



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE USLE Y GAVRILOVIĆ EN LA
DETERMINACIÓN DE LA PERDIDA DE SUELO Y SU INFLUENCIA EN EL APORTE
DE SEDIMENTOS POR EROSIÓN HÍDRICA LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN EN
LOS AÑOS 1995 AL 2013

Línea de investigación:

Desarrollo urbano-rural, catastro, prevención de riesgos, hidráulica y geotecnia

Tesis Para Optar Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

Autor:

Fasabi Ferrer, Freddy Ruben

Asesor:

Rosales Vidal, José Luis
(ORCID: 0000-0002-1692-3024)

Jurado:

Aylas Humareda, María Del Carmen
Martínez Cabrera, Rubén
Valdivia Orihuela, Braulio Armando

Lima - Perú
2022

DEDICATORIA:

“Esta tesis está dedicada a:

A mis padres Armando y Teresa quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades porque Dios está conmigo siempre.

Mis hermanas Angela y Tania por su cariño y apoyo incondicional. Finalmente quiero dedicar esta tesis a mis sobrinos Marianna y Mathias, por brindarme todo su amor y cariño.”

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, su amor y bondad que no me desampara en ningún monto, siempre brindándome la fortaleza divina para seguir en la senda del camino correcto. Esta tesis ha sido una gran bendición en todo sentido y te lo agradezco, y no cesan mis ganas de decir que es gracias a ti que esta meta está cumplida.

A mis amados padres Armando y Teresa por haberme forjado como la persona que soy actualmente, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye este. Gracias a su apoyo incondicional durante todos estos años y por ser mi fortaleza y mis guías en cada momento de mi vida.

A mis hermanas Angela y Tania por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias por extender su mano en momentos difíciles y por el amor brindado cada día, de verdad mil gracias hermanitas, siempre las llevo en mi corazón. a toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Gracias, a mi asesor tesis el Ing. José Luis Rosales Vidal, por haberme guiado en este trabajo de investigación, en base a su experiencia y sabiduría ha sabido direccionar mis conocimientos y poder culminar satisfactoriamente la tesis.

A mis docentes informantes y jurados por haberme brindado su tiempo y paciencia para la culminación de la tesis.

Un agradecimiento especial a la Ing. Geógrafa Elena Pérez, por brindarme todo el soporte técnico, metodológico y todo su conocimiento en erosión de suelos, a mi amigo el Ing. Frank Loroña por brindarte todo su apoyo desde el inicio hasta el final de la tesis, como también a mi amigo el Ing. Jorge Zúñiga por apoyarme y no rendirme en la investigación de la tesis, al gran maestro el Eco. Cristian Zegarra por fomentar sus consejos en lo personal y profesional así poder culminar satisfactoriamente la tesis.

INDICE

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
I. INTRODUCCIÓN	10
1.1 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	12
1.1.1 <i>Descripción del Problema</i>	12
1.1.2 <i>Formulación del Problema</i>	15
1.1.2.1 <i>Problema general</i>	15
1.1.2.2 <i>Problemas Específicos</i>	15
1.2 ANTECEDENTES.....	15
1.2.1 <i>Antecedentes internacionales</i>	16
1.2.2 <i>Antecedentes Nacionales</i>	18
1.3 OBJETIVOS.....	27
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	27
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	28
1.4 JUSTIFICACIÓN	28
1.5 HIPÓTESIS.....	30
II. MARCO TEÓRICO	31
2.1 EL SUELO.....	31
2.2 FORMACIÓN DEL SUELO.....	31
2.3 FACTORES INVOLUCRADOS EN LA FORMACIÓN DEL SUELO	31
2.1.1 <i>Material parental o roca madre</i>	31
2.1.2 <i>El clima</i>	32

2.1.3	<i>Organismos</i>	32
2.1.4	<i>Relieve</i>	33
2.1.5	<i>El tiempo</i>	33
2.4	EROSIÓN DE SUELOS	34
2.4.1	<i>Erosión hídrica</i>	34
2.4.2	<i>Tipos de erosión hídrica</i>	36
2.5	MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA	38
2.5.1	<i>Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE)</i>	38
2.5.2	<i>Factores de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE)</i>	39
2.5.3	<i>Tasa de erosión en cm/año mm/año</i>	58
2.5.4	<i>Modelo Gavrilović o modelo Potencial de Erosión de Suelos (EPM)</i>	58
2.6	LÍMITE DE TOLERANCIA DE PÉRDIDA DE SUELO	64
2.7	ANÁLISIS PARA LA ESTIMACIÓN DE SEDIMENTOS	66
2.8	PRÁCTICAS CONSERVACIONISTAS DE SUELOS	69
2.8.1	<i>Agricultura sostenible en laderas</i>	69
2.8.2	<i>Prácticas Mecánico - Estructurales</i>	70
2.8.3	<i>Prácticas Agronómicas</i>	74
III.	MÉTODO	75
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	75
a)	<i>Tipo. – Transeccional, o también conocido transversales.</i>	75
b)	<i>Diseño. - El diseño de la investigación es no experimental.</i>	75
c)	<i>Niveles de investigación</i>	75
3.2	ÁMBITO TEMPORAL Y ESPACIAL.....	76
3.2.1	<i>Ámbito Geográfico y Político</i>	76
3.2.2	<i>Ámbito Administrativo de los recursos hídricos</i>	76
3.3	VARIABLES.....	79

3.3.1	<i>Variable independiente</i>	79
3.3.2	<i>Variables Dependientes</i>	80
3.4	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	81
3.5	INSTRUMENTOS.....	82
3.5.1	<i>Información Cartográfica</i>	82
3.5.2	<i>Datos meteorológicos y climatológicos</i>	82
3.5.3	<i>Equipos</i>	82
3.5.4	<i>Software</i>	83
3.6	PROCEDIMIENTOS.....	83
3.6.1	<i>Etapa de Gabinete I: recopilación de datos e información</i>	83
3.6.2	<i>Etapa de Gabinete II: Revisión bibliográfica</i>	106
3.6.3	<i>Etapa de Gabinete III:</i>	113
3.7	ANÁLISIS DE DATOS.....	115
3.8	CONSIDERACIONES ÉTICAS.....	116
IV.	RESULTADOS	117
4.1.	EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS USLE Y GAVRILOVIĆ EN LA DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA ANUAL DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA Y SU INFLUENCIA EN EL APORTE DE SEDIMENTOS.....	117
4.1.1.	<i>Estimación de la erosión hídrica aplicando la ecuación universal de pérdida de suelos – USLE</i> 117	
4.1.2.	<i>Estimación de la tasa sedimentos por erosión superficial en la cuenca mediante la ecuación de Gavrilović</i> 122	
4.1.3.	<i>Diferencias de ambos métodos empleados para determinar la pérdida de suelo</i>	125
4.1.4.	<i>Limitaciones</i>	128
4.2.	ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE PERDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA SEGÚN LOS MÉTODOS DE USLE Y GAVRILOVIĆ UTILIZANDO HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS ESPACIAL, EN LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN.	129
4.2.1.	<i>Elaboración del mapa base</i>	129

4.2.2.	<i>Estimación de la Erosión Hídrica mediante la ecuación USLE</i>	129
4.2.3.	<i>Estimación de la Erosión Hídrica y la descarga media anual de material erosionado mediante la ecuación de Gavrilović</i>	145
4.3.	ESTIMACIÓN EL APORTE DEL VOLUMEN DE SEDIMENTOS SUPERFICIAL AL CAUCE PRINCIPAL A PARTIR DEL CÁLCULO DE PERDIDA DE SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN.	153
4.3.1.	<i>Producción neta de sedimentos USLE</i>	153
4.3.2.	<i>Cálculo del coeficiente de retención de sedimentos (R) Gavrilović</i>	154
4.4.	DETERMINACIÓN LA DIFERENCIA DE LOS RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE USLE Y GAVRILOVIĆ, EN LA DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE SUELOS POR EROSIÓN HÍDRICA Y SU INFLUENCIA EN EL APORTE DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO MASHCÓN.	155
4.5.	PROPUESTA DE CONSERVACIÓN DE SUELOS.....	156
4.5.1.	<i>Control de la erosión</i>	156
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	162
VI.	CONCLUSIONES	167
VII.	RECOMENDACIONES	169
VIII.	REFERENCIAS	171
IX.	ANEXOS	180
	ANEXO N° A – MAPAS DEL ÁMBITO GEOGRÁFICO Y POLÍTICO.....	181
	ANEXO N° B – FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA (R)	183
	ANEXO N° C – CÁLCULO DEL FACTOR K (ERODABILIDAD DEL SUELO EN T/MJ/MM)	190
	ANEXO N° D – CÁLCULO DEL FACTOR LS (LONGITUD Y GRADO DE LA PENDIENTE).....	191
	ANEXO N° E – PRODUCCIÓN NETA DE SEDIMENTOS.....	194
	ANEXO N° F – ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA MEDIANTE GAVRILOVIĆ.....	195
	ANEXO N° G – PRESUPUESTO.....	198
	ANEXO N° H – MATRIZ DE CONSISTENCIA	1

RESUMEN

La cuenca del río Mashcón a grandes rasgos se encuentra, según la Autoridad Nacional del Agua, en la Región hidrográfica Atlántico 10 como parte de la cuenca mayor del río Crisnejas, área en la que los procesos de erosión alcanzan un promedio multianual 101.7 t/ha/año (Autoridad Nacional del Agua ANA, 2010), valor que califica con grado de erosión alta. Debido a la escala del estudio mencionado y a que sobre la cuenca no se encuentra ningún documento sobre el tema en específico se decidió realizar un análisis de erosión más detallado y local a través de la utilización de métodos empíricos para la estimación de la tasa media anual de erosión con base en la caracterización climática, de suelos, cobertura vegetal y factores topográficos del área de estudio. Las ecuaciones utilizadas son la USLE y el modelo de Gavrilović mediante el uso de herramientas SIG para el cálculo y la identificación de las zonas de erosión. Por otro lado, tomando en consideración la importancia de conocer la producción de sedimentos que llegan a los cauces ya que estos afectan la calidad y colmatación de los cuerpos de agua generando problemas ambientales, en este trabajo se calcularon las proporciones de entrega de sedimentos al cauce principal de la cuenca mediante coeficiente de aporte de sedimentos (SDR) aplicado al resultado de la USLE y el coeficiente de retención de sedimentos (R) aplicados a los resultados del método Gavrilović teniendo como resultados un aporte de 7.87 t/ha/año y 5.05 t/ha/año respectivamente.

Palabras Clave: Erosión hídrica, USLE, Gavrilović, erogación de sedimentos

ABSTRACT

The Mashcón river basin is located, according to the National Water Authority, in the Atlantic 10 hydrographic region as part of the larger Crisnejas river basin, an area in which erosion processes reach a multiannual average of 101.7 t/ha/year (National Water Authority ANA, 2010), a value that qualifies as high erosion. Due to the scale of the aforementioned study and the fact that there is no document on this specific topic in the basin, it was decided to carry out a more detailed and local erosion analysis using empirical methods to estimate the average annual erosion rate based on the climatic and soil characterization, vegetation cover and topographic factors of the study area. The equations used are the USLE and Gavrilović's model through the use of GIS tools for the calculation and identification of erosion zones. On the other hand, taking into consideration the importance of knowing the production of sediments that reach the channels since these affect the quality and clogging of water bodies generating environmental problems, in this work the proportions of sediment delivery to the main channel of the basin were calculated using sediment contribution coefficient (SDR) applied to the result of the USLE and the sediment retention coefficient (R) applied to the results of the Gavrilović method having as results a contribution of 7.87 t/ha/yr and 5.05 t/ha/yr respectively.

Key words: Water erosion, USLE, Gavrilović, sediment delivery.

I. INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo como un proceso de desgaste del mismo por factores naturales o la acción humana constituye en sí misma un problema de degradación del recurso con repercusión tanto en lo ecológico como en lo económico ya que implica, por una parte, la alteración de las condiciones favorables para el equilibrio de los ecosistemas presentes y por la otra, la pérdida de su fertilidad y la consecuente disminución del rendimiento en la producción de cultivos.

Un tipo de erosión muy común y de gran importancia en las zonas de alta precipitación es la erosión hídrica ya que mediante la acción del agua se desprenden y transportan millones de sedimentos y nutrientes fuera de las áreas de origen, pérdidas que deben ser reemplazadas por técnicas de recuperación de suelos.

Ante el panorama antes descrito y desde la perspectiva del desarrollo sostenible del territorio se impone la necesidad de la formulación e implementación de planes que incluyan técnicas de conservación de suelos y control de la erosión con base en datos e información de mediciones directas o indirectas a través de métodos de estimación de erosión. En cuanto a la estimación de la erosión para fines de investigación se han planteado un gran número de modelos matemáticos, en su mayoría desarrollados a partir de muchas mediciones de erosión en campo, que permiten estimar la erosión a través de ecuaciones las cuales tienen mayor o menor aceptación y difusión a nivel mundial.

En tal sentido, el presente trabajo tiene la finalidad de realizar una comparación de las metodologías adecuadas para la obtención de información de pérdida de suelos mediante erosión

hídrica y teniendo como objetivo principal: “Evaluar la diferencia de los resultados de la aplicación de los métodos USLE y Gavrilović en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón del departamento y provincia de Cajamarca.”

Se propone la estimación de la pérdida media de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Mashcón, usando dos métodos de estimación de la erosión, en primer lugar la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), de amplio uso a nivel mundial y con resultados favorables y, a manera de contraste, el método Gavrilović (1976), también de exitosa aplicación en cuencas de ríos de montaña, con resultados validados a través de mediciones de caudales sólidos en suspensión y comparación de batimetrías de embalses en cuencas andinas y que además tiene la ventaja de que en su ecuación incluye el valor de erogación de entrega de sedimentos al cauce principal.

La estimación del volumen de pérdida de suelo por erosión hídrica, aplicando según los métodos de USLE y Gavrilović para este trabajo de investigación, se realizó utilizando herramientas de análisis espacial, en la cuenca del río Mashcón.

Para la estimación de aporte del volumen de sedimentos transportados y aportados al cauce principal de la cuenca de río Mashcón, se realizó aplicando coeficiente de aporte de sedimentos (Sediment Delivery Ratio, SDR).

También realizaremos la determinación de los resultados de la aplicación de los métodos de USLE y Gavrilović, en la determinación del volumen de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón. Esto nos ayudara a comparar si los resultados tienen gran variación o están cercano, como también que resultado se acerca a otras investigaciones en perdida de suelo.

Finalmente, se plantean soluciones al problema de erosión hídrica y alternativas de control de esta con enfoque en la reforestación, siembra de pasto, árboles, arbustos y otros tipos de vegetación para proteger la capa superior del suelo, especialmente las zonas desnudadas.

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del Problema

Teniendo en cuenta internacionalmente, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO, 2016) el 33 % de los suelos del mundo se encuentran con niveles de moderado a altamente degradados debido a la erosión del suelo, siendo esta una de las mayores amenazas para el suelo. En el mismo informe se concluye que dadas las condiciones actuales el estado de los suelos se agravará cada vez más a menos se tomen acciones concertadas y acertadas hacia la gestión sostenible del suelo.

Según la FAO, en el Perú la tierra cultivable es escasa: aproximadamente, 4.4 millones de hectáreas en cultivos anuales y perennes que representa solamente el 3.5% del territorio, por lo tanto, la degradación de los suelos existentes representa un serio problema que amenaza un recurso natural muy escaso.

Según el Ministerio de Agricultura y Riego del Perú (MIDAGRI, 2014) la erosión del suelo es uno de los problemas que más afecta a los suelos de la región alto andina del país, presentando problemas a nivel ecológico y económico. La consecuente reducción de la productividad de los suelos tiene un alto impacto en el desarrollo económico y social de estas zonas.

La erosión del suelo una forma de degradación del recurso suelo que implica el deterioro ecológico y la pérdida de la capacidad productiva en las zonas donde se produce.

Particularmente, la erosión hídrica es el proceso erosivo más agresivo y de mayor impacto ya que, por lo general, grandes volúmenes de suelo se pierden definitivamente al ser transportado en suspensión por los cauces de la cuenca hacia otros lugares fuera de esta. Dada la importancia que tiene en el manejo integral de una cuenca la conservación de suelos, consideramos que el control de la erosión mediante acciones concretas implica necesariamente el estudio de la erosión aplicando metodologías probadas, adecuadas y con resultados aceptados. De la amplia revisión bibliográfica y documental realizada nos ha llamado la atención que para el estudio de la pérdida anual de suelo en una cuenca, la metodología más aplicada y conocida es la Ecuación Universal de Perdida de Suelos (USLE) la cual tiene una serie de limitaciones como por ejemplo, la disponibilidad de datos hidrológicos a nivel diario y en un período de tiempo representativo, por lo que nos planteamos la interrogante, ¿qué otro método puede acercarse como alternativa a la más aplicada en la determinación de pérdida de suelos? – En respuesta encontramos el método de Gavrilović.

En la siguiente investigación se plantea comparar los resultados de USLE y el modelo empírico denominado Modelo Potencial de Erosión de suelos (EPM) o Método Gavrilović, metodología inicialmente de mayor difusión en Europa y de efectiva aplicación en cuencas de montaña. Teniendo dos metodologías en la determinación de pérdida de suelo, podemos comparar los resultados respectivos y adicionalmente como contribución a la investigación determinar cuál es su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón del departamento y provincia de Cajamarca.

El espacio geográfico escogido es la cuenca del río Mashcón, hidrográficamente perteneciente a la cuenca del río Marañón de la vertiente del atlántico y políticamente pertenece

al departamento y provincia de Cajamarca y se encuentra dentro de los distritos de Cajamarca y Baños del Inca.

Según el “Plan de Gestión de los Recursos Hídricos en las Cuencas de Mashcón y Chonta” cuyo informe final fue publicado en marzo del 2010, Aproximadamente el 69.32% del área (50,558.72 ha) presentan erosión de moderada a severa, aproximadamente el 58% del área, presentan limitaciones por suelos de mala calidad, erosión y clima para las explotaciones propias del lugar, el 16% (10,600 ha) presentan limitaciones climáticas y aproximadamente el 13% (8,550 ha) presentan limitaciones de suelo y clima.

Desde el enfoque de la ordenación del territorio, como instrumento para la gestión adecuada del uso de los recursos naturales, el avance hacia un desarrollo humano sostenible, es de gran importancia identificar las zonas vulnerables y conocer el grado de erosión para poder planificar y ejecutar proyectos sostenibles en la cuenca (Morera, 2009).

Por otro lado, la estimación de la producción de sedimentos es de gran importancia ya que el desconocimiento de dichos valores podría llevar a la sobreestimación de sedimentos lo que significa un costo innecesario en la ejecución de obras e infraestructura hidráulicas y civiles. Por el contrario, la subestimación del fenómeno podría implicar el aumento de la vulnerabilidad ante riesgos de inundaciones, deslizamientos y flujos de lodo tanto de infraestructuras existentes como de la población en general.

Es por ello que se requiere de métodos confiables que permitan predecir la erosión del suelo y el aporte de sedimentos en función de la formulación de propuestas de conservación del suelo.

1.1.2 Formulación del Problema

1.1.2.1 Problema general

Para tratar de dar respuesta al problema planteado se formula la siguiente pregunta:

- ¿Cuál es la evaluación de los métodos de USLE y Gavrilović para la determinación de la pérdida de suelo y su influencia en el aporte de sedimentos por erosión hídrica en la cuenca del río Mashcón en los años 1995 al 2013?

1.1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Cuál es el volumen de pérdida de suelo por erosión hídrica según los métodos de USLE y Gavrilović utilizando herramientas de análisis espacial, en la cuenca del río Mashcón?
- ¿Cuál es el aporte del volumen de sedimentos superficial al cauce principal a partir del cálculo de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Mashcón?
- ¿Cuál es la diferencia de los resultados de la aplicación de los métodos de USLE y Gavrilović, en la determinación del volumen de suelos por erosión hídrica y aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón?

1.2 Antecedentes

Como se afirma en la viabilidad de la investigación, no se han desarrollado trabajos sobre este tema específico, sino que se han desarrollado trabajos de vinculación, que incluyen los siguientes:

1.2.1 Antecedentes internacionales

Morales (2016), en su tesis de grado “Estimación de la Cantidad de Azolves producida en una Cuenca Hidrográfica empleando ArcGis 10.2. Caso de Estudio: Cuenca El Naranjo.” Ubicada en la provincia Sancti Spiritus en el municipio la Sierpeenfocada, Cuba.

Cuyo objetivo principal es cuantificar la de posición de sedimentos en determinadas zonas de una cuenca hidrográfica para lo cual se plantea posibles métodos para estimar cuantitativamente el volumen de sedimentos que definirá el nivel muerto del embalse que se pretende construir en está utilizando el software profesional ArcGis10.2.2, proponiendo una metodología con el empleo de este software para obtener parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica y de su sistema fluvial y la generación de información técnica para su empleo en la estimación del volumen de sedimentos en una cuenca hidrográfica. En este sentido, el estudio obtuvo como resultados la producción de sedimentos media anual de 62.538 t/ha/año según el método Gavrilović y de 18.536 t/ha/año según la metodología de la USLE y, finalmente, el resultado para el coeficiente de retención R fue de 0.12. El autor concluye que con el uso de las herramientas GIS como por ejemplo el ArcGis 10.2, pueden cuantificarse los sedimentos de una cuenca hidrográfica con escasos datos hidrológicos, mediante el empleo de los módulos Spatial Analyst / Hydrology a partir de un modelo de elevación del terreno, para obtener parámetros morfométricos de una cuenca y de su sistema fluvial.

Ríos (2018), en su tesis para optar al grado de maestría en recursos Hidráulicos “Erosión Hídrica y Evolución del Relieve en las Cuencas de los Ríos Grande y San Andrés, Antioquia – Colombia”.

Plantea para estimar las potenciales tasas medias anuales de pérdida de suelo a escala de cuenca empleado los modelos empíricos RUSLE - Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada y EPM – Método de Erosión Potencial (Gavrilović, 1988). , además, se analizó la variación de los resultados en función de los datos de entrada en múltiples escalas espaciales, hallando una importante dependencia del factor de erosividad de la lluvia R a la resolución temporal del registro de precipitación usado para su estimación y una marcada dependencia y efectos de escala en el factor topográfico LS (longitud e inclinación de la ladera) del modelo empírico RUSLE y sus posteriores estimaciones medias de pérdida de suelo anual.

Aplicando el modelo empírico RUSLE (Renard et al., 1997) se obtuvo una producción potencial de sedimentos o erosión bruta media anual (A) de 942.88 Ton/ha-año que es consistente con el reporte de erosión de Jansen Luis, Pierre Y. Julien, Lariyah M. Sidek y Soo Huey Teh presentado en Eslamian (2014) para las cuencas de montaña tropicales tributarias al embalse de Ringlet en Malasia donde se estimó que los valores superan las 100 Ton/ha-año o 10,000 Ton/km² -año. Resalta la evidencia de que existe una importante dependencia de los resultados del modelo RUSLE a la resolución temporal de la información de lluvia a partir de la cual se estime el factor de erosividad R. Por otro lado, las relaciones de entrega de sedimento calculado se obtiene un suministro medio de sedimento fino anual de sedimento de 14.14 Ton/ha-año, valor comparable con las tasas representativas de erosión reportadas por Morris y Fan (1998) para diferentes usos del suelo en zonas templadas y con las simulaciones de Unal (2014), en la cual para las cuencas abastecedoras al sitio de presa se obtuvo un valor medio anual cercano a 7.99 Ton/ha.

Con la aplicación del modelo empírico EPM (Gavrilović, 1962; 1970, 1972), es posible apreciar que al mejorar la resolución espacial de la información cartográfica los valores estimados de erosión media anual (m^3/km^2) presentan un aumento, situación similar a la encontrada con la aplicación del modelo RUSLE. Por último, para la escala 1:100,000 se obtiene un valor de 14.75 Ton/ha-año, consistente con lo reportado por CIAT (2012) en la zona. Para la escala 1:25,000 se obtiene un valor de 15.41 Ton/ha-año, situación que exhibe el mismo comportamiento identificado al simular con el modelo RUSLE cuando se mejora la escala cartográfica.

Al comparar ambos métodos el autor sostiene que la tendencia general al aumento en los valores estimados (dos veces más severos) en la cuenca del río San Andrés que en la del río Grande, resultados consistentes con los procesos erosivos identificados en dicha cuenca. Es interesante anotar que los valores estimados por el modelo RUSLE son muy superiores a los estimados por el modelo EPM.

1.2.2 Antecedentes Nacionales

Autoridad Nacional del Agua (2010) en su documento “Plan de Gestión de los Recursos Hídricos en las Cuencas Mashcón y Chonta con Énfasis en el Afianzamiento Hídrico de las Subcuencas Azufre, Paccha y Río Grande de Chonta, Cajamarca, Perú”.

Se formula como la base para la definición de las acciones y medidas de orden técnico, económico y legal para la gestión integrada y sostenible del recurso hídrico en las cuencas de intervención. El estudio trata de identificar los problemas relevantes que afectan a las cuencas mediante la evaluación de los aspectos técnicos, económicos, ambientales, sociales y legales relacionados a la gestión del agua.

En el estudio se analiza el impacto de las operaciones mineras en la cantidad de erosión y transporte de sedimentos del sitio de la mina hacia cuencas adyacentes y señala que los surcamientos y cárcavas originadas por erosiones hidrodinámicas tipo laminar y/o lineal son las geofomas más frecuentes en el área de estudio. Según el estudio, las actividades humanas insostenibles en muchos de los casos, una alta deforestación y escasa cobertura en las laderas, cultivos con tecnologías inadecuadas para el tipo de suelos (cultivos en limpio como trigo, papa, maíz, ollucos, ocas, entre otros) y grandes movimientos de suelos contribuyen a que la erosión sea potencialmente alta en la cuenca, lo que podría ocasionar alteración de la capacidad de uso de suelo y posible contaminación del suelo.

Mercado (2014), en su tesis para optar al título de Ing. Civil “Estimación y Comparación de Métodos Teóricos con Modelos Matemáticos en la Producción de Sedimentos. Aplicación a la Cuenca del Río Allahualla”.

En cuyo estudio se plantea una comparación en la producción de Sedimentos de la Cuenca del río Allahualla (distrito de Yauri, provincia de Espinar, región Cusco) para un evento tormenta de lluvia de 42.3 mm. estimado utilizando diferentes modelos matemáticos determinísticos (Sed Cad 4 y Kineros 2) y metodologías teóricas (Gavrilović y USLE).

Los resultados obtenidos de la Producción de Sedimentos en la cuenca Allahualla alcanzan con las simulaciones: a 7,900 t con el modelo Sed cad y 29,760 t con el modelo Kineros. Con el método teórico del Gavrilović se obtiene 34,480 y con el método teórico USLE se obtiene 17,686. Se observa que los métodos Gavrilović y Kineros 2 muestran cierta similitud en la estimación de sedimentos, por lo que se podría considerar como

resultados aceptables para el informe. Considerando la metodología teórica de Gavrilović se estima 34,480 t y mediante la metodología USLE se llega a estimar un aporte de sedimento de 17,686 t para un evento de tormenta de 43.2 mm.

Rosas (2016), con la presentación de su tesis para optar al grado de magister en Ingeniería Civil “Cuantificación de la Erosión Hídrica en el Perú y los Costos Ambientales”.

Se plantea la gran problemática que representa la erosión a nivel mundial y las dificultades en la su cuantificación, particularmente en los países en desarrollo por la falta de información actualizada como es el caso de Perú. El objetivo de este estudio propone un método basado en RUSLE para estimar las tasas de erosión del suelo en escala de país para los países en desarrollo, que comúnmente exhiben limitaciones temporales y espaciales en las mediciones en tierra de los parámetros fundamentales que describen dicho modelo. El método propuesto utiliza principalmente conjuntos de datos disponibles públicamente actualizados. Igualmente, profundiza en el pre procesamiento de dichos datos, se centra en el factor R y C del modelo RUSLE porque son parámetros críticos en los países en desarrollo, y sugiere el uso de la tasa de entrega de sedimentos (SDR) como un parámetro para validar el modelo RUSLE. Se explica el método a través de una aplicación directa al Perú, y posteriormente se obtienen mapas de tasas de erosión a una resolución de 5 km. Nuestros resultados muestran que Perú enfrenta un constante aumento de las tasas de erosión del suelo (19 millones ton/año para 1990, 26 millones ton/año para 2000, y 41 millones ton/año para 2010) que son inducidos principalmente por cambios en el uso del suelo. Se espera que se mantenga esa tendencia porque sigue

aumentando su cartera de infraestructura y las áreas dedicadas a concesiones para la industria extractiva, y el rápido crecimiento de la población urbana.

Cabrejos (2016), en su tesis para optar al grado de Ing. Agrícola “Modelamiento Geoespacial en la Determinación del Riesgo, Vulnerabilidad y de la Cuantificación de la Erosión Hídrica en la Micro Cuenca del río Atuen - Amazonas”.

Realizada principalmente para conocer los problemas erosivos de la micro cuenca. El trabajo se realizó mediante un modelo geoespacial, con la utilización de las bondades del SIG (Sistema de Información Geográfica), para la identificación de zonas erosionadas y/o vulnerables, según el grado de intensidad dentro del ámbito de estudio; luego se cuantifico utilizando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE, por sus siglas en inglés, Universal Soil Loss Equation), (Wischmeier y Smith 1978), Finalmente se propusieron posibles alternativas de protección y/o conservación para las zonas afectadas por la erosión hídrica. El estudio consistió en la recopilación de información, tanto digital como física, se requirió de información temática como cobertura vegetal, suelos, precipitaciones, fisiografía, geología, pendiente clasificada e información socioeconómica, para lo cual se realizó un trabajo de campo en la zona de estudio para obtener información sobre necesidades básicas insatisfechas, actividades económicas que se realizan y un reconocimiento in-situ de la zona. Con la información obtenida y con la ayuda del SIG, en primer lugar se realizó el procesamiento digital de imágenes satelitales y el modelamiento geoespacial consistiendo en la interrelación de la parte física, biótica y social, otorgándole una calificación y ponderación a cada unidad de las variables según el grado de incidencia que presenten para el estudio; en segundo lugar, se procedió a la

realización del modelo cuantificado, con cada una de las variables involucradas al modelo de la ecuación USLE. Culminando el procedimiento; se pudo observar, que las zonas que presentan mayores incidencias erosivas son las que se encuentran en las zonas más altas del territorio y en las riberas de los ríos; las cuales, a su vez, presentan bajos niveles socioeconómicos.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (2017), con la elaboración del Atlas de Erosión de Suelos por Regiones Hidrológicas del Perú el SENAMHI.

Se propuso aportar información relevante sobre el conocimiento de la evolución de las tasas de erosión en el Perú para una cronología de 30 años mediante la aplicación de técnicas de procesamiento y análisis de datos de sensores remotos y la metodología de RUSLE como modelo matemático para la estimación de la tasa de erosión hídrica. El Atlas de Erosión de Suelos por Regiones Hidrológicas del Perú muestra una serie cronológica de mapas de erosión, y para este caso, una secuencia de mapas anuales desde 1981 hasta el 2014, siendo la base geoespacial multitemporal PISCO (Peruvian Interpolation data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations), y en particular el producto de precipitación mensual la variable de mayor peso en la elaboración de estos mapas.

Zúñiga (2017), en su tesis para optar al grado de Mg. Sc. “Determinación de la Pérdida de Suelos en la Cuenca Aportante del Embalse Aguada -Blanca-Arequipa, Aplicando USLE y Técnicas Geoespaciales”.

Cuyo objetivo principal fue determinar la pérdida de suelo, en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca aplicando el método USLE y técnicas geoespaciales; estableciendo los diferentes niveles de erosión bajo dos modelos, el primero denominado MC78, debidamente calibrado y basado en el método USLE y NDVI de imagen satelital 2014 y el segundo modelo denominado MC80 basado en USLE e imágenes Landsat del 2001. Con métodos afines se determinó el mapa del modelo retrospectivo, con la erosión de la cuenca aportante y su relación con la sedimentación del embalse bajo tres fases; el primero concerniente al mapa de erosión ocurridas entre el 2002 al 2006, el segundo alusivo a la erosión 2006 - 2010 y el tercero del 2010 – 2015; de manera similar se formuló el modelo prospectivo, con actividades de conservación. Los resultados muestran los coeficientes consistentes del factor de: lluvia R, erodabilidad K y cobertura vegetal C (calibrados con $r^2 > 80$ por ciento). El modelo MC80 expresó una tasa promedio anual de 128.96 t/ha/año, mientras que el modelo MC78 una tasa promedio de 145.50 t/ha/año; mostrando una cuenca erosiva con tendencia a la desertificación, que está por encima del patrón de erosión recomendada por ICONA (1991) de 12.5 t/ha/año y la FAO 11.2 t/ha/año.

Nayaka Barzola (2018) en su tesis de grado “Estimación de la pérdida de suelo media anual mediante en el modelo R.U.S.L.E., en la cuenca del río Tingo - Cajamarca”.

Enfocada en determinar la vulnerabilidad a la erosión hídrica de la cuenca. El trabajo se realizó mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Perdida de Suelos Revisada (RUSLE, por sus siglas en inglés, Revised Universal Soil Loss Equation) y aplicando un modelo geoespacial con el empleo de las herramientas SIG (Sistema de Información

Geográfica), mediante la cual se identificó las zonas vulnerables a la erosión hídrica según la clasificación de la FAO. Como resultado del trabajo realizado se obtuvo un mapa temático que presenta la distribución espacial de la vulnerabilidad a la erosión hídrica, en las cuales se presenta una mayor pérdida de suelos en las zonas con alta pendiente y con escasa cobertura vegetal, estando la erosión hídrica más influenciada por la pendiente y cobertura vegetal, que por la precipitación en sí. En cuanto a la cuantificación de la pérdida de suelos media anual y su clasificación de acuerdo al sistema de la F.A.O. Se identificó un área de 2,502.52 hectáreas (20.44 %) con pérdidas de suelo media anual menor a 10 t/ha/año, la cual corresponde a la clasificación de ligera a nula, se tiene un área de 5,734.01 hectáreas (46.84 %) que presenta pérdida de suelo media anual moderada, la cual representa casi la mitad del territorio, en esta clasificación los valores de pérdida de suelo corresponden entre 10 a 50 t/ha/año, la superficie con riesgo alto a la erosión hídrica tiene una extensión de 3,581.58 hectáreas (29.25 %) y de riesgo muy alto a la erosión hídrica abarca una superficie de 424.83 hectáreas (3.47 %).

Quispe (2018), en su tesis para optar al grado de maestría en Ciencias Ambientales “Influencia de la Cobertura Vegetal en la Erosión Hídrica del Suelo en la Comunidad de San Mateo, Perú”.

Tiene como objetivo del estudio evaluar los niveles de pérdida de masa de suelo por la erosión hídrica. El trabajo se realizó en una ladera de la comunidad de San Mateo, Lima, con una altitud de 3320 m.s.n.m., desde setiembre del 2015 a agosto del 2016., con cuatro tratamientos, en cuatro bloques, con 16 varillas por parcela, que sirvieron de indicador de pérdida de masa de suelo, midiéndose la erosión laminar sobre las varillas, en un área

total de 129,96 m². El tipo de estudio fue experimental, longitudinal, prospectivo, utilizando el diseño completamente al azar y la prueba de Tukey al nivel de confianza de 95 por ciento para determinar las diferencias entre los tratamientos. Los resultados indican que las parcelas con cobertura vegetal nativa (*Festuca amethystina* L.) produjeron una menor pérdida de suelo, 10,901 t/ha-año, en comparación a las pérdidas de suelo de las parcelas con mulch, 17,18 t/ha-año; las parcelas con cobertura natural, 28,651 t/ha-año; y, las parcelas con suelo desnudo, 44,85 t/ha-año, esta última cifra es once veces mayor a la tasa considerada máxima permisible por la FAO (4 t/ha-año, para suelos de escasa profundidad). La cobertura vegetal, actuó como un eficiente protector del suelo, disminuyendo considerablemente la erosión hídrica.

Álvarez (2019), en su tesis para optar al grado de maestro en Ciencias de Ingeniería “Análisis Temporal del Nivel de la erosión Hídrica de la Sub Cuenca del Río Ichu 2013 y 2017”. Cuyo objetivo general fue estimar el nivel de erosión hídrica de la Subcuenca del río Ichu 2013 y 2017; como objetivos específicos, a) cuantificar la erosividad de la lluvia de la subcuenca del río Ichu para los años 2013 y 2017, b) estimar la erodabilidad del suelo de la subcuenca del río Ichu, c) determinar la longitud y pendiente de la subcuenca del río Ichu y d) determinar los cambios de la erosión hídrica producto de la cobertura vegetal para el año 2013 y 2017. Se utilizó como métodos generales el análisis y la síntesis de la metodología de Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y el análisis espacial con herramientas de sistemas de información geográfica (SIG). La tasa de erosión hídrica promedio más alta que se dio en el año 2013 fue de 406.98 ton/ha/año con un área de 18.1 ha correspondiente a 0.013 % de la superficie total, la mínima fue de 0.46 del nivel de

erosión de la superficie de la subcuenca del río Ichu y la erosión hídrica promedio más alta se dio para el 2017 con 554.36 ton/ha/año con un área de 25 ha correspondiente a 0.018 % de la superficie total, la mínima fue de 0.39 ton/ha/año del nivel de erosión de la subcuenca del río Ichu. Con estos resultados se concluye que hubo una variación extremada del 2013 al 2017 por dos factores muy importantes la cobertura vegetal y la precipitación pluvial.

Quiñonez (2019) en su tesis para optar al título profesional de Ingeniero Ciencias de Ingeniería “Estimación de la Erosión Hídrica Potencial en la Cuenca Media y Alta del Río Rímac, Aplicación del Modelo Rusle”.

Plantea que debido a los limitados estudios y datos disponibles del fenómeno de la erosión hídrica en el Perú se genera la necesidad de aplicar un modelo de base física para la estimación de este parámetro con posteriores aplicaciones de gran utilidad como la sedimentación en reservorios, manejo de agua de contacto (Minería) y Calidad de agua. Resalta la importancia del desarrollo actual de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como herramienta potente en la aplicación de los métodos y análisis para la evaluación de datos espaciales y con ello se hace posible la aplicación de métodos tales como la Revised Universal Soil Loss Equation - RUSLE (Renard et al., 1997), o Revised Universal Soil Loss Equation Modified - MUSLE (Williams 1975). El objetivo de este trabajo de investigación es la de aplicar la metodología RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos o EUPS) para estimar la tasa de sedimento producido por erosión hídrica a nivel anual en el área de estudio, así como la variación geoespacial del potencial erosivo.

Los resultados de erosión hídrica potencial muestran la distribución de la producción de sedimentos a lo largo de la cuenca en el año 2015, que toma valores mínimos como 0 ton/ha/año, pertenecientes a superficies de suelo rocoso, cuerpos de agua, bofedales, glaciares permanentes y demás superficies difícilmente erosionables típicas en nuestra zona de estudio, así como también una tasa de erosión máxima de 523 ton/ha/año, típicos de suelos altamente susceptibles a este fenómeno. Como resultado de la erosión laminar modelada en la cuenca media y alta del río Rímac podemos observar que: 115299.72ha presentan erosión laminar por debajo de las 10 ton/ha/año, clasificada como erosión incipiente las cuales representa el 94.4% del área total de la cuenca en estudio; 5254.83ha presentan erosión en un rango de 10 a 50ton/ha/año clasificada como erosión ligera y que representan el 4.3% del área total de la cuenca en cuestión; así mismo 1535.13ha presentan erosión intensa o fuerte en un rango de 50 a 200ton/ha/año que es el 1.26% del área de estudio; finalmente 44ha presentan erosión muy intensa o severa siendo esta área el 0.04% del área total de la cuenca media y alta del río Rímac.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar de los métodos USLE y Gavrilović en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón en los años 1995 al 2013.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Estimar el volumen de pérdida de suelo por erosión hídrica según los métodos de USLE y Gavrilović utilizando herramientas de análisis espacial, en la cuenca del río Mashcón.
- Estimar el aporte del volumen de sedimentos superficial al cauce principal a partir del cálculo de pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Mashcón.
- Determinar la diferencia de los resultados de la aplicación de los métodos de USLE y Gavrilović, en la determinación del volumen de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón.

1.4 Justificación

Considerando que la erosión hídrica es la principal causa de la degradación y pérdida de suelos en muchas cuencas del Perú, y que los suelos de alto valor agrologico son escasos y están sometidos a fuertes procesos erosivos agravados por inadecuadas prácticas agrícolas lo que impacta de manera negativa tanto desde el punto de vista ecológico como al desarrollo económico y social de las áreas de interés (Elegren y Lee, 2007). La cuenca del río Mashcón también experimenta la realidad antes descrita con la característica en la zona la pérdida de suelo anual agrava principalmente por las malas prácticas agrícolas.

Para tener en cuenta la pérdida de suelos por erosión hídrica en el Perú es un problema latente, que afecta y pone en riesgo los principales servicios ecosistémicos hídricos y el espacio donde se desarrolla importantes actividades económicas, como agrícolas, mineras, hidroenergéticos, etc., al cual se ha prestado muy poca atención, desde la época de la colonia, por parte de las diferentes instituciones del Estado y de los mismos agricultores. Bajo este contexto,

la falta de información sobre la cuantificación de la erosión hídrica, hace que el problema no sea totalmente visible.

En la actualidad no abundan trabajos de investigación sobre la erosión de suelos y relacionados en la cuenca señalada, dificultando la formulación de estrategias para mitigar el impacto en la pérdida de suelos en la zona por lo que la presente investigación busca presentar una alternativa tecnológica con la obtención de información para una adecuada gestión, conservación y al aprovechamiento sostenible del recurso suelo, teniendo implicancia en la integración equilibrada en los aspectos socioculturales, económicos, demográficos y recursos naturales en el desarrollo de la cuenca de río Mashcón, así como la satisfacción de las necesidades de las actuales y futuras generaciones para la ciudad de Cajamarca.

En tal sentido, el presente trabajo tiene la finalidad de realizar una comparación de las metodologías adecuadas para la obtención de información de pérdida de suelos mediante erosión hídrica y teniendo como objetivo principal: “Evaluar la diferencia de los resultados de la aplicación de los métodos USLE y Gavrilović en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón del departamento y provincia de Cajamarca.”

De acuerdo a lo expresado, se hace necesario fomentar, mejorar y ampliar los estudios cuantitativos para un mayor conocimiento y comprensión de los procesos erosivos y el aporte de sedimentos de los cauces de la cuenca y el posterior análisis del impacto de estos en el equilibrio ecológico, en la productividad de los suelos, en la sedimentación y colmatación de obras hidráulicas, en la calidad del agua y en la ocurrencia de inundaciones, con fuertes repercusiones económicas y sociales.

Esperamos que el presente trabajo enfocado en la evaluación y comparación de los dos métodos propuestos, USLE Y Gavrilović, contribuya a abrir el camino dentro del campo de la Ingeniería Geográfica, en la especialidad manejo y conservación de suelos, presentándose como una valiosa herramienta para la presente y futuras generaciones de ingenieros formados en nuestro País.

1.5 Hipótesis

- H_0 = La diferencia de la aplicación de los métodos USLE y Gavrilović **no** es significativa en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón en los años 1995 al 2013.
- H_1 = La diferencia de la aplicación de los métodos USLE y Gavrilović **si** es significativa en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón en los años 1995 al 2013.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 El suelo

El suelo es un componente esencial de la "Tierra" y "Ecosistemas". Ambos son conceptos más amplios que abarcan la vegetación, el agua y el clima en el caso de la tierra, y además abarca también las consideraciones sociales y económicas en el caso de los ecosistemas. (Portal de suelos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO).

2.2 Formación del suelo

El suelo es el resultado del efecto combinado de procesos primarios (meteorización y humidificación) y secundarios que alteran y reorganizan las materias minerales y la materia orgánica para formar suelo. Un número sustancial de invertebrados (lombrices de tierra, milpiés, termitas, ácaros, nematodos, etc.) interviene en el desarrollo de las capas superiores del suelo, descomponiendo los desechos vegetales, haciendo más asimilable la materia orgánica y creando condiciones estructurales que permiten la circulación del oxígeno, los nutrientes y el agua. (Glosario de Agricultura Orgánica de la FAO, 2009)

2.3 Factores involucrados en la formación del suelo

2.1.1 *Material parental o roca madre*

Está compuesto por aquellos materiales de tipo geológico que dan origen al suelo. Sobre este se dan los procesos de meteorización ya descritos para dar origen al suelo. Las características del suelo como el color, la composición, textura y estructura dependen en gran

medida de la naturaleza del material parental que le da origen. (Glosario de Agricultura Orgánica de la FAO, 2009).

2.1.2 El clima

Considerado uno de los factores de acción directa en la formación del suelo ya que condiciona la velocidad de meteorización del material parental. (Glosario de Agricultura Orgánica de la FAO, 2009). Contempla los siguientes elementos:

- **Precipitación:** fuente: de agua y causa de la lixiviación. Por otro lado, la ausencia de precipitación da lugar por evaporación la ascensión y la formación de costras.
- **Temperatura:** de importante incidencia en la acción de los procesos químicos y la actividad bacteriana.
- **Viento:** al incidir directamente sobre la formación vegetal y distribución de la humedad.

2.1.3 Organismos

Este factor de la formación del suelo comprende esencialmente por plantas y animales. Una vez alterada la roca y formado el regolito comienzan a instalarse poblaciones de hongos, líquenes y musgos, así como la acumulación de restos de organismos muertos y el crecimiento de vegetación nueva. La descomposición de los restos de animales y vegetales (hojas, tallos) da origen a la formación de materia orgánica o humus. La materia orgánica del suelo es uno de los componentes más importante del suelo por su influencia en las características y comportamiento del mismo. (Glosario de Agricultura Orgánica de la FAO, 2009)

2.1.4 *Relieve*

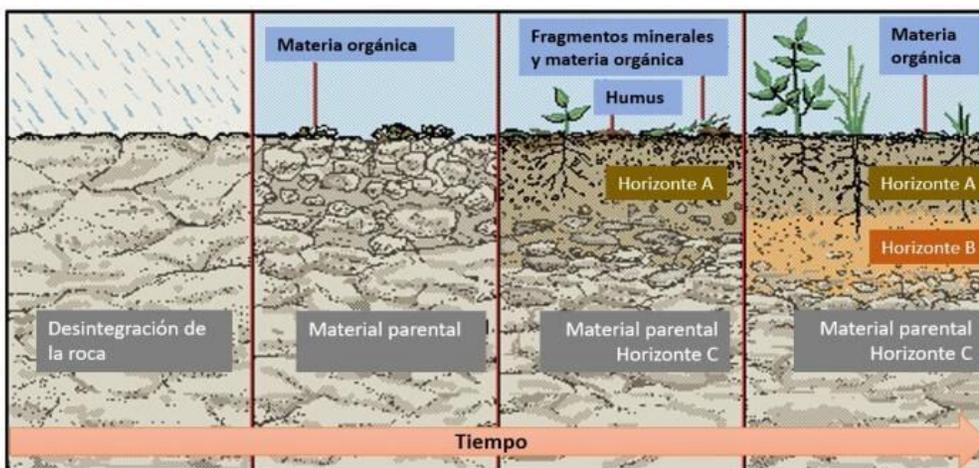
El relieve es la forma o configuración de la superficie terrestre como resultado de la interacción de procesos de modelado de tipo meteorológico, atmosféricos y antrópicos sobre una estructura geológica construida por una tectónica a través del tiempo. (Muñoz, 1995).

2.1.5 *El tiempo*

Cada uno de los factores señalados anteriormente ejerce su influencia en la formación del suelo a lo largo del tiempo dando lugar a características morfológicas distintas. Los suelos jóvenes e inmaduros son aquellos que han desarrollado pocas propiedades y que sus horizontes están poco desarrollados. A medida que van evolucionando, sus características se desarrollan más rápidamente originando suelos más profundos y también más diferenciados los unos de los otros. (Badía, (Abdul et al., 2010).

Figura 1

Procesos y factores de la formación del suelo



Fuente: Tomado de boletín del Instituto para la Innovación Tecnológica en Agricultura de México

INTAGRI. 2017

2.4 Erosión de suelos

La erosión del suelo es definida como un proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos. (Ellison, 1947).

La erosión es un fenómeno que comprende el desprendimiento y traslado o arrastre de las partículas del suelo por acción del agua, del viento, o de la actividad biológica. Puede ser natural (normal o geológica) cuando se produce por los cambios naturales en el ambiente y en largos periodos geológicos contribuyendo a la formación de los suelos y del relieve terrestre; o acelerada siendo uno de los problemas más serios que tiene que enfrentar cualquier acción encaminada a lograr el desarrollo agropecuario, ya que además de ser la causa de bajos rendimientos de los cultivos, acorta la vida útil de las obras de regulación por la cantidad de sedimentos que acarrea el agua que se almacena colmatando el lecho de los ríos y favoreciendo, en muchos casos las inundaciones, problemas de drenaje y salinización de las tierras. (Vásquez, 2000).

2.4.1 Erosión hídrica

La Erosión Hídrica es un proceso de disgregación y transporte de las partículas del suelo por acción del agua. Se trata de un fenómeno natural y lento, sin embargo, debido al uso intensivo de las tierras agrícolas y al manejo inadecuado, ha sido acelerado como consecuencia de tales actividades (FAO, 1980).

La erosión hídrica genera la pérdida del suelo que contiene la mayor parte de la fertilidad. Por lo tanto, es necesario controlarla adoptando prácticas de cultivo y producción que mantengan el buen estado del suelo y que eviten el impacto de las gotas de lluvia los cuales originan la degradación, transporte y sedimentación de las partículas del suelo. (Cabrejos, 2016).

A. Procesos de la erosión hídrica. Según Tayupanta (1993) en la erosión hídrica se tienen procesos y factores que la caracterizan:

- Tamaño e impacto de la gota de lluvia en el suelo calificado como la fase más importante del proceso erosivo. Se debe considerar el tamaño y velocidad de impacto de las gotas de lluvia en el suelo (tamaños entre 5 – 6 mm y velocidades entre 2 – 9 m/segundo).
- Salpicado y dispersión del suelo luego del impacto de las gotas de lluvia. Se da en todas las direcciones, más o menos uniformemente dependiendo de la pendiente del terreno.
- Escurrimiento producido por la saturación del suelo cuando la cantidad de lluvia es mayor a la capacidad de infiltración del suelo. El agua escurre siguiendo la forma y pendiente del terreno arrastrando consigo las partículas removidas y podría formar canales, surcos o cárcavas.
- Transporte y sedimentación cuyo agente principal es la esorrentía. El agua tiene una gran capacidad de transporte de partículas de suelo formando a su paso rugosidades o socavaciones. La disminución de la pendiente del terreno provoca la disminución de la velocidad de la esorrentía e iniciando los procesos de depósito y sedimentación de las partículas de suelos arrastrados.

B. Factores de erosión la erosión hídrica

- Precipitación: la cantidad, intensidad, duración, distribución y frecuencia de la lluvia inciden directamente en la pérdida del suelo.
- Características del suelo: el material original, grado de meteorización, contenido de materia orgánica y propiedades químicas influyen en la pérdida del suelo.

- Topografía: el relieve del suelo en conjunto con el ángulo, longitud y forma de la pendiente inciden en el proceso erosivo.
- Cobertura vegetal: impide el impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie terrestre disipando la energía que estas llevan consigo. A su vez, la cobertura vegetal incide en la distribución del agua que se infiltra, la que se evapora y la que se escurre.
- Manejo: las prácticas inadecuadas como el excesivo laboreo preparación y surcado del terreno y el mal manejo de agua incrementan el potencial erosivo.

2.4.2 *Tipos de erosión hídrica*

A. Erosión por salpicadura. Consiste en la dispersión de los agregados del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del terreno; la cantidad de suelo erosionado depende de la clase de suelo y de la pendiente. (Tayupanta, 1993).

B. Erosión laminar. Es la remoción más o menos uniforme del suelo, en capas delgadas, provocada por la saturación del suelo y deslizamiento superficial por la pendiente. Este tipo de erosión se da más frecuentemente en suelos arenosos y en menor escala en los arcillosos. (Tayupanta, 1993).

- C. Erosión en surcos.** Se presenta cuando la escorrentía se concentra en pequeñas irregularidades naturales o inducidas en la superficie del terreno hasta que adquiere volumen y velocidad suficientes para deslizarse por la pendiente, formando en su recorrido cortes en forma de canalillos y canales que pueden observarse a simple vista. (Tayupanta, 1993).
- D. Erosión en cárcavas.** Se denomina cárcava al estado más avanzado de la erosión en surcos. En función de la pendiente y de la longitud de la ladera del terreno, el flujo concentrado de agua provoca el aumento de las dimensiones de los surcos formados inicialmente, hasta transformarse en grandes zanjas llamadas cárcavas. (FAO, 2009).
- E. Movimientos en masa del suelo.** El término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras por efectos de la gravedad (Cruden, 1991).

Tabla 1

Tipos de movimientos de masa

Tipo	Subtipo
Caídas	Caída de roca (detritos o suelos)
Volcamiento	Volcamiento de rocas (bloque). Volcamiento flexural de rocas o del macizo rocoso
Deslizamiento de roca o suelo	Deslizamiento traslacional, deslizamiento en cuña. Deslizamiento rotacional.
Propagación lateral	Propagación lateral lenta Propagación lateral por licuación (rápida)
Flujo	Flujo de detritos Crecida de detritos

Tipo	Subtipo
	Flujo de lodo
	Flujo de tierra
	Flujo de turba
	Avalancha de rocas
	Deslizamiento por flujo o deslizamiento por licuación (de arena, limo, detritos, roca fracturada)
Reptación	Reptación de suelos
	Soliflucción, geliflucción (en permafrost)
Deformaciones gravitacionales profundas	

Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, INGEMMET, 2007

2.5 Métodos de Estimación de la Erosión Hídrica

Existen diferentes formas de medición y estimación de las pérdidas de suelo por erosión hídrica. Algunas son útiles y aplicables a parcelas o lotes y otras en superficies mayores, locales o regionales (subcuencas y micro cuencas).

2.5.1 Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE)

Es un método empírico para la estimación erosión del suelo. Formulada por Wischmeier y Smith (1978) para la predicción de pérdida de suelos utilizando parámetros a partir de información promedio de precipitación, suelos, pendientes, cultivos y manejo o prácticas de cultivo.

La USLE corresponde a múltiples esfuerzos teóricos y de campo incentivados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), en primera mitad del siglo XX. Los estudios fueron compilados por los investigadores Walter Wischmeier y Dwight Smith. (Mancilla, 2008).

La ecuación USLE permite predecir la pérdida anual de suelo por hectárea y también indicar las prácticas más adecuadas para el laboreo del suelo principalmente para la agricultura.

La representación matemática de la USLE es:

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

Donde:

A = Es la pérdida de suelos calculada por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas para K y el período seleccionado para R, generalmente en toneladas (t) hectárea (ha) -1 año.

R = Erosividad de la lluvia medido en MJ*cm/ha*h

K = Erodabilidad del suelo expresado en t*ha*h/MJ*ha*mm

L = Longitud de la pendiente en metros.

S = Pendiente en m/m

C = Cubierta vegetal y manejo del recurso, sin unidades de medida.

P = Prácticas de conservación aplicada, sin unidades de medida.

2.5.2 Factores de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE)

A. Factor R

El factor R de Erosividad corresponde a la sumatoria de los productos de las energías de todos los eventos de lluvias erosivas anuales con sus respectivas intensidades máximas en 30 minutos, lo cual da una idea de la agresividad con que la precipitación influye en el proceso de degradación de los suelos. Wischmeier y Smith, (1978) presentaron un índice de erosividad o factor R basado en esta relación directa: la energía cinética (E) y la intensidad de la lluvia (I) a través de la siguiente ecuación:

$$R = \sum_{i=1}^n E * EI_{30} \quad (2)$$

Donde:

E = la energía cinética (E) representa el trabajo por golpeo y salpicadura de la gota de lluvia caídas sobre la superficie del suelo, obtuvieron una alta correlación entre la intensidad de las lluvias y su energía.

EI_{30} = máxima intensidad en 30 minutos: Indican que cuando el valor de energía de la lluvia, es multiplicada por la máxima intensidad de las lluvias con duración de 30 minutos, se obtienen altas correlaciones con las pérdidas de suelo.

Para el cálculo de la energía cinética (E) se utiliza la siguiente ecuación propuesta por Wischmeier y Smith, (1978):

$$E = e * P \quad (3)$$

Donde:

E = Energía de la lluvia en (MJ.mm/ha)

e = Energía unitaria del evento en (MJ/ha)

P = Precipitación en mm del evento

Para el cálculo de e (energía unitaria) se utiliza la siguiente ecuación:

$$e = 0.1191 + 0.0873 \text{ Log}_{10} I \quad (4)$$

Donde:

I = Es la intensidad de la lluvia para ese evento en mm/hora

Una vez conocida la energía cinética total y la máxima intensidad en 30 minutos de la lluvia se calcula el índice EI_{30} de acuerdo a la siguiente expresión.

$$EI_{30} = E * I_{30} \quad (5)$$

Donde:

E = Energía cinética de la lluvia en Kg/m²

I₃₀ = Máxima intensidad en 30 minutos en mm/h.

Al producto de ambos se le denomina índice de erosividad lo cual resulta el potencial erosivo de la lluvia y está en función de la misma y de su máxima velocidad de caída sobre la superficie del suelo. Representa los efectos totales del impacto de las gotas de lluvia.

El cálculo del factor R mediante la ecuación antes descrita ha sido muy limitado ya que representa una metodología muy especializada que requiere de un gran volumen de datos de estaciones pluviométricas a nivel diario que normalmente no están disponibles y de gran complejidad al contemplar el cálculo de la energía cinética y la intensidad de los aguaceros de forma aislada, por lo que diversos autores han propuesto métodos alternativos mucho más fáciles de operar, con datos más asequibles y con precisiones cada vez más aceptables. Se trata de relaciones empíricas entre el valor de R y la lluvia total diaria, mensual, o de eventos extremos entre las que se tienen:

- 1) **Morgan (1974)** citado por Ramos Taipe (2001) usado para lugares con precipitaciones altas.

$$R = \frac{I_{30} * 9.28 * P - 8.3}{100} \quad (6)$$

Donde:

$I_{30} = 75$ mm/h (valor recomendado por Weischmeier)

P = Precipitación media anual.

- 2) **Foster y Onstad (1975)** plantean una ecuación usando las mismas variables mediante la siguiente expresión

$$R = \frac{0.276 * P * I_{30}}{100} \quad (7)$$

Donde:

$I_{30} = 75$ mm/h (valor recomendado por Weischmeier)

P = Precipitación media anual.

Según Morgan (1997) en ambas ecuaciones el valor de $I_{30} = 75$ mm/h es propuesto como una constante ya que según estudios de diversos autores como (Kinnell, 1987), Cárter et al. (1974) comprobaron que los valores máximos de energía cinética se alcanzan en intensidades próximas a 75 mm/h. debido a que el tamaño mediano de las gotas de lluvia no continúa aumentando con intensidades de precipitación pluvial superiores. Roose (1995) citado por

Morgan (1997), es otro índice de erosividad que considera la precipitación promedio anual y se expresa por la siguiente ecuación:

$$R = 1.73 * 0.5 * P \quad (8)$$

Donde:

P = Precipitación promedio anual en mm.

3) Índice de agresividad de Fournier (1960)

También conocido como Índice de Fournier (IF) mostrando una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía y con buenos resultados en indicadores de riesgo a la erosión. El cálculo del IF se realiza a partir de los datos pluviométricos de estaciones meteorológicas representativas, según la siguiente ecuación:

$$IF = \frac{p_m^2}{P} \quad (9)$$

Donde:

p_m = Es la precipitación media correspondiente al mes más lluvioso en mm.

P = Precipitación promedio anual en mm.

En 1978, Arnoldus, citado por Ramírez (2005), propone la modificación del IF, a través de regresión lineal en la cual correlacionó valores conocidos de R con las lluvias medias anuales y establece un método práctico, con resultados óptimos, para el cálculo del factor R con el Índice Modificado de Fournier (IMF) a través de la siguiente ecuación:

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P_t} \quad (10)$$

Donde:

IMF = Índice Modificado de Fournier

p_i = Precipitación mensual (mm)

P_t = Precipitación anual (mm).

Este índice fue utilizado por FAO en la elaboración del mapa universal de degradación de suelos. Las principales ventajas que muestra son el empleo de datos meteorológicos simples y una buena correlación con valores medidos del factor R, probada en diferentes regiones del mundo obteniéndose en general un alto grado de correlación (0,89). (Ramírez, 2005).

Según Del Águila (2010) para América Latina se considera válido la aplicación el IMF gracias a una serie de trabajos de estimación de la erosividad de la lluvia en diferentes áreas de la región cafetera de Colombia en los que se encontró una correlación del IMF con el factor R propuesto por Wischmeier y Smith (1978) alta ($R^2 = 0,92$).

En este sentido, Lobo, Gabriels, Ovalles, Santibañez, Moyano, Aguilera, Pizarro, Sangüesa, y Urra (2006), clasificaron el IFM de acuerdo al grado de agresividad de la lluvia para Latinoamérica como se muestra en la tabla 2:

Tabla 2*Clasificación del IMF para Latinoamérica*

Clase	Rango	Calificación
1	< 60	Muy bajo
2	60 – 90	Bajo
3	90 – 120	Moderado
4	120 – 160	Alto
5	> 160	Muy alto

Fuente: Lobo et al., 2006

No obstante, lo anterior, la determinación del factor R mediante el IMF podría ser objetado por algunos autores alegando que la correlación entre ambos podría ser variable según el área de estudio, por lo que, como respuesta a ello, se han realizado trabajos más detallados y localizados que han dado como resultados diversas ecuaciones que introducen factores de ajuste al IMF. Mancilla (2008) señala las siguientes ecuaciones:

- Arnoldus 1978

$$R = 0.264 * IMF^{1.5} \quad (11)$$

- Renard y Freimund (1990)

$$R = 0.07397 * IMF^{1.847} \quad (12)$$

- Instituto Nacional de Recursos Naturales de España (ICONA) pone a disposición la siguiente ecuación genérica

$$R = 2.56 * IMF^{1.0657} \quad (13)$$

B. Factor K

Se trata del factor de erodabilidad del suelo. La erodabilidad del suelo es, por definición, su vulnerabilidad a la erosión la cual se determina considerando exclusivamente factores intrínsecos o inherentes al propio suelo. Se toman en cuenta las propiedades de textura del suelo: contenido de arena, limo, arcilla y carbono orgánico.

- **Textura:** el análisis textural del suelo es para obtener los porcentajes de arena, limo, arcilla y arenas finas. De acuerdo a los manuales originales de USLE, para efectos de la erosión del suelo la arena muy fina se comporta similar al limo.
- **Materia Orgánica:** Se estima su proporción porcentual dentro del suelo, para lo cual se efectúa un análisis de las muestras obtenidas en campo. Según USLE, el porcentaje de materia orgánica oscila entre 0 y 4 %, con valores de números enteros, si el contenido fijado es más que el rango especificado, se asume un 4 %.
- **Estructura del suelo:** su determinación se efectúa mediante la observación visual y tacto para lo cual es recomendable emplear algún manual de comparación, de acuerdo a la USLE, las categorías y códigos empleados son solo cuatro.
- **Permeabilidad del suelo:** Para la permeabilidad se le asignan valores o códigos de acuerdo a la velocidad de infiltración de cada suelo determinado. Estos códigos son asignados por la USLE.

Tabla 3

Códigos USLE de estructura de suelo

Código USLE	Categoría de permeabilidad
1	Rápido (más de 12,7 cm/h ⁻¹)

Código USLE	Categoría de permeabilidad
2	Moderada a rápida (6,3 a 12,7 cm/h ⁻¹)
3	Moderada (entre 2 y 6,3 cm/h ⁻¹)
4	Lenta a moderada (entre 0,5 y 2 cm/h ⁻¹)
5	Lenta (entre 0,13 y 0,5 cm/h ⁻¹)
6	Muy lenta menor a 0,13 cm/h ⁻¹)

Fuente: tomado de Cabrejos, 2016

Figura 2

Códigos USLE de estructura de suelo

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

Fuente: tomado de Cabrejos (2016)

El factor K en el Sistema Internacional de Unidades está expresado en t-ha-h/ha-MJ-cm, que expresa la resistencia del suelo en superficie y tiempo, respecto a la energía de la lluvia.

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

1. **Método de la Ecuación:** después de obtener el análisis completo de textura de las muestras y determinar los códigos de estructura y permeabilidad, se procede a utilizar la siguiente ecuación que establece la USLE, señalando que es válida solo para suelos con presencia de 70% o menos de fracción limosa.

$$K = \frac{1.313 * [2.1 * 10^{-4} * (12 - MO) * M1.14 + 3.25 * (s - 2) + 2.5 * (p - 3)]}{100} \quad (14)$$

Existen métodos alternativos de estimación de K cuando no se tenga información detallada de los suelos tal como lo es como la metodología propuesta por la FAO (1980) en el que el factor K se determina sólo en función de la unidad a la cual pertenece el suelo en la clasificación FAO – UNESCO y la textura de la capa superficial del suelo.

Por su parte, (Williams, J. R., 1995) estableció una ecuación para la Estimación del factor K en la que solo se necesitan dos propiedades del suelo, el contenido de carbono orgánico del suelo y distribución del tamaño de las partículas del suelo (arena, limo y arcilla). La ecuación es como sigue:

$$K = 0,1317 * fcsand * fcl - si * forgc * fhisand \quad (15)$$

Donde:

fcsand = Contenido de arena. Reduce el indicador K en suelos con alto contenido de arena gruesa y más alto en suelos con poca arena.

fcl- si = Contenido de limo – arcilla. Proporciona factores de erosión del suelo bajos para suelos con altas proporciones de arcilla y limo.

f_{orgc} = Contenido de carbono orgánico. Reduce los valores de K en suelos con alto contenido de carbono orgánico

f_{hisand} = Disminuye los valores de K para suelos con un contenido de arena extremadamente alto.

Para el cálculo de los parámetros de la fórmula anterior se recurren a otras fórmulas por separado tal como se muestra en la Estimación de los parámetros del factor K según la fórmula de Williams, (1995).

$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right)$	(16)
$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$	(17)
$f_{orgc} = \left[1 - \frac{0.25orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95orgC]} \right]$	(18)
$f_{hisand} = \left[1 - \frac{0.70 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp[-5.51 + 22.9 \left(1 + \frac{m_s}{100} \right)]} \right]$	(19)

Donde:

ms = Contenido de fracción de arena (0,05-2,00 mm de diámetro) [%]

msilt = Contenido de fracción de limo (0.002-0.05 mm de diámetro) [%]

mc = Contenido de fracción de arcilla (<0,002 mm de diámetro) [%]

orgC: Contenido de carbono orgánico (SOC) [%]

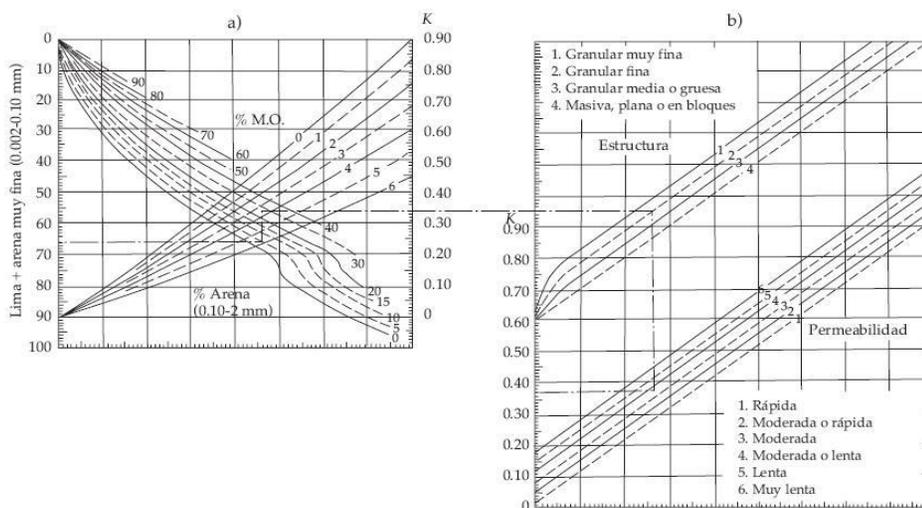
Con la aplicación de esta ecuación los valores de K varían de aproximadamente 0.1 a 0.5. El contenido de arena fina se estima como el producto del contenido de arena y limo dividido por 100. Para la estimación de arena gruesa es simplemente la diferencia entre el contenido de arena y de fina estimada.

2. Método gráfico: para este método se utiliza el monograma de Erodabilidad de Wischmeier y Smith, (1978), a pesar de representar la misma ecuación del método anterior, es menos exacto, debido al sesgo visual en el que puede incurrir el interesado. En este caso es recomendable apoyarse de una regla u otro objeto recto con el que ayudarse. La determinación gráfica del factor de Erodabilidad se efectúa proyectando siempre líneas rectas en el interior del monograma.

Se comienza ingresando el porcentaje de limo más arena muy fina en el gráfico izquierdo. A partir de este valor, se proyecta una línea recta hasta interceptar la correspondiente curva representativa del porcentaje de arena del suelo en cuestión. Desde ese punto se proyecta verticalmente la línea hasta topar con la curva que representa el porcentaje de materia orgánica del suelo. Desde allí se continua hacia la derecha, cruzando la primera aproximación del valor K, la cual es útil si no se dispone de los antecedentes de estructura o permeabilidad. De esta manera, se ingresa al gráfico derecho, continuando la proyección realizada, hasta interceptar la línea correspondiente al código de estructura del suelo en cuestión. Desde ese punto, se desciende por el gráfico hasta topar la línea que representa el código de permeabilidad adecuado al suelo en estudio. Finalmente, desde ese punto se traza la línea recta hacia la izquierda del gráfico, hasta encontrar el factor correspondiente de Erodabilidad del suelo (K).

Figura 3

Nomograma de Wischmeier y Smith, 1978 para el cálculo del factor K



Fuente: tomado de Wawer, Nowocień y Podolski (1995)

La FAO (1980), indicó valores típicos de K para grandes grupos de suelo de acuerdo información sobre textura y grado de permeabilidad tal como se muestran en la tabla 4.

Tabla 4

Valores estimados para el factor K por tipo de suelo

Tipo de suelo	Factor K
<i>Cambisol eutrico</i>	0.4
<i>Cambisol húmico</i>	0.07
<i>Feozem háptico</i>	0.2
<i>Feozem lúvico</i>	0.2
<i>Litosol</i>	0.2
<i>Luvisol crómico</i>	0.13
<i>Regosol eutrico</i>	0.4
<i>Vertisol pélico</i>	0.26

Fuente: tomado de Villavicencio y Zarazúa, 2006

El factor K se ha clasificado en función del grado de susceptibilidad del suelo a ser erosionando. La clasificación ha sido propuesta por Giboshi (1999) y se muestra en la tabla 5

Tabla 5

Rangos de susceptibilidad del factor K

Código	Grado de susceptibilidad	Factor K (Ton.h/MJ.cm)
0	Nulo	< 0.1
1	Ligero	0.1 – 0.2
2	moderado	0.2 – 0.3
3	Fuerte	0.3 – 0.4
4	Muy fuerte	> 0.4

Fuente: Giboshi, 1999

C. Factor L * S

Según Wischmeier y Smith (1978), la longitud y la inclinación de la pendiente afectan la intensidad de la erosión hídrica. Estos dos efectos se han estudiado por separado y se muestran en la ecuación de pérdida de suelo por L y S, respectivamente. Sin embargo, para la aplicación práctica, es más conveniente considerarlos juntos como un factor topográfico, LS.

Originalmente ambos factores fueron determinados en conjunto como:

$$LS = (\lambda / 72.6) * (65.41 * \sin^2 \alpha + 4.56 * \sin \alpha + 0.065) \quad (20)$$

Donde:

λ = Longitud de la pendiente en pies

α = Ángulo de pendiente

M = Un coeficiente que toma valores de: 0.5 (pendiente es mayor a 5%), 0.4 (pendiente esta entre 3.5 y 4.5%), 0.3 (pendiente está entre 1 y 3%) y 0.2 (pendiente es menos a 1%).

Debido al sistema de unidades que se emplea en este país se consideran utilizar las siguientes fórmulas:

1. Longitud de la pendiente según Foster, Meyer y Onstad. (1977)

$$L = (13)^m \quad (21)$$

Donde:

L = Factor de longitud de pendiente

λ = Longitud de la pendiente [m]

m = Exponente de la longitud de la pendiente

Para calcular **m** tenemos la siguiente ecuación

$$m = \frac{F + 1}{F} \quad (22)$$

Para calcular F tenemos la siguiente ecuación:

$$F = \frac{(\sin \beta / 0.0896)}{3 * (\sin \beta)^{0.8} + 0.56} \quad (23)$$

Donde:

β : ángulo de la pendiente

Para el cálculo de los factores L utilizando la herramienta SIG, Velásquez (2008), citando a Desmet y Govers, (1996), planteó la siguiente fórmula:

$$L_{ij} = \frac{[A_{ij} + D^2]^{m+1} - A_{ij}^{m+1}}{X^m * D^{m+2} (22.13)^m} \quad (24)$$

Donde:

L_{ij} = Factor de longitud de pendiente

A_{ij} = Acumulación de flujo a nivel de pixel

D = Lado del pixel

X = Coeficiente de forma (X= 1 para sistemas pixelados)

Es importante aclarar que para la ejecución de las ecuaciones desde la aplicación “Raster Calculador” que ofrece el software ArcGIS, se debe calcular la pendiente del terreno en grados, los cuales deben ser convertidos posteriormente a radianes (1 grado sexagesimal = 0,01745 radianes), para que pueda ser multiplicado por los demás componentes de las ecuaciones (Velásquez, 2008).

2. **Inclinación de la Pendiente (Factor S)** según Wischmeier y Smith (1978)

$$S = 10.8 * \sin \beta + 0.03 \quad \text{Si: } s < 9\% \quad (25)$$

$$S = 16.8 * \sin \beta - 0.5 \quad \text{Si: } s \geq 9\% \quad (26)$$

Donde:

S = Factor de inclinación de pendiente

s = Inclinación de pendiente [%]

β = Ángulo de pendiente [°]

Un procedimiento sencillo de cálculo es el utilizado por la Facultad de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes (Madrid). Este estudio ha permitido la elaboración de una tabla que nos permite asignar directamente a una ladera el valor del factor L.S en función de la pendiente. (Ramos, 2001)

Tabla 6

Valores del factor L.S en función de la pendiente

Grupos de Pendientes%	Factor LS
0 - 3	0.3
3 - 12	1.5
12 - 18	3.4
18-24	5.6
24-30	8.7
30-60	14.6
60-70	20.2
70-10	25.2
>100	28.5

Fuente: Ramos, 2001

D. Factor C

El factor C es la relación entre la pérdida de suelo en un terreno cultivado en condiciones específicas y la pérdida correspondiente del suelo en barbecho continuo. Esta comparación se hace suponiendo que son semejantes las condiciones de suelo, pendiente y lluvia. El factor C ya se ha definido como la relación entre las pérdidas de suelo que se producen bajo una alternativa y

con unas determinadas técnicas de cultivo, y las pérdidas correspondientes al barbecho continuo. (Grupo TRAGSA, 1998).

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo, mientras que los componentes subterráneos, como los sistemas radicales, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 1997).

Para la determinación de este factor se estudian las diferentes coberturas que cuenta la zona de estudio, para lo cual se tiene una tabla publicada por Wischmeier y Smith (1978), donde se definen los valores de C para los tipos más comunes de cultivos y coberturas y se compara con la clasificación establecida para la cuenca.

Tabla 7

Valores del factor C por tipo cobertura vegetal

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Suelo desnudo	1
Bosque o matorral denso	0.001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0.01
Pradera sobre pastoreada	0.1
Maíz, sorgo, alto rendimiento, laboreo convencional	0.2 – 0.55
Maíz, sorgo, alto rendimiento, sin laboreo convencional	0.50 – 0.9
Maíz, sorgo, bajo rendimiento, laboreo mínimo	0.02 – 0.1
Maíz, sorgo, alto rendimiento, laboreo con shisel	0.12 – 0.2
Maíz, sorgo, alto rendimiento, laboreo con shisel	0.3 – 0.45
Algodón	0.4 – 0.7
Pradera herbácea	0.01 – 0.025
Soya	0.20 – 0.5
Trigo	0.1 – 0.4

Cultivo y práctica	Media anual del factor C
Arroz	0.10 – 0.20
Cacahuete	0.30 – 0.80
Frutales con cobertura vegetal	0.01 – 0.80
Caña de azúcar	0.56
Arbolado denso	0.001 – 0.003
Arbolado forestal clareado	0.003 – 0.009
Arbolado muy clareado (25-60%)	0.041
Matorral con buena cobertura	0.003 – 0.013
Matorral ralo y eriales	0.2 – 0.013
Cultivos anuales y herbáceos	0.25
Pasturas	0.15
Plantas herbáceas y matorjos (100%)	0.003
Plantas herbáceas y matorjos (60%)	0.035
Cubierta escasa (60%)	0.15 – 0.09
Cubierta inapreciable	0.45

Fuente: FAO, 1980

E. Factor P

Según Velásquez (2008), P es el factor de prácticas de control de erosión. El factor P de la USLE refleja el impacto que las prácticas de control tienen sobre la tasa de erosión.

Representa la relación existente entre las pérdidas de suelo que tienen un lugar bajo determinada práctica de conservación de suelo y las pérdidas que ocurren en la misma área sin que existan prácticas de conservación, este parámetro toma valores entre 0 y 1. Las prácticas incluidas en este término son: las curvas de nivel, los cultivos en faja (cultivos alternados sobre contornos), zanjas de infiltración en protección de pastos y las terrazas entre otros (Ferrán, 2007).

En numerosas ocasiones los estudios en los que se aplica la USLE no consideran este factor bien por falta de información disponible al respecto o por no existir prácticas de conservación en la zona de estudio.

2.5.3 Tasa de erosión en cm/año mm/año

Se calcula utilizando la ecuación del peso específico promedio del suelo (Camacho, 2012).

$$p = \frac{P}{V} \left(\frac{T}{m^3} \right) \quad (27)$$

Donde:

p = Peso específico del suelo en el área de estudio

P = Peso del suelo en toneladas

V = Volumen del suelo en m^3

Reemplazando en la ecuación:

$$V = \frac{P}{p} \quad (28)$$

$$H = \frac{V}{A} \quad (29)$$

Donde:

A = Valor de superficie en m^2

2.5.4 Modelo Gavrilović o modelo Potencial de Erosión de Suelos (EPM)

El modelo de Gavrilović es un método teórico desarrollado por Slobodan Gavrilović en la década de 1960 mediante la investigación de campo en la cuenca del río Morava en Serbia, con base en el Método para la Clasificación Cuantitativa de la Erosión (MQCE), desarrollado

formalmente en 1954. El método comprende la cartografía de la erosión, la estimación de la cantidad de sedimentos y la clasificación de torrentes con aplicación a nivel mundial especialmente en cuencas de montaña. (Mercado, 2014).

La metodología de Gavrilović ha sido empleada en diferentes contextos geológicos, climáticos y de uso del territorio, con resultados en general aceptables. En numerosas cuencas de montaña ha podido ser validada a partir del contraste de los resultados con mediciones de caudales sólidos en suspensión y la comparación de batimetrías en embalses. (Andreazzini et al., 2014).

La metodología propuesta cuantifica el proceso erosivo en función de las características morfológicas, geolitológicas, vegetación y uso del suelo, distribución de precipitaciones y temperatura. Se define de este modo la descarga media anual de material erosionado (G) como el producto de la producción de sedimentos (W) y el coeficiente de retención (R). (Mercado, 2014).

La metodología de Gavrilović (Gavrilović, S., 1959; Gavrilović, Z., 1988; Zemljic, M., 1971), estima la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca y que es efectivamente transportado a la sección del río que la define. (Jaime et al., 2007).

Este método empírico se compone de dos partes:

1. La producción media anual de sedimento por erosión superficial (W)
2. El coeficiente de retención de sedimentos (R).

A partir de ambos se obtiene el volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección final de la cuenca (G) mediante la siguiente ecuación:

$$G = W * R \quad (30)$$

Donde:

G = Es el volumen de sedimentos producidos en la cuenca (m³/año)

W = Es la producción media anual de sedimento bruto por erosión (m³/año)

R = Es el coeficiente de retención

Los procesos erosivos son el resultado de la interacción de varios factores: topografía, clima, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas, geomorfología. Por ello las formulaciones intentan incluir estas variables con un adecuado peso relativo. (Jaime et al., 2007)

Ahora, la producción media anual de sedimentos por erosión superficial (**W**) se determina mediante la siguiente ecuación:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{\frac{3}{2}} \cdot F \quad (31)$$

Donde:

T = Es el coeficiente de temperatura definido a partir de la temperatura promedio anual en °C

(*t_m*) y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$T = \left[\frac{tm}{10} + 0.1 \right]^{1/2} \quad (32)$$

Donde:

h = Es la precipitación media inter anual (mm/año)

π = Valor constante 3.1416

F = Superficie de la zona de estudio (km²)

Z = Es el coeficiente de erosión definido como

$$Z = X.Y. (\phi + I^{\frac{1}{2}}) \quad (33)$$

Donde:

X = Es el coeficiente de uso del suelo

Y = Es el coeficiente de resistencia del suelo a la erosión

Φ = Coeficiente correspondiente al tipo de proceso erosivo observado

I = Pendiente media de la cuenca (%)

Según Jaime et al., 2007 el coeficiente ϕ está asociado a los procesos de erosión observados, con valores que varían entre 1 y 0.1 y los valores para su determinación son propuestos en el autor de acuerdo a los tipos de erosión observada, el porcentaje de área de la cuenca afectada por el mismo y su gravedad. El parámetro X caracteriza el uso del suelo y adopta valores entre 0.05 y 1 y por último, el parámetro Y indica la resistencia del suelo a ser erosionado de acuerdo a sus características geolitológicas y los valores varía en el rango de 0.25 a 2. Los valores de los coeficientes X, Y y ϕ propuestos por el autor se muestran en las tablas 8, 9 y 10.

Tabla 8

Valores del coeficiente de vegetación X

Descripción según metodología	Valor de X
Bosques /bosque montano	0.20
Pastizal de montaña	0.30
Pastos dañados/Cultivo	0.63
Cultivos sin vegetación baja	0.40
Suelo desnudo	1.00

Descripción según metodología	Valor de X
Ciudades	0.70

Fuente: Gavrilović (1986) citado por Jorge et al., 2018

Tabla 9

Valores del coeficiente de resistencia del suelo a la erosión Y

Grupos de suelos propuestos en la metodología	Coeficiente Y
Suelos sueltos, arenas y gravas	2
Rocas calizas desintegradas	1.2
Calizas duras y pizarras	0.9
Loess y suelos salinos	1.6
Flysch y areniscas	1.1
Toba	1.6
Suelos con buena estructura	0.5
Rocas ígneas compactas desnudas	0.25
Suelo de bosque marrón y suelos de montaña	0.8

Fuente: Gavrilović (1986) citado por Jorge et al., 2018

Tabla 10

Valores del grado de resistencia a la erosión del suelo ϕ

Valores propuestos en la metodología	Coeficiente ϕ
Sin erosión o pocos signos de erosión	0.1 - 0.2
Erosión laminar y regueros en un 20- 50% de la cuenca.	0.3 - 0.5
Erosión en ríos, cárcavas, depósitos aluviales, erosión kárstica.	0.6 - 0.7
50-85% de la cuenca afectada por erosión superficial y deslizamientos.	0.8 - 0.9
Toda la cuenca afectada por erosión.	1.0

Fuente: Gavrilović (1986) citado por Almorox et al., 2010

Por su parte, el coeficiente R indica la relación entre el volumen de sedimento que efectivamente pasa por la sección de cierre de la cuenca y el volumen total de material producido por erosión superficial. La ecuación para su cálculo según Zemljic en 1971. (Andreazzini, et al., 2014). La ecuación de Zemljic (1971) determina un coeficiente en función de datos morfométricos y está definida de la siguiente manera:

$$R = \frac{(L + Li) * (\sqrt{D * O})}{(L + 10)F} \quad (34)$$

Donde:

O = Es el perímetro de la cuenca (km)

D = La diferencia de nivel media en la cuenca (cota media menos cota mínima, en km)

Li = La longitud total de los afluentes fluviales laterales (km)

L = La longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km)

F = La superficie de la cuenca (km²).

La utilidad del método de Gavrilović es que permite sintetizar la compleja interrelación entre aspectos geológico-geomorfológicos, climáticos, bióticos, uso del territorio y la morfodinámica de los cursos colectores en la producción de sedimentos en una cuenca y ha sido empleado con éxito en cuencas alpinas, andinas y en otras zonas montañosas, obteniéndose buenos resultados, y con buena concordancia entre los valores medidos y calculados en cuencas piloto o en casos en que pudo efectuarse esta comparación (Brea y Spalletti, 1997; Cadore, Peviani y Baldin, 1994 ; Gentile et al., 1999, Peviani et al., 1994; Jaime et al., 2007).

2.6 Límite de tolerancia de pérdida de suelo

El límite de pérdida de suelo es la tasa máxima de erosión de suelo que permite que sostenga un alto nivel de productividad y en la actualidad no existe una base satisfactoria para determinar los valores adecuados de la tolerancia a la pérdida de suelos (Kirkby y Morgan, 1984).

La tolerancia a la pérdida de suelo para un suelo específico se utiliza como una guía para la planificación en la conservación de suelos. La ecuación universal de pérdida de suelos se utiliza para estimar la pérdida de suelo real y para evaluar cómo los cambios en las prácticas pueden aplicarse para reducir la pérdida de suelo por debajo del nivel de tolerancia (Kirkby y Morgan, 1984).

De acuerdo a lo descrito por el Grupo TRAGSA (1998), la evaluación de tolerancias de pérdidas de suelos en un terreno, factor básico para la utilización del modelo en la ordenación, depende de diversos factores tales como profundidad del suelo, sus propiedades físicas, desarrollo de los sistemas radicales de la vegetación, reducción de la materia orgánica, pérdidas de nutrientes y sementeras, etc.

Según Gaitán, Navarro, Tenti, Pizarro, Carfagno, y Rigo, 2017, no existe un acuerdo general en la bibliografía sobre cuál es la tasa de erosión tolerable. Los autores, citando a (Kirkby y Morgan, 1994), indican que tradicionalmente se ha considerado esta pérdida fluctuando entre 4 a 20 t/ha/año, aunque otros autores proponen una pérdida menos: 2 a 10 t/ha/año (Troeh, 1991, citado por Cisneros, 2012), o 1 a 2 t/ha/año (Walter y Stutzel, 2009, citados por Gaitán et al., 2017).

Tabla 11

Tolerancia de pérdida de suelo (t/ha/año) de acuerdo al régimen climático y la profundidad del suelo

Profundidad/ Clima	Húmedo	Subhúmedo - húmedo	Subhúmedo - seco	Semiárido	Árido
< 25 cm	2.5	2	1.5	1	0.5
25 - 50 cm	5	4	3	2	1
50 - 100 cm	7	5.5	4	3	2
100 - 150 cm	8.5	7	5	4	3
> 150 cm	10	8	6	5	4

Fuente: Gaitán et al., 2017

Generalmente se ha venido admitiendo que una pérdida de 12,5 tm/ha/año, es el máximo aceptable para suelos bastante profundos, permeables y bien drenados. Pérdidas de 2 a 4 tm/ha/año han sido también consideradas como admisibles para suelos con un subsuelo desfavorable y que presenten escasa profundidad. (Quispe, 2018).

El límite de erosión aceptado internacionalmente como admisible oscila en torno a las 10-12 tm/ha/año, aunque creemos que en zonas húmedas esta cifra puede elevarse hasta los 25 tm/ha/año. Por encima de esta cifra no se garantiza la conservación de los suelos, ya que la destrucción es más rápida que la creación de suelo. (Ramos, 2001)

Tabla 12

Clasificación de pérdida del suelo

Nivel	t/ha/año	Tipo de erosión
1	0 – 10	Normal
2	10 – 50	Moderada
3	50 – 200	Severa
4	>200	Muy severa

Fuente: FAO-PNUMA-UNESCO, 1980

2.7 Análisis para la estimación de sedimentos

A. Producción neta de sedimentos y relación de erogación de sedimentos (SDR)

La relación de erogación de sedimentos fue planteada por Vanoni utilizando datos de más de 300 cuencas de diferentes partes del mundo. (Basile, 2008).

Parte del principio de que no todo el sedimento producido por erosión superficial ingresa a la red hidrográfica y es transportado por los cursos de agua hasta la sección de control. En general, el sedimento que efectivamente alcanza la sección de control (SY) es menor que la cantidad de sedimento producido por erosión superficial (A). La relación entre estas dos magnitudes se denomina relación de erogación de sedimentos y es menor que la unidad (Basile, 2008).

Un coeficiente de entrega de sedimentos se utiliza para ajustar la erosión total estimada y compensarla por la deposición de sedimentos durante el transporte y estimar el aporte de sedimentos en un punto específico de la cuenca. Esto indica que no todo el sedimento producido por la erosión superficial ingresa a la red hidrográfica y es transportado por los cursos de agua (Martínez, 2010, citado por Pérez, 2018).

Dicho de otra manera, la SDR es la relación que existe entre la producción de sedimentos en un punto dado con su erosión superficial; a esto se lo representa de la siguiente manera (Brooks et al., 1997, citado por Pérez, 2018).

$$SDR = \frac{YS}{A} \quad (35)$$

Por lo tanto, el SY se calcula mediante la ecuación 31

$$SY = SDR * A \quad (36)$$

Donde:

SY = Producción de sedimentos en un punto dado (t/ha/año).

SDR = Coeficiente de entrega de sedimento (adimensional).

A = Es la erosión superficie (t/ha/año).

El autor además menciona que tal relación sólo arroja valores de muy baja aproximación, ya que la erosión y las concentraciones de sedimentos pueden variar enormemente para cada cuenca (Pérez, 2018).). Varios investigadores emplearon relaciones para calcular el SDR, y de esta manera poder determinar la producción de sedimentos (SY), conociendo su erosión hídrica. (Pérez, 2018).)

Steward et al., 1975, citado por Pérez, 2018, propone utilizar los valores de la tabla 13, la cual muestra la variación del área de drenaje de la cuenca y su respectivo SDR.

Tabla 13

Valores del SDR de acuerdo a la variación de la superficie de la cuenca

Área de la cuenca km²	Valor SDR
1.29	0.33
2.59	0.30
12.95	0.22
25.90	0.18
195.50	0.12
259.00	0.10
518.00	0.08

Fuente: Esteward et al., 1975 citado por Pérez, 2018

De la tabla anterior se desprende la ecuación 37

$$SDR = - 0.043 \ln(A) + 0.3342 \quad (37)$$

Williams y Berndt (1972)

$$SDR = 0.627(SLP)^{0.403} \quad (38)$$

Vanoni (1975) plantea el cálculo del coeficiente SDR mediante la siguiente ecuación

$$SY = SDR * A \quad (39)$$

$$SDR = 0.4720 * F^{-0.125} \quad (40)$$

USDA SCS, 1979

$$SDR = 0.566 * F^{-0.11} \quad (41)$$

Roehl, 1962

$$SDR = 0.36 * F^{-0.2} \quad (42)$$

Donde:

SY = Es la producción neta específica de sedimentos (t/ha/año)

A = Erosión bruta específica (t/km²/año)

SDR = Es la relación de erogación de sedimentos.

F = Área de la cuenca expresada en Km²

SLP = Pendiente media del cauce principal de la cuenca %

Cabe señalar que estas son ecuaciones empíricas que estima exclusivamente la erosión superficial (en surcos y entre surcos), es decir, no contempla los procesos de erosión del flujo encauzado (erosión de lecho y márgenes) ni obviamente procesos de remoción masivos (deslizamientos, flujos de detritos, etc.). Por otra parte, el aporte correspondiente a los procesos de erosión debido al flujo encauzado puede considerarse mucho menor que los producidos por erosión superficial. (Basile, 2008).

2.8 Prácticas conservacionistas de suelos

La FAO (2016) lo define como las actividades a nivel local que mantienen o aumentan la capacidad productiva de la tierra en áreas afectadas por o propensas a la degradación.

Según Vásquez (2000), las principales prácticas de conservación de suelos y aguas pueden reunirse en tres grandes grupos: mecánicas - estructurales, agronómicas y forestales.

2.8.1 Agricultura sostenible en laderas

La agricultura sostenible en laderas (ASEL) consiste en sistemas de producción agrosilvopastoriles, cuyo objetivo mayor es una gestión más intensiva y sostenible de los recursos de las fincas, que permita reconstituir la fertilidad de los suelos y la conservación del agua para la producción agropecuaria. Así se puede lograr la seguridad alimentaria a largo plazo y constituir excedentes. (Raudes y Sagastume, 2014).

Para el enfoque de ASEL es indispensable tener conocimientos de los elementos agua y suelo (textura, estructura, capacidad de infiltración, pedregosidad, condiciones agroecológicas, fertilidad) (Raudes y Sagastume, 2014).

2.8.2 *Prácticas Mecánico - Estructurales*

Entre las principales prácticas mecánicas estructurales se pueden mencionar las siguientes:

1. Zanjas o acequias de infiltración: Son pequeños canales de sección rectangular o trapezoidal, generalmente asimétricos. Se construyen transversalmente a la máxima pendiente del terreno. El fondo de estos canales debe estar a nivel salvo que se trate de acequias o canales de desviación, en los que la pendiente recomendable es de 1 a 3% y su desembocadura debe efectuarse en una zona protegida a fin de evitar la formación de una gran cárcava. (Raudes y Sagastume, 2014).

2. Terrazas de absorción, presentan sus plataformas con una ligera inclinación hacia adentro o contrapendiente, de tal modo que no se produzcan desbordes de agua fuera de la plataforma, y permita que el agua de lluvia se infiltre, de allí su nombre de terrazas de absorción. Se presentan con muro de piedra y con talud de tierra. (Ministerio de Agricultura, MIDAGRI, 2014).

Según Vásquez (2000) la inclinación del terraplén hacia adentro evita el rebose del agua de lluvia durante los aguaceros fuertes o lluvias prolongadas. La nivelación de los bordes impide que el agua escurra hacia un lado u otro, de este modo el agua de lluvia que cae en las terrazas se infiltra total y uniformemente en estas, evitando totalmente la erosión. Cuando se construyen estas prácticas en zonas de alta precipitación (mayores de 1000 mm/año), se debe contemplar un sistema de drenaje superficial. Se pueden distinguir y cumplir en las terrazas los siguientes elementos y requisitos:

- El borde interno de la terraza, pie o borde inferior del talud (debe estar a nivel)
- El borde externo de la terraza o borde superior del talud (debe estar a nivel)

- La profundidad del borde interno o desnivel (debe permitir almacenar el agua de lluvia que recibe)
- El suelo del terraplén o terraza propiamente dicha, debe ser removido o “preparado” para que pueda absorber el agua de lluvia.
- El talud debe ser sembrado con plantas perennes y su altura preferentemente no debe ser mayor de 1.50 m.

A fin de mantener la capa superior del suelo en la parte de arriba (horizonte A o capa arable), se debe efectuar la remoción lateral del suelo durante la construcción de la terraza.

La siembra del cultivo principal se hace en el terraplén, en el talud se debe instalar otras plantas de tipo permanente, principalmente pastos o plantas aromáticas, con la finalidad de estabilizar y aprovecharlo económicamente. Terrazas de absorción, de formación lenta, etc.

En las zonas de secano, el borde interno del terraplén puede tener una profundidad de 15cm, a fin de asegurar una máxima captación y aprovechamiento del agua de lluvia.

En terrenos bajo riego, el terraplén debe tener una pendiente longitudinal de uno a dos por mil en el sentido en que va a correr el agua; esto mismo se recomienda para zonas muy lluviosas y en terrenos poco permeables. Asimismo, en terrenos bajo riego las terrazas no deben tener contrapendiente, pero si un camellón o borde pequeño a lo largo del borde externo para evitar que el agua se desborde y desestabilice el talud.

3. Diques para el control de cárcavas, la cárcava es una zanja causada por la erosión hídrica del suelo. Sigue generalmente la pendiente del terreno y constituye un cauce natural en donde se concentra y corre el agua proveniente de las lluvias. El agua que corre por la cárcava arrastra gran cantidad de partículas de suelo, producto de la erosión. (Vásquez, 2000).

Normalmente cuando el agricultor va a utilizar nuevos terrenos para cultivo, corta toda la vegetación arbórea, arbustiva y herbácea existente, es decir, limpia el terreno, quedando este consecuentemente expuesto a la acción directa de las lluvias y de la escorrentía superficial. Cuando se trata de suelos inclinados o laderas, automáticamente se inicia la remoción y el arrastre de las partículas del suelo por capas delgadas (erosión laminar). (Vásquez, 2000).

El agua a medida que desciende por la ladera y debido a las irregularidades en el relieve del terreno se va concentrando, formando pequeños canales, los que a su vez se juntan y forman un canal mayor. Con una masa de agua más abundante y una velocidad que va en aumento, la erosión se acentúa, formando inicialmente pequeños surcos, los que se van agrandando horizontal y verticalmente hasta que se forman las cárcavas llamadas también zanjas, barrancos o torrentes. (Vásquez, 2000).

4. Andenes, los andenes son estructuras construidas en forma de escaleras con la finalidad de cortar la pendiente de las laderas, transformándolas en plataformas de terreno horizontal, sostenidas por muros de piedras ligeramente inclinados hacia adentro. (Vásquez, 2000).

Un sistema de andenerías es la expresión de una cultura caracterizada por el trabajo organizado, para la conservación de las aguas y los suelos y para la producción agropecuaria eficiente. La andenería incaica fue construida por un pueblo con vocación eminentemente agrícola, guiado por el padre inca bajo una disciplina místico-militar y una organización comunal eficiente para el trabajo. (Vásquez, 2000).

Los principales objetivos que se logran con la construcción de un sistema de andenería son:

- Reducción de la pendiente de la ladera
- Mejor aprovechamiento de la ladera con fines productivos
- Disminución de la velocidad del flujo de agua que escurre
- Mejor aprovechamiento del agua ya sea de lluvia o de riego
- Protección de los suelos contra la erosión hídrica
- Mejora de las condiciones ambientales de la ladera
- Mejora de la capacidad productiva de los suelos de la ladera
- Mejor aprovechamiento de los abonos y otros insumos

5. Barreras vivas se recomienda el establecimiento de barreras vivas como práctica adecuada en terrenos con pendiente menor a 10%.

En terrenos con pendiente mayores a 10%, el establecimiento de las barreras vivas debe estar acompañado con otras prácticas conservacionistas, tales como cultivo en fajas, surco en contornos acequias o zanjas de infiltración, terrazas. Las plantas que se van a establecer como barrera viva deben sembrarse en doble hilera distanciadas entre sí 15 a 20 cm aproximadamente. En zanjas o acequias de infiltración, la barrera viva debe sembrarse entre 10 a 20 cm por encima del lado o borde superior. El distanciamiento entre barreras vivas dependerá del tipo de cultivo y del grado de pendiente del terreno. Se debe practicar un mantenimiento frecuente de las barreras vivas a fin de asegurar un buen funcionamiento. (Vásquez, 2000).

6. Surcos en Contorno los surcos en contorno son prácticas conservacionistas que se construyen en dirección transversal a la máxima pendiente del terreno. El objeto de esta práctica es reducir la velocidad del escurrimiento superficial, favorecer una mayor infiltración

del agua, disminuir la erosión del suelo y aumentar la producción y productividad de los cultivos. Los surcos en contorno pueden ser a nivel o con una ligera pendiente. Esta práctica se recomienda para suelos con pendiente no muy pronunciadas (menores de 20%), en pendientes mayores pueden ocurrir daños por erosión sobre todo durante los aguaceros fuertes. Los surcos en contorno son recomendables principalmente para terrenos dedicados a la instalación de cultivos de hilera o en limpio; aunque también pueden surcarse a nivel los terrenos que van a ser dedicados a cultivos densos. El surcado en contorno es una práctica que puede ser fácilmente aplicada en lugares donde se usa la yunta, tracción equina o maquinaria agrícola para el surcado del terreno. (Vásquez, 2000).

2.8.3 Prácticas Agronómicas

Raudes y Sagastume (2014) indican que entre las principales prácticas agronómicas se tienen las siguientes:

1. Surcos en Contorno
2. Cultivo en fajas
3. Ordenación territorial de cultivos
4. Cobertura vegetal
5. Labranza conservacionista o mínima labranza
6. Rotación de cultivos
7. Incorporación de materia orgánica
8. Aplicación de fertilizantes y enmiendas químicas al suelo
9. Manejo de pastos

III. MÉTODO

3.1 Tipo de Investigación

La metodología empleada es cuantitativa, donde tenemos la evaluación de dos métodos para el cálculo de pérdida de suelo, para ellos tuvimos como materia prima el registro de datos meteorológicos durante los años 1995 al 2013. Para lo cual mencionamos el Tipo, Diseño y los niveles de investigación en lo siguiente:

- a) *Tipo*. – Transeccional, o también conocido transversales.
- b) *Diseño*. - El diseño de la investigación es no experimental.
- c) *Niveles de investigación*

Los niveles que se aplicada para el desarrollo de la investigación se basó en los siguientes aspectos:

- **Descriptivo;** a través de un análisis de la variable meteorológica precipitación, con lo cual se pudo determinar la distribución mensual y anual de la misma, las intensidades de lluvia y su capacidad erosiva, así como analizar el comportamiento el proceso erosivo y predecir el impacto en la cuenca del río Mashcón.
- **Histórico;** se evaluaron datos meteorológicos de precipitación y temperatura para determinar el comportamiento hidrológico y meteorológico de la cuenca del río Mashcón; para ello se analizó, evaluó, y proceso una base de datos meteorológicos de 18 años siendo la fuente de información el SENAMHI (1995 - 2013) y la empresa Minera Yanacocha (1995 - 2013) lo cual permitió la elaboración de mapas temáticos: isoyetas, isotermas e isoerodabilidad.

3.2 Ámbito temporal y espacial

Para este capítulo del ámbito temporal y espacial de nuestra investigación a desarrollar, fue escogido la cuenca de la cuenca del río Mashcón en los años 1995 al 2013. El río Mashcón se encuentra dentro de la cuenca del río Crisnejas y está a la cuenca del río Marañón, perteneciente a la vertiente del Atlántico.

3.2.1 Ámbito Geográfico y Político

El área de la cuenca del río Mashcón está ubicado dentro de la cuadrícula a) Este 761 828 – Norte 9 228 236 b) Este 782 988 – Norte 9 228 236 c) Este 782 988 – Norte 9 200 777 d) Este 761 828 – Norte 9 200 777. Proyección UTM sistema WGS – 84 Zona 17 S. Altimétricamente, el punto más alto de la microcuenca se ubica en la cota 4200 msnm, mientras que el más bajo se encuentra en la cota 2, 650 msnm. (Ver Figuras 4, y anexo A Figuras 32 y 33).

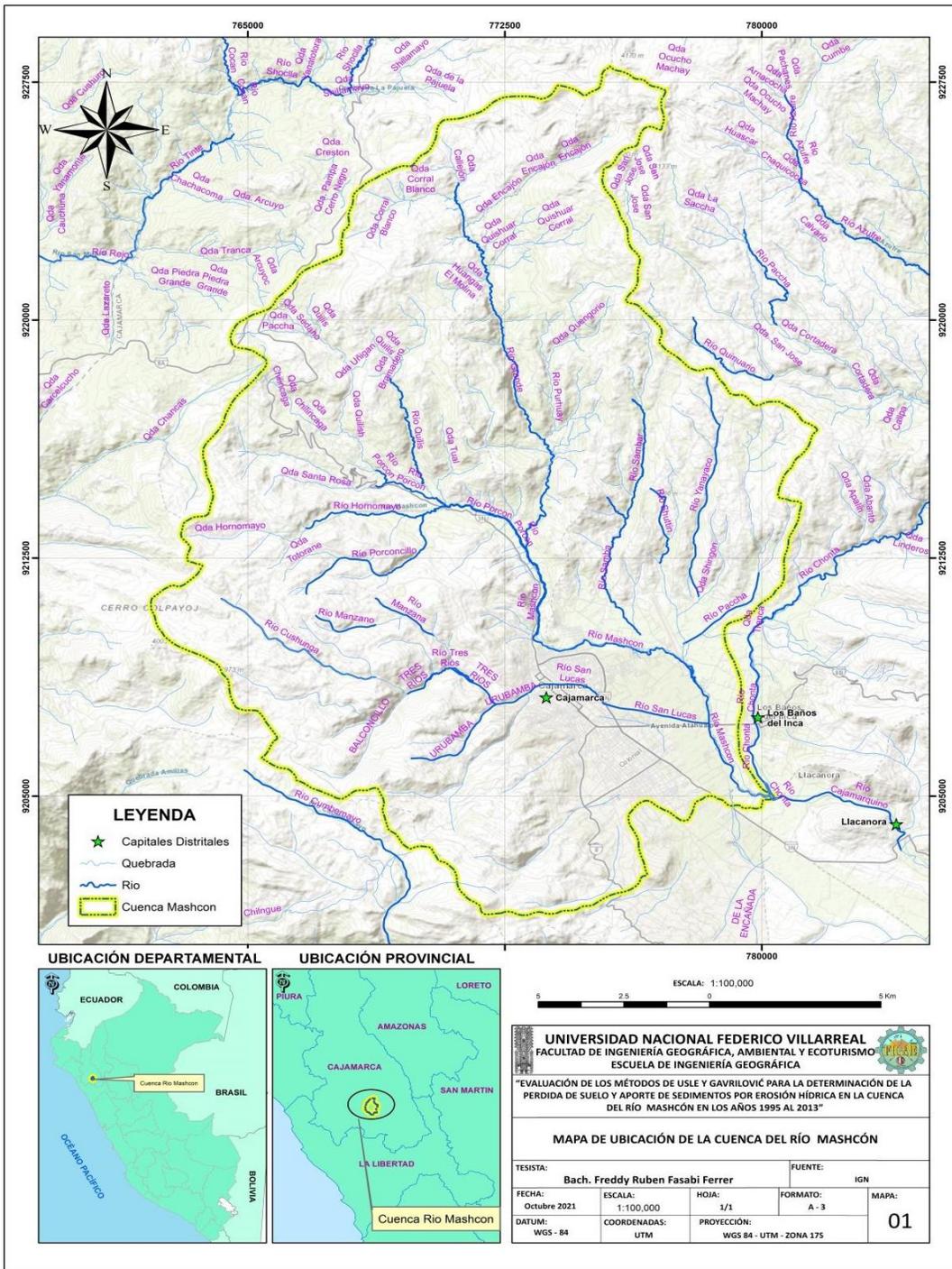
Políticamente la cuenca del río Mashcón pertenece al departamento y provincia de Cajamarca y se encuentra dentro los distritos de Cajamarca y Baños del Inca (Ver anexo A Figuras 33).

3.2.2 Ámbito Administrativo de los recursos hídricos

De acuerdo a la normatividad vigente, la cuenca del río Mashcón se encuentra en el ámbito de la Administración Local de Agua de Cajamarca, perteneciente a la Autoridad Administrativa del Agua VI Marañón, la cual depende funcional y administrativamente de la Autoridad Nacional del Agua ANA-MIDAGRI. (Ver Figura 5)

Figura 4

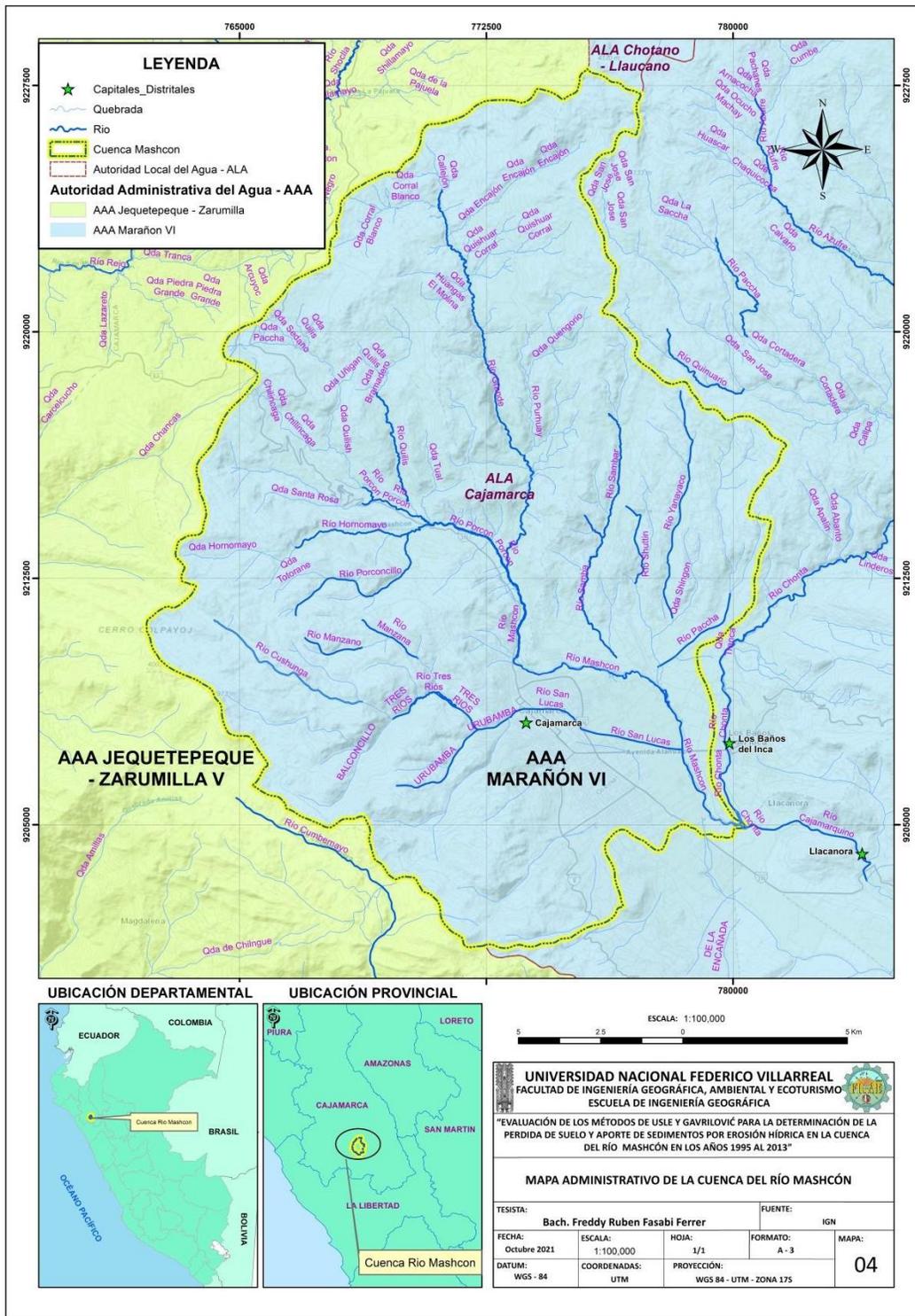
Ámbito Geográfico de la cuenca del río Mashcón



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5

Ámbito Administrativo de la cuenca del río Mashcón



Fuente: Elaboración Propia

3.3 Variables

Se han definido las siguientes variables dependientes e independientes conforme a las dimensiones de acuerdo al planteamiento del problema, los objetivos e hipótesis planteados en el presente trabajo.

3.3.1 Variable independiente

La variable independiente de la presente investigación constituye: “**métodos USLE y Gavrilović**”, cuyos indicadores presentan a continuación.

Tabla 14

Variable Independiente

Dimensiones	Indicadores
Método de cálculo	Ecuaciones empíricas de USLE y Gavrilović
	Estadísticas hidrológicas
	Cálculo de pérdida de suelo por los métodos de USLE y Gavrilović
Comparativa de los métodos	Fundamentos de métodos aplicados
	Disponibilidad de información
	Modelamiento de cálculo de pérdida de suelos
	Coefficiente de aporte de sedimentos en la cuenca
	Volumen de aporte de sedimentos en la cuenca
	Relación de erogación de sedimentos en el río principal
Eficacia de los métodos	Aproximación de resultados
	Resultados de otros estudios

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2 Variables Dependientes

La variable dependiente de la presente investigación constituye: **“Pérdida de suelo y su influencia en el aporte de sedimentos por erosión hídrica”**, cuyas dimensiones e indicadores presentan a continuación:

Tabla 15

Variables Dependientes

Dimensión	Indicadores	Unidades
	Pendiente	%
	Precipitación mensual y anual	Mm
Identificación de Zonas de Erosión Hídrica	Textura del suelo	% limo, arcilla, arena
	Cobertura vegetal	Adimensional
	Superficie de la cuenca	km ²
	Red hidrográfica	Km
	Precipitación mensual y anual	Mm
	Textura del suelo	% limo, arcilla, arena
Estimación de la tasa media anual de erosión de suelos - USLE	Contenido de materia orgánica	%
	Pendiente del terreno	grados
	Longitud entre el rango de pendientes	M
	Cobertura vegetal	Adimensional
	Prácticas de conservación	Adimensional
	Superficie de la cuenca	km ²
Estimación de la tasa media anual de aporte de sedimentos - Gavrilović	Precipitación media mensual y anual	Mm
	Temperatura media mensual	° C
	Características del suelo	Adimensional

Dimensión	Indicadores	Unidades
	Pendiente del terreno	%
	Cobertura vegetal	Adimensional
	Superficie de la cuenca	km ²
	Longitud total de la red hidrográfica	Km
	Altitud media de la cuenca	Km
	Perímetro de la cuenca	Km
	Superficie de la cuenca	km ²
	Pendiente del terreno	%
	Ancho del cauce	M
	Caudal	m ³ /s
Capacidad de transporte de sedimento según clase granulométrica	Diámetro representativo de la clase granulométrica i-esima	mm.
	Diámetro medio aritmético	mm.
	Fracción de la clase i-esima en el estrato de mezcla (textura)	%
	Erosión anual de suelos	t/ha/año
Volumen de sedimento	Superficie de la cuenca	km ²
	Pendiente media del curso principal de la cuenca	%

Fuente: Elaboración Propia

3.4 Población y muestra

Para este capítulo de la investigación, consideramos la población y la muestra, como uno solo, la razón que nuestra población es la cuenca del río Mashcón, que abarca un total de 312.06 km², y la muestra del estudio está siendo toda la cuenca de río Mashcón, donde la muestra se seleccionó por criterios estratégicos, en dicha cuenca presentan aspectos socioculturales, económicos, demográficos y recursos naturales para el desarrollo de la cuenca de río Mashcón.

3.5 Instrumentos

En la presente investigación no se realizó encuestas a la población, sin embargo, hubo reuniones con personal técnico de la AAA IV Marañón, se utilizaron como materia prima para esta investigación la obtención de la información cartográfica, datos meteorológicos y climáticos, como también equipos y software, como detallaremos a continuación:

3.5.1 Información Cartográfica

- ✓ Cartas Nacionales: 14f, 14g, 15f y 15g.
- ✓ Mapa base a escala 1: 25 000 con curvas de nivel, hidrografía y toponimia.
- ✓ Imágenes Raster proporcionadas por el Ministerio del Ambiente.
- ✓ Mapas en formato digital (Fisiografía, Geológico, Geomorfológico, Ecológico, Zona de Vida y Otros), de la base de datos de la Zonificación Económica y Ecológica de Cajamarca.
- ✓ Base de Datos AAA – VI Marañón (Autoridad Administrativa del Agua VI Marañón)

3.5.2 Datos meteorológicos y climatológicos

- ✓ Datos Meteorológicos y Climatológicos brindados por la el SENAMHI (precipitación y temperatura) para el período 1993 – 2013 y procesados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA)
- ✓ Datos Meteorológicos y Climatológicos brindados por la Empresa YANACOCHA S.R.L SENAMHI (precipitación y temperatura) para el período 1993 – 2013.

3.5.3 Equipos

- ✓ GPS Navegador – Garmin Oregón 550

- ✓ Laptop
- ✓ Cámara Fotográfica
- ✓ Calculadora

3.5.4 Software

- ✓ ArcGIS Desktop 10.5
- ✓ ArcGIS Online
- ✓ Microsoft Office

3.6 Procedimientos

El estudio se desarrolló en tres etapas de gabinete I, II y III, trabajándose en su totalidad con datos levantados por fuentes secundarias de información, los cuales fueron analizados y procesados estadística y cartográficamente. La presente propuesta no contempló la verificación de resultados en campo.

3.6.1 Etapa de Gabinete I: recopilación de datos e información

Recopilación de la información necesaria para el conocimiento previo de la cuenca. El requerimiento consta de información físico y digital de la cuenca (cartográfica y tabular) que permitan la caracterización general del área de estudio: climatología, suelos, geología, hidrografía, cobertura vegetal y uso actual entre otras.

3.6.1.1. Características Físicas y Topográficas

a) *Características morfométricas*. Para efectos del presente estudio son de importancia los siguientes aspectos morfométricos de la cuenca:

- Superficie: 312.06 km²
- Perímetro de 88.21 Km.
- Longitud del cauce principal (río Mashcón) 47.95 km
- Longitud total de los afluentes fluviales laterales: 239.93 km
- Altitud media en la cuenca 637 Km.

b) *Fisiografía*. La cuenca del río Mashcón se ubica en una región de zonas altoandinas, zonas bajoandinas y zonas mesoandinas del norte de la cordillera de Los Andes en Perú (ver Figura 6). La fisiografía presenta colinas altas y bajas como también con terrazas y montañas bajas. La forma del relieve se caracteriza por vertiente montañosa y colina moderadamente empinada, altiplanicie ondulada, vertiente allanada, vertiente montañosa moderadamente empinada, vertiente montañosa empinada a escarpada, fondo de valle y llanura aluvial y Vertiente montañosa fuertemente disectada.

La elevación del lugar varía, pero en promedio es de aproximadamente de 3500 msnm. Las cimas de los cerros Yanacocha y Rumi Guachac forman la divisoria continental entre las cuencas del Océano Pacífico y Atlántico. La divisoria tiende hacia el norte desde las colinas de Rumi Guachac y hacia el sudeste desde las colinas de Yanacocha

La cobertura vegetal de esta zona (andes noroccidentales) permanente todo el año es una característica importante de esta zona.

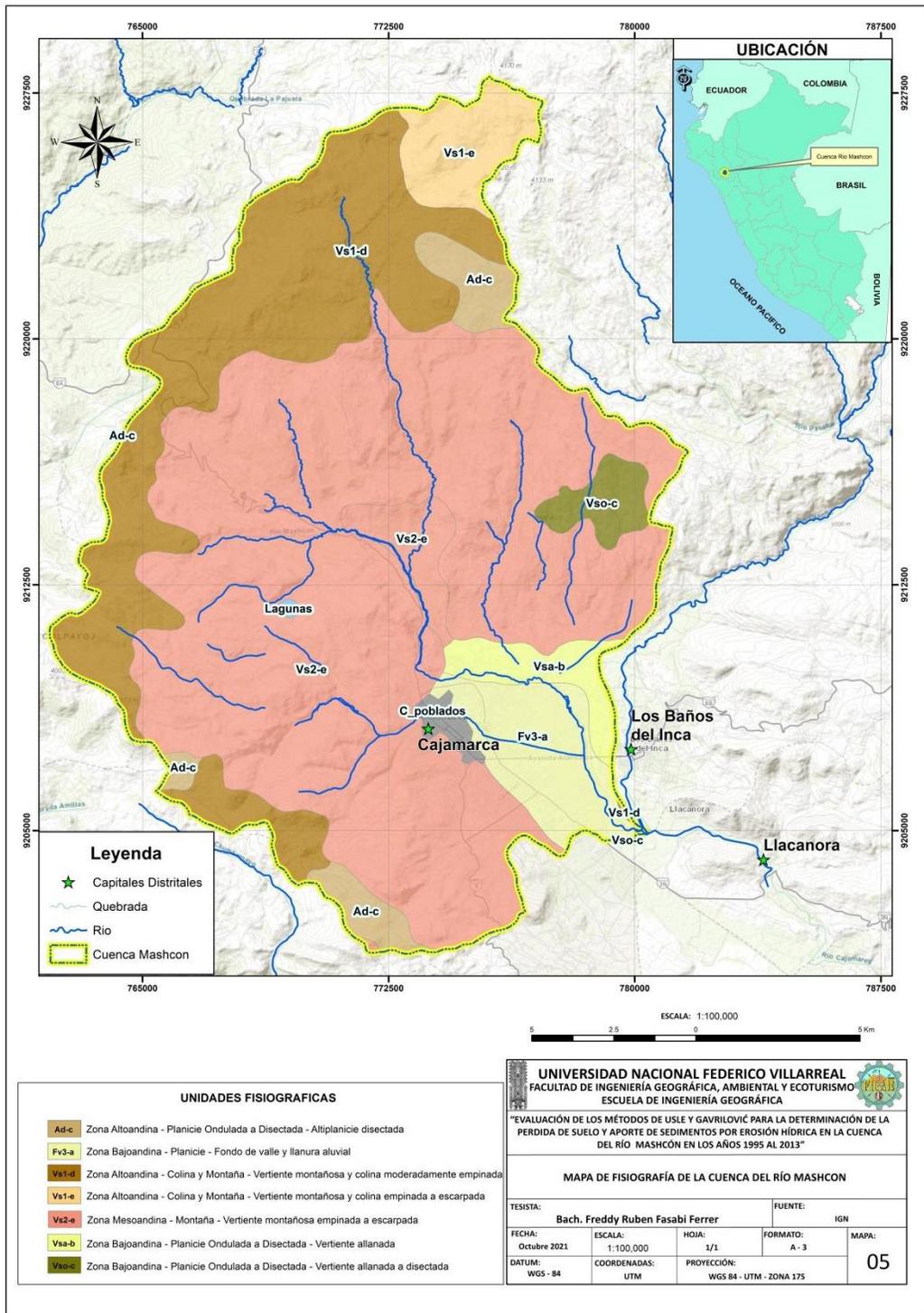
La zona presenta un paisaje fisiográfico muy heterogéneo, presentándose unidades fisiográficas que corresponden principalmente a los paisajes aluviales, lomadas y colinas, fluvio-glaciar y glaciar dominado por laderas (faldas de cerros) con abundantes afloramientos rocosos y zonas muy empinadas. Las pendientes varían desde casi a nivel hasta extremadamente empinadas (02% a más de 70%); los principales paisajes fisiográficos encontrados son:

Paisaje Aluvial. Son las zonas constituidas por depósitos aluviales del río Mashcón y de sus afluentes (quebradas y ríos). Esta zona está conformada por pequeños valles estrechos, de topografía suave y relieve generalmente plano. La mayor parte corresponde a aluviales recientes no inundables o con riesgos ocasionales de inundación; los suelos están formados por arena más limo y arcilla y en partes asociados a cantos rodados. De igual manera, en la desembocadura de los ríos y quebradas, se pueden observar pequeños abanicos aluviales que se componen de piedras, gravas y gravillas mezcladas con suelo.

Paisaje de Lomadas y Colinas. Este paisaje, por efecto de la erosión hídrica, se encuentra moderadamente a fuertemente accidentado. En este paisaje se encuentran unidades de lomadas y colinas bajas de pendientes suaves, colinas altas y cimas con presencia de cerros con laderas de pendientes empinadas a extremadamente empinadas, muy pedregosos y presencia de afloramientos rocosos de diferente litología; así mismo, encontramos laderas de depósitos coluviales constituidos por depósitos de material detrítico grueso acumulados, principalmente por gravedad, en la parte baja de los cerros.

Figura 6

Mapa de Fisiografía de la cuenca del río Mashcón



Fuente: elaboración propia

c) **Geomorfología.** La zona se encuentra dominada por un paisaje alto andino típico, con presencia de laderas, faldas de cerros, cimas, cerros, pendientes convexas, pendientes cóncavas, planicies, afloramientos rocosos y zonas muy escarpadas. La morfología de la zona es el resultado de la acción combinada de una intensa actividad volcánica, que ha sufrido los efectos de una significativa actividad glacial.

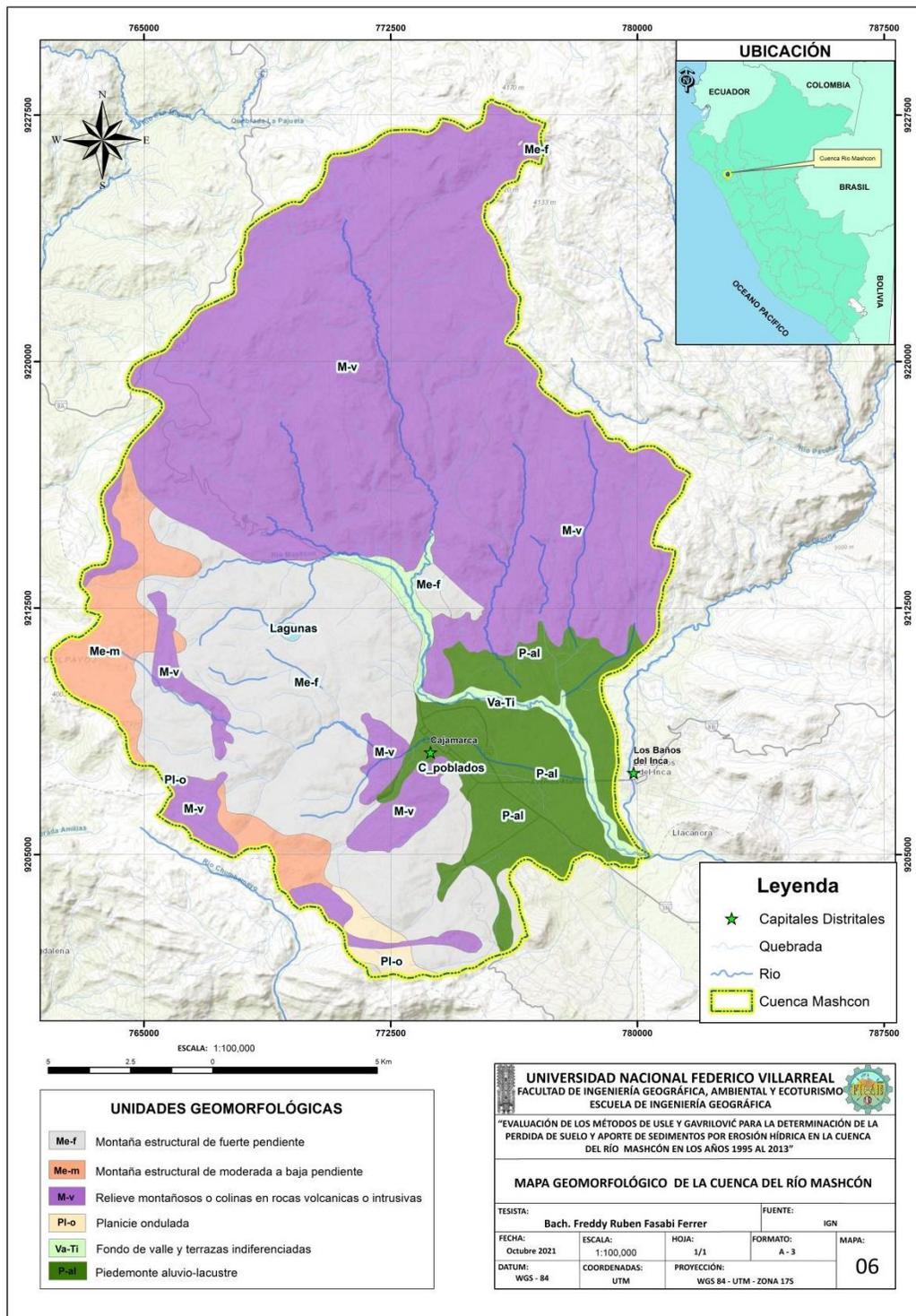
El área de la cuenca del río Mashcón, pertenece a la Cordillera Occidental de los Andes y en ella se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas:

Altiplanicie fuertemente inclinada en depósitos fluvioglaciares, Altiplanicie fuertemente inclinada en rocas del paleógeno, Altiplanicie moderadamente empinada en rocas del paleógeno, Complejo de terrazas inundable y no inundable, Ladera de montaña empinada en rocas del cretáceo inferior y superior, Ladera de montaña empinada en rocas del neógeno, Montaña empinada en rocas del cretáceo inferior y superior, Montaña empinada en rocas del cretáceo inferior y superior, Montaña fuertemente empinada en rocas del paleógeno, Montaña moderadamente empinada en rocas del neógeno y Terraza no inundable (ver figura 7).

El valle interandino de Cajamarca se caracteriza por estar controlado por factores estructurales ya que algunos tramos siguen fallas longitudinales o plegamientos paralelos.

Figura 7

Mapa de Geomorfología de la cuenca del río Mashcón



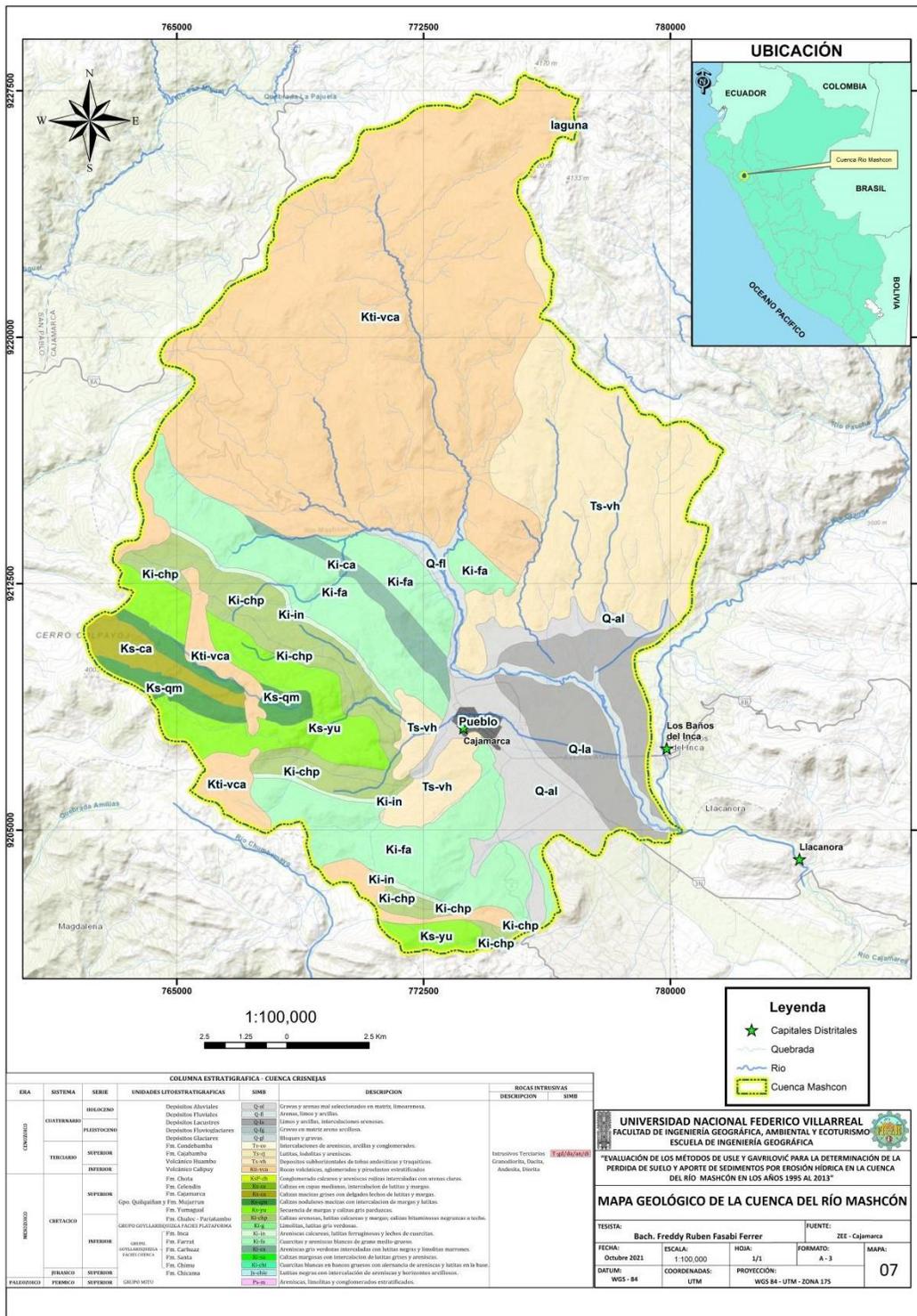
Fuente: elaboración propia

d) Geología. La geología del área de la microcuenca del río Grande objeto de este documento, consta de rocas volcánicas de la era terciaria que recubren un basamento cretáceo. Las rocas volcánicas terciarias incluyen piroclásticos, tobas volcánicas e intrusiones andesíticas que han sido clasificadas en cinco unidades principales: Intrusivos y Piroclásticos jóvenes, Andesita superior, Piroclásticos ricos en líticos, Piroclásticos principales y Andesita inferior. Estas unidades principales están dispuestas en capas horizontales, aunque existen fallas que causan desplazamientos.

Las rocas se caracterizan por ser alteradas, diferenciándose los tipos de alteración siguientes: roca silícea, argílica, argílica avanzada, propilítica, flujo de lodo, flujo de lodo-arcilla y ferricreta (ver figura 8).

La cuenca del río Mashcón forma parte de una cadena volcánica (Mioceno a plioceno) la cual se extiende desde Cajamarca a la frontera con Ecuador a unos 35 km. Al noroeste. Estas rocas han sido salificadas y mineralizadas por soluciones ricas en oro y periodos de lixiviación acida, actividad intrusiva ígnea y la extensión de la corteza. La mineralización de oro ocurre en las zonas de salificación, ruptura y alteración de alunita quarcítica, las que se formaron a su vez por alteraciones de tobas e ignimbritas. La existencia de varios volcánicos intrusivos más jóvenes de edad terciaria y que fueron instruidos después de eventos de flujo dómico principales.

Figura 8
Mapa de Geología de la cuenca del río Mashcón

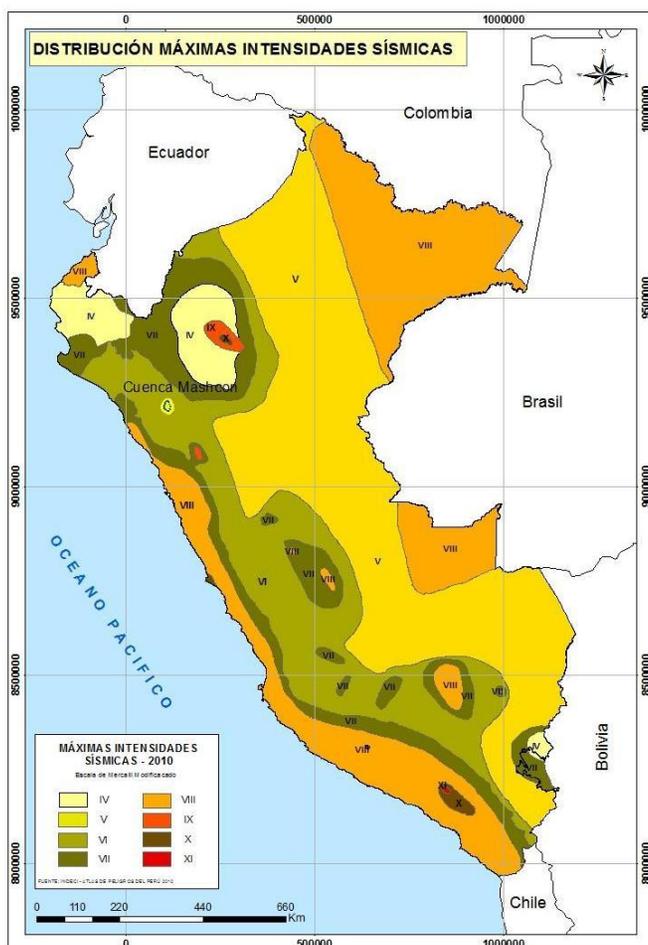


Fuente: elaboración propia

e) **Sismicidad.** El área está bajo la influencia de dos principales fuentes de eventos sísmicos: la zona de subducción entre la Placa Continental Sudamericana y la Placa de Nazca (conocida como el Plano Wadati-Beniof) y una serie de sistemas de fallas geológicas activas de la región, ubicadas en la “zona de influencia” (radio de 300 km) del área en estudio. Sin embargo, dentro de la “zona crítica” (radio de 100 km) del área estudiada, no se han reconocido fallas activas (Marchare y Rodríguez, 1991).

Figura 9

Distribución de Isointensidades sísmicas, escala Mercalli Modificada.



Fuente: Datos INDECI, CISMID.

f) **Suelos.** No se cuentan con estudios detallados de suelos en el área de estudio por lo que la caracterización de los suelos ha hecho a partir del trabajo mapa de suelos del mundo publicado por la FAO-UNESCO el cual fue digitalizado a escala 1: 5.000.000 y se encuentra en la proyección Geográfica (Latitud - Longitud). El mapa de suelos del mundo está disponible en el portal de suelos de la FAO junto con sus informes para las siguientes regiones: América del Norte, México y América Central, América del Sur, Europa, Asia, Asia del Sur, Norte y Asia Central, Asia Sudoriental y Australasia. Ver <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116>

Partiendo de dicho documento en el área de estudio se identificaron las siguientes grandes unidades de suelos a los que se ha agregado las características principales

Tabla 16

Unidades de suelos presentes en la cuenca, según mapa mundial de suelos de la FAO

Unidad de suelo	Arena %	Limo %	Arcilla %	Contenido de MO %	Clase textural	Características principales
Luvic Phaeozems	39.1	26.5	34.6	1.46	franco arcilloso (textura moderadamente fina)	Por lo general, los Phaeozems se forman sobre material parental básico de textura fina, materiales de reacción básica, blandos como los coluviones en condiciones relativamente estables. Presente en climas secos y las zonas templado-húmedas en superficies llanas u onduladas en regiones de cálidas a frías (por ejemplo, tierras altas tropicales).
						Suelos profundos, con una superficie muy oscura y enriquecimiento de carbonatos en el subsuelo, ricos en

Unidad de suelo	Arena %	Limo %	Arcilla %	Contenido de MO %	Clase textural	Características principales
						<p>materia orgánica lo que le confiere una elevada estabilidad estructural, porosidad y fertilidad (horizonte móllico).</p> <p>Posee una extraordinaria actividad biológica. La vegetación natural consiste de hierbas altas de estepa y/o bosque</p> <p>Suelos rojizos de las regiones de praderas/pasto con una alta saturación de bases (ricos en nutrientes)</p> <p>Los Phaeozems son suelos porosos, bien aireados con estructuras migajosas o de bloques, de moderados a fuertes, muy estables</p>
Lithosols (leptosol)	58.9	16.2	24.9	0.97	franco arcillo arenoso (textura moderadamente fina)	<p>Suelos de poco desarrollo, de no más de 10 cm de grosor, que descansa directamente sobre la roca madre o, incluso, la deja al descubierto.</p> <p>Consiste en fragmentos de rocas parcialmente meteorizadas, generalmente en pendientes pronunciadas.</p>

Fuente: modificado de la data del mapa mundial de suelos de la FAO

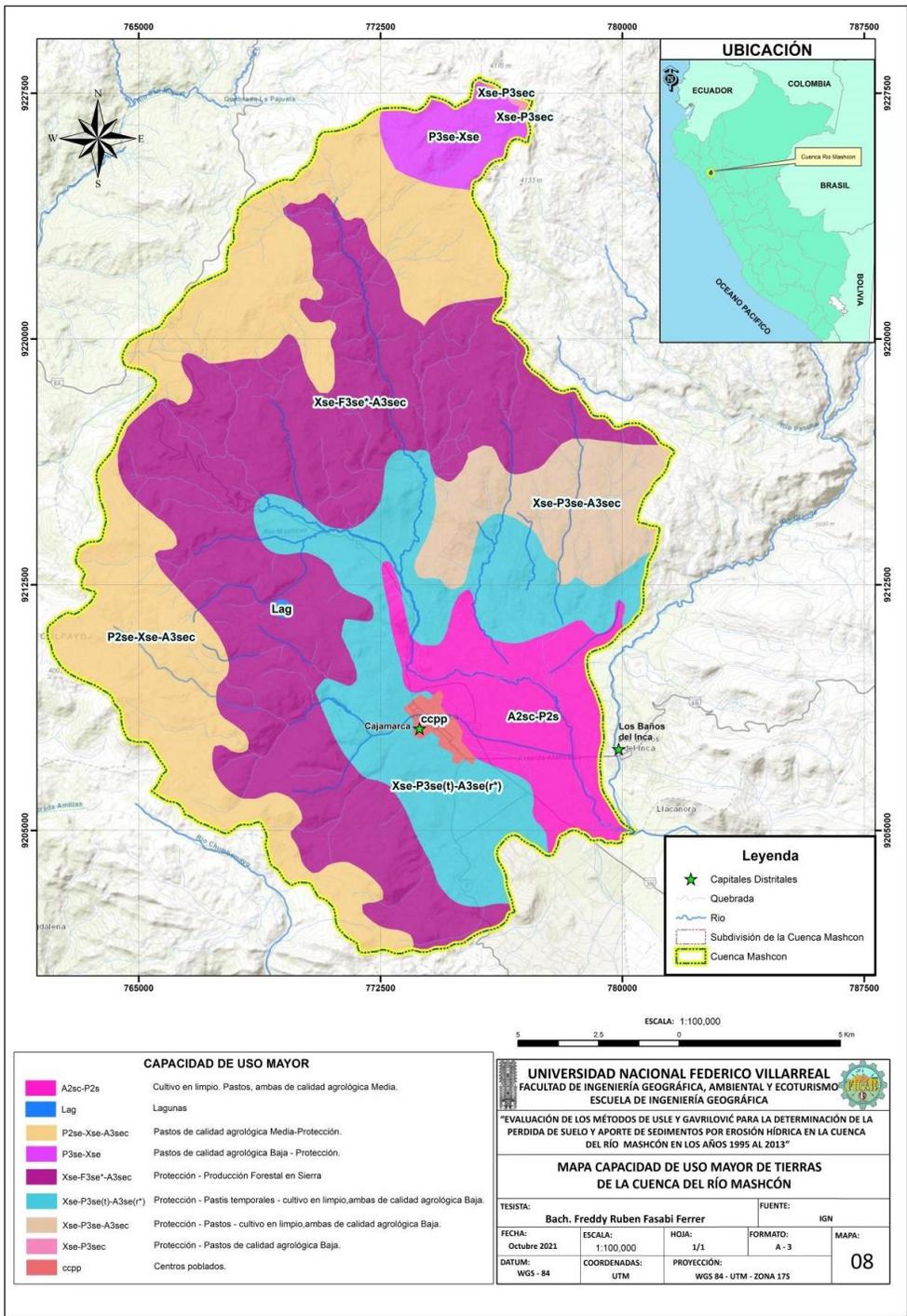
g) Capacidad de Uso Mayor de las Tierras. El área a ser ocupada por el Proyecto ocuparía Tierras Aptas para Pastoreo y Tierras de Protección. Las tierras aptas para pastos y en menor proporción para cultivos en limpio con calidad agrológica baja constituyen la superficie mayoritaria del total de área de la cuenca. Dichas zonas han sido explotadas mayoritariamente en función de su accesibilidad para usos pecuarios (ganadería vacuna y camélida).

El 10 % de la superficie de la cuenca corresponde a suelos aptos para pastos y cultivos en limpio. La calidad agrológica para dichos suelos es entre baja y media y su distribución es heterogénea, encontrándose mayor superficie en la cuenca alta y media, especialmente en zonas de llanura aluvial asociadas a los cursos fluviales principales. El resto de capacidades de uso mayor se distribuye en zonas de protección (aproximadamente un 9%) y áreas aptas para pastos con necesidad de riego (alrededor de un 4%) sin elevadas potencialidades de uso en la actualidad. Ver figura 10.

h) Uso de Suelos . A grandes rasgos, los usos actuales del suelo pueden dividirse en zonas húmedas, área agrícola, área de pradera/ arbustos, nevados y cuerpos de agua. En este sentido las zonas de praderas y arbustos constituyen el área mayoritaria de la cuenca (más del 85% del total de la superficie de la cuenca), dichas zonas se encuentran en la actualidad en uso para actividades agrarias y sobre todo pecuarias (vacuno y camélidos fundamentalmente). A mucha distancia le siguen las áreas agrícolas (alrededor del 10% sobre el total de la cuenca) ubicadas adyacentes a los cursos fluviales principales aprovechando zonas de llanura aluvial y finalmente zonas húmedas y sub-húmedas (alrededor del 5%). La cuenca Mashcón cuenta con un uso predominante “praderas/arbustos” que configura uno de los paisajes más característicos del departamento de Cajamarca, los prados verdes, que permiten una ganadería extensiva y una elevada producción de lácteos y sus derivados. Atendiendo a esta clasificación, la distribución de dichos usos se representa en la figura 11.

Figura 10

Mapa de Capacidad de Uso Mayor de Tierras de la cuenca del río Mashcón



Fuente: elaboración propia

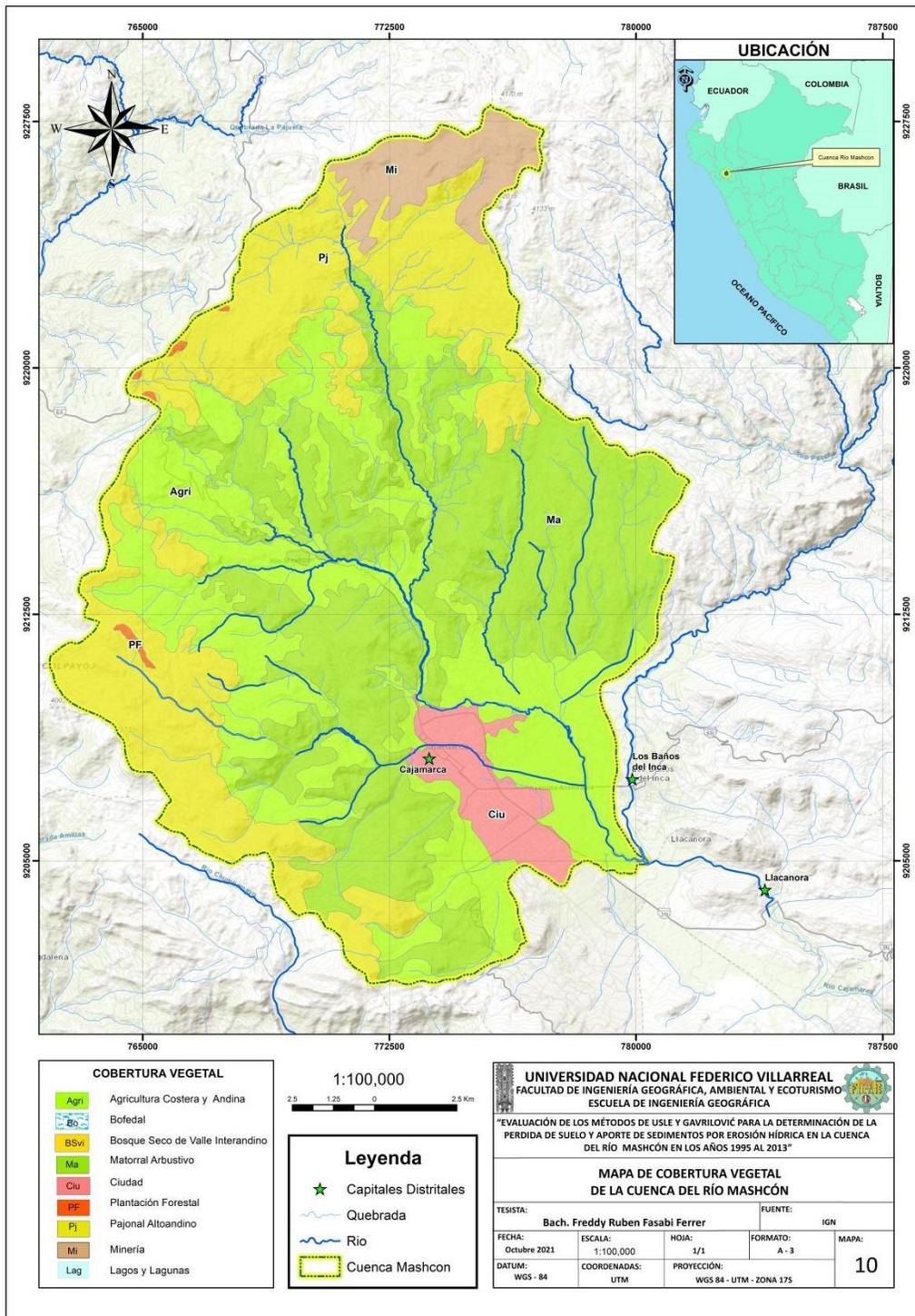
- i) Cobertura Vegetal.* En la cuenca Mashcón, parte del territorio está cubierto por zonas boscosas. Se ha prestado especial atención a las zonas agrícolas, ya que estas son las más propicias a ser modificadas o ampliadas. Ver figura 12.
- j) Uso Actual de la Tierras.* El área de la cuenca del río Mashcón se compone mayoritariamente de terrenos que ya fueron intervenidos previamente por la minería u otras actividades antropogénicas (mayoría) y otras con pastos naturales y/o desnudos (minoría).

En los suelos de la Jalca son muy escasas las áreas ocupadas con cultivos alimenticios. La mayor extensión (aproximadamente 65 %) están ocupadas por pastos naturales como el ichu, en menor número son terrenos desnudos con afloramientos rocosos (32 %), eriazos con vegetación (2 %) y terrenos en descanso, lagunas y pantanos (1 %).

La cuenca del río Mashcón se encuentra en la zona donde las actividades económicas predominantes son la minería y la ganadería, así como la presencia de un mayor desarrollo de las actividades de servicios y comercio muy relacionada a la actividad minera. Según la capacidad de uso mayor de las tierras de la cuenca han sido categorizadas como aptas para pastoreo y tierras de protección con proporciones menores para cultivos en limpio.

Figura 12

Mapa de Cobertura Vegetal de la cuenca del río Mashcón



Fuente: elaboración propia

3.6.1.2. Climatología. La información climatológica empleada en el presente estudio ha sido proporcionada, en primer lugar, por la ANA y el SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú) y, en segundo lugar, por la empresa Minera Yanacocha (MYSRL) la cual ha proporcionado registros de cuatro estaciones meteorológicas en el área de estudio. Así, se dispone de un conjunto de series climáticas temporales de periodicidad diaria asociadas a diferentes variables climáticas, registradas en las estaciones meteorológicas ubicadas en el interior o en la proximidad de la zona de estudio. A partir de dicha información se han realizado los tratamientos necesarios para su depuración y conversión a periodicidad mensual, la escala temporal que se empleará para la realización del estudio de recursos. Las estaciones recopiladas se presentan en la Figura 13.

a) Precipitación pluvial. La precipitación promedio total anual varía entre 1,250 mm en las partes altas hasta 500 mm en las bajas; en todas las altitudes, el régimen de lluvias a lo largo del año presenta un período lluvioso de octubre a abril con un decaimiento leve en noviembre y diciembre y otro, de escasa precipitación entre los meses de mayo a septiembre, que alcanza sus niveles más bajos de junio a agosto, donde se registran valores inferiores a 10 mm/mes.

b) Temperatura

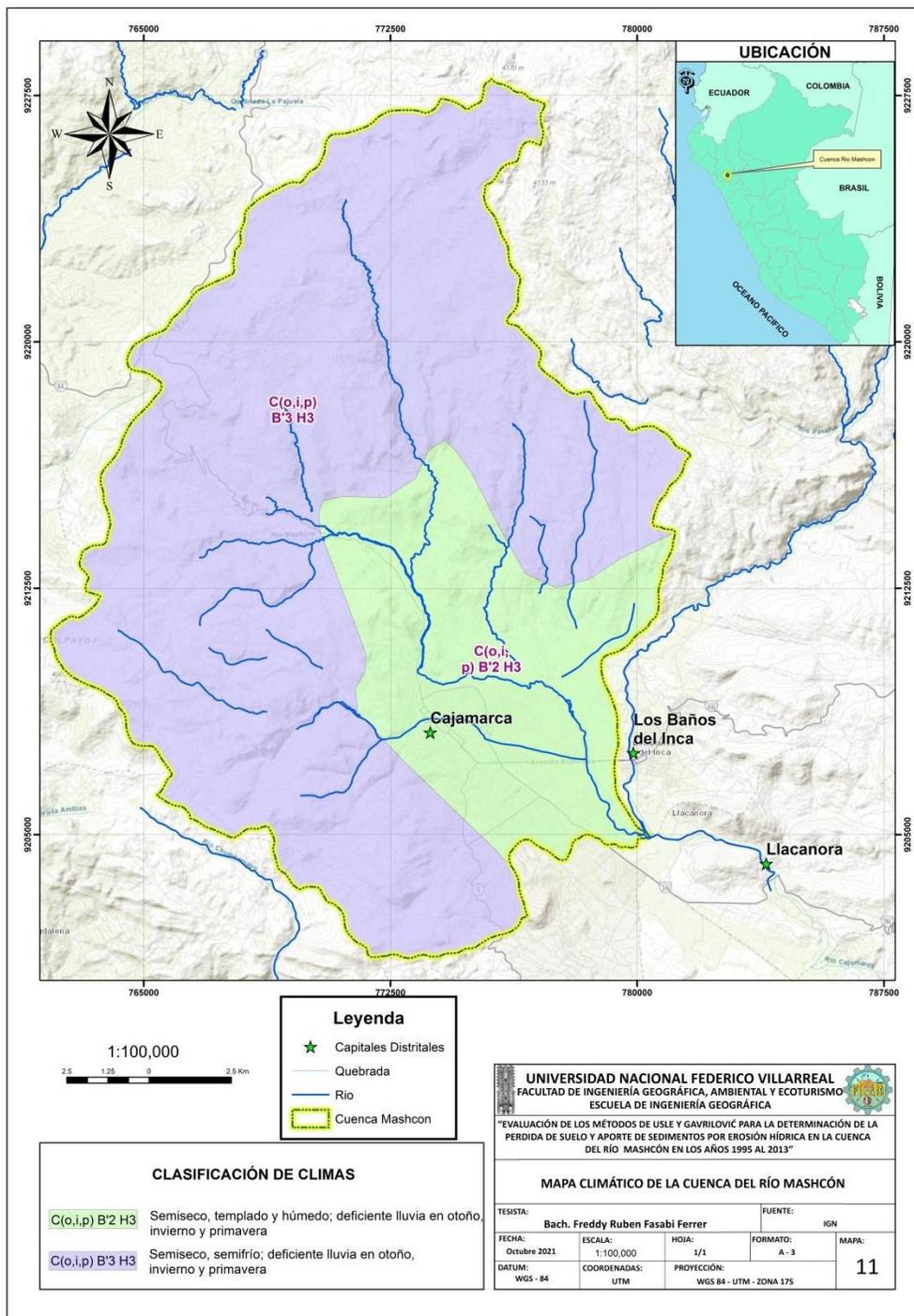
. En las partes altas, la temperatura máxima media mensual oscila entre 15.7°C y 19.3°C, valores que corresponden a los meses de marzo y enero, respectivamente, mientras que la

temperatura mínima media mensual, se encuentran entre -1.2°C y 1.6°C , para los meses de agosto y marzo, respectivamente; en las partes bajas, la temperatura máxima media mensual oscila entre 20.9°C y 21.9°C , valores que corresponden a los meses de marzo y setiembre, respectivamente, mientras que la temperatura mínima media mensual se encuentran entre 4.6°C y 9.3°C , para los meses de julio y febrero, respectivamente.

- c) Humedad relativa.* En las zonas altas de las cuencas, la humedad relativa varía entre un máximo de 85.8% registrado en el mes de marzo, hasta un mínimo de 63% medido en el mes de julio, mientras que, en las partes bajas, este parámetro meteorológico varía entre 74.6% y ocurre en marzo, mientras el menor valor ocurre en el mes julio, cuando los instrumentos han registrado una humedad de 62.7%.
- d) Horas de sol.* De esta variable meteorológica, sólo se tiene información referida a la parte baja de las cuencas y del valle del Cajamarquino, donde se reporta que a nivel total mensual el menor valor medido es de 4.7 horas y ocurre en el mes de marzo, mientras que el mayor valor ocurre en el mes de julio y es de 7.4 horas.
- e) Radiación solar.* En relación a esta variable, sólo se cuenta con información tomada en las partes bajas de la cuenca y el valle del Cajamarquino, donde a nivel total mensual, se reporta un menor valor de 16.4 (MJ/m²/d) medido en el mes de mayo, mientras que el mayor valor es de 19.0 (MJ/m²/d), ocurrido en el mes de noviembre.

Figura 13

Mapa de clima en la cuenca del río Mashcón



Fuente: elaboración propia

3.6.1.3. Características Biológicas

a) Flora. En el área de la cuenca del río Mashcón se ha identificado la presencia de vegetación con fisonomía del tipo Pajonal, la que se encuentra parcialmente intervenida y fragmentada debido a las actividades antropogénico pasadas, no habiendo zonas reforestadas o revegetadas, con excepción del depósito de suelos superficiales Ornamo. El área se caracteriza por ser un Pajonal de gramíneas y arbustos dispersos, parecidas al pajonal de Jalca, pero con menor número de especies de la familia Poaceae, con hojas filiformes y rígidas y con arbustos dispersos que sobrepasan un metro de altura.

Algunas de las especies encontradas en esta zona fueron: *Pitcairnia* sp., *Calceolaria percaespitosa*, *Miconia salicifolia*, *bejaria* sp., *Citharexylum pachyphyllum*, *Salpichroa* sp. y *Nicotiana thyrsoiflora*.

b) Fauna. La fauna en el área de la microcuenca del río Grande, debido a la elevada altitud, es escasa pero altamente adaptada morfológica y etológicamente y difiere de la fauna de las partes Central y Sur de los Andes peruanos.

Respecto a la fauna, en total se registraron 30 especies de fauna en toda la microcuenca del río Grande, de las cuales más del 70 % estuvieron representados por aves. El orden Paseriformes fue el de mayor riqueza con 14 especies, entre las cuales destacan las especies *Zonotrichia capensis* (gorrión americano), *Catamenia anales* (semillerito colifajeado) y *Tbraupis bonariensis* (tangara azulamarillo), todas especies poco comunes o raras de observar. Ninguna de las especies registradas se encuentra en categoría de conservación.

3.6.1.4. Ubicación de las estaciones meteorológicas

Ubicación de las estaciones meteorológicas dentro del área de estudio, identificación y selección de las estaciones representativas para efectos del presente estudio y la obtención de datos de registros para precipitación y temperatura existentes en estas para el período analizado, 1995 – 2013.

Para este estudio se consideró 3 estaciones meteorológicas, de acuerdo a su análisis de precipitación anual y la correlación lineal de cada estación. Donde tenemos una de la Empresa Minera Yanacocha S.R.L. y dos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

Tabla 17

Estaciones meteorológicas seleccionadas en el área de estudio y zonas adyacentes

Estación	Propiedad	Coordenadas UTM		Altitud (m.s.n.m.)	Período en años
		WGS 84 Sur	Zona 17 Este Norte		
Maqui Maqui ²	MYSRL	779762	9228517	4240	1995 – 2013
Granja Porcón ¹	SENAMHI	762191	9221840	3206	1995 – 2013
A. Weberbauer ¹	SENAMHI	776115	9207072	2660	1995 – 2013

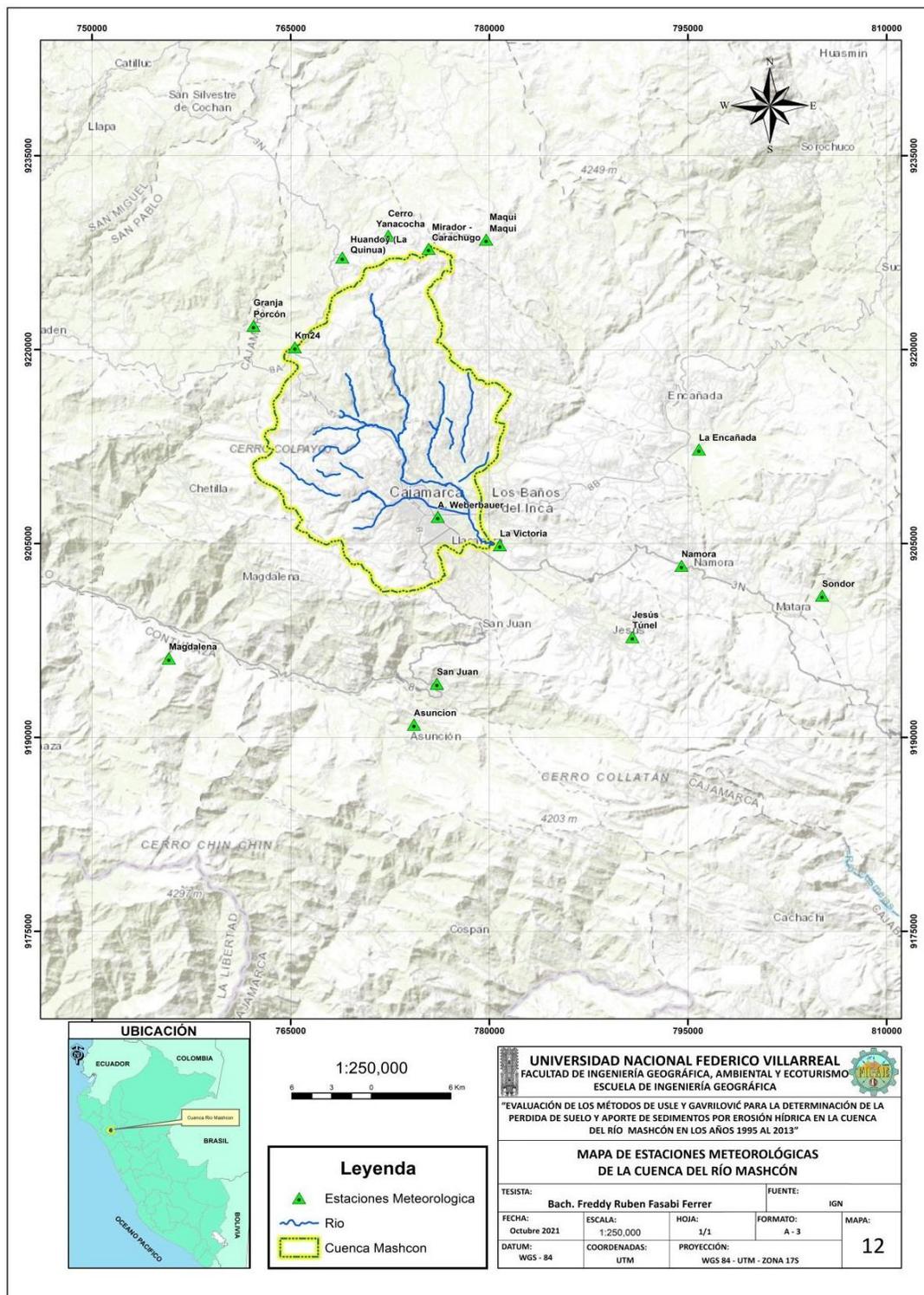
Fuente: elaboración propia

(1) SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

(2) MYSRL: Empresa Minera Yanacocha S.R.L.

Figura 14

Mapa de Estaciones meteorológicas de influencia en la cuenca del río Mashcón



Fuente: elaboración propia

3.6.2 Etapa de Gabinete II: Revisión bibliográfica

A. Estimación de la erosión hídrica aplicando la ecuación universal de pérdida de suelos – USLE

Se aplicó la metodología de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos, EUPS, o por sus siglas en inglés USLE (Universal Soil Loss Equation) desarrollada a través de la ecuación 1.

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

Para cada uno de los factores de la ecuación se generará un mapa digital en formato raster para la posterior determinación de las zonas de erosión en la cuenca.

1. Cálculo del factor de erosividad R. Para la determinación del factor R se aplicó la metodología del Índice Modificado de Fournier (Arnoldus, 1978), mediante la ecuación 10

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{pi^2}{Pt} \quad (10)$$

Para ellos se tomaron los datos de precipitación media mensual y anual para las estaciones seleccionadas: Alfredo Weberbauer, Granja Porcón y Maqui Maqui. Ver tabla 17.

El cálculo del IFM debe hacerse para cada mes de cada año de la serie y luego se calcula el promedio de esta.

Como método de ajuste de regresión entre el IMF y el factor R calculado por el método USLE y el correspondiente IMF se utilizó el método propuesto por Arnoldus en 1978 expresado en la ecuación 11.

$$R = 0.264 * IMF^{1.5} \quad (11)$$

Los valores del factor R total anual obtenidos se muestran en la tabla 21

2. **Cálculo del factor de erodabilidad K.** En el caso que nos ocupa no se tienen muestras de suelos recabados en campo por lo que se utilizará un mapa en formato digital existente y validado, como lo es el mapa de suelos del mundo publicado por la FAO en el año 2003 y su respectiva caracterización, desde el que se han extraído las unidades de suelo correspondiente al área de estudio y sus respectivos valores físicos como lo son porcentaje de arena, porcentaje de arcilla, porcentaje de limo y contenido de materia orgánica. Ver tabla 22.

La metodología a utilizar fue propuesta por Williams (1995) que considera las propiedades físicas del suelo antes mencionadas mediante la ecuación 15.

$$K = 0,1317 * fcsand * fcl - si * forgc * fhisand \quad (15)$$

Los factores relacionados con el contenido de arena (*fcsand*), contenido de limo (*fcl - si*), contenido de carbono orgánico (*forgc*) y el factor de corrección de K para suelos con

un contenido de arena extremadamente alto (*fhisand*) se calculan por separado aplicando las ecuaciones 16, 17, 18 y 19 respectivamente.

$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right)$	(16)
$f_{cl-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$	(17)
$f_{orgc} = \left[1 - \frac{0.25orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95orgC]} \right]$	(18)
$f_{hisand} = \left[1 - \frac{0.70 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 \left(1 + \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right]$	(19)

Los resultados obtenidos para el factor K en el área de estudio se muestran en la tabla 22.

En la capa digital de polígonos de tipos de suelos del área de estudio se agregan en la tabla de atributos los valores del factor K y posteriormente se crea el mapa en formato raster de factor K.

3. **Cálculo del factor de la longitud y grado de inclinación de la pendiente (LS).** Para la determinación de los factores L y S requerimos del mapa digital de pendiente en grados, el cual es generado a partir del modelo digital del terreno (DEM) de la cuenca con resolución espacial de 30 m. Este mismo DEM servirá para el cálculo del parámetro de acumulación de flujo (*flow direction*), necesario para los cálculos con herramienta SIG. Ver Figura 33 del anexo D.

Cálculo de L: Para determinar los valores de L utilizando la herramienta GIS raster calculator de ArcMap aplicando fórmula planteada por Desmet y Govers, (1996) citados por Velásquez (2008) a través de la ecuación 24.

$$L_{ij} = \frac{[A_{ij} + D^2]^{m+1} - A_{ij}^{m+1}}{X^m * D^{m+2} (22.13)^m} \quad (24)$$

Los raster generados tienen un tamaño de píxel de 30 x 30. m.

Cálculo de S: para el cálculo de la inclinación de la pendiente se aplican las fórmulas propuestas por Wischmeier, (1982) a través de las ecuaciones 25 y 26 a través de la herramienta raster calculator de ArcMap

$$S = 10.8 * \sin \beta + 0.03 \quad \text{Sí: } s < 9\% \quad (25)$$

$$S = 16.8 * \sin \beta - 0.5 \quad \text{Si: } s \geq 9\% \quad (26)$$

4. *Asignación de los valores del factor C según la cobertura vegetal.* Para la determinación del factor C se analizan las clases de coberturas vegetales presentes en la zona según el de Zonificación Económica y Ecológica de Cajamarca. A esta capa de información digital de tipo polígono se le asignan los valores de C que correspondan al equivalente en la tabla de valores propuestos para la metodología por Wischmeier y Smith, (1978), donde se definen los valores de C para los tipos más comunes de cultivos y coberturas. Ver tabla 7.

La clasificación de la cobertura vegetal presentes en la zona y sus respectivos valores de C se muestran en la tabla 26.

5. **Determinación del factor P.** Se asumió un valor del factor P igual a 1.0 al no haber verificado en campo la aplicación de prácticas de conservación de suelos en la cuenca.

6. **Determinación de la tasa de pérdida de suelos (A t/ha/año).** Finalmente, se procedió a la aplicación de la ecuación USLE, ecuación 1, mediante la superposición de mapas con la herramienta álgebra de mapas del ArcMap, obteniéndose el mapa de las áreas de erosión y su clasificación como se muestra en la tabla 27.

7. **Análisis para la estimación de sedimentos.** Este análisis consiste en el cálculo de relación de erogación de sedimentos (SDR) con base a la producción bruta de sedimentos de la cuenca según el método USLE utilizando las ecuaciones 39, 40 y 41

$SY = SDR * A$	(39)
$SDR = 0.47 * F^{-0.125}$	(40)
$SDR = 0.566 * F^{-0.11}$	(41)

B. Estimación de la tasa sedimentos por erosión superficial en la cuenca mediante la ecuación de Gavrilović

La descarga media anual de material erosionado se calculó a través de la ecuación 30.

$$G = W * R \quad (30)$$

Donde G es el volumen de sedimentos producidos en la cuenca (m³/año), W es la producción media anual de sedimento bruto por erosión hídrica (m³/año) y R es el coeficiente de retención. Cada uno de los factores de la ecuación se calculan de manera independiente de acuerdo a las expresiones desarrolladas por el autor y a partir de los resultados se genera un mapa digital en formato raster para la posterior determinación de las zonas de erosión en la cuenca.

1. Cálculo de la producción media anual de sedimento bruto por erosión (m³/año)

W

$$W = T . h . \pi . Z^{\frac{3}{2}} . F \quad (31)$$

$$T = \left[\frac{tm}{10} + 0.1 \right]^{1/2} \quad (32)$$

$$Z = X . Y . (\phi + I^{\frac{1}{2}}) \quad (33)$$

Teniendo en cuenta la distribución espacial en la cuenca de las variables intervinientes en el cálculo y el uso de la herramienta SIG, se utilizarán capas de datos en formato raster que permitirán la realización de operaciones matemáticas entre estas,

operando celda por celda. Para el mapa de la tasa anual promedio de producción de sedimento por erosión superficial o tasa de erosión superficial potencial específica de la cuenca, se adoptó un tamaño de celda de 30 x 30 m.

1. Aplicación de la ecuación 32 para el cálculo del coeficiente de temperatura (T) a partir de los registros de temperatura media anual durante el período de 19 años (1993 – 2013) de las estaciones seleccionadas. Ver tabla 17.
2. Aplicación de la ecuación 33 para el cálculo del coeficiente de erosión (Z). Para ello se subdivide el proceso en las siguientes tareas:
 - ✓ Asignación de los valores de la cuantificación del coeficiente de vegetación (X), ello se realizó en función de la capa de cobertura vegetal y uso del suelo, asignando a cada polígono, según su clasificación, el valor correspondiente establecido en la metodología y señalados en la tabla 8.
 - ✓ Asignación del coeficiente de resistencia a la erosión (Y) para lo cual se utilizó la capa de unidades geológicas, definiendo y asignando a cada polígono, según su clasificación, los valores de resistencia a la erosión de acuerdo a los valores propuestos en la metodología, estos se muestran en la tabla 9.
 - ✓ Asignación del valor del coeficiente correspondiente al tipo de proceso erosivo observado (ϕ). Para definir el valor del se toma como referencia el análisis de los procesos erosivos existentes, identificados bien a través de imágenes de sensores remotos o a partir de los resultados del método USLE.
3. Determinación del gradiente de pendiente de la cuenca I

Los valores del parámetro de pendiente en % se encuentran plasmados en el mapa digital de pendiente generado a partir del modelo digital del terreno (DEM) de la cuenca y se aprecia en la Figura 33 del anexo D.

4. Cálculo del coeficiente de retención R aplicando la ecuación 34 a partir de los datos morfométricos de la cuenca (ver tabla 35)

$$R = \frac{(L + Li) * (\sqrt{O * D})}{(L + 10)F} \quad (34)$$

3.6.3 Etapa de Gabinete III:

3.6.3.1. Proceso con análisis espacial

Esta etapa del proceso consiste en la identificación de áreas de erosión hídrica mediante los índices de erosión obtenidos en la etapa II y la utilización de las herramientas SIG. Contempla la generación de las capas digitales en formato raster, la integración y la elaboración de mapas temáticos de erosión potencial y erosión actual en el área de estudio, en los que se representan los polígonos homogéneos producto de la superposición de las capas de información digital (feature class) utilizando el software ArcGIS.

Las capas temáticas involucradas requieren de un tratamiento de análisis y edición y adecuación a la información base. Uno de los principales objetivos es estandarizar la escala de trabajo, así como la de generar los archivos en formato raster que contienen los valores de los factores involucrados en cada una de las ecuaciones de estimación de erosión hídrica.

Las capas temáticas integradas fueron:

- **Capa de Isotermas:** para la determinación del coeficiente de temperatura T (método Gavrilović).

- **Capa de Isoyetas:** para la determinación del factor de erosividad R (USLE) y rangos de precipitaciones media y total (método Gavrilović).
- **Capa de Suelos:** para la determinación del factor de erodabilidad K de la USLE y coeficiente de coeficiente de resistencia a la erosión Y del método Gavrilović.
- **Capa de Pendientes:** para la determinación de los factores longitud y grado de la pendiente LS para la ecuación USLE y coeficiente I del método Gavrilović.
- **Capa de Cobertura Vegetal:** para la determinación del factor C de la USLE y el coeficiente de vegetación X del método Gavrilović

Los mapas en formato Raster creados tienen un tamaño de píxel de 30 m por 30 m y la integración de estas se realizó a través de la superposición de mapas con la utilización de los algoritmos a través de la herramienta de álgebra de mapas “raster calculator”.

Los pasos se detallan a continuación:

1. Elaboración y edición de las capas, ajustando los límites espaciales de las unidades tomando como referencia el mapa topográfico y el polígono de la cuenca. Incluyen procesos de generalización o simplificación de polígonos a conveniencia.
2. Codificación de los polígonos de las capas corregidas. Consiste en asignar los valores para cada uno de los factores calculados.

Este proceso también se aplica como para los mapas finales de erosión potencial y erosión actual resultantes de acuerdo a una clasificación establecida.

3. Generación de las zonas de erosión mediante la superposición de las capas corregidas de cada factor (R, K, LS, C), para la obtención de la tasa de pérdida anual de suelo según la USLE, (t/ha/año) promedio y bruta para la cuenca a través

de operación de álgebra de mapas, multiplicando las capas raster correspondiente a cada uno de los factores de la ecuación USLE, mediante la ecuación 1.

Los resultados se muestran en la tabla 31.

4. Generación de las áreas de erosión mediante la superposición de los mapas de capas corregidas de cada factor: humedad (precipitación) coeficiente de temperatura (T), coeficiente de resistencia a la erosión (Z), coeficiente de vegetación (X), coeficiente de erosión (Z) y pendiente del terreno en % para la estimación de la tasa de sedimentos por erosión superficial en la cuenca mediante la ecuación de Gavrilović, ecuación 31.
5. Cálculo de la producción media anual de sedimentos (W) (m³/ año) según el método de Gavrilović utilizando el álgebra de mapas en el SIG utilizando la ecuación 31.
6. Cálculo del coeficiente de retención de sedimentos (R) en función de datos morfométricos de la cuenca (ver tabla 35) a través ecuación 34.
7. Cálculo de relación de erogación de sedimentos (SDR) con base a la producción bruta de sedimentos de la cuenca según el método USLE utilizando las ecuaciones 35, 36 y 37.
8. Estimación de la tasa de entrega de sedimentos 36.

3.7 Análisis de datos

Para este capítulo realizamos el análisis de datos mediante el software de Microsoft Excel, mediante su hoja de cálculos fueron fundamentales para realizar el análisis de datos de registros climatológicos de precipitación y temperatura, existentes en las estaciones seleccionadas, donde se realizaron las siguientes acciones:

1. Se tomaron los registros de precipitación mensual procesados (consistenciada y extendida de ser el caso) por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en su trabajo de Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca del Crisnejas realizada en el año 2015 y los registros de precipitación mensual suministrados por la empresa Minera Yanacocha S.R.L., para las estaciones seleccionadas, especificadas en la tabla 17.
2. A partir de los datos diarios de precipitación y temperatura se calcularon los valores de precipitación acumulada diaria, precipitación media mensual y anual (mm). Los valores de precipitación y temperatura media interanual se calcularon sumando los valores de precipitación media mensual de cada uno de los años de la serie de datos y dividido entre el número de la serie, 19 años. Los valores de precipitación y temperatura media interanual se muestran en las tablas 19 y 29.

3.8 Consideraciones éticas

Para esta investigación como tesista e investigador indico que hay compromiso como futuro profesional, brindar todos los resultados con total versatilidad, la calidad, objetividad y validación del trabajo de investigación, no se presentara copia alguna de otros estudios de investigación, del mismo modo duplicidad en información, se demostrara en el presente estudio autenticidad y presentación de forma original.

IV. RESULTADOS

4.1. Evaluación de los métodos USLE y Gavrilović en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos

4.1.1. Estimación de la erosión hídrica aplicando la ecuación universal de pérdida de suelos

– *USLE*

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

Donde:

A = Es la pérdida de suelos calculada por unidad de superficie, expresada en las unidades seleccionadas para K y el período seleccionado para R, generalmente en toneladas (t) hectárea (ha) -1 año.

R = Erosividad de la lluvia medido en MJ*cm/ha*h

K = Erodabilidad del suelo expresado en t*ha*h/MJ*ha*mm

L = Longitud de la pendiente en metros.

S = Pendiente en m/m

C = Cubierta vegetal y manejo del recurso, sin unidades de medida.

P = Prácticas de conservación aplicada, sin unidades de medida.

4.1.1.1. Cálculo del factor de erosividad R.

$$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{pi^2}{Pt} \quad (10)$$

Donde:

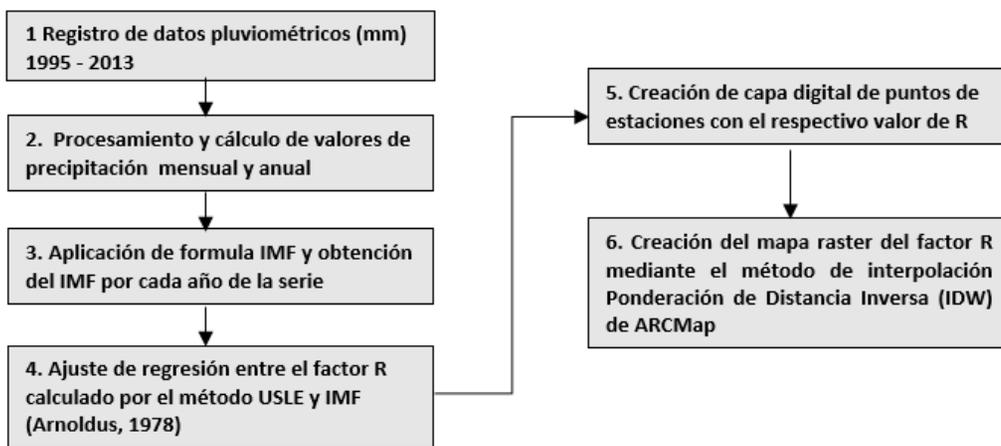
E = la energía cinética (E) representa el trabajo por golpeo y salpicadura de la gota de lluvia caídas sobre la superficie del suelo, obtuvieron una alta correlación entre la intensidad de las lluvias y su energía.

EI_{30} = máxima intensidad en 30 minutos: Indican que cuando el valor de energía de la lluvia, es multiplicada por la máxima intensidad de las lluvias con duración de 30 minutos, se obtienen altas correlaciones con las pérdidas de suelo.

$$R = 0.264 * IMF^{1.5} \quad (11)$$

Figura 15

Proceso para la obtención del mapa de erosividad de la lluvia (R)



Fuente: elaboración propia

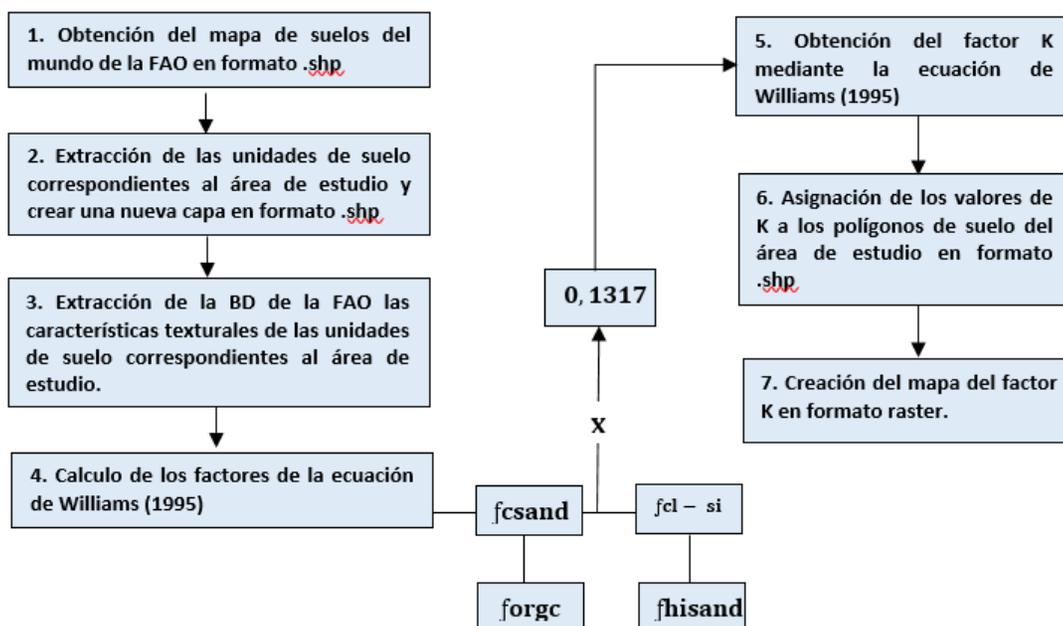
4.1.1.2. Cálculo del factor de erodabilidad K

$$K = 0,1317 * fcsand * fcl - si * forgc * fhisand \quad (15)$$

$f_{csand} = \left(0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right)$	(16)
$f_{cl - si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0.3}$	(17)
$f_{orgc} = \left[1 - \frac{0.25orgC}{orgC + \exp[3.72 - 2.95orgC]} \right]$	(18)
$f_{hisand} = \left[1 - \frac{0.70 \left(1 - \frac{m_s}{100} \right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100} \right) + \exp \left[-5.51 + 22.9 \left(1 + \frac{m_s}{100} \right) \right]} \right]$	(19)

Figura 16

Proceso para la obtención del mapa de erodabilidad del suelo (K)



Fuente: elaboración propia

4.1.1.3. Cálculo del factor de la longitud y grado de inclinación de la pendiente

(LS)

Cálculo de L:

$$L_{ij} = \frac{[A_{ij} + D^2]^{m+1} - A_{ij}^{m+1}}{X^m * D^{m+2} (22.13)^m} \quad (24)$$

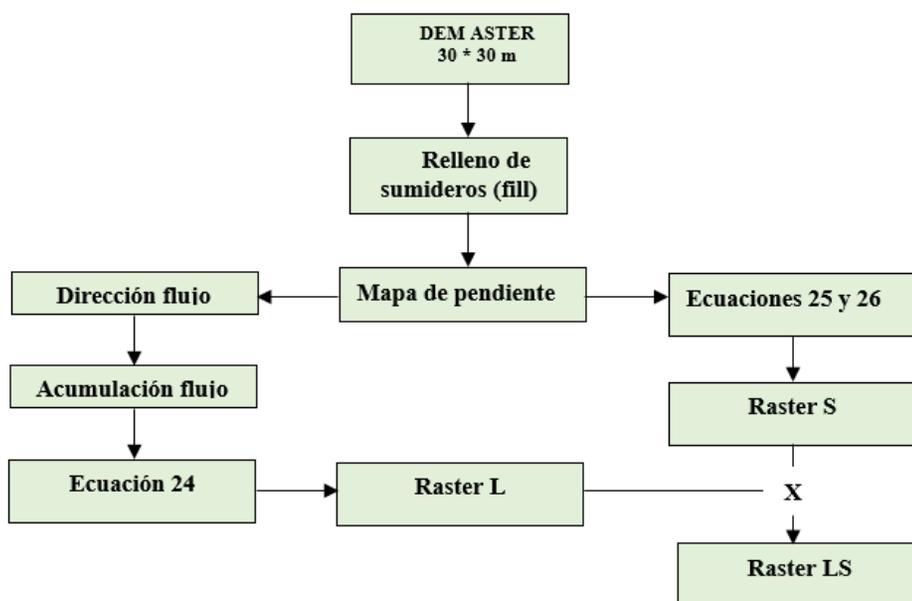
Cálculo de S:

$$S = 10.8 * \sin \beta + 0.03 \quad \text{Si: } s < 9\% \quad (25)$$

$$S = 16.8 * \sin \beta - 0.5 \quad \text{Si: } s \geq 9\% \quad (26)$$

Figura 17

Proceso para la obtención del mapa de longitud e inclinación de la pendiente (LS)

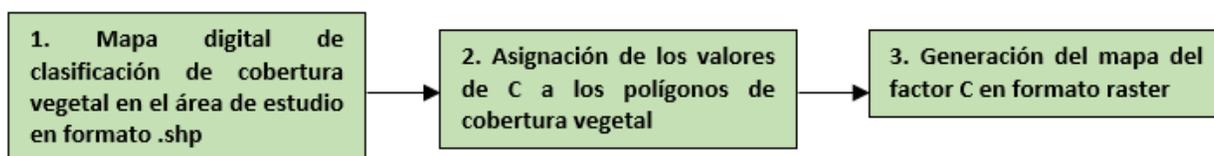


Fuente: elaboración propia

4.1.1.4. Asignación de los valores del factor C según la cobertura vegetal

Figura 18

Proceso para la obtención del mapa del factor C



Fuente: elaboración propia

4.1.1.5. Determinación del factor P

Se asumió un valor del factor P igual a 1.0 al no haber verificado en campo la aplicación de prácticas de conservación de suelos en la cuenca.

4.1.1.6. Determinación de la tasa de pérdida de suelos (A t/ha/año)

Finalmente, se procedió a la aplicación de la ecuación USLE, ecuación 1, mediante la superposición de mapas con la herramienta álgebra de mapas del ArcMap, obteniéndose el mapa de las áreas de erosión y su clasificación como se muestra en la tabla 26.

4.1.1.7. Análisis para la estimación de sedimentos

$SY = SDR * A$	(39)
$SDR = 0.47 * F^{-0.125}$	(40)
$SDR = 0.566 * F^{-0.11}$	(41)

4.1.2. Estimación de la tasa sedimentos por erosión superficial en la cuenca mediante la ecuación de Gavrilović

$$G = W * R \quad (30)$$

Donde:

G = Es el volumen de sedimentos producidos en la cuenca (m³/año)

W = Es la producción media anual de sedimento bruto por erosión (m³/año)

R = Es el coeficiente de retención

4.1.2.1. Cálculo de la producción media anual de sedimento bruto por erosión

(m³/año) **W**

$$W = T . h . \pi . Z^{\frac{3}{2}} . F \quad (31)$$

$$R = \frac{(L + Li) * (\sqrt{O * D})}{(L + 10)F} \quad (34)$$

T = Es el coeficiente de temperatura definid a partir de la temperatura promedio anual en °C

(tm) y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$T = \left[\frac{tm}{10} + 0.1 \right]^{1/2} \quad (32)$$

Donde:

h = Es la precipitación media inter anual (mm/año)

π = Valor constante 3.1416

F = Superficie de la zona de estudio (km²)

Z = Es el coeficiente de erosión definido como

$$Z = X.Y. (\Phi + I^{\frac{1}{2}}) \quad (33)$$

Donde:

X = Es el coeficiente de uso del suelo

Y = Es el coeficiente de resistencia del suelo a la erosión

Φ = Coeficiente correspondiente al tipo de proceso erosivo observado

I = Pendiente media de la cuenca (%)

$$R = \frac{(L + Li) * (\sqrt{D} * O)}{(L + 10)F} \quad (34)$$

Donde:

O = Es el perímetro de la cuenca (km)

D = La diferencia de nivel media en la cuenca (cota media menos cota mínima, en km)

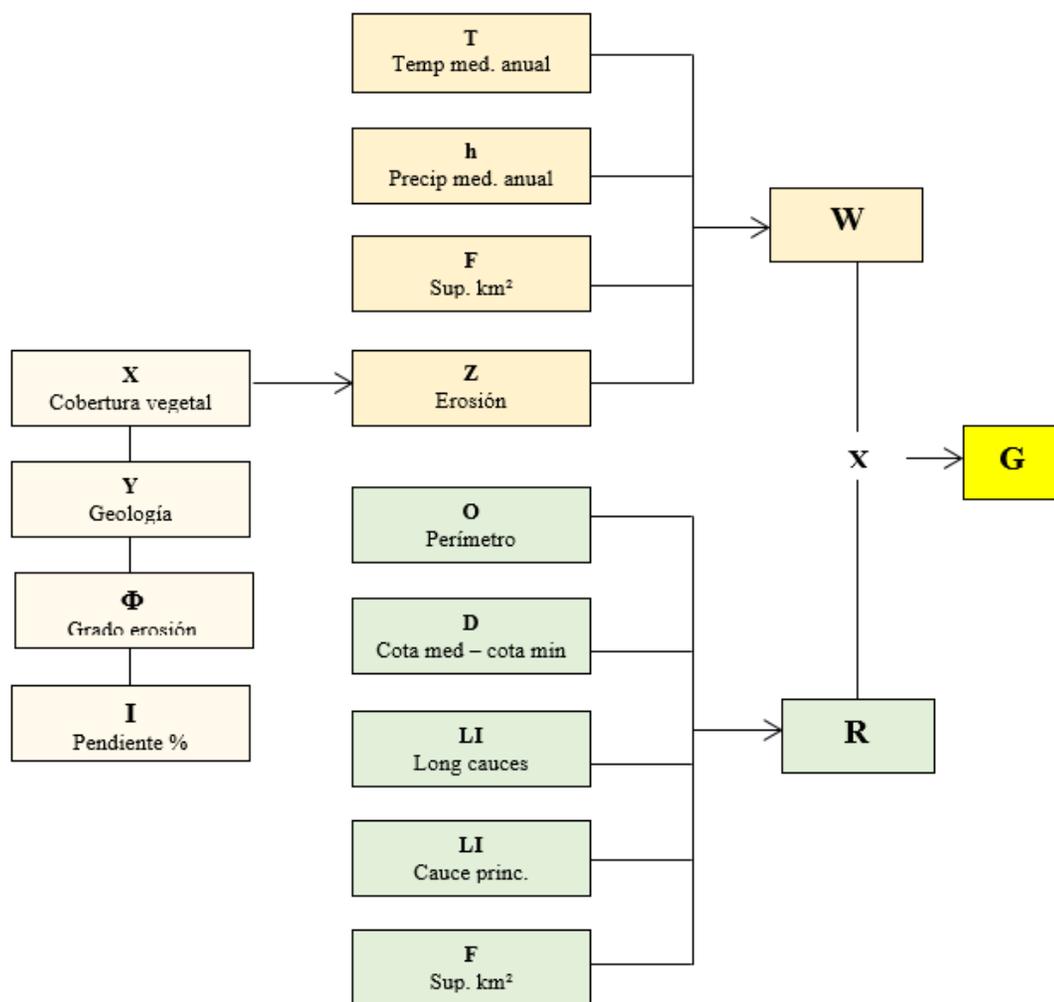
Li = La longitud total de los afluentes fluviales laterales (km)

L = La longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km)

F = La superficie de la cuenca (km²).

Figura 19

Proceso para la obtención de la tasa sedimentos por erosión superficial en la cuenca mediante la ecuación de Gavrilović



Fuente: elaboración propia

4.1.2.2. Producción neta de sedimentos y relación de erogación de sedimentos

(SDR)

$$SDR = \frac{YS}{A} \quad (35)$$

Por lo tanto, el SY se calcula mediante la ecuación 31

$$SY = SDR * A \quad (36)$$

Donde:

SY = Producción de sedimentos en un punto dado (t/ha/año).

SDR = Coeficiente de entrega de sedimento (adimensional).

A = Es la erosión superficie (t/ha/año).

4.1.3. Diferencias de ambos métodos empleados para determinar la pérdida de suelo

Realizando las diferencias de ambos métodos podemos decir que el método de USLE es el más conocido y el resultado y metodología se puede hacer la comparación y validación, como también sus variables son más exigentes con los datos de campo.

La aplicación del método Gavrilović no es de gran difusión en el Perú por lo que existen muy pocos estudios para realizar comparaciones. En este contexto, podemos establecer la necesidad de validar los resultados obtenidos en este estudio con observación y medición directa en campo.

Tabla 18

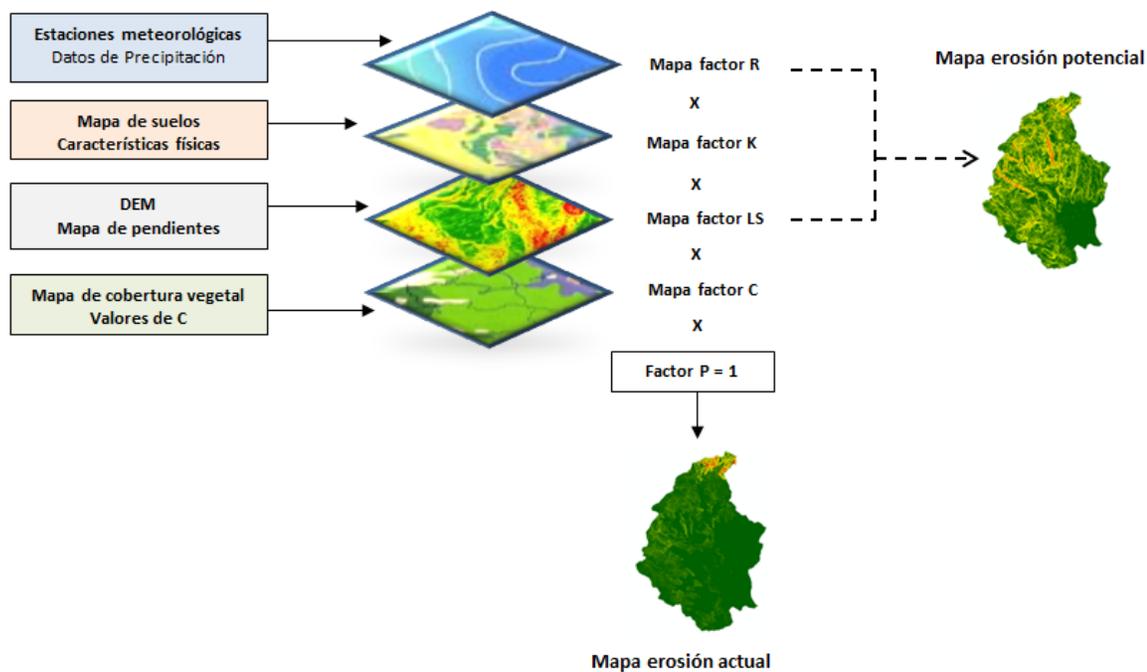
Diferencias de ambos métodos empleados para determinar la pérdida de suelo

<p>Estimación de la erosión hídrica aplicando la ecuación universal de pérdida de suelos – USLE</p>	<p>Estimación de la tasa sedimentos por erosión superficial en la cuenca mediante la ecuación de Gavrilović</p>
$A = R * K * LS * C * P$	$G = W * R$
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cálculo del factor de erosividad R ✓ Cálculo del factor de erodabilidad K ✓ Cálculo del factor de la longitud y grado de inclinación de la pendiente (LS) ✓ Asignación de los valores del factor C según la cobertura vegetal ✓ Determinación del factor P ✓ Determinación de la tasa de pérdida de suelos (A t/ha/año) ✓ Análisis para la estimación de sedimentos 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cálculo de la producción media anual de sedimento bruto por erosión (m³/año) W <ul style="list-style-type: none"> • cálculo del coeficiente de temperatura (T) • Cálculo del coeficiente de erosión (Z). • Determinación del gradiente de pendiente de la cuenca (I) ✓ Cálculo del coeficiente de retención (R)

Elaboración: Propia

Figura 20

Proceso para la obtención del mapa de erosión utilizando la ecuación USLE

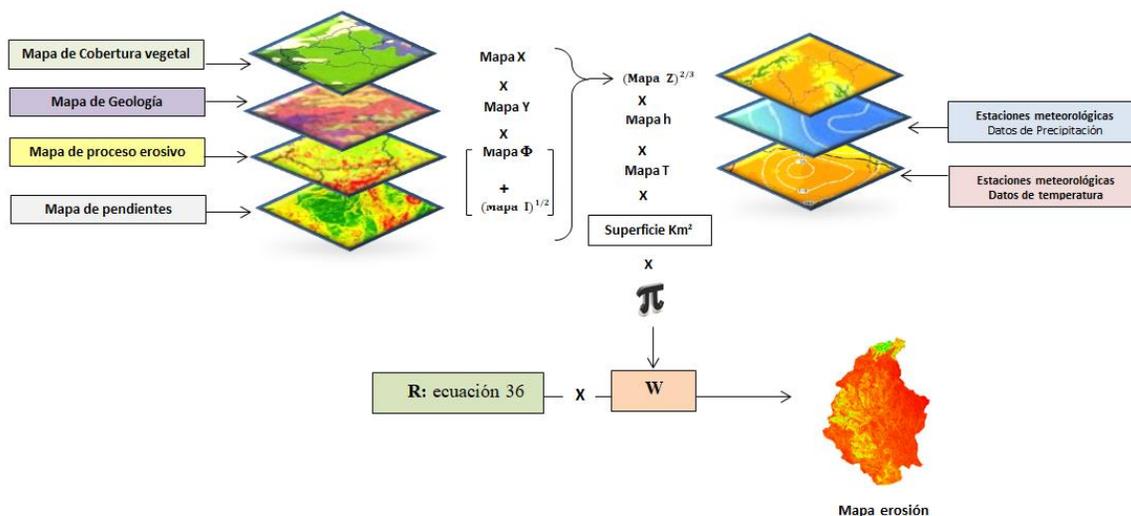


Fuente: elaboración propia

Figura 21

Proceso para la obtención del mapa de erosión utilizando el método Gavrilović

Fuente: elaboración propia



4.1.4. Limitaciones

A. Limitaciones de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo (USLE)

- i. Muchas veces se impone el carácter subjetivo del especialista para la determinación de los parámetros de la ecuación, no existe un consenso, por lo que se debe ser cuidadoso al seleccionar la metodología a utilizar para el desarrollo de cada factor. Generalmente las experiencias a nivel local no son validadas para otras áreas por lo que su aplicación en áreas nuevas requiere de muchísima información documentada.
- ii. Dificultad para encontrar los datos a nivel de detalle requeridos para la estimación de los factores de la ecuación. Esta situación es constante en todos los países de la región y en particular en el Perú la disponibilidad de información altamente especializada, de calidad y en cantidad es bastante limitada.
- iii. Aumenta el sesgo de los resultados al trabajar con la información disponible sin limitaciones estrictas para ello. Esta condición puede marcar la tendencia a la sobreestimación y subestimación de la erosión.
- iv. Es un modelo empírico que no contempla los procesos físicos de separación, transporte y sedimentación en forma mecánica.
- v. No considera aspectos físicos y climáticos del área de estudio. Obvia posibles mecanismos que pudieran estar condicionando el transporte y deposición de sedimentos en un área específica.

B. Limitaciones de la Ecuación de Gavrilović

- i. Este método en general se asemeja al método de la USLE por lo que básicamente enfrenta las mismas limitaciones descritas para la USLE en los puntos ii y iii.

4.2. Estimación del volumen de pérdida de suelo por erosión hídrica según los métodos de USLE y Gavrilović utilizando herramientas de análisis espacial, en la cuenca del río Mashcón.

4.2.1. Elaboración del mapa base

Este mapa contiene el polígono de la cuenca, determinado según lo explicado en el ítem 3.5.3, las curvas de nivel, la red de drenaje y las estaciones meteorológicas representativas del área de estudio, a partir de cartografía digital a escala 1:25.000 de Base de Datos AAA – VI Marañón (Autoridad Administrativa del Agua VI Marañón). Ver figura 4.

4.2.2. Estimación de la Erosión Hídrica mediante la ecuación USLE

4.2.2.1. Factor de erosividad de la lluvia (R). La metodología aplicada para este capítulo se encuentra en los métodos, en la parte de procedimientos, como se muestra en la Figura 15.

a) Registros de datos pluviométricos (mm) 1995 - 2013. A partir de los registros de precipitación media interanual del período 1995 al 2013 (Ver tablas 39, 42 y 45 del anexo B).

b) Procesamiento y cálculo de valores de precipitación mensual e interanual. Los datos de volúmenes de precipitación media interanual para cada una de las estaciones representativas se muestran en la Tabla 18 estos resultados de obtuvieron a partir de los datos de precipitación que se muestran en las tablas 41, 44 y 47 del anexo B.

Tabla 19

Valores de precipitación media interanual y mensual para las estaciones seleccionadas en el área de estudio y zonas adyacentes, período 1995 - 2013

Estación	Precipitación media interanual (mm)												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Maqui Maqui ²	125.17	170.78	192.75	111.07	65.38	24.75	14.47	15.88	49.13	134.97	146.74	161.80	1212.90
Granja Porcón ¹	183.80	242.18	274.47	164.87	93.00	32.70	19.66	18.09	75.01	139.40	140.84	180.66	1564.70
A. Weberbauer ¹	83.89	107.12	134.84	70.82	30.55	9.28	6.52	7.03	27.04	63.34	69.51	80.66	690.60

Fuente: elaboración propia

(1) SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

(2) MYSRL: Empresa Minera Yanacocha S.R.L.

La precipitación media de la zona oscila entre los 600 mm y los 1600 mm al, con una marcada estacionalidad siendo el período de octubre – mayo en el que se presentan las mayores precipitaciones.

c) *Aplicación de fórmula IMF y obtención del IMF por cada año de la serie.* La tabla 19, muestra los resultados del factor de erosividad de la lluvia R media para cada estación, donde el valor más alto corresponde a la estación con el mayor registro de precipitación media interanual, estación Granja Porcón y el valor más bajo lo presenta la estación con el menor registro de precipitación, estación Augusto Weberbauer.

Tabla 20

Valores promedio del factor R calculados mediante la ecuación del Índice Modificado de Fournier para cada una de las estaciones seleccionadas, período 1995 – 2013

Estación	Índice Modificado de Fournier revisado (R) MJ mm ha h-1 año-1												R
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
Maqui Maqui ²	24.39	41.93	53.81	11.38	3.84	0.37	0.06	0.09	2.26	24.96	30.06	35.41	228.56
Granja Porcón ¹	39.97	85.62	108.79	25.28	5.58	0.38	0.13	0.09	4.28	16.79	19.06	36.90	342.85
A. Weberbauer ¹	14.17	27.59	52.30	6.35	0.69	0.04	0.02	0.03	0.72	6.30	7.59	10.71	126.50

Fuente: elaboración propia

(1) SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

(2) MYSRL: Empresa Minera Yanacocha S.R.L.

d) *Ajustes de regresión entre el factor R calculado por el método USLE y IMF.* Se calcularon los valores de R para las estaciones representativas aplicando el Índice de Modificado de Fournier (IMF), propuesto por Arnoldus y la ecuación de ajuste propuesta por el mismo autor (1978), ecuaciones 10 y 11, para mayor detalle podemos se muestran en las tablas 42, 43, 45, 46, 48 y 49 del anexo B.

El grado de erosividad de acuerdo a la clasificación de R propuesta por Lobo et al., 2006 se muestra en la tabla 21.

Tabla 21*Grado de erosividad del Factor R a nivel de la cuenca*

Rango factor R	Grado de erosividad	Área Km²	%
120 - 160	Alto	5.91	1.89
> 160	Muy alto	306.15	98.11
Total		312.06	100

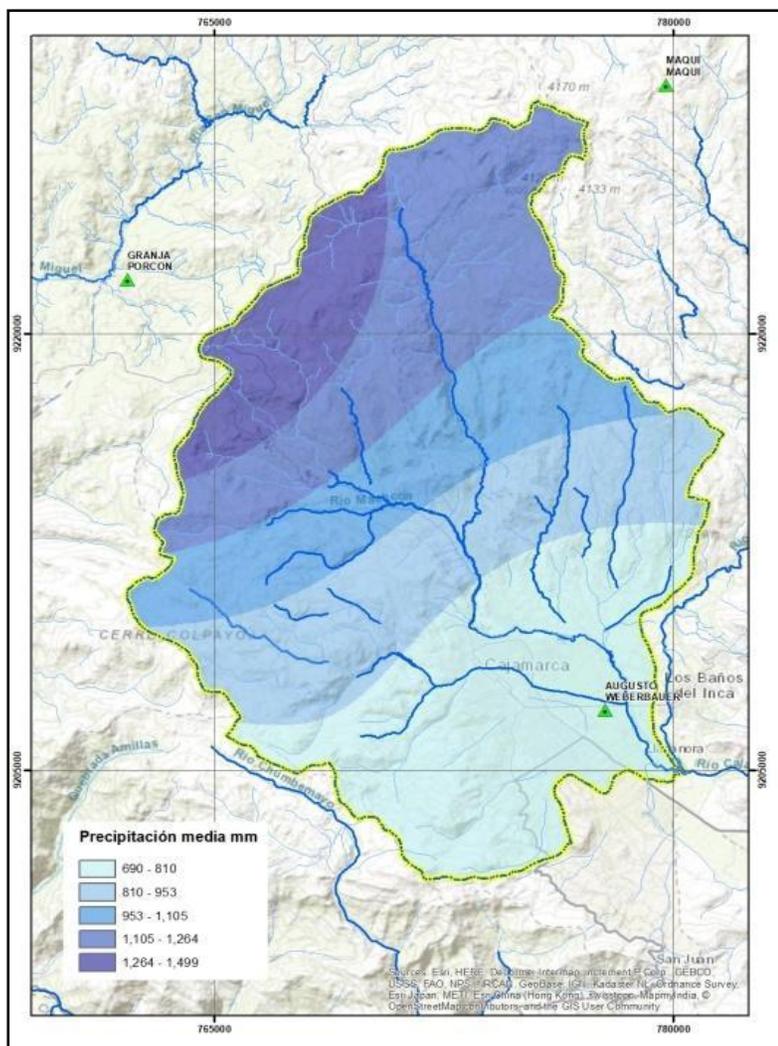
Fuente: Elaboración propia

De los resultados obtenidos se observa que la cuenca se encuentra sometida a grados de agresividad climática entre alto y muy alto, donde la lluvia tiene un gran potencial erosivo sobre el suelo.

- e) *Creación de capa digital de puntos de estaciones con el respectivo valor R* El mapa de isoyetas muestra que la distribución geográfica de las precipitaciones en la cuenca responde a un patrón sencillo, aumento de las precipitaciones hasta determinada faja de altitud (3200 a 3500 m.s.n.m), para después comenzar a descender con la altitud.

Figura 22

Mapa de isoyetas de la cuenca del río Mashcón

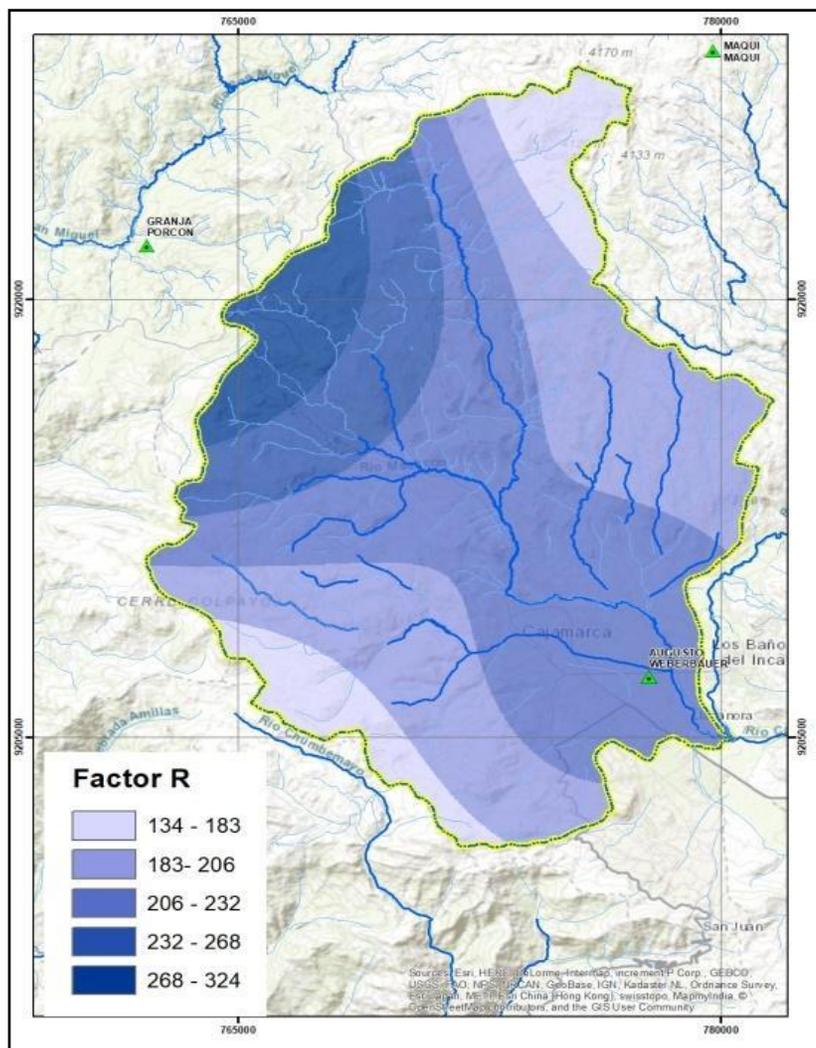


Fuente: elaboración propia

f) Creación del mapa ráster del factor R

Figura 23

Distribución de la precipitación media y del factor R de la cuenca del río Mashcón



Fuente: elaboración propia

4.2.2.2. Cálculo del factor K (erodabilidad del suelo en t/MJ/mm). Para el presente estudio no se recabaron muestras de suelo en campo ni se cuenta con datos de otras fuentes por lo que el factor K se obtuvo aplicando la ecuación 15 que requiere como datos de entrada los valores de contenido de arena, contenido de limo, contenido de arcilla y el contenido de carbono orgánico proporcionados por el mapa de suelos del mundo publicado por la FAO (Ver tablas 48 y 49 del anexo C) desde el que se han extraído las unidades de suelo correspondiente al área de estudio, como se muestra la tabla 22.

Tabla 22

Unidades de suelos presentes en la cuenca, según mapa mundial de suelos de la FAO

Soil unit symbol	Descripción	sand % topsoil	silt % topsoil	clay % topsoil	OC % topsoil
HI	Luvic Phaeozems	39.1	26.5	34.6	1.46
I	Lithosols	58.9	16.2	24.9	0.97

Fuente: Mapa mundial de suelos de la FAO, 1995

Según los suelos de la clase Luvic Phaeozems son típicos de las zonas de praderas/pasto con un horizonte superficial 30-50 cm de espesor. De acuerdo a su textura son suelos porosos, bien aireados con estructuras migajosas o de bloques, de moderados a fuertes y considerados como muy estables. La erosión del viento y del agua son peligros graves en suelos preparados para la agricultura. Por su parte los suelos de la clase Lithosols son suelos, también conocidos como Leptosols y comprenden suelos muy delgados, menos de 10 cm de profundidad, sobre roca continua, extremadamente ricos en fragmentos gruesos, particularmente comunes en regiones montañosas. En pendientes pronunciadas, el deterioro de los bosques y la actividad agrícola

aumenta la susceptibilidad de los leptosoles a la erosión. En la tabla 22 se muestran los valores de K para cada unidad de suelo identificados en el área de estudio.

Tabla 23

Valores del factor K correspondientes a las unidades de suelo presentes en el área de estudio

Soil unit symbol	<i>fcsand</i>	<i>fcl – si</i>	<i>forgc</i>	<i>fhisand</i>	Factor K
HI	0.20	0.78	0.82	1	0.02
I	0.20	0.76	0.93	1	0.02

Fuente: elaboración propia

Los valores de K para la cuenca son bastante bajos, en promedio se tiene un valor de 0.02 t*ha*h/MJ*ha*cm. Lo que los categoriza dentro del grupo de los suelos menos susceptibles a la erosión hídrica.

4.2.2.3. Cálculo del factor LS (longitud y grado de la pendiente)

Para la determinación de los factores L (longitud) y S (grado) de la pendiente requerimos del mapa digital de pendiente en cual es generado a partir del modelo digital del terreno (DEM ASTER) de la cuenca con resolución espacial de 30 m. Ver Figura 33 del anexo D.

El cálculo de L utilizando la herramienta GIS se utilizó la ecuación 24 planteada por Velásquez (2008), citando a Desmet y Govers, (1996) generando mapas en formato raster con tamaño de pixel de 30.88, 30.88 m. Los valores de L para la cuenca del río Mashcón varían entre 1 y 55 m.

Para el cálculo de S utilizando la herramienta GIS se utilizaron las ecuaciones 25 y 26 propuestas por Wischmeier, (1982). Los valores de S para la cuenca varían entre 0.03 y 14.50 grados.

Finalmente, el cálculo de LS se realizó utilizando la herramienta algebra de mapas del ARCMAP a través de la operación de multiplicación de los archivos raster correspondientes a L y S. Los valores de LS para la cuenca del río Mashcón varían entre 0.03 y 381 con una media de 5.18.

En la tabla 23 se muestra la clasificación de las pendientes de la cuenca en siete rangos de acuerdo Guía de Clasificación de los Parámetros Edáficos, del Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor, aprobado por D.S. N° 017-2009/AG.

Tabla 24

Clasificación de la pendiente de la cuenca en %

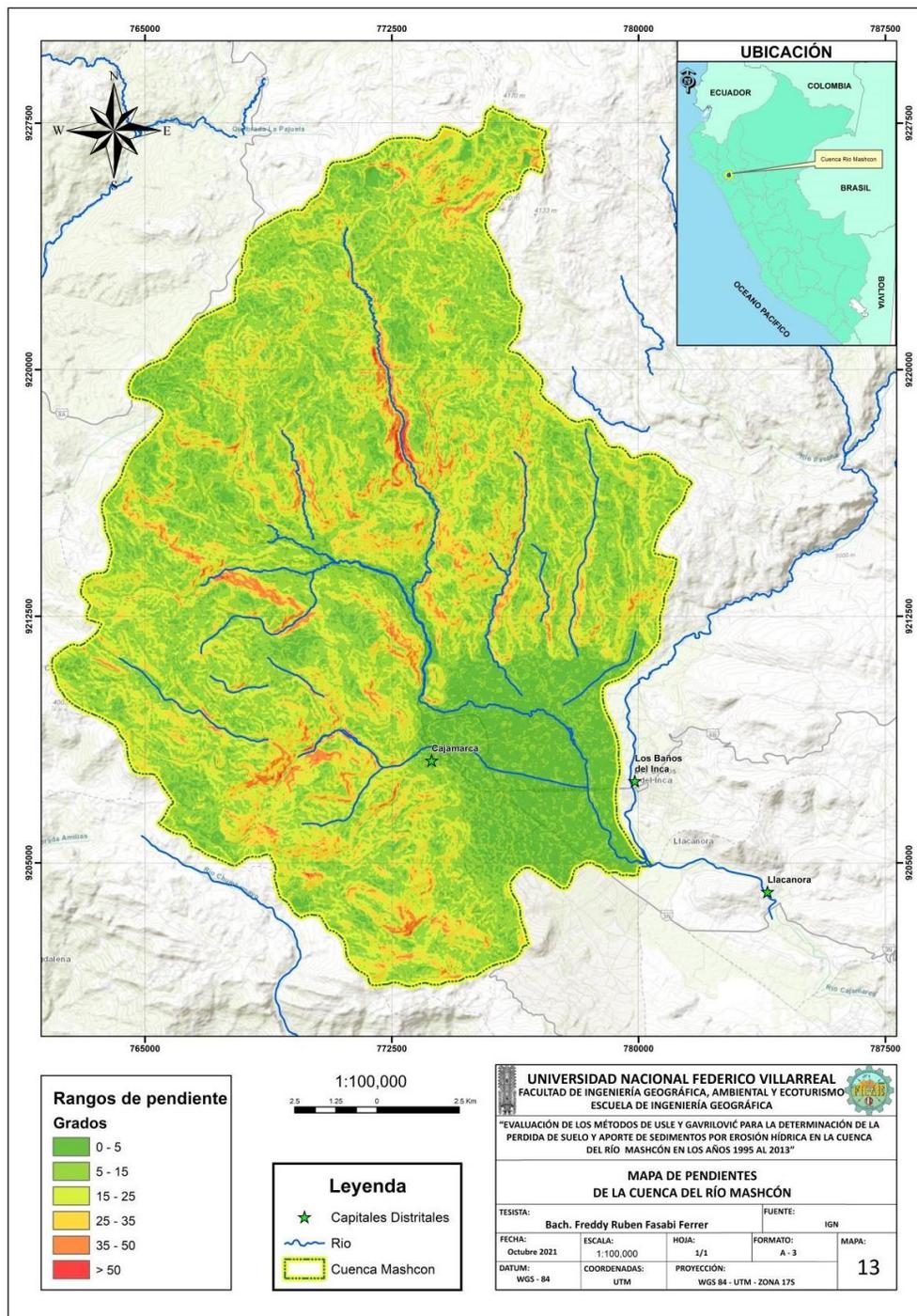
Rangos de pendiente	Descripción	Superficie km²	%
< 4	Nula o casi a nivel	17.64	5.65
4 - 8	Ligeramente inclinada	28.96	9.28
8 - 15	Ligeramente inclinada a moderadamente empinada	63.99	20.51
15 - 25	Moderadamente empinada	68.77	22.04
25 - 50	Empinada	101.88	32.65
50 -75	Muy empinada	30.82	9.88
Total		312.06	100.00

Fuente: elaboración propia

Aproximadamente el 40% de la superficie de la cuenca presenta pendientes del terreno mayor al 25%, factor que incrementa el potencial de pérdida de suelo. Mediante una operación de superposición de mapas se determinó que los valores más altos de LS se corresponden con valores de pendientes más altos como se observa en la tabla 24.

Figura 24

Mapa de pendientes en grados de la cuenca del río Mashcón



Fuente: elaboración propia

Tabla 25*Relación entre los rangos de pendiente en % y el factor LS*

Rangos de pendiente	Factor LS
< 4	1.7
4 - 8	2.1
8 -15	2.8
15 - 25	3.94
25 - 50	5.93
50 -75	9.3

Fuente: elaboración propia

4.2.2.4. Cálculo del factor C (cobertura vegetal adimensional)

Para la determinación del este factor C se analizaron los diferentes tipos de coberturas presentes en la zona de estudio y se adaptaron estas a la clasificación establecida en la metodología propuesta por Wischmeier y Smith, (1978). Ver tabla 7. A cada polígono de cobertura vegetal presente en la cuenca, ver figura 18, se le asignó el valor de C correspondiente, como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26*Adaptación a la clasificación de la cobertura vegetal del área de estudio*

Cobertura Vegetal de la Cuenca	Cobertura según metodología	Factor C	Superficie km²	%
Agricultura costera y andina	Cultivos anuales y herbáceos	0.25	95.70	30.67
Ciudad	Matorral ralo y eriales	0.20	12.17	3.85
Matorral arbustivo	Matorral con buena cobertura	0.008	111.57	35.75
Minería	Suelo desnudo	1	13.21	4.23
Pajonal	Pasturas	0.15	78.57	25.18
Plantación forestal	Arbolado forestal clareado	0.006	0.80	0.32
Total			312.06	100.00

Fuente: elaboración propia

4.2.2.5. Determinación del factor P (prácticas de manejo adimensional)

Se asumió un valor del factor P igual a 1.0 al no contar con valores propios de las prácticas de conservación evaluadas para este factor.

La tasa de pérdida de suelos media (rendimiento de sedimento) para la cuenca se ha calculado en 29.18 t/ha/año, clasificada como erosión moderada. La tasa de erosión en cm/año mm/año se ha calculado en función del peso específico promedio del suelo en el área de estudio de 2.01 T/m³, el cual ha sido estimado en laboratorio de mecánica de suelos para el estudio de la rehabilitación y mejoramiento de la carretera Chongoyape – Cochabamba – Cajamarca (2009) mediante la ecuación 28.

$$V = \frac{P}{p} = \frac{29.18 \text{ t}}{2.01 \text{ t/m}^3} = 14.52 \text{ m}^3$$

$$H = \frac{V}{A} = \frac{14.52 \text{ m}^3}{10000 \text{ m}^2} = 0.001451 \text{ m}$$

La pérdida media de suelos se estimó en $0.1451 \text{ cm} = 1.45 \text{ mm/año}$

4.2.2.6. Identificación de las Zonas de Erosión

Se trata del cálculo de la tasa de erosión, explicado en el ítem 3.6.3.1, y su distribución espacial en la cuenca a mediante la aplicación de la ecuación 1 con el uso de la herramienta algebra de mapas “raster calculador” en ArcMap. El mapa resultante muestra las zonas de erosión en función del grado de afectación según la clasificación establecida por la FAO, 1980, ver tabla 12.

Los niveles de pérdidas de suelo se muestran en la tabla 27.

Tabla 27

Tipo de erosión actual estimada en la cuenca según clasificación de la FAO, 1980

Nivel	t/ha/año	Tipo de erosión	Superficie km²	%
1	0 - 10	Normal	172.01	55.12
2	10 - 50	Moderada	113.54	36.39
3	50 - 200	Severa	23.80	7.63
4	> 200	Muy severa	2.70	0.87
Total			312.06	100.00

Fuente: elaboración propia

La mayor pérdida de suelo según ambos métodos, fue identificada en la subcuenca alta, al norte, donde se desarrolla la actividad minera de la empresa Minera Yanacocha, con una tasa media anual de erosión de 107.50 t/ha/año según la USLE y 54 t/ha/año según la ecuación de Gavrilović. La menor tasa de pérdida de suelo según ambos métodos se produce en la subcuenca baja, al sur, en la cual se asienta la ciudad de Cajamarca donde la erosión media anual se estimó en menos de 5 t/ha/año. Ver mapa de la figura 25.

Los resultados obtenidos indican que casi un 45% de la superficie presenta riesgo erosivo que va de moderado a muy severo, con tasas de erosión mayores a 15 t/ha/año. Este rango de afectación es muy elevado, considerando los límites de tolerancia propuestos por la FAO (1980), entre 10 a 12.5 t/ha/año para suelos profundos y de 2 a 4 t/ha/año para suelo pocos profundos. Ver gráfico 1.

Gráfico 1

Clasificación de la superficie de la cuenca función del riesgo de erosión hídrica.

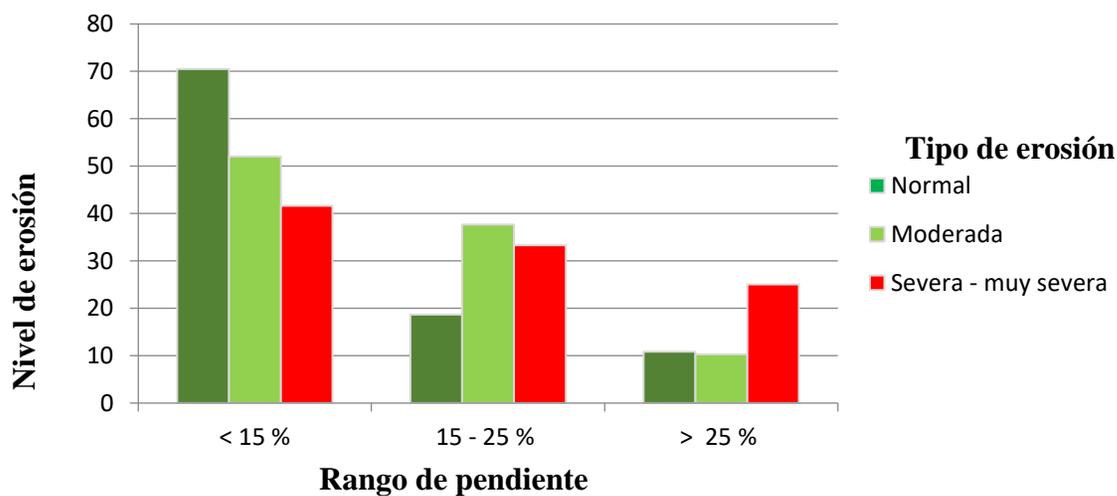


Fuente: elaboración propia

La distribución espacial de las zonas de erosión muestra la alta relación existente entre el proceso erosivo de intensidad moderada a severa y las áreas de mayor precipitación y pendientes del terreno. Ver los gráficos 2 y 3.

Gráfico 2

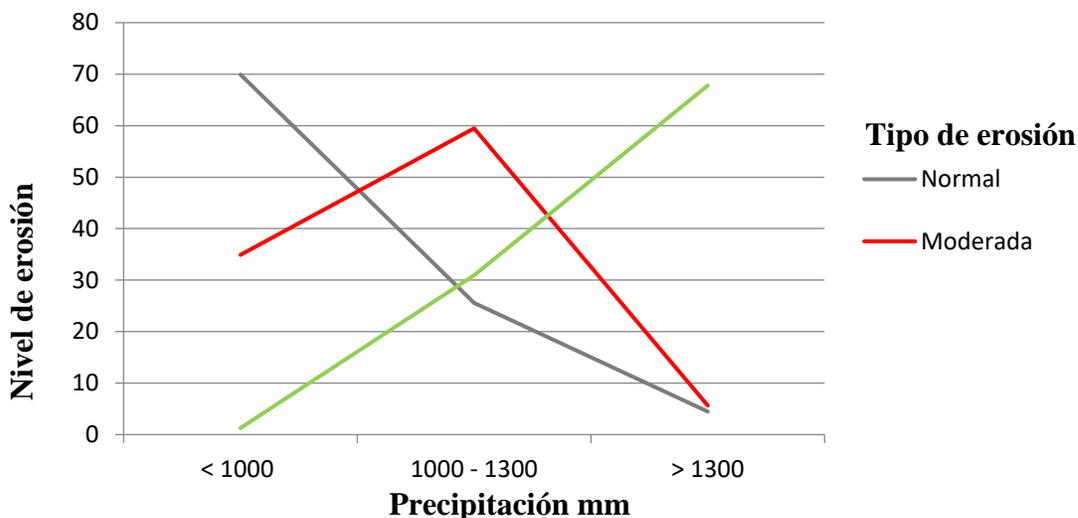
Relación entre la tasa de erosión y la pendiente del terreno



Fuente: elaboración propia

Gráfico 3

Relación entre la tasa de erosión y la precipitación



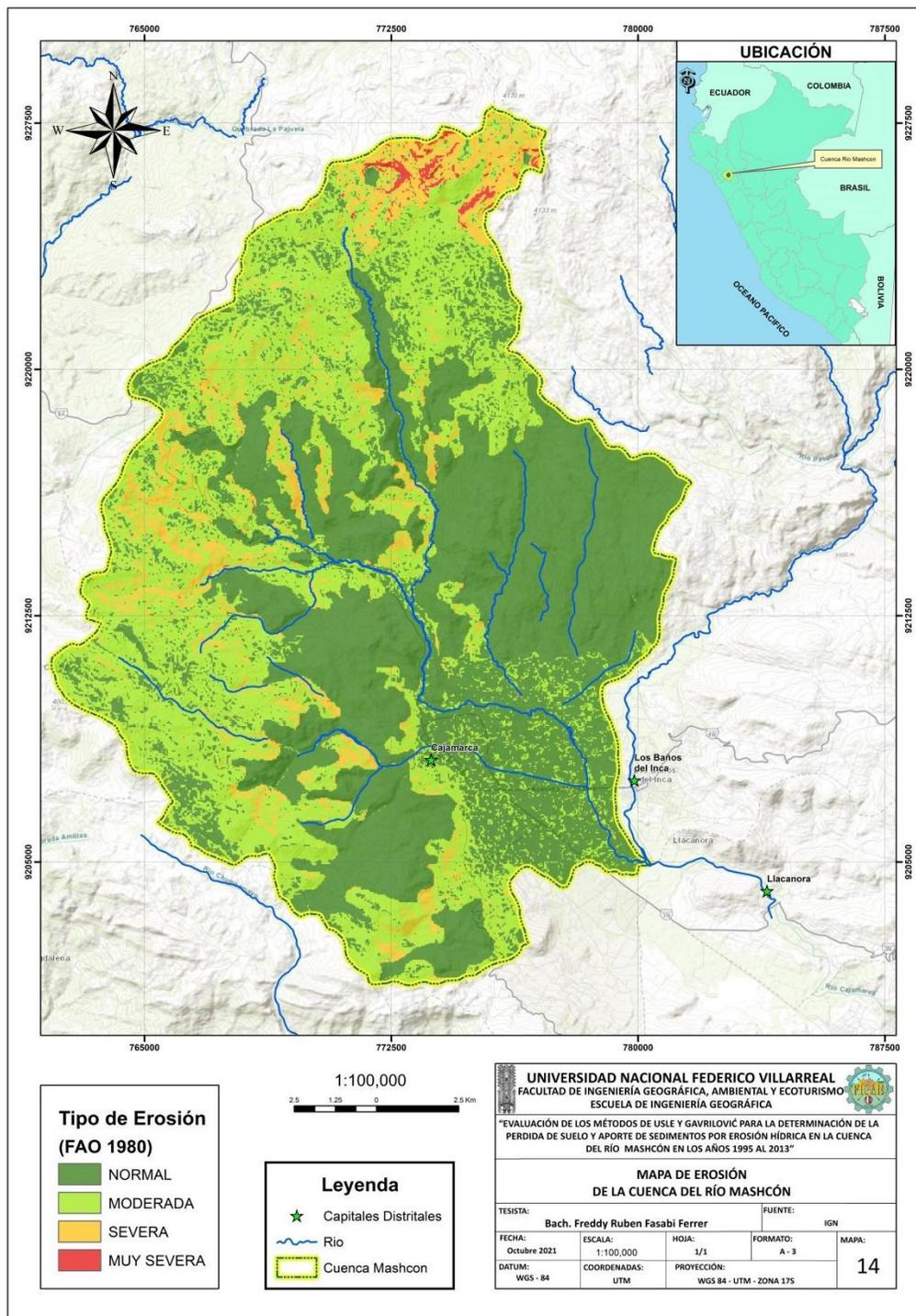
Fuente: elaboración propia

Al relacionar la cobertura vegetal y las zonas de erosión se observa que las áreas de la cuenca que presenta el tipo de erosión severa - muy severa se corresponden con el área de cobertura vegetal y uso clasificada como minería (13.21 km²), al que corresponde el valor de C más alto, considerándose como suelo desnudo y sin ningún tipo de prácticas de conservación de suelos.

Aproximadamente 174.27 km² (55,58 %) de la cuenca que presentan actividad agrícola y cobertura vegetal de tipo pajonales se encuentran sometidas a procesos de erosión moderados, entre 10 – 50 t/ha/año, 111, 50 km² (35, 75%) presentan cobertura vegetal de tipo matorral arbustivo y están sometidos a procesos de erosión normal, menos de 10 t/ha/año. La cobertura vegetal de tipo plantación forestal es la que ofrece la mayor protección de los suelos a la erosión, pero la extensión de este tipo de cobertura en la cuenca es muy poca, menos de 1 km².

Figura 25

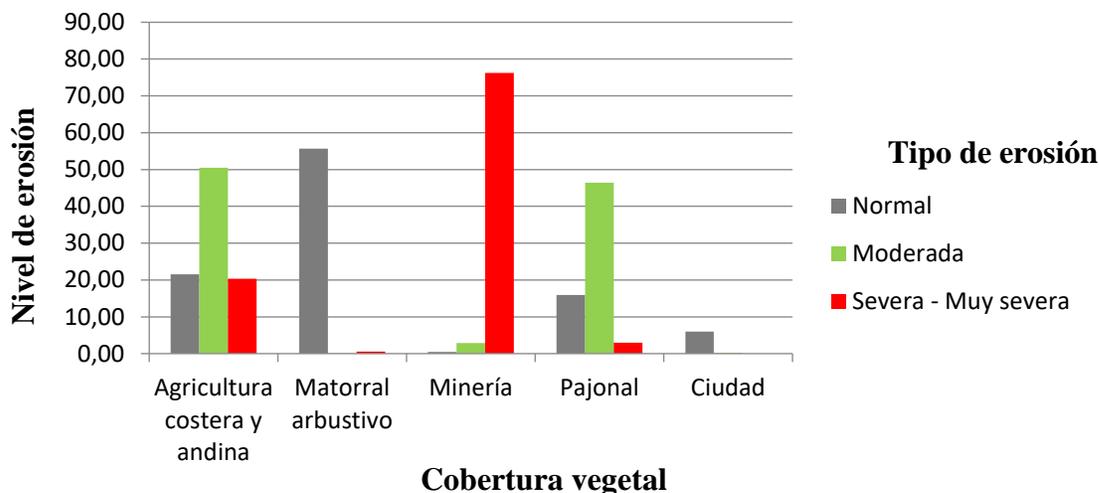
Mapa de erosión actual de la cuenca del río Mashcón según la USLE



Fuente: elaboración propia

Gráfico 4

Relación entre la tasa de erosión y el tipo de cobertura vegetal



Fuente: elaboración propia

4.2.3. *Estimación de la Erosión Hídrica y la descarga media anual de material erosionado mediante la ecuación de Gavrilović*

Para este segundo análisis de la erosión en la cuenca se aplicó la ecuación 30

$$G = W * R \quad (30)$$

4.2.3.1. Cálculo de la producción media anual de sedimentos (W) (m³/ año) Este factor de la ecuación de Gavrilović se calculó aplicando la ecuación 31 lo que a su vez requiere el cálculo de coeficientes de manera separada utilizando las ecuaciones 32 y 33.

$$W = T . h . \pi . Z^{\frac{3}{2}} . F \quad (31)$$

a) Cálculo del coeficiente de temperatura (T)

Teniendo los registros de temperatura media anual durante el período de 19 años (1995 – 2013) para las estaciones seleccionadas (ver tabla 28), se han obtenido los valores de temperatura media (tm) para cada una y a partir de estos datos se calcula el coeficiente de temperatura (T) utilizando la ecuación 32. Los resultados se muestran en la tabla 28. Ver tablas 54, 55 y 56.

$$T = \left[\frac{tm}{10} + 0.1 \right]^{1/2} \quad (32)$$

Tabla 28

Valores medios de temperatura (tm) de las estaciones consideradas, período 1995 – 2013

Estación	Precipitación media interanual (tm) (°C)												
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MEDIA
Maqui Maqui ²	6.58	6.40	6.35	6.48	6.24	5.64	5.27	5.59	5.80	6.49	6.26	6.16	6.10
Granja Porcón ¹	10.43	10.56	10.73	10.54	10.14	9.71	9.47	9.73	9.97	10.21	9.98	10.17	10.24
A. Weberbauer ¹	15.17	15.18	15.15	14.91	14.15	13.44	13.03	13.6	14.4	14.9	14.82	15.05	14.56

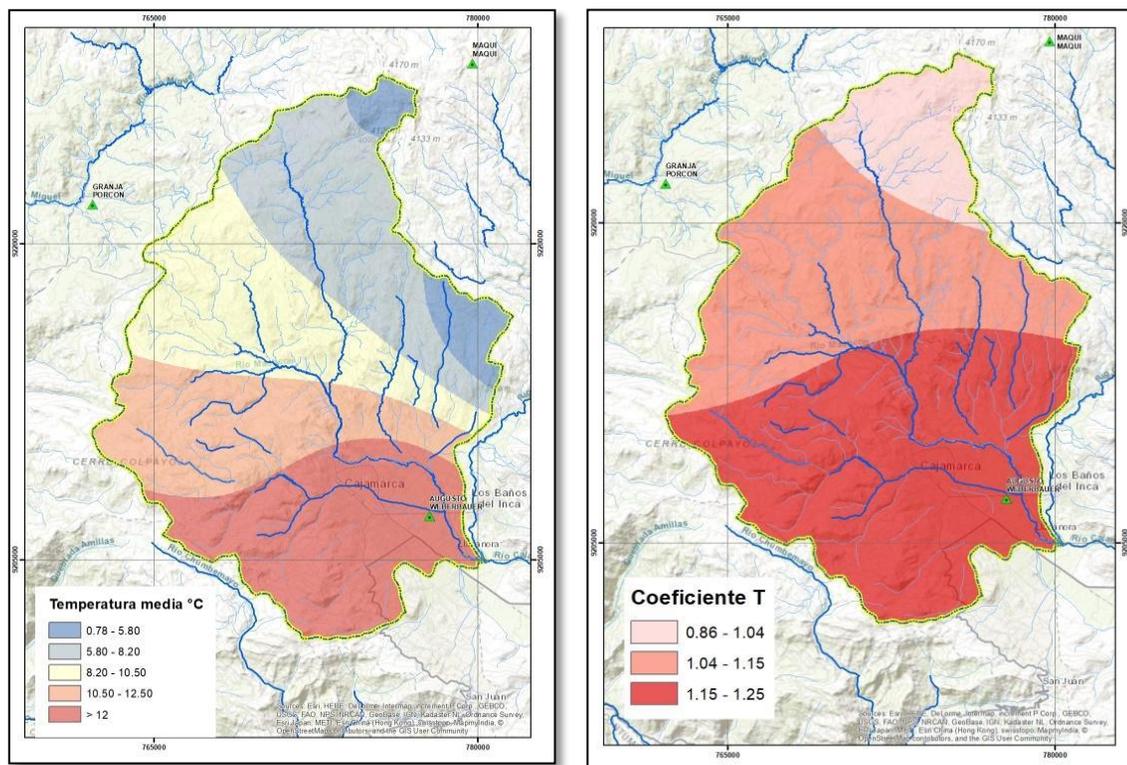
Fuente: elaboración propia

(1) SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

(2) MYSRL: Empresa Minera Yanacocha S.R.L.

Figura 26

Distribución de la temperatura media y coeficiente de temperatura T de la cuenca del río Mashcón



Fuente: elaboración propia

b) Asignación del parámetro h

Se determina a partir de los valores de la precipitación media mensual, de los valores de la precipitación calculados a partir de los datos del ANA, como se muestra en la tabla 29.

Ver tablas 40, 43 y 46 del anexo B.

Tabla 29

Valores medios de precipitación mensual (h) de las estaciones consideradas, período 1995 – 2013

Estación	Precipitación media mensual (h) (mm)												MEDIA
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
Maqui Maqui ²	125.17	170.78	192.75	111.07	65.38	24.75	14.47	15.88	49.13	134.97	146.74	161.80	101.08
Granja Porcón ¹	183.80	242.18	274.47	164.87	93.00	32.70	19.66	18.09	75.01	139.40	140.84	180.66	130.39
A. Weberbauer ¹	83.89	107.12	134.84	70.82	30.55	9.28	6.52	7.03	27.04	63.34	69.51	80.66	57.55

Fuente: elaboración propia

(1) SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

(2) MYSRL: Empresa Minera Yanacocha S.R.L.

Tabla 30

Valores de (tm), T calculado y h de las estaciones consideradas, período 1995 – 2013

Estación	Altitud (m.s.n.m.)	Temperatura media interanual (tm) (°C)	Coefficiente de temperatura (T)	PP media mensual h (mm)
Maqui Maqui ²	4024	6.10	0.84	101.8
Granja Porcón ¹	3206	10.24	1.06	130.39
A. Weberbauer ¹	2660	14.56	1.25	57.55

Fuente: elaboración propia

(1) SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

(2) MYSRL: Empresa Minera Yanacocha S.R.L.

c) Cálculo del coeficiente de erosión (Z)

Aplicando la ecuación 33 tomando como valores de entrada coeficientes asociados a la cobertura vegetal, características litológicas y de suelos y la pendiente del terreno.

$$Z = X.Y. (\phi + I^{\frac{1}{2}}) \quad (33)$$

- i. Asignación de los valores de X.** La cuantificación del coeficiente "X" se realizó en función de la capa de cobertura vegetal mostrados en la Figura 19, asignando a cada tipo de unidad el valor correspondiente según la metodología como se muestra en la tabla 31.

Tabla 31

Valores del coeficiente de vegetación X

Descripción según metodología	Cobertura vegetal en el área de estudio	Valor de X
Bosques /bosque montano	Plantación forestal	0.20
Pastizal de montaña	Pajonal	0.30
Pastos dañados/Cultivo	Agricultura costera y andina	0.63
Cultivos sin vegetación baja	Matorral arbustivo	0.40
Suelo desnudo	Suelo desnudo / Minería	1.00
Ciudades	Ciudades	0.70

Fuente: Gavrilović (1986) citado por Jorge et al., 2018

- ii. Asignación de los valores de Y.** Para la asignación del coeficiente "Y" fue utilizado como base las unidades de suelo identificados en la zona, definiendo valores de resistencia a la erosión para cada uno de acuerdo a lo establecido en la metodología. Los valores se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32

Valores del coeficiente de resistencia del suelo a la erosión Y

Soil unit symbol	Descripción	Equivalente en la metodología de Graviovic	Valor de Y
HI	Luvic Phaeozems	Suelo pardo de bosques y suelos de montaña	0.8
I	Lithosols (leptosol)	Suelo pardo de bosques y suelos de montaña	0.8

Fuente: elaboración propia

- iii. Asignación del valor ϕ .** Para definir el valor del coeficiente correspondiente al tipo de proceso erosivo observado (ϕ) se toma como referencia el análisis de la tasa de erosión obtenida a través de la ecuación USLE en la que se identifica que aproximadamente entre el 20 y el 50% de la superficie de la cuenca presenta proceso de erosión moderado por lo que se asigna, según la metodología un valor de ϕ igual a 0.4.
- iv. Gradiente de pendiente de la cuenca I.** Los valores del parámetro de pendiente en % se encuentran plasmados en el mapa digital de pendiente en cual es generado a partir del modelo digital del terreno (DEM) de la cuenca. Ver Figura 33 del anexo D.
- v. Consideración de los valores de π y F (superficie de la cuenca Km²)**

Son valores constantes y corresponden a $\pi = 3.1416$ y $F = 312.06 \text{ km}^2$

Como resultado de la aplicación de las ecuaciones necesarias, la tasa de producción anual de sedimentos por erosión (W) (m³/ año) va desde los 2,907 a 2, 781,421 m³ con una media anual de 261,337.97 m³.

La distribución espacial de las zonas de la cuenca más susceptibles a los procesos erosivos según el método de Gavrilović se muestra en el mapa de la figura 27 y se observa una distribución espacial bastante parecida a las áreas de erosión determinadas por la ecuación USLE con predominancia de los procesos erosivos de tipo normal, más del 60% de la superficie de la cuenca, y el tipo de proceso erosivo moderado con aproximadamente de 40% de la superficie de la cuenca.

Tabla 33

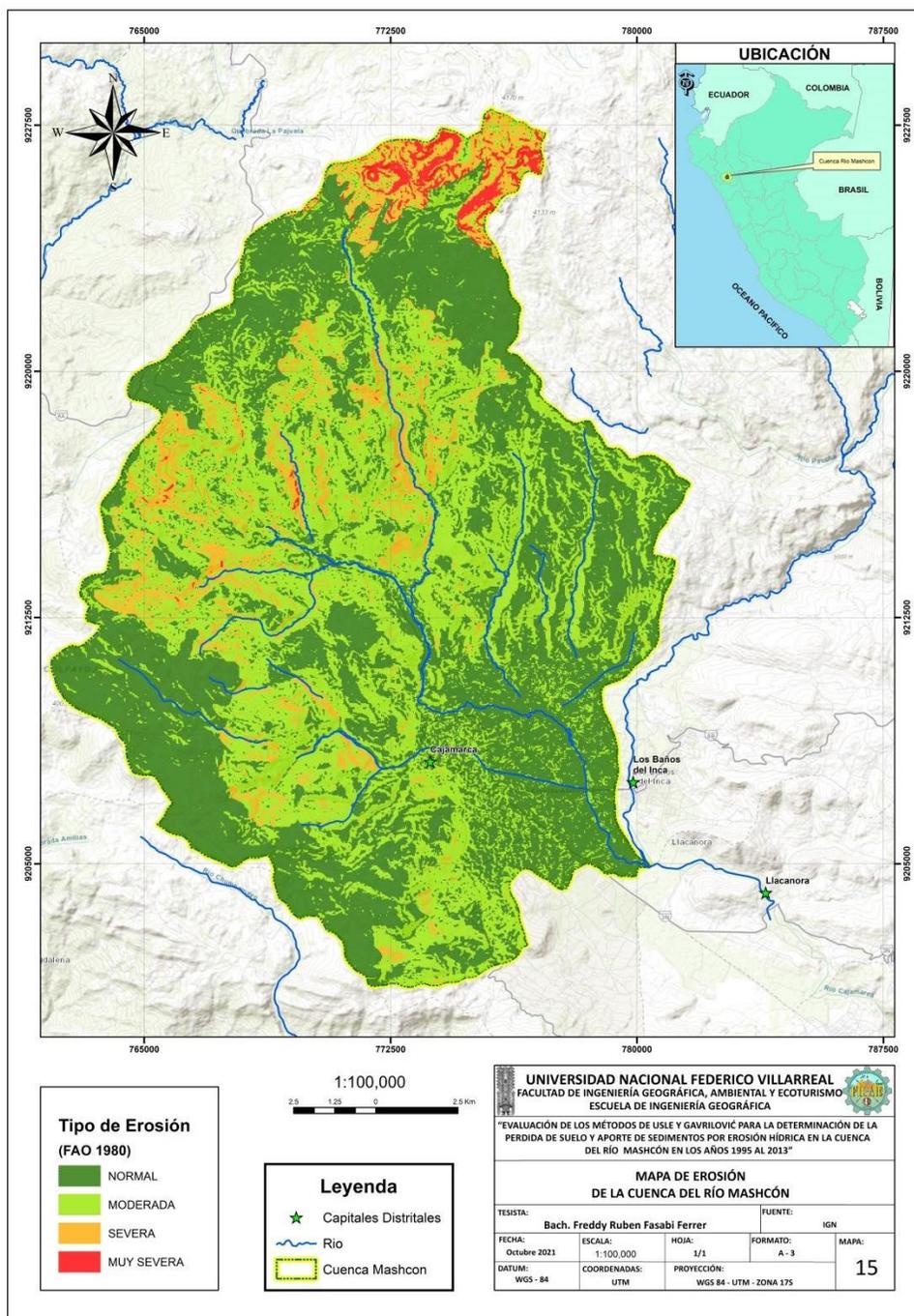
Distribución de los valores de W en la cuenca

Nivel	m3/año	Grado	Superficie km²	%
1	> 200,000	Ligera	154.22	49.42
2	200,000 - 500,000	Moderada	128.72	41.25
3	5000,000 - 1,000,000	Fuerte	24.73	7.93
4	> 1,000,000	Muy Fuerte	4.39	1.41
Total			312.06	100.00

Fuente: elaboración propia

Figura 27

Distribución espacial de la tasa de producción anual de sedimentos por erosión W en la cuenca del río Mashcón.



Fuente: elaboración propia

4.3. Estimación el aporte del volumen de sedimentos superficial al cauce principal a partir del cálculo de pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del río Mashcón.

4.3.1. Producción neta de sedimentos USLE

En la estimación de la parte del suelo erosionado que sale de la cuenca en forma de carga de sedimentos se ha definido mediante el coeficiente SY, expresada en la ecuación 39. Para el cálculo de la relación de erogación de sedimentos (SDR) se aplicaron las ecuaciones 40 y 41 planteadas por Vanoni y la USDA SCS, citadas por Basile (2008) teniendo en cuenta que la superficie de la cuenca es 312.06 km² y la producción media de sedimentos es 29.18 t/ha/año o 2,918.04 t/km²/año. Ver tablas 52 y 53 del anexo E.

Tabla 34

Valores de USLE

R	K	LS	C	A(t/ha/año)
161.15	0.02	30.18	0.3	29.18

Fuente: elaboración propia

Las ecuaciones aplicadas en la cuenca nos dan como resultado valores de SDR similares, promediando un 27%, lo que nos permite indicar que según este modelo el aporte de sedimentos que recibe el cauce de la cuenca vertiente (SY) es de 787.86 t/km²/año lo que equivale a un peso solido de 245,903.28 t/año y un volumen de 122,318.20 m³.

Tabla 35*Valores de SDR para la cuenca*

Ecuación	SDR
Vanoni, 1975 (40)	0.23
USDA SCS, 1970 (41)	0.30
Promedio	0.27

Fuente: elaboración propia

Las ecuaciones aplicadas en la cuenca nos dan como resultado valores de SDR similares, promediando un 27%, lo que nos permite indicar que según este modelo el aporte de sedimentos que recibe el cauce de la cuenca vertiente (SY) es de 787.86 t/km²/año lo que equivale a un peso solido de 245,903.28 t/año y un volumen de 122,318.20 m³.

4.3.2. *Cálculo del coeficiente de retención de sedimentos (R) Gavrilović*

Este coeficiente se calcula en función de datos morfométricos de la cuenca a través de la ecuación 34.

Los parámetros a utilizar se muestran en la tabla 36 y fueron obtenidos mediante el análisis en ambiente SIG tomando como base para la implementación de esta metodología las diferentes capas temáticas y el modelo digital del terreno.

Tabla 36*Valores de parámetros morfométricos para el cálculo de coeficiente de retención de sedimentos (R)*

(O) Km	(D) Km	(Li) Km	(L) Km	(F) km²	R
88.21	1.26	393.05	36.42	312.06	0.3

Fuente: elaboración propia

Donde O es el perímetro de la cuenca (km), D es la diferencia de nivel media en la cuenca (cota media menos cota mínima, en km), L_i es la longitud total de los afluentes fluviales laterales (km), L es la longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km), y F es la superficie de la cuenca (km²).

El volumen medio de entrega de sedimentos a la cuenca (R) corresponde al 30% del total producido, por lo que el volumen de sedimentos producido por erosión y transportado a la sección de cierre de la cuenca en estudio (G) se estimó en 78,401.39 m³/año.

Tabla 37

Valores de Gavri

T	h	$Z^{3/2}$	F (Km ²)	π	W (m ³ / año)
1.05	77.876	3.26	312.06	3.1416	261336.174

Fuente: elaboración propia

4.4. Determinación la diferencia de los resultados de la aplicación de los métodos de USLE y Gavrilović, en la determinación del volumen de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón.

Tabla 38

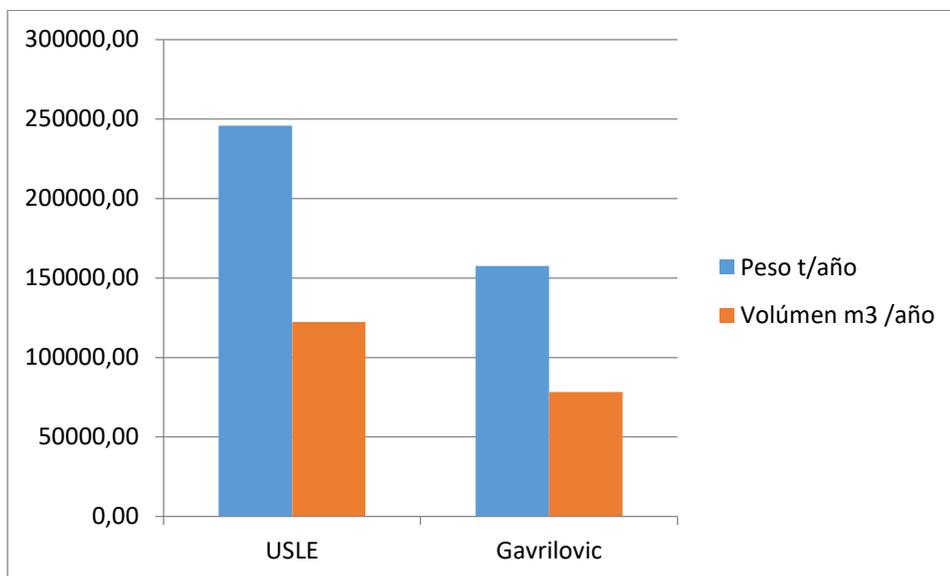
Comparación de la erosión real en la cuenca y descarga anual de sedimentos al cauce de la cuenca según los métodos aplicados

Método	Erosión media t/ha/año	Índice de aporte de sedimentos	Aporte de sedimentos t/ha/año	Aporte de sedimentos t/año	Aporte de sedimentos m ³ /año
USLE	29.18	SDR = 0.27	7.87	245,903.28	122,318.20
Gavrilović	16.83	R = 0.30	5.05	157,586.80	78,403.13

Fuente: elaboración propia

Gráfico 5

Aporte anual de sedimentos al cauce de la cuenca por método



Fuente: elaboración propia

4.5. Propuesta de conservación de suelos

Con base en manuales y propuestas planteadas por varios autores, como son la FAO (2000), Camacho (2012), Raudes y Sagastume (2011), entre otros, en el presente estudio, para la cuenca del río Mashcón, se realiza la siguiente propuesta.

4.5.1. Control de la erosión

Consiste en reducir la velocidad del paso de agua por sobre el suelo (escorrentía) para evitar que la corriente lo arrastre. Para ello se proponen las siguientes prácticas de conservación de suelo:

- a) Protección de la superficie del suelo mediante la restauración o mejora de la cobertura vegetal como barrera al golpe de las gotas de lluvia y la escorrentía.

- Capa de material vegetal muerto (rastrajo o mulch)
- Siembra de abono verde
- Agroforestería / silvopasturas
- Labranza mínima
- Siembras en contorno

b) Reducción del largo de la pendiente para disminuir la escorrentía y por lo tanto aumenta la infiltración del agua en el suelo. Entre las obras útiles para conseguir la reducción de la longitud de la pendiente se proponen:

- Establecimiento de barreras vivas
- Muros de retención
- Zanjas de ladera
- Terrazas de base angosta
- Callejones o hileras de árboles.

Ver figura 28, 29 y 30.

Siguiendo las recomendaciones del enfoque de Agricultura Sostenible en Laderas (ASEL), a continuación, se muestra el distanciamiento entre las obras físicas de conservación de suelos

Tabla 39*Distanciamiento entre las obras físicas*

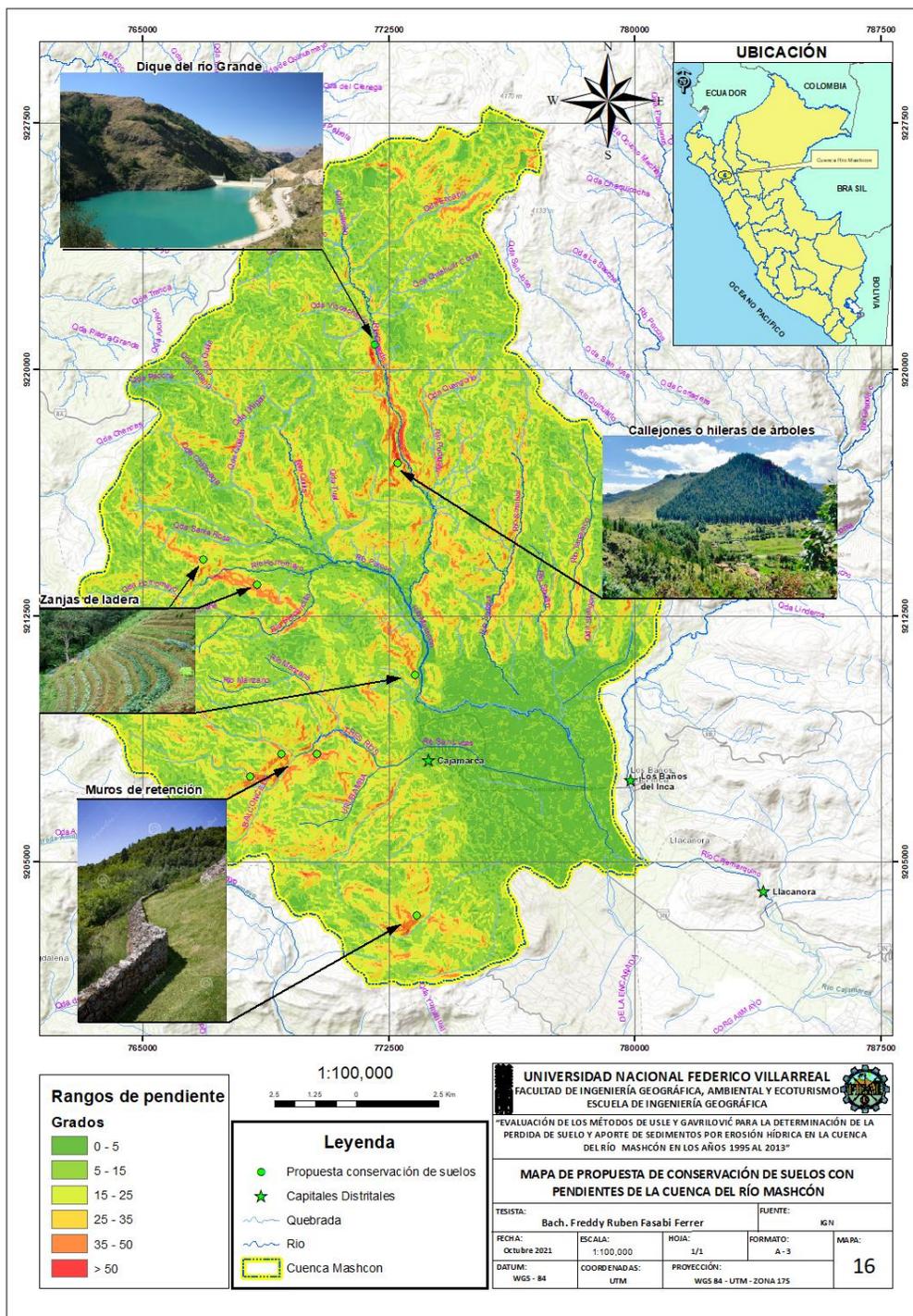
Obra de conservación de suelos	Pendiente suave hasta 15%	Pendiente moderada 15-30 %	Pendiente fuerte 30-50%
Barreras Vivas	15-30 m	10-15 m	4-10 m
Barreras muertas	10-20 m	6-10 m	4-6 m
Acequias	10-20 m	8-10 m	6-8 m
Diques de 1m	4-12 m	2-4 m	1.3 - 2 m

Fuente: Raudes y Sagastume (2011)

- c) Reducción de la inclinación de la pendiente mediante la construcción de terrazas las cuales además de evitar la escorrentía y aumentar la infiltración se constituyen en un tipo de plataforma cultivable.
- d) Incorporación de materia orgánica al suelo con la finalidad de crear una capa tipo esponja que funciona como una esponja que mejore tanto la infiltración y retención de agua, como la disminución de la escorrentía y la disponibilidad de nutrientes.

Figura 28

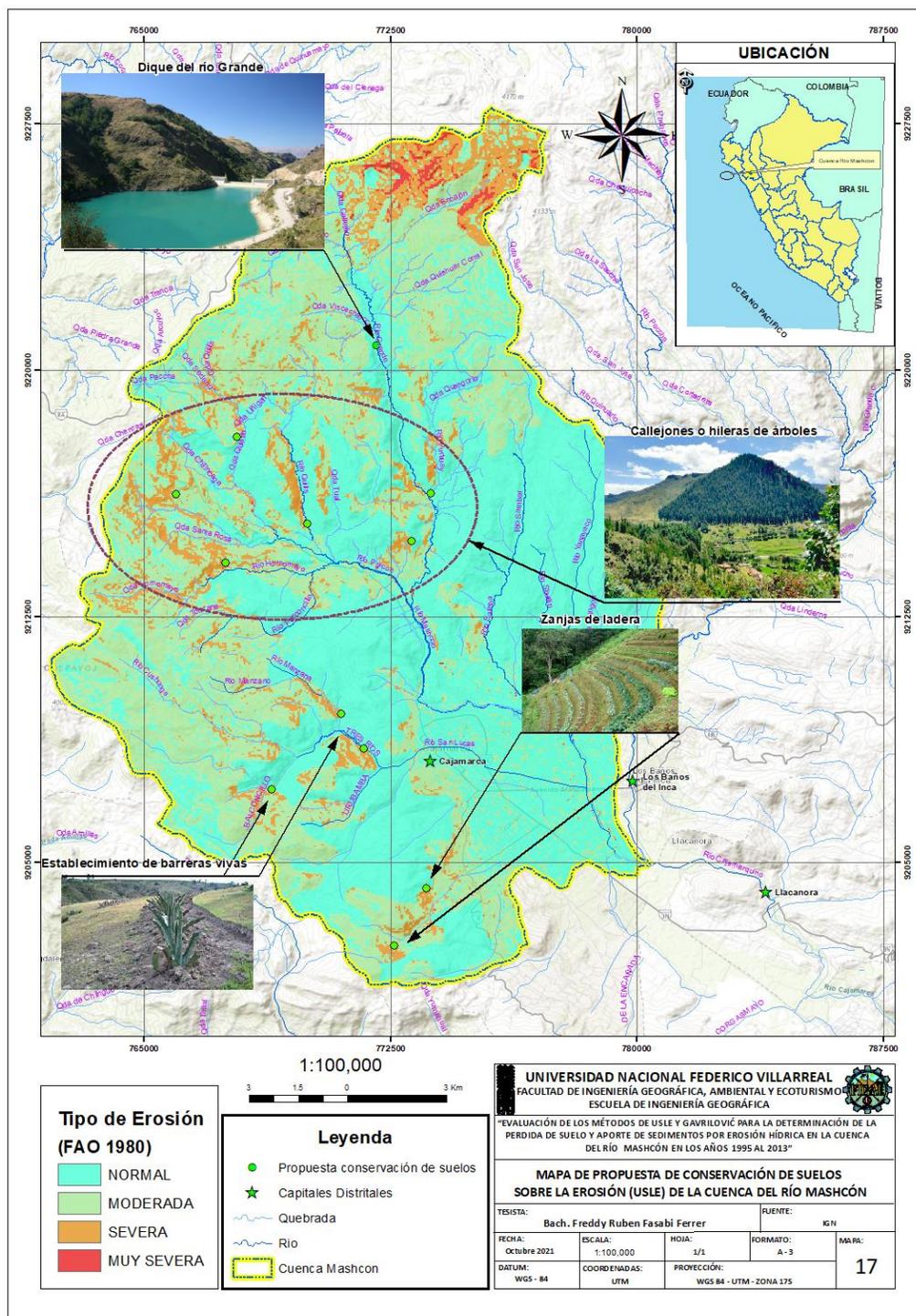
Propuesta de conservación de suelos de acuerdo a la pendiente de la cuenca del río Mashcón.



Fuente: elaboración propia

Figura 29

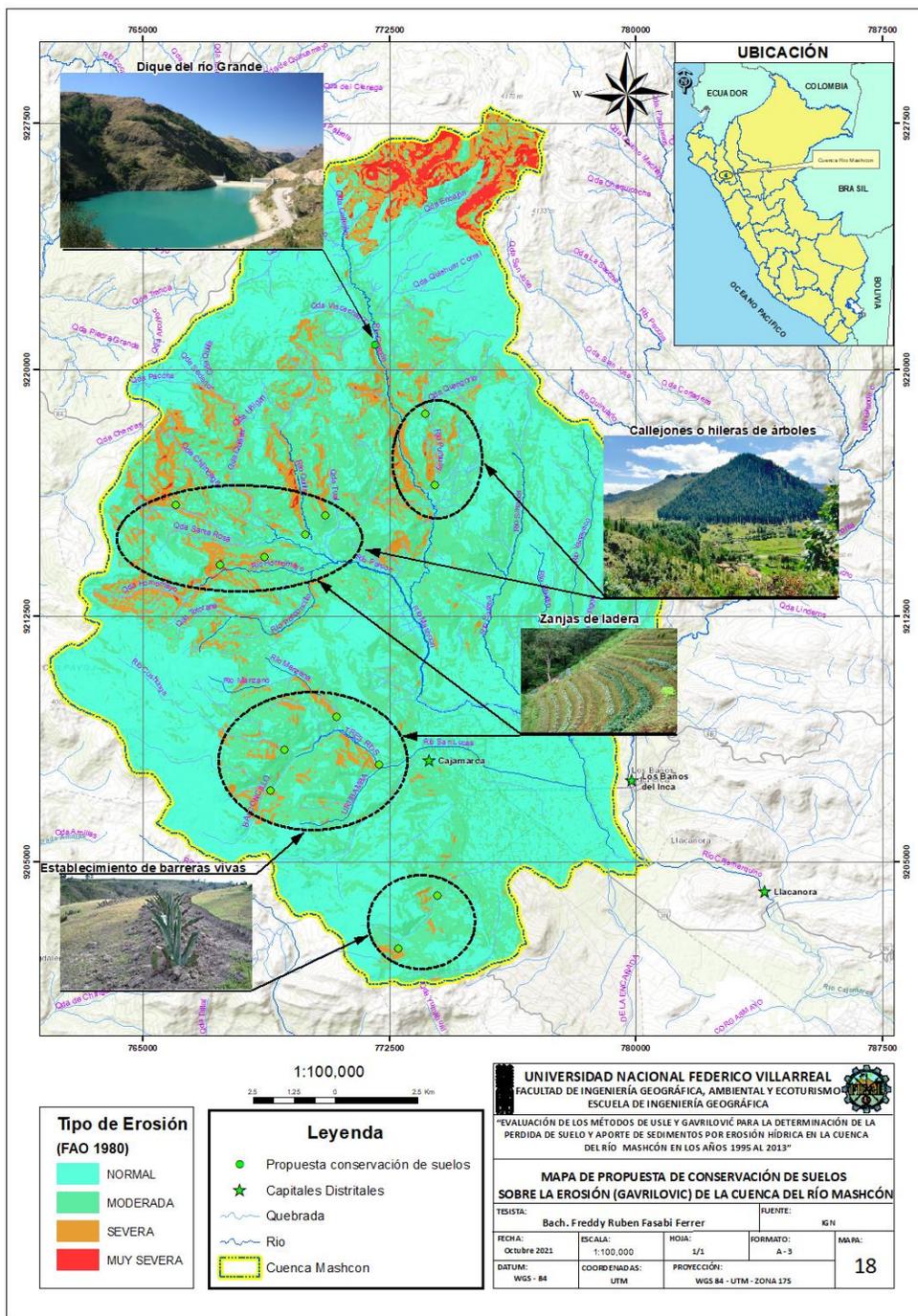
Propuesta de conservación de suelos sobre la erosión (USLE) de la cuenca del río Mashcón.



fuente: elaboración propia

Figura 30

Propuesta de conservación de suelos sobre la erosión (Gavrilović) de la cuenca del río Mashcón.



Fuente: elaboración propia

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para la realización del presente estudio se construyó una base de datos geoespacial en la que se dio relevancia a las variables: precipitación, temperatura, pendiente, suelos y cobertura vegetal. La poca disponibilidad de datos e información suficiente, actualizada y adecuada para el cálculo de los factores y coeficientes requeridos constituye una limitante que requiere de mucho tiempo y documentación para ser resuelta.

Los resultados no han sido validados con registros tomados directamente en campo y solo se ha podido establecer comparación con resultados obtenidos en otros estudios como los del **Plan de Gestión en las Cuencas de los Ríos Mashcón y Chonta, con Énfasis en el Afianzamiento Hídrico en las Subcuentas Azufre, Paccha y Río Grande, de Chonta, Cajamarca, Perú, realizado por la ANA en el año 2010**, en el que los observados indican la presencia de erosión fuerte en gran parte de la cuenca debido principalmente a una alta deforestación, escasa cobertura vegetal en las laderas, cultivos con tecnologías inadecuadas para el tipo de suelos y grandes movimientos de suelos lo cual se corrobora en el presente estudio cuando se afirma que la pendiente y la cobertura vegetal son factores con un gran influencia en la determinación del grado del proceso erosivo en la cuenca.

Evalutando el comportamiento de los factores involucrados en los modelos de estimación de la erosión aplicados tenemos que en la cuenca del río Mashcón, al igual que en la cuenca Tingo – Cajamarca (**Nayaka, 2018**), el factor de erosividad de la lluvia, la pendiente del terreno y la cobertura vegetal son factores determinantes en los procesos erosivos en su área de estudio. La agresividad climática, en especial de la variable precipitación, es de fuerte a muy fuerte en más del 50% de la cuenca y se incrementa con la altitud y su influencia en la variación de los niveles de

las precipitaciones. Los valores relacionados a la erodabilidad de los suelos K y Y son bajos, en promedio 0.02 y 0.8 respectivamente, por lo que se puede decir que los aspectos litológicos y edafológicos no tienen una gran influencia en la producción de sedimentos.

Espacialmente hay una marcada variación de la producción de sedimentos, con valores máximos en aquellas zonas con pendientes de fuerte a muy fuerte y con cobertura vegetal y uso actual de pajonales discontinuos y agricultura, aproximadamente el 10% de la superficie de la cuenca. Las áreas de menor producción de sedimentos se corresponden a aquellas zonas de pendientes poco inclinadas a moderadas y cuya cobertura vegetal predominante es matorral arbustivo, aproximadamente un 40% de la cuenca como se observa en las figuras 25, 26 y 27.

Al norte de la cuenca se presenta una superficie de 13.21 km² que, aunque no se caracteriza ser un área de pendientes fuertes a muy fuertes presenta la mayor producción de sedimentos, > de 50 t/ha/año, esto se debe principalmente a que, para ambas metodologías, la cobertura vegetal y uso clasificada como minería o suelo desnudo y se le asignó los valores de C y X respectivamente más altos. Esta superficie está dentro del polígono de la empresa minera Yanacocha S.R.L. y se presume que la misma cuenta con planes de conservación de suelos y control de la erosión, pero esto no ha fue considerado para el presente estudio. Estos resultados son comparables con los obtenidos por **Quispe (2018)** al estudiar la influencia de la cobertura vegetal en la erosión en la comunidad de San Mateo, donde se observó que las parcelas con cobertura vegetal nativa (*Festuca amethystina* L.) produjeron una menor pérdida de suelo, 10,901 t/ha-año, en comparación a las pérdidas de suelo de las parcelas con mulch, 17,18 t/ha-año; las parcelas con cobertura natural, 28,651 t/ha-año; y, las parcelas con suelo desnudo, 44,85 t/ha-año, esta última cifra es once veces mayor a la tasa considerada máxima permisible por la FAO (4 t/ha-año, para suelos de escasa profundidad)

La aplicación del método Gavrilović no es de gran difusión en el Perú por lo que existen muy pocos estudios para realizar comparaciones. Del análisis de la distribución espacial de las áreas de erosión resultantes de la aplicación de este método se evidencia de igual manera que los factores erosividad de la lluvia, la pendiente del terreno y la cobertura vegetal son factores determinantes en los procesos erosivos en el área de estudio, lo que es comparable con lo indicado por **Ríos (2018)** cuando afirma que en su análisis encuentra una importante dependencia del factor de erosividad de la lluvia, una marcada dependencia y efectos de escala en el factor topográfico LS (longitud e inclinación de la ladera) y cambios importantes en la magnitud al estimar la erosión potencial en zonas de cultivos.

El desarrollo metodológico planteado arroja valores estimados de erosión hídrica para la cuenca del río Mashcón de 29.18 t/ha/año según el método USLE y 16.83 t/ha/año según el método Gavrilović. Teniendo en cuenta los métodos para la estimación de la descarga media anual de sedimentos al cauce principal, el SDR aplicado al resultado de la ecuación USLE y el coeficiente de retención R al modelo Gavrilović, el valor de R es de 0.30 lo que indica que el aporte del volumen de sedimentos superficial al cauce principal erosionado es de 30 % de los sedimentos producidos en la cuenca, entre 5.05 y 7.87 ton/ha/año.

Los valores estimados por ambos métodos presentan diferencias significativas siendo los resultados de la USLE superiores a los estimados por el método EPM o de Gavrilović. Esta tendencia es comparable con los resultados obtenidos por **Ríos Arboleda en 2018 en las cuencas de montaña de los ríos Grande y San Andrés, Antioquia – Colombia**, 94.29 Ton/ha-año y 15.41 Ton/ha-año, respectivamente. Los resultados obtenidos por Morales (2016) en la cuenca El Naranjo, Cuba, también muestran diferencias significativas entre ambos métodos: 62.538 t/ha/año según el método Gavrilović y de 18.536 t/ha/año según la metodología de la USLE y en el caso

peruano los resultados obtenidos por **Mercado (2014) en la cuenca del río Allahualla**, las diferencias también son marcadas, 34.480 t/ha/año según Gavrilović y 17.686 t/ha/año según USLE. La estimación de la descarga media anual de sedimentos al cauce principal, el SDR aplicado al resultado de la ecuación USLE y el coeficiente de retención R al modelo Gavrilović, se tiene que **Mercado (2014)** obtuvo resultados de R igual al 0.19 lo que corresponde al 19% del total de sedimentos, **Morales (2016)** obtuvo un R igual a 0.12, mientras que para nuestro estudio el valor de R es de 0.30 indicando que la descarga media del material erosionado es de 30 % de los sedimentos producidos en la cuenca.

En cuanto a la clasificación del tipo de erosión predominante en el área de estudio los resultados obtenidos por ambos métodos permite calificar la erosión como moderada, **según la clasificación de la FAO, en contraste con los valores obtenidos en el estudio del 2017 para la elaboración del Atlas de Erosión por Regiones Hidrológicas del Perú**, en la que la cuenca del río Mashcón, como subcuenca del río Crisnejas, ubicada en la Región Atlántico 10, fue caracterizada por presentar una tasa promedio multianual de erosión de 101.7 t/ha/año, valor que califica con grado de erosión Alto, según clasificación FAO, pero no debe olvidarse que dicho estudio abarca un área mucho más extensa. El estudio más detallado realizado por **Nayaka (2018)** en la cuenca de la cuenca del río Tingo – Cajamarca, de similares características a la del Mashcón, estimó el tipo de erosión mediante el modelo R.U.S.L.E calificándolo como predominantemente moderado, según la FAO, con valores de pérdida de suelo media anual entre 10 a 50 t/ha/año en un 46.84% del área de estudio.

En este contexto, podemos establecer la necesidad de validar los resultados obtenidos en este estudio con observación y medición directa en campo pero destacamos las bondades de las

herramientas GIS en la cuantificación de sedimentos de una cuenca hidrográfica con escasos datos hidrológicos.

- Los resultados obtenidos según los modelos empleados, la precipitación, la pendiente y la cobertura vegetal son factores con una gran influencia en la determinación del grado del proceso erosivo en la cuenca por lo que la consideración de planes de conservación de suelos y control de la erosión que contemplen la mejora de la cobertura y calidad de la vegetación, así como de la longitud y grado de la pendiente es fundamental.

VI. CONCLUSIONES

- La evaluación de los métodos USLE y Gavrilović en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica nos permitió diferenciar los parámetros técnicos y metodológicos así los resultados obtenidos según los modelos empleados, la precipitación, la pendiente y la cobertura vegetal son factores con una gran influencia en la determinación del grado del proceso erosivo en la cuenca, de la misma manera pudimos obtener su influencia en el aporte de sedimentos al cauce principal en la cuenca del río Mashcón en los años 1995 al 2013.
- La estimación del volumen mediante el procesamiento de variables y la aplicación de los métodos USLE y Gavrilović utilizando la herramienta del Sistema de Información Geográfica, permitió la identificación de las zonas de erosión y la estimación de la pérdida de suelo en una superficie de 312.06 km². La tasa media anual de erosión según la USLE se estimó en 29.18 t/ha/año y según la ecuación de Gavrilović en 16.83 t/ha/año calificando la erosión en la cuenca como moderada y con valores por encima del límite de pérdida de suelos permitido internacionalmente, establecido por la FAO en 1980.
- La estimación de la producción neta o de entrega de sedimentos al cauce principal de la cuenca, arrojó resultados similares para ambos métodos, 27 % de la producción de los sedimentos según la las ecuaciones de SDR planteadas por Vanoni (1975) y USDA SCS (1970) relacionadas a la USLE y el 30% de los sedimentos producidos según la ecuación de Gavrilović, determinándose que la proporción entre la erosión y la sedimentación depende del área y/o pendiente de la cuenca aportante. A pesar de la diferencia significativa en los resultados obtenidos pueden

considerarse ambos métodos como complementarios, cuyos resultados agregan confiabilidad al análisis.

- La evaluación de la diferencia de los resultados de la aplicación de los métodos de USLE y Gavrilović, con respecto a la mayor pérdida de suelo según ambos métodos, fue identificada en la subcuenca alta, donde se encuentra asentada la actividad minera de la empresa Minera Yanacocha, con una tasa media anual de erosión de 107.50 t/ha/año según la USLE y 54 t/ha/año según la ecuación de Gavrilović. La menor tasa de pérdida de suelo según ambos métodos se produce en la subcuenta baja, en la cual se asienta la ciudad de Cajamarca.

VII. RECOMENDACIONES

- En la evaluación de los métodos USLE y Gavrilović en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica podemos ver que tuvimos limitaciones por no contar con información de suelos en el ámbito regional y datos de campo de las unidades de arena, limo y arcilla, utilizamos información de la FAO de gran escala por contener las unidades de arena, limo y arcilla, por lo tanto se recomienda la utilización de información de suelos de menor escala como por ejemplo la zonificación del ámbito a desarrollar, siempre en cuando tenga las unidades de suelos.
- La estimación del volumen de pérdida de suelo por erosión hídrica mediante el procesamiento de variables y la aplicación de los métodos USLE y Gavrilović utilizando la herramienta del Sistema de Información Geográfica, debido a la importancia que tiene la cuantificación de la erosión y el aporte de sedimento a nivel de cuencas para el control de erosión y conservación de suelos y debido a las limitaciones de los métodos señaladas se recomienda promover la validación de resultados con mediciones en campo o comparación con experiencias similares bien documentadas.
- La estimación de la producción neta o de entrega de sedimentos al cauce principal de la cuenca, se recomienda promover la realización de estudios similares al presente, extender los modelos a otras cuencas lo que permitiría tener estimaciones y proyecciones necesarias para diagnósticos

y propuestas para áreas de diversas características físicas y sociales con el fin de gestionar y priorizar proyectos de prevención y/o conservación de los suelos.

- La mayor pérdida de suelo según ambos métodos, fue identificada en la subcuenca alta y la menor tasa de pérdida de suelo según ambos métodos se produce en la subcuenta baja, en la cual se asienta la ciudad de Cajamarca. Aplicando la tecnología del Sistema de Información Geográfica y la teledetección son herramientas que combinadas aportan excelentes resultados en la caracterización de las cuencas hidrográficas y generación de modelos para la cuantificación y estimación de parámetros por lo cual se recomiendan su uso extensivo en la formulación de proyectos de conservación de cuencas.

VIII. REFERENCIAS

- Achuy, J. (2006). *Manual de Sistemas de Información Geográfica ArcGis*. (1ª ed.). Editorial grupo universitario.
- Agricultura, I. I. (INTAGRI). *Los Factores de Formación del Suelo*. Obtenido de <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/los-factores-de-formacion-del-suelo>
- Alva, J. M. (1976). *Agentes Erosivos y Tipos de Erosión*. Temuco, Chile: INIA.
- Andreazzini, M. J., Degiovanni, S., Irigoyen, M., y Spalletti, P. (2014). En *Producción de sedimentos en una cuenca de sierras pampeanas, Córdoba, Argentina. Estimación ara distintos escenarios* (pp. 38 - 49). Córdoba, Argentina: Aqua-LAC - Vol. 6.
- Angelone, S., Garibay, M. T., y Cauhapé Casaux, M. (2006). *Permeabilidad de Suelos*. Obtenido de Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario. Rosario, Argentina: <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua. (2010). *Resolución Jefatural N° 188-2010-ANA*. Diario El Peruano.
- Autoridad Nacional del Agua. (2014). *Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos de la ANA*. Obtenido de <http://www.ana.gob.pe/etiquetas/sistema-nacional-de-informacion-de-recursos-hidricos-snrh>
- Badía, D., Palacio, J., Andrés, R., Martí, C., y Cuchí, J. A. (2010). Cronosecuencia edáfica en terrazas del río Alcanadre (Los Monegros, NE-España). *Actas IV Congreso Ibérico de la Ciencia del Suelo*. Granada, España.

- Balairón, L. (2002). *Gestión de los recursos hídricos*. Cataluña, España: Segunda edición. Editorial Universidad Pontífice.
- Balochi, F., y Brea, J. D. (2010). *Procesos de erosión – sedimentación en cauces y cuencas*. Montevideo, Uruguay: Volumen I. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe.
- Basile, P. A. (2008). *Modelación de procesos de erosión / sedimentación en sistemas hidrológicos*. Rosario, Argentina: Departamento de Hidráulica. Universidad Nacional de Rosario.
- Benítez Flores, O. (2014). *Análisis comparativo de la erosión hídrica por los métodos de USLE y varillas en la subcuenca del río Pusmalca – Piura*. [Tesis de Grado]. Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo. Universidad Nacional Federico Villarreal..
- Brea, J. D., y Spaletti, P. D. (2010). *Generación y transporte de sedimentos en cuencas de río de montaña*. Montevideo, Uruguay: Documentos del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe.
- Cabrejos Valdivia, M. N. (2016). *Modelamiento geoespacial en la determinación del riesgo, vulnerabilidad y de la cuantificación de la erosión hídrica en la micro cuenca del río Atuen – Amazonas*. [Tesis de Grado]. Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Camacho Zorogastúa, K. (2012). *Evaluación de la erosión hídrica por efecto de la precipitación máxima en la cuenca del Cumbaza*. [Tesis de Grado]. Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo. Universidad Nacional Federico Villarreal.
- Centro Agronómico Tropical De Investigación y Ense. (1996). *Gestión ambiental para el manejo de cuencas municipales. Área de Cuencas y Sistemas Agroforestales. Curso corto*. Coronado, Costa Rica.

- Crozier, M. J. (1999). *Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model Earth Surf, Process, Landforms*. London, England.
- Cruden, D. M. (1991). *A Simple definition of a landslide: Bulletin of the International Association of Engineering Geology* N° 43. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02590167>
- Desmet, P. J., y Govers, G. A. (1996). *GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units*. Obtenido de *Journal of Soil and Water Conservation*: <http://www.jswconline.org/content/51/5/427.short>
- Di Silvio, G. (1988). *A one-dimensional model for the transport of a sediment mixture in nonequilibrium conditions*. *Journal of Hydraulic Research*, 26(3).
- Dominic, M., Zvikomborero, H., Lewis, J., Nhapi, I., y Aidan Senzanje. (2008). *Integrated Water Resources Management (IWRM) – From Concept to Practice. Journal Science Direct. Physics and Chemistry of the Earth*, 33.
- Duque Escobar, G., Escobar, P., y C.E. (2017). *Geotecnia para el trópico andino*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- E.S.R.I. (1995). *Understanding GIS The ArcInfo Method. Environmental Systems Research Institute Inc*. Nueva York, Estados Unidos.
- Elegren, J., y D. Lee. (2007). *Taller de Diseminación del Análisis Ambiental del Perú (CEA) Conservación de Recursos Naturales: Suelos, Recursos Forestales y Biodiversidad*. Obtenido de <https://vdocuments.mx/taller-de-diseminacion-del-analisis-ambiental-del-peru-cea-conservacion-de-recursos-naturales-suelos-recursos-forestales-y-biodiversidad-prof-david-.html>

- Ellison, W. D. (1947). *Soil Erosion studies. Agricultural Engineering*, 28. Madison, Estados Unidos.
- FAO. (1980). Metodología provisional pra la evaluación de la degradación de suelos. Roma, Italia.
- FAO, O. A., y PNUMA, P. e. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma, Italia.
- FAO, O. d. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma.
- Felipe Morales, C., y Reynel, C. (1987). *Agroforestería tradicional en Los Andes del Perú. para la evaluación de la degradación de los suelos*. Lima, Perú.
- Ferrán Conill, A. (2007). *Modelización de la erosión hídrica en los suelos. El enfoque de sistemas en las CTMA*. Obtenido de Revista de Didáctica Ambiental S.L.: <http://www.didacticaambiental.com/revista/numero6/Sistemas3.html>
- Foster, G. R., y Onstad, C. A. (1975). *Erosion modelling on a watershed*. American Society of Agronomy. 18.
- Foster, G. R., Meyer, L. D., y Onstand, C. A. (1977). *A runoff erosivity and variable slope length exponents for soil loss estimates*. Transactions of ASAE.
- García, C., y P. A. (2010). *Metodologías de medición de la erosión y sedimentación*. Montevideo, Uruguay: Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe.
- García, R. J. (2010). *La restauración hidrológico forestal, como herramienta en la disminución de producción de sedimentos*. Montevideo, Uruguay: Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para América Latina y el Caribe.
- Global Water Parnership. (2002). Obtenido de <http://www.gwpforum.org>.

- Grupo TRAGSA, y Ministerio de Medio Ambiente. (1998). *Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión*. Madrid, España: Ed. Mundi-prensa.
- Gutiérrez Elorza, M. (2001). *Geomorfología climática*. Barcelona, España: Editorial Omega.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Madrid, España: Pearson Educación S.A.
- Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics*. San Diego, U.S.A.: Academic Press.
- Ins. Innovación Tecnológica en Agricultura México, I. (s.f.). *Los Factores de Formación del Suelo*. Obtenido de <https://www.intagri.com/articulos/horticultura-protegida/los-factores-de-formacion-del-suelo>
- Instituto Geológico Minero y Metalúrgico, I. (2007). *Movimientos en Masa para la Región Andina*. Obtenido de Publicación Geológica Multinacional N° 4: <http://www.ingemmet.gob.pe/documents/73138/442884/GuiaEvaPeligros.pdf>
- Jaramillo, J., y D. F. (2002). *Introducción a la Ciencia del Suelo. Facultad de Ciencias*, . Obtenido de Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia: <http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf>
- Jorge, J., Vallejo, P., y Zamora, G. (2018). *Estimación de la tasa sedimentos en la cuenca minera del lago Poopo mediante el modelo potencial de erosión de suelos (EPM) y tendencias ante variaciones climáticas - Uso de herramientas SIG y teledetección*. Oruro, Bolivia: Revista de Medio Ambiente Minero y Minería. N° 4.
- Kirkby, M. J., R., P. C., y Morgan. (1984). *Erosión de suelos*. México: Editorial Limusa.
- Lee., E. J. (2007). *Taller de Diseminación del Análisis Ambiental del Perú (CEA) Conservación de Recursos Naturales: Suelos, Recursos Forestales y Biodiversidad*. Lima.
- Llerena, C., Rothwell, R., y Zhang, H. (1987). *Test of erodability rating system for the foothills of Alberta*. Canada: Forest hidrology and watershed management. Publ. IAHS.

- Lyttleton Lyon, T., y Buckman, H. O. (1947). *Edafología. Naturaleza y propiedades del suelo*. Buenos Aires, Argentina: Editorial ACME Agency Soc. Resp. LTDA.
- Mancilla Escobar, G. A. (2008). *Uso de la ecuación universal de pérdidas del suelo (USLE) en el campo forestal*. Facultad de Ciencias Forestales: Facultad de Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales.
- Martínez Salvador, A. (2017). *Modelos de Estimación de Erosión del Suelo y Producción de Sedimentos Aplicados a una Cuenca de Drenaje Semiárida: el Área Vertiente al Embalse del Argos (Cuenca del Segura)*. Murcia, España: Escuela de Geografía, Universidad de Murcia. Tesis doctoral.
- Martínez, V. (1999). *Simulación y comprobación experimental de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas no aforadas mediante modelos distribuidos implementados sobre SIG*. Madrid, España: Escuela técnica superior de ingenieros agrónomos. Tesis doctoral.
- Mayuri, L. (2004). *Aplicación de la percepción remota y el sistema de información geográfica para la demarcación territorial*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. Tesis de grado.
- Ministerio de Agricultura, M. (2014). *Técnicas de Conservación de Suelos*. Obtenido de http://agroaldia.minag.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manualesboletines/suelos/2014/tecnicas_puno.pdf.
- Montes-León, M. A., Uribe Alcántara, E. M., y García Celis, E. (2010). *Mapa Nacional de Erosión Potencial*. Querétaro, México: Agroasemex, S.A.
- Moreno, A. (2006). *Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS*. Mexico: Primera edición. Alfaomega Grupo editor S.A.

- Morera Julca, S. (2009). Uso de la Herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) en la cuenca del río Santa. *Tesis de Grado*. Cajamarca, Perú: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Morera Julca, S. B. (2009). *Uso de Herramientas de Sistema de Información Geográfica (SIG) para la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) en la Cuenca del Río Santa*. Cajamarca, Perú: Universidad Nacional de Cajamarca. Tesis de grado.
- Morgan R. P. C. (1974). *Estimating Regional Variations in Soil Erosion Hazard in Peninsular Malaysia*. *Malaysia Nature Journal* N° 28 y *conservación del suelo*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Morgan R.P.C. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. Madrid, España: Ediciones Mundi-Prensa.
- Muñoz Jiménez, J. (1995). *Geomorfología General*. Madrid, España: Segunda edición. Edit. Síntesis.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. Obtenido de Girona, España: <http://volaya.github.io/libro-sig/index.html>
- Olivera, F., y Maidment, D. R. (1996). *Storm Runoff Computation Using Spatial Distributed terrain Parameters*. Austin, Estados Unidos: Universidad de Texas.
- Ordoñez, J. (2004). *Una metodología de diagnóstico físico conservacionista para el manejo de una microcuenca, utilizando técnicas de percepción remota y sistemas de información geográfica (SIG)*. Lima. Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. Tesis de maestría.
- Pérez Ayala, F., Peviani, M. A., y Rafaelli, S. (1998). *Estudio de Producción de Sedimentos en la Cuenca Montañosa del río Iruya (Argentina)*. Buenos Aires, Argentina: Artículo de investigación. Comisión Regional del Río Bermejo.

- Pfafstetter, O. (1989). *Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodologia de Codificação*. Rio de Janeiro: RJ: DNOS.
- Pizarro, T. R., Cultiño, M. H., Flores V., J. P., Sangüesa, P. C., y Martínez, A. E. (1997). *Metodología de los clavos de erosión para la evaluación cuantitativa de la erosión hídrica superficial*. Talca, Chile: Sociedad EIAS Ltda. Universidad de Talca.
- Ramos Taipe, C. L. (2001). *Modelamiento Ambiental para Análisis de Susceptibilidad Erosiva en la cuenca media y alta del Rio Cañete y determinación del Mapa De Erosión*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina .
- Rasmus, T. (1994). *Capacidad Erosiva de las Lluvias en la Cuenca de los ríos Chira y Piura*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina. Tesis de grado.
- Vahrson, W., y Cervantes, C. (1991). *Escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal Costa Rica*. Heredia, Costa Rica: Memoria del Taller de Erosión de Suelos. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Vahrson, W., Alfaro, M., y Palacios, G. (s.f.). *Escorrentía superficial y erosión laminar en Puriscal Costa Rica*. Heredia, Costa Rica: Memoria del Taller de Erosión de Suelos. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation engineering / prepared by the ASCE Task Committee for the Preparation of the Manual on Sedimentation of the Sedimentation Committee of the Hydraulics Division*. New York: American Society of Civil Engineers.
- Vásquez, A. (2000). *Manejo de Cuencas Altoandinas*. Lima, Perú: Tomo I. Universidad Agraria La Molina.
- Velásquez, S. (2008). *Erosión de suelos utilizando la EUPSR (RUSLE)*. Coronado, Costa Rica: Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza.

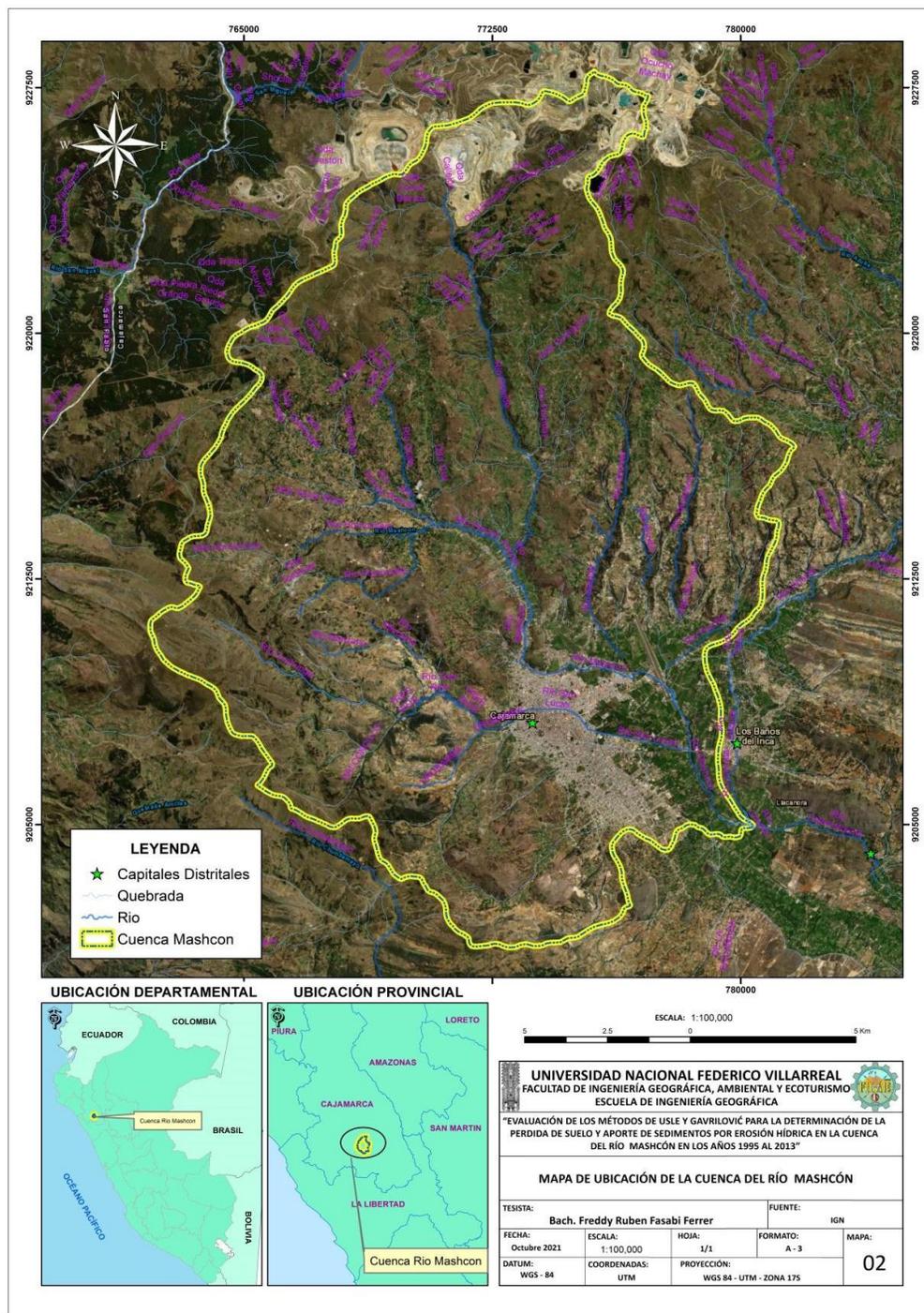
- Villón Bejar, M. (2011). *Hidrología*. Lima, Perú: Tercera Edición. Editorial Villón.
- Williams, J. R. (1995). *Chapter 25: The EPIC model*. Singh (ed.) Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications.
- Wischmeier, W. y. (1978). A rainfall erosion index for the universal soil loss equation. *Proceedings*. EEUU: Soil Science Society American.
- Wischmeier, W. H. (1976). *Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation*. Iowa, EEUU: Journal of soil and water conservation.
- Wischmeier, W. H., y Smith, D. (1959). *A rainfall erosion index for the universal soil-loss equation*. EEUU: Soil Science Society American, Proceedings.
- Worthen, E. L. (1949). *Suelos agrícolas: Su conservación y fertilización*. México: U.T.E.H.A.
- Zambrano Nájera, J. (2015). *Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo de base física basado en SIG*. [Tesis doctoral]. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña.

IX. ANEXOS

Anexo N^a A – Mapas del Ámbito Geográfico y Político

Figura 31

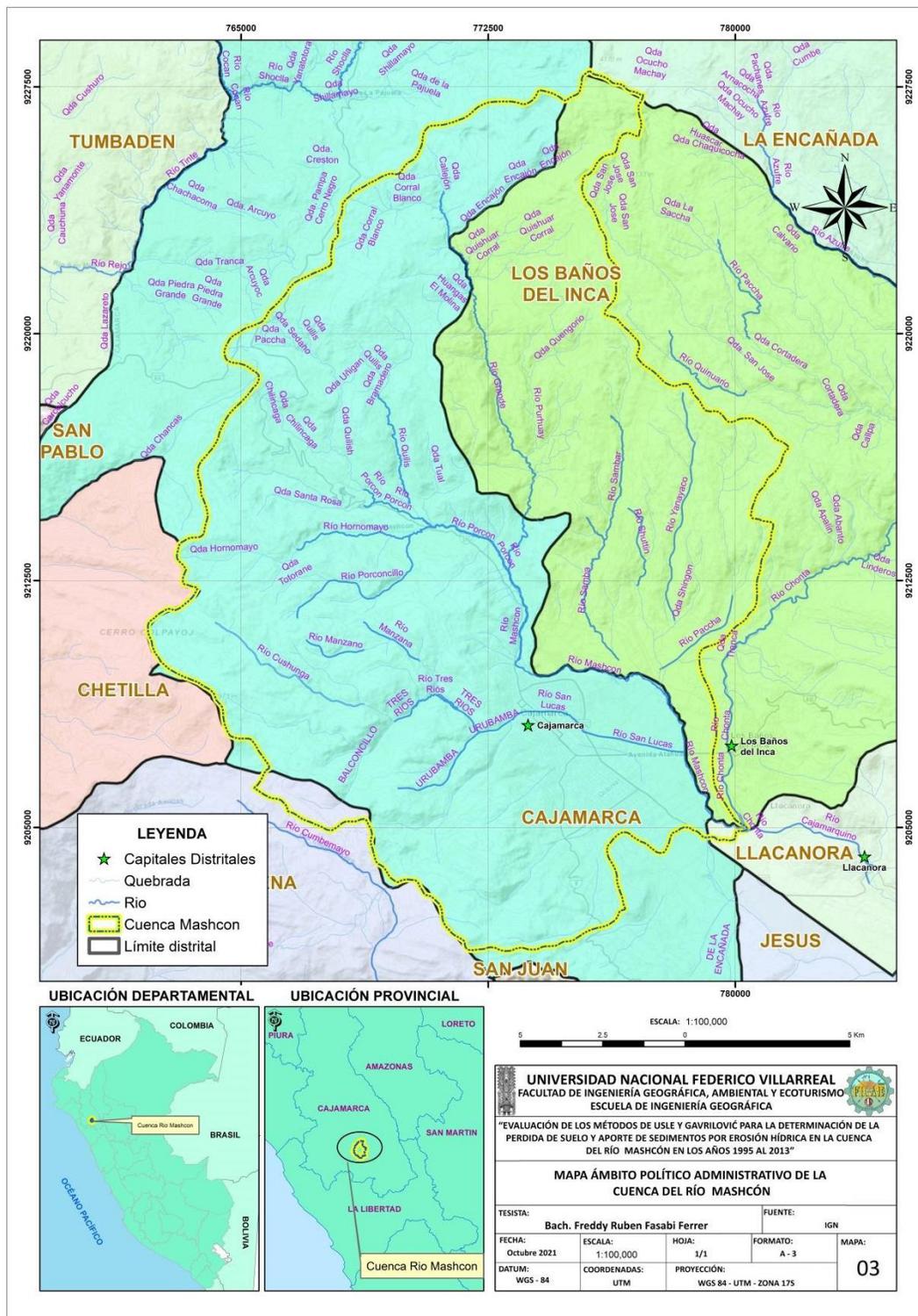
Ámbito Geográfico de la cuenca del río Mashcón con Imagen Satelital



Fuente: Elaboración Propia

Figura 32

Ámbito Político Administrativo de la cuenca del río Mashcón



Fuente: Elaboración Propia

Anexo N° B – Factor de erosividad de la lluvia (R)

Tabla 40

Datos de precipitación media mensual y anual de la estación Maqui Maqui para la serie 1995 – 2013

AÑO	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1995	20.55	145.03	154.56	84.46	72.52	14.22	3.94	3.56	22.23	70.36	156.21	169.00
1996	78.99	155.19	184.91	97.79	55.12	22.86	2.79	10.41	44.07	146.30	55.37	83.31
1997	94.20	125.20	74.90	63.50	25.10	12.96	6.10	2.30	25.90	89.70	136.40	118.60
1998	57.40	192.52	161.03	119.36	93.40	5.80	0.40	1.60	18.00	155.40	160.80	47.40
1999	162.40	315.20	137.36	69.60	101.40	93.20	17.00	7.20	123.60	58.00	110.20	238.00
2000	86.40	211.80	196.20	97.60	68.40	26.40	5.00	35.80	136.40	9.60	55.20	147.80
2001	243.20	148.84	257.40	99.60	65.40	6.80	12.80	3.40	72.00	124.60	170.40	193.60
2002	53.00	106.60	188.80	168.60	35.20	15.80	18.40	3.30	40.80	195.60	134.03	207.21
2003	92.40	101.60	113.80	25.60	9.40	13.20	4.40	4.40	13.40	18.00	22.43	118.68
2004	95.73	67.06	109.98	71.49	21.56	7.36	22.09	8.65	55.62	115.56	186.96	202.96
2005	116.34	140.19	325.65	122.92	30.47	17.52	11.43	17.77	36.84	292.36	73.91	229.36
2006	91.43	257.28	270.77	122.42	21.57	58.65	9.65	22.62	33.01	139.95	168.88	276.59
2007	120.13	72.39	236.23	137.41	67.29	6.33	51.03	37.06	33.24	233.95	194.82	108.21
2008	145.30	250.94	167.90	102.86	87.35	28.95	16.25	41.38	91.42	154.16	134.62	128.74
2009	263.65	173.73	256.28	198.37	134.61	74.41	24.88	29.44	45.19	182.11	200.40	176.24
2010	74.65	147.56	241.32	113.27	109.72	22.08	16.76	4.56	27.67	119.63	267.71	198.13
2011	118.58	193.26	277.61	222.25	28.93	17.76	22.85	13.69	98.03	92.20	168.38	198.13
2012	367.02	296.41	134.86	116.82	52.31	15.98	2.54	10.65	3.81	217.93	311.41	71.27
2013	96.77	144.02	172.72	76.45	162.56	9.91	26.67	43.94	12.19	149.09	80.01	161.04
TOTAL	2378.15	3244.82	3662.28	2110.36	1242.31	470.19	274.98	301.73	933.42	2564.50	2788.13	3074.27
MEDIA	125.17	170.78	192.75	111.07	65.38	24.75	14.47	15.88	49.13	134.97	146.74	161.80

Fuente: MYSRL: Empresa Minera Yanacocha S.R.L.

Tabla 41

Valores de Índice Modificado de Fournier mensual (fórmula 10) de la estación Maqui Maqui para la serie 1995 – 2013

AÑO	IMF MENSUAL											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1995	0.46	22.95	26.06	7.78	5.74	0.22	0.02	0.01	0.54	5.40	26.62	31.16

AÑO	IMF MENSUAL											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1996	6.66	25.70	36.49	10.20	3.24	0.56	0.01	0.12	2.07	22.84	3.27	7.41
1997	11.45	20.23	7.24	5.20	0.81	0.22	0.05	0.01	0.87	10.38	24.01	18.15
1998	3.25	36.58	25.59	14.06	8.61	0.03	0.00	0.00	0.32	23.84	25.52	2.22
1999	18.40	69.32	13.16	3.38	7.17	6.06	0.20	0.04	10.66	2.35	8.47	39.52
2000	6.93	41.67	35.76	8.85	4.35	0.65	0.02	1.19	17.28	0.09	2.83	20.29
2001	42.31	15.85	47.39	7.10	3.06	0.03	0.12	0.01	3.71	11.10	20.77	26.81
2002	2.41	9.73	30.54	24.35	1.06	0.21	0.29	0.01	1.43	32.78	15.39	36.78
2003	15.89	19.21	24.10	1.22	0.16	0.32	0.04	0.04	0.33	0.60	0.94	26.21
2004	9.50	4.66	12.53	5.30	0.48	0.06	0.51	0.08	3.21	13.84	36.22	42.69
2005	9.57	13.89	74.96	10.68	0.66	0.22	0.09	0.22	0.96	60.42	3.86	37.18
2006	5.68	44.94	49.78	10.18	0.32	2.34	0.06	0.35	0.74	13.30	19.36	51.94
2007	11.12	4.04	42.99	14.55	3.49	0.03	2.01	1.06	0.85	42.16	29.24	9.02
2008	15.64	46.65	20.88	7.84	5.65	0.62	0.20	1.27	6.19	17.61	13.43	12.28
2009	39.51	17.16	37.33	22.37	10.30	3.15	0.35	0.49	1.16	18.85	22.83	17.65
2010	4.15	16.21	43.36	9.55	8.96	0.36	0.21	0.02	0.57	10.66	53.36	29.23
2011	9.69	25.73	53.09	34.03	0.58	0.22	0.36	0.13	6.62	5.86	19.53	27.04
2012	84.14	54.88	11.36	8.52	1.71	0.16	0.00	0.07	0.01	29.66	60.57	3.17
2013	8.25	18.27	26.28	5.15	23.28	0.09	0.63	1.70	0.13	19.58	5.64	22.84

Fuente: cálculos propios

Tabla 42

Valores de Índice Modificado de Fournier anual ajustado (fórmula 11) de la estación Maqui Maqui para la serie 1995 – 2013

AÑO	IMF MENSUAL AJUSTADO												R TOTAL
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
1995	0.08	29.02	35.12	5.73	3.63	0.03	0.00	0.00	0.10	3.31	36.26	45.92	159.21
1996	4.54	34.40	58.18	8.61	1.54	0.11	0.00	0.01	0.79	28.82	1.56	5.32	143.87
1997	10.23	24.02	5.14	3.13	0.19	0.03	0.00	0.00	0.21	8.83	31.06	20.42	103.28
1998	1.55	58.42	34.18	13.92	6.67	0.00	0.00	0.00	0.05	30.72	34.04	0.87	180.42
1999	20.84	152.38	12.61	1.64	5.07	3.94	0.02	0.00	9.19	0.95	6.51	65.60	278.76
2000	4.82	71.01	56.44	6.95	2.39	0.14	0.00	0.34	18.97	0.01	1.26	24.13	186.45
2001	72.65	16.65	86.13	4.99	1.41	0.00	0.01	0.00	1.89	9.77	24.99	36.65	255.13
2002	0.99	8.02	44.55	31.72	0.29	0.03	0.04	0.00	0.45	49.54	15.94	58.89	210.44
2003	16.72	22.23	31.24	0.36	0.02	0.05	0.00	0.00	0.05	0.12	0.24	35.43	106.46
2004	7.73	2.66	11.71	3.22	0.09	0.00	0.09	0.01	1.52	13.59	57.55	73.63	171.79
2005	7.81	13.67	171.33	9.21	0.14	0.03	0.01	0.03	0.25	123.97	2.00	59.86	388.31
2006	3.57	79.54	92.72	8.57	0.05	0.94	0.00	0.05	0.17	12.80	22.50	98.83	319.75

AÑO	IMF MENSUAL AJUSTADO												R TOTAL
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
2007	9.79	2.14	74.41	14.65	1.72	0.00	0.75	0.29	0.21	72.28	41.74	7.15	225.12
2008	16.33	84.12	25.20	5.79	3.55	0.13	0.02	0.38	4.07	19.50	12.99	11.36	183.42
2009	65.57	18.76	60.22	27.93	8.73	1.47	0.06	0.09	0.33	21.61	28.79	19.58	253.13
2010	2.23	17.23	75.38	7.79	7.08	0.06	0.03	0.00	0.11	9.18	102.91	41.72	263.73
2011	7.96	34.45	102.12	52.40	0.12	0.03	0.06	0.01	4.50	3.74	22.79	37.12	265.29
2012	203.74	107.32	10.11	6.57	0.59	0.02	0.00	0.00	0.00	42.65	124.45	1.49	496.95
2013	6.25	20.61	35.56	3.08	29.65	0.01	0.13	0.59	0.01	22.87	3.53	28.82	151.11
TOTAL	463.39	796.65	1022.36	216.26	72.92	7.00	1.23	1.80	42.85	474.28	571.11	672.79	4342.64
R MEDIA	24.39	41.93	53.81	11.38	3.84	0.37	0.06	0.09	2.26	24.96	30.06	35.41	228.56

Fuente: cálculos propios

Tabla 43

Datos de precipitación media mensual y anual de la estación Granja Porcón para la serie

1995 – 2013

AÑO	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1995	139.69	228.80	217.69	127.80	112.69	12.60	53.50	48.90	54.90	96.50	125.90	243.88
1996	198.80	407.50	312.70	141.30	59.70	49.70	0.00	20.29	48.50	232.88	80.58	58.59
1997	186.88	190.30	123.19	260.00	81.00	18.50	39.00	9.89	80.50	169.19	301.60	305.10
1998	168.50	380.50	298.70	243.19	85.40	0.00	0.00	14.80	67.58	234.69	158.80	92.40
1999	210.30	494.20	253.50	126.00	166.69	53.90	20.29	6.40	228.30	65.30	138.60	166.38
2000	74.80	237.00	221.10	168.60	160.69	40.70	1.60	16.29	123.19	19.29	62.79	236.50
2001	341.10	227.69	419.20	92.58	88.69	17.60	15.18	0.40	145.19	169.50	156.10	171.80
2002	76.19	188.80	390.10	159.00	38.09	27.79	15.18	2.58	53.29	202.10	226.50	243.00
2003	103.80	134.88	124.30	81.19	76.00	54.40	28.88	15.60	47.20	101.80	112.58	100.00
2004	70.30	230.38	168.19	82.40	75.40	11.68	41.00	19.10	84.80	147.00	168.00	240.88
2005	157.80	231.19	343.29	93.08	91.58	53.70	0.00	7.09	54.40	152.80	28.60	164.80
2006	145.50	188.10	345.70	184.69	62.79	62.00	5.09	15.68	116.58	39.79	158.50	183.60
2007	246.60	64.50	352.29	226.30	57.70	1.10	42.59	20.10	32.79	171.80	211.10	170.38
2008	190.60	291.20	252.38	150.30	76.00	73.30	16.00	11.00	110.90	182.60	133.19	66.40
2009	344.79	197.50	307.29	149.60	127.40	31.29	18.10	8.00	27.00	184.00	187.88	234.80
2010	108.00	169.69	275.70	163.50	83.08	39.40	45.79	33.59	30.60	82.69	96.50	182.60
2011	257.00	148.88	284.60	269.39	21.20	8.50	13.68	4.80	55.40	84.50	93.00	265.39
2012	325.89	320.00	160.88	210.69	109.58	32.40	0.00	45.79	33.70	137.69	202.50	67.58
2013	145.69	270.39	364.10	203.00	193.38	32.79	17.70	43.50	30.38	174.50	33.20	238.50
TOTAL	3492.23	4601.50	5214.90	3132.61	1767.06	621.35	373.58	343.80	1425.20	2648.62	2675.92	3432.58

AÑO	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
MEDIA	183.80	242.18	274.47	164.87	93.00	32.70	19.66	18.09	75.01	139.40	140.84	180.66

Fuente: SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

Tabla 44

Valores de Índice Modificado de Fournier mensual (fórmula 10) de la estación Granja

Porcón para la serie 1995 – 2013

AÑO	IMF MENSUAL											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1995	13.34	35.79	32.39	11.17	8.68	0.11	1.96	1.63	2.06	6.37	10.84	40.66
1996	24.54	103.11	60.71	12.40	2.21	1.53	0.00	0.26	1.46	33.67	4.03	2.13
1997	19.79	20.52	8.60	38.30	3.72	0.19	0.86	0.06	3.67	16.22	51.53	52.74
1998	16.27	82.99	51.14	33.90	4.18	0.00	0.00	0.13	2.62	31.57	14.45	4.89
1999	22.92	126.56	33.30	8.23	14.40	1.51	0.21	0.02	27.01	2.21	9.95	14.34
2000	4.11	41.22	35.88	20.86	18.95	1.22	0.00	0.19	11.14	0.27	2.89	41.05
2001	63.06	28.10	95.24	4.65	4.26	0.17	0.12	0.00	11.43	15.57	13.21	16.00
2002	3.58	21.97	93.79	15.58	0.89	0.48	0.14	0.00	1.75	25.17	31.62	36.39
2003	10.99	18.55	15.76	6.72	5.89	3.02	0.85	0.25	2.27	10.57	12.92	10.20
2004	3.69	39.63	21.12	5.07	4.25	0.10	1.26	0.27	5.37	16.14	21.08	43.33
2005	18.07	38.78	85.50	6.29	6.08	2.09	0.00	0.04	2.15	16.94	0.59	19.70
2006	14.04	23.46	79.25	22.62	2.61	2.55	0.02	0.16	9.01	1.05	16.66	22.35
2007	38.07	2.60	77.70	32.06	2.08	0.00	1.14	0.25	0.67	18.48	27.90	18.17
2008	23.38	54.57	40.99	14.54	3.72	3.46	0.16	0.08	7.91	21.46	11.42	2.84
2009	65.40	21.46	51.95	12.31	8.93	0.54	0.18	0.04	0.40	18.63	19.42	30.33
2010	8.90	21.96	57.97	20.39	5.26	1.18	1.60	0.86	0.71	5.22	7.10	25.43
2011	43.85	14.71	53.77	48.18	0.30	0.05	0.12	0.02	2.04	4.74	5.74	46.76
2012	64.50	62.18	15.72	26.96	7.29	0.64	0.00	1.27	0.69	11.51	24.90	2.77
2013	12.15	41.85	75.88	23.59	21.40	0.62	0.18	1.08	0.53	17.43	0.63	32.56

Fuente: cálculos propios

Tabla 45

Valores de Índice Modificado de Fournier anual ajustado (fórmula 11) de la estación

Granja Porcón para la serie 1995 – 2013

AÑO	IMF MENSUAL AJUSTADO
-----	----------------------

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JU N	JU L	AG O	SET	OCT	NOV	DIC	R TOTAL
1995	12.86	56.52	48.68	9.85	6.75	0.01	0.72	0.55	0.78	4.24	9.42	68.44	218.82
1996	32.09	276.39	124.89	11.52	0.87	0.50	0.00	0.03	0.47	51.59	2.14	0.82 101.1	501.32
1997	23.23	24.53	6.66	62.57	1.89	0.02	0.21	0.00	1.86	17.24	97.66	0	336.98
1998	17.33	199.59	96.56	52.11	2.26	0.00	0.00	0.01	1.12 37.0	46.83	14.51	2.86	433.18
1999	28.96	375.86	50.73	6.23	14.42	0.49	0.03	0.00	5	0.87	8.29	14.34	537.27
2000	2.20 132.2	69.87	56.73	25.16	21.78	0.35	0.00	0.02	9.81 10.2	0.04	1.30	69.43	256.70
2001	0	39.32	245.39	2.64	2.32	0.02	0.01	0.00	0	16.22	12.67	16.89	477.90
2002	1.79	27.18	239.78	16.24	0.22	0.09	0.01	0.00	0.61	33.34	46.93	57.96	424.15
2003	9.61	21.10	16.51	4.60	3.77	1.38	0.21	0.03	0.90	9.07	12.27	8.60	88.06
2004	1.87	65.87	25.63	3.01	2.31	0.01	0.37	0.04	3.29	17.11	25.54	75.30	220.35
2005	20.27	63.75	208.72	4.16	3.96	0.80	0.00	0.00	0.83	18.41	0.12	23.09	344.11
2006	13.89	30.00	186.25	28.40	1.12	1.07	0.00	0.02	7.14	0.28	17.95	27.90	314.02
2007	62.02	1.11	180.82	47.93	0.79	0.00	0.32	0.03	0.15	20.97	38.91	20.46	373.50
2008	29.84 139.6	106.43	69.29	14.63	1.89	1.70	0.02	0.01	5.88	26.24	10.18	1.26	267.37
2009	4	26.24	98.85	11.41	7.04	0.10	0.02	0.00	0.07	21.22	22.59	44.10	371.29
2010	7.00	27.17	116.53	24.30	3.19	0.34	0.53	0.21	0.16	3.14	5.00	33.86	221.44
2011	76.65 136.7	14.90	104.09	88.28	0.04	0.00	0.01	0.00	0.77	2.72	3.63	84.41	375.51
2012	4	129.46	16.45	36.95	5.20	0.13	0.00	0.38	0.15	10.31	32.81	1.22	369.80
2013	11.18	71.46	174.49	30.24	26.14	0.13	0.02	0.30	0.10	19.21	0.13	49.04	382.45
TOTAL	759.3	1626.7	2067.0	480.2	105.9	7.15	2.49	1.64	81.3	319.0	362.0	701.0	6514.22
R MEDIA	39.97	85.62	108.79	25.28	5.58	0.38	0.13	0.09	4.28	16.79	19.06	36.90	342.85

Fuente: cálculos propios

Tabla 46

Datos de precipitación media mensual y anual de la estación A. Weberbauer para la serie 1995 – 2013

AÑO	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1995	44.70	108.30	75.69	49.70	20.60	1.70	13.19	10.80	11.50	51.79	50.50	76.40
1996	65.19	124.00	120.09	50.40	13.69	0.80	0.50	15.80	13.89	76.19	68.80	34.09
1997	63.79	152.89	26.50	40.40	17.00	15.39	0.20	0.00	27.39	50.79	119.90	129.39
1998	103.00	116.50	257.00	83.90	19.60	4.80	1.29	4.69	17.79	79.59	29.10	47.90
1999	94.80	242.69	69.50	65.00	53.70	22.79	22.10	1.20	81.40	21.70	77.00	68.80
2000	46.00	162.30	126.30	77.30	40.50	15.60	2.09	13.39	56.59	9.89	44.50	122.30
2001	191.19	100.80	230.19	57.20	48.09	2.29	13.89	0.00	34.40	46.20	93.40	90.90
2002	27.00	60.00	133.10	77.19	23.00	8.80	10.69	3.40	14.60	90.30	99.90	86.09

AÑO	MES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2003	51.09	61.40	100.40	42.09	30.70	22.29	1.79	10.60	14.80	46.00	63.79	80.69
2004	36.09	102.00	56.90	44.50	42.40	2.09	13.80	29.39	19.00	63.40	92.59	123.69
2005	87.69	53.70	136.60	54.00	7.19	4.50	0.60	3.50	31.20	92.30	30.00	87.80
2006	83.19	101.59	199.30	77.59	7.69	23.89	1.79	6.09	34.29	12.69	60.40	81.69
2007	95.40	17.50	182.39	111.50	29.00	1.39	10.69	6.40	11.60	118.90	97.59	68.80
2008	80.19	133.30	118.40	99.09	22.70	15.39	2.29	11.69	34.70	96.50	68.80	67.40
2009	180.69	74.59	110.50	78.80	42.20	17.89	12.30	3.90	11.80	78.50	109.40	74.19
2010	49.50	112.90	154.00	88.40	31.60	8.60	2.70	1.29	28.89	43.40	52.50	70.80
2011	76.59	73.30	125.19	102.00	16.70	0.40	8.30	0.00	47.09	31.50	25.20	109.69
2012	154.19	139.50	126.40	72.80	51.50	0.20	0.00	2.50	19.10	83.19	120.30	58.29
2013	63.59	98.00	213.60	73.80	62.59	7.50	5.69	8.89	3.70	110.69	17.00	53.59
TOTAL	1593.88	2035.26	2562.05	1345.66	580.45	176.31	123.90	133.53	513.73	1203.52	1320.67	1532.50
MEDIA	83.89	107.12	134.84	70.82	30.55	9.28	6.52	7.03	27.04	63.34	69.51	80.66

Fuente: SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

Tabla 47

Valores de Índice Modificado de Fournier mensual (fórmula 10) de la estación A. Weberbauer para la serie 1995 – 2013

AÑO	IMF MENSUAL											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1995	3.88	22.78	11.13	4.80	0.82	0.01	0.34	0.23	0.26	5.21	4.95	11.34
1996	7.28	26.35	24.72	4.35	0.32	0.00	0.00	0.43	0.33	9.95	8.11	1.99
1997	6.32	36.32	1.09	2.54	0.45	0.37	0.00	0.00	1.17	4.01	22.34	26.01
1998	13.87	17.74	86.32	9.20	0.50	0.03	0.00	0.03	0.41	8.28	1.11	3.00
1999	10.95	71.77	5.89	5.15	3.51	0.63	0.60	0.00	8.07	0.57	7.22	5.77
2000	2.95	36.75	22.26	8.34	2.29	0.34	0.01	0.25	4.47	0.14	2.76	20.87
2001	40.23	11.18	58.32	3.60	2.55	0.01	0.21	0.00	1.30	2.35	9.60	9.09
2002	1.15	5.68	27.94	9.40	0.83	0.12	0.18	0.02	0.34	12.86	15.74	11.69
2003	4.97	7.17	19.18	3.37	1.79	0.95	0.01	0.21	0.42	4.03	7.74	12.39
2004	2.08	16.62	5.17	3.16	2.87	0.01	0.30	1.38	0.58	6.42	13.70	24.45
2005	13.05	4.90	31.68	4.95	0.09	0.03	0.00	0.02	1.65	14.46	1.53	13.09
2006	10.03	14.95	57.55	8.72	0.09	0.83	0.00	0.05	1.70	0.23	5.29	9.67
2007	12.12	0.41	44.29	16.55	1.12	0.00	0.15	0.05	0.18	18.82	12.68	6.30
2008	8.57	23.68	18.68	13.08	0.69	0.32	0.01	0.18	1.60	12.41	6.31	6.05
2009	41.08	7.00	15.36	7.81	2.24	0.40	0.19	0.02	0.18	7.75	15.06	6.93
2010	3.80	19.77	36.79	12.12	1.55	0.11	0.01	0.00	1.29	2.92	4.28	7.78
2011	9.52	8.72	25.44	16.89	0.45	0.00	0.11	0.00	3.60	1.61	1.03	19.53

AÑO	IMF MENSUAL											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2012	28.71	23.50	19.30	6.40	3.20	0.00	0.00	0.01	0.44	8.36	17.48	4.10
2013	5.63	13.36	63.49	7.58	5.45	0.08	0.05	0.11	0.02	17.05	0.40	4.00

Fuente: cálculos propios

Tabla 48

Valores de Índice Modificado de Fournier anual ajustado (fórmula 11) de la estación A.

Weberbauer para la serie 1995 – 2013

AÑO	IMF MENSUAL AJSTADO												R TOTAL
	IENE	IFEB	IMAR	IABR	IMAY	IJUN	IJUL	IAGO	ISET	IOCT	INOV	IDIC	
1995	2.02	28.70	9.80	2.77	0.20	0.00	0.05	0.03	0.03	3.14	2.91	10.08	59.73
1996	5.19	35.72	32.44	2.40	0.05	0.00	0.00	0.07	0.05	8.29	6.10	0.74	91.05
1997	4.20	57.78	0.30	1.07	0.08	0.06	0.00	0.00	0.33	2.12	27.87	35.02	128.82
1998	13.63	19.72	211.73	7.37	0.09	0.00	0.00	0.00	0.07	6.29	0.31	1.37	260.58
1999	9.57	160.51	3.77	3.08	1.74	0.13	0.12	0.00	6.06	0.11	5.13	3.66	193.88
2000	1.34	58.82	27.72	6.35	0.91	0.05	0.00	0.03	2.49	0.01	1.21	25.17	124.11
2001	67.37	9.87	117.58	1.80	1.07	0.00	0.03	0.00	0.39	0.95	7.85	7.24	214.17
2002	0.33	3.57	38.99	7.60	0.20	0.01	0.02	0.00	0.05	12.17	16.49	10.55	89.98
2003	2.92	5.07	22.17	1.63	0.63	0.24	0.00	0.03	0.07	2.13	5.69	11.51	52.10
2004	0.79	17.89	3.11	1.49	1.29	0.00	0.04	0.43	0.12	4.30	13.38	31.91	74.74
2005	12.45	2.86	47.06	2.91	0.01	0.00	0.00	0.00	0.56	14.52	0.50	12.50	93.37
2006	8.38	15.26	115.26	6.80	0.01	0.20	0.00	0.00	0.59	0.03	3.21	7.94	157.67
2007	11.13	0.07	77.81	17.78	0.31	0.00	0.02	0.00	0.02	21.56	11.92	4.18	144.79
2008	6.62	30.42	21.31	12.49	0.15	0.05	0.00	0.02	0.54	11.54	4.18	3.93	91.26
2009	69.51	4.89	15.90	5.77	0.89	0.07	0.02	0.00	0.02	5.70	15.43	4.81	123.00
2010	1.96	23.22	58.92	11.14	0.51	0.01	0.00	0.00	0.39	1.32	2.33	5.73	105.52
2011	7.76	6.80	33.88	18.33	0.08	0.00	0.01	0.00	1.80	0.54	0.28	22.79	92.27
2012	40.62	30.08	22.38	4.28	1.51	0.00	0.00	0.00	0.08	6.38	19.29	2.19	126.81
2013	3.52	12.90	133.55	5.51	3.36	0.01	0.00	0.01	0.00	18.58	0.07	2.11	179.62
TOTAL	269.31	524.15	993.67	120.57	13.09	0.83	0.31	0.63	13.66	119.68	144.14	203.42	2403.47
R MEDIA	14.17	27.59	52.30	6.35	0.69	0.04	0.02	0.03	0.72	6.30	7.59	10.71	126.50

Fuente: cálculos propios

Anexo N° C – Cálculo del factor K (erodabilidad del suelo en t/MJ/mm)

Tabla 49

*Valores de los factores: contenido de arena (**fcsand**), contenido de limo (**fcl – si**), contenido de carbono orgánico (**forgc**), contenido de carbono orgánico (**forgc**) calculados aplicando las fórmulas 16, 17 y 18 respectivamente*

Soil unit symbol	sand % topsoil	silt % topsoil	clay % topsoil	OC % topsoil	fcsand	fcl – si	forgc
HL	39.1	26.5	34.6	1.46	0.20019142	0.77832575	0.81894776
I	58.9	16.2	24.9	0.97	0.20000098	0.75631368	0.92716884

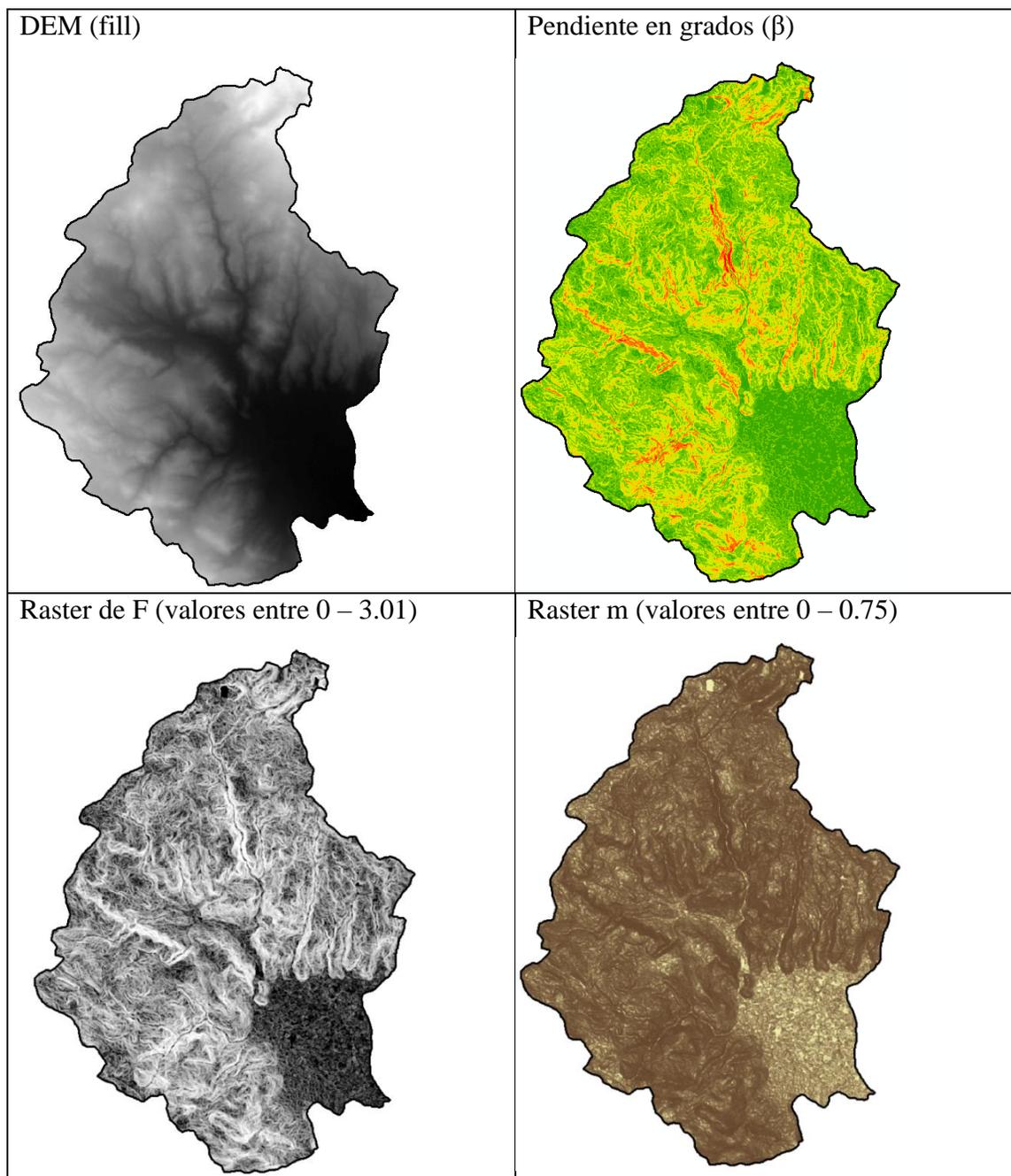
Fuente: cálculos propios

Tabla 50

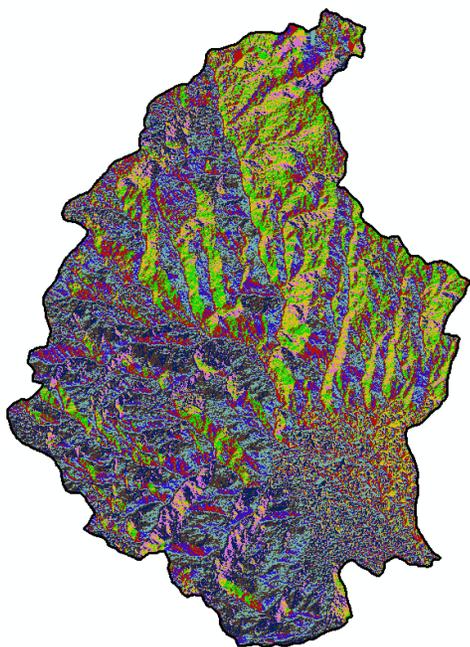
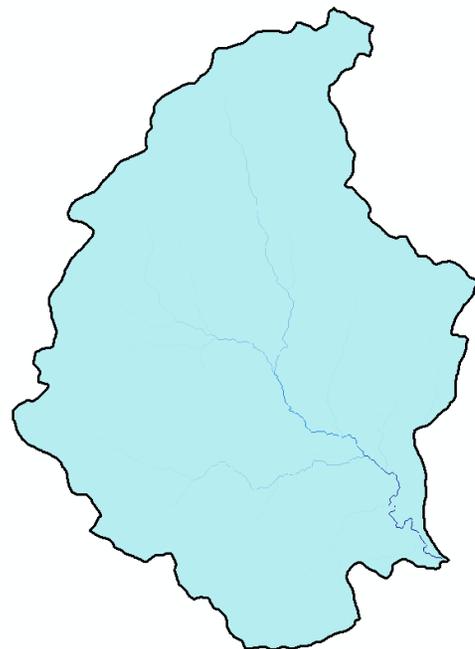
Valores de K aplicando la fórmula 15

Soil unit symbol	fcsand	fcl – si	forgc	fhisand	Constante	K
HL	0.20	0.78	0.82	1.00	0.1317	0.02
I	0.20	0.76	0.93	1.00	0.1317	0.02

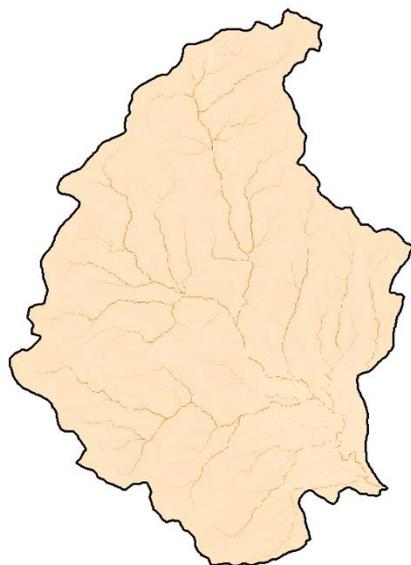
Fuente: cálculos propios

Anexo N° D – Cálculo del factor LS (longitud y grado de la pendiente)**Figura 33***Mapas raster para el cálculo del factor LS*

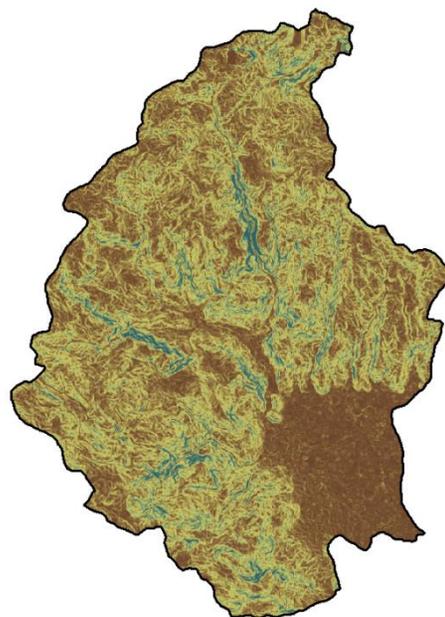
1. Raster de dirección de flujo

2. Raster de acumulación de flujo (A_{ij})

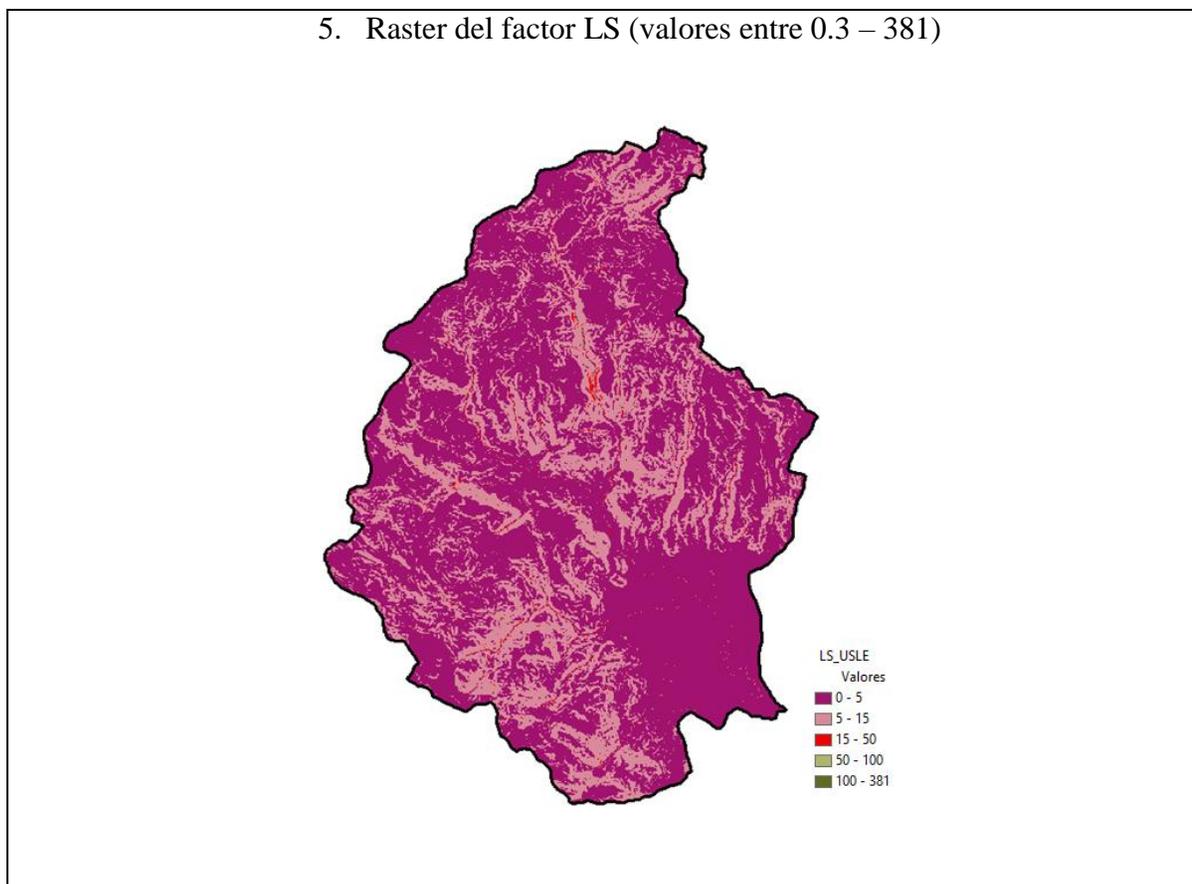
3. Raster del factor L (valores entre 1 – 55.99)



4. Raster del factor S (valores entre 0.03 – 14.50)



5. Raster del factor LS (valores entre 0.3 – 381)

**Tabla 51**

Valores del factor LS en la cuenca

<i>Valores LS</i>	<i>Superficie km²</i>
0-5	217.3
5 - 15	92.54
15 -50	1.58
50 -100	0.37
100 -381	0.27
Total	312.06

Fuente: cálculos propios

Anexo N° E – Producción neta de sedimentos

Tabla 52

Cálculo de los valores del coeficiente de entrega de sedimento SDR

Ecuación	F (km²)	Constantes	SDR
Vanoni, 1975 (40)	312.06	$F^{-0.125} = 0.4878$	0.2302
USDA SCS, 1970 (41)	312.06	$F^{-0.11} = 0.5317$	0.3009
Promedio			0.2656

Fuente: cálculos propios

Tabla 53

Cálculo del volumen promedio de sedimentos que van al cauce de la cuenca a partir de La tasa de pérdida de suelos media

USLE MEDIA	29.18	t/ha/año
SDR	0.27	= 27%
SY	7.8786	t/ha/año
SY km ²	787.86	t/km ² /año
Superficie	312.06	km ²
SY/Superficie	245,859.59	t/año
Peso esp. 2.01 t/m ³	122,318.20	m ³

Fuente: cálculos propios

Anexo N° F – Estimación de la Erosión Hídrica mediante Gavrilović

Tabla 54

Datos de temperatura media mensual y anual de la estación Maqui Maqui para la serie 2002 – 2013

AÑO	MES												MEDIA
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
2002	6.37	6.53	6.50	6.37	6.28	5.73	5.32	5.71	6.16	5.83	6.21	7.09	6.18
2003	6.83	6.55	6.01	6.50	6.20	5.81	5.13	5.93	5.76	6.45	6.29	5.94	6.12
2004	6.49	7.00	6.86	6.50	6.77	5.21	5.01	5.16	5.61	6.22	6.26	6.55	6.14
2005	6.79	7.39	6.57	6.90	6.30	6.13	5.70	5.81	6.20	5.98	6.40	5.72	6.32
2006	6.38	6.67	6.51	6.42	5.94	5.35	5.19	5.72	6.20	6.28	6.32	6.42	6.12
2007	7.54	6.39	6.41	6.50	6.37	5.67	5.54	5.39	5.07	6.02	6.30	5.89	6.09
2008	6.23	5.66	5.39	5.82	5.86	5.54	5.03	5.75	5.87	5.85	6.38	6.12	5.79
2009	6.26	6.10	6.22	6.27	5.89	5.79	5.39	6.02	6.16	6.68	6.64	6.52	6.16
2010	7.14	7.49	7.47	7.40	6.83	5.79	5.97	5.75	5.89	5.84	5.78	5.44	6.40
2011	5.81	5.42	5.41	6.03	6.24	5.79	4.87	5.38	5.20	10.54	6.22	5.94	6.07
2012	5.96	5.32	6.08	6.20	5.91	5.21	5.23	5.23	5.44	5.98	6.01	6.16	5.73
2013	7.12	6.30	6.80	6.84	6.33	5.61	4.88	5.22	6.02	6.22	6.40	5.70	6.12
MEDIA	6.58	6.40	6.35	6.48	6.24	5.64	5.27	5.59	5.80	6.49	6.26	6.16	6.10

Fuente: MYSRL: Empresa Minera Yanacocha S.R.L.

Tabla 55*Datos de temperatura media mensual y anual de la estación Granja Porcón para la serie**1995 – 2013*

AÑO	MES												MEDIA
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1995	9.89	10.07	9.76	10.54	9.78	9.94	9.89	9.7	9.95	9.89	9.85	9.59	9.9
1996	9.22	9.51	10.29	9.67	9.33	8.67	8.63	9.47	9.99	9.82	8.36	10.58	9.46
1997	10.54	11.12	10.32	10.72	10.79	9.59	10.74	11.02	10.78	11.09	11.07	12.07	10.82
1998	12.02	11.85	11.72	12.08	11.49	11.04	9.75	9.82	10.67	11.07	10.38	9.72	10.97
1999	10.41	10.52	10.14	10.57	10.14	9.65	9.16	9.41	9.95	9.76	9.92	10.16	9.98
2000	9.32	9.78	10.33	10.54	10.11	9.46	9.03	9.5	10.14	9.59	8.28	9.9	9.66
2001	10.44	10.72	10.8	10.52	10.14	9.45	9.15	9.91	9.86	10.47	10.68	10.78	10.24
2002	10.47	11.15	11.25	10.68	10.56	9.84	9.48	9.72	9.72	10.27	10.42	10.99	10.38
2003	10.84	10.65	10.26	10.68	9.62	8.99	9.27	9.97	10.05	10.62	10.54	10.08	10.13
2004	9.52	10.82	11.32	10.67	10.31	9.82	9.26	9.89	9.76	10.3	10.48	11.05	10.27
2005	10.33	11.51	11.25	11.33	9.54	9.72	9.45	9.79	10.17	10.15	9.11	10.07	10.2
2006	10.13	11.47	11	10.36	9.66	9.66	9.47	9.98	10.13	9.99	10.52	11.05	10.28
2007	11.81	10.54	11.34	10.72	10.42	9.7	9.63	9.21	9.41	10.1	10.75	9.62	10.27
2008	10.8	10.42	10.29	10.45	9.97	9.16	8.72	9.5	10.17	10.48	10.6	9.76	10.03
2009	9.88	10.01	10.25	10.64	9.72	9	10.03	9.93	10.56	11.04	10.89	11.42	10.28
2010	11.75	12.78	12.73	11.95	11.58	9.7	9.4	9.35	10.06	9.4	9.22	10.1	10.66
2011	10.04	10.1	9.92	10.8	10	10.14	9.38	9.53	9.85	9.4	10.64	10.42	10.02
2012	10.75	9.99	11.3	10.89	10.44	10.02	9.71	9.6	10.32	10.78	10.98	10.62	10.45
2013	11.92	11.13	11.66	11.25	10.75	10.01	9.61	9.45	9.79	10.83	9.55	10.46	10.53
MEDIA	10.43	10.56	10.73	10.54	10.14	9.71	9.47	9.73	9.97	10.21	9.98	10.17	10.24

Fuente: SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

Tabla 56*Datos de temperatura media mensual y anual de la estación A. Weberbauer para la serie**1995 – 2013*

AÑO	MES												MEDIA
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
1995	15.51	15.32	15.36	14.99	14.34	13.87	13.88	14.39	14.38	15.15	15.42	15.22	14.82
1996	14.71	14.92	15.43	14.81	14.2	13.8	13.41	13.45	14.78	15.42	14.21	15.36	14.54
1997	14.75	15.36	14.65	15.07	14.84	13.87	14.37	14.61	15.57	16.31	15.89	16.69	15.16
1998	16.77	16.86	16.91	16.95	15.07	13.72	13.25	13.94	14.8	15.63	14.61	14.7	15.27
1999	14.97	14.91	14.88	14.91	13.9	13.7	12.64	13.21	14.49	14.07	14.79	15.08	14.3
2000	14.46	14.44	14.83	14.8	14.33	13.77	12.97	13.42	14.74	14.39	13.74	14.77	14.22
2001	14.95	15.42	15.33	14.63	14.51	13.25	13.5	13.57	14.54	15.87	15.47	15.49	14.71
2002	15.07	15.84	15.92	14.93	14.33	13.42	13.72	14.05	14.82	15.27	15.59	16.31	14.94
2003	15.84	15.64	14.99	15.41	14.65	13.86	13.12	13.91	14.81	15.63	15.82	15.36	14.92
2004	14.76	15.65	15.62	15.05	14.93	13.48	13.63	13.83	14.29	15.51	15.53	15.53	14.82
2005	15.1	16.26	16	15.55	13.65	13.82	13.09	13.68	14.74	15.19	14.21	15.07	14.7
2006	15.34	16.08	15.8	14.66	13.81	13.83	13.21	14.11	14.47	15.01	15.35	16.04	14.81
2007	16.56	14.88	15.61	15.01	14.63	13.06	13.44	13.57	13.31	14.62	15.31	14.24	14.52
2008	15.24	15.02	14.64	14.86	14.21	13.31	12.9	13.92	14.72	15.08	15.3	14.7	14.5
2009	15.44	15.36	15.63	15.5	14.62	13.79	13.7	14.35	14.83	15.77	15.34	16.07	15.03
2010	16	16.47	16.73	16.14	15.02	14.03	14.26	14.03	14.96	14.66	14.7	15.12	15.18
2011	15.08	14.66	14.36	15.14	14.13	13.89	13.54	14.09	14.09	14.6	15.79	15.42	14.57
2012	15.81	14.93	15.61	15.27	14.24	13.32	13.42	13.79	14.28	15.37	15.92	15.52	14.79
2013	15.92	15.75	16	15.67	15.25	13.74	13.33	14.07	14.58	15.78	14.81	15.58	15.04
MEDIA	15.17	15.18	15.15	14.91	14.15	13.44	13.03	13.6	14.4	14.9	14.82	15.05	14.56

Fuente: SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

Anexo N° G – Presupuesto

Presupuesto

El presupuesto estará financiado por el optante, quien por el avance a la tesis y dar un aporte en el desarrollo a la población.

Tabla 57

Presupuesto del proyecto

Código	Descripción	Cantidad	Formato	Costo S/.	(Uni)	Costo S/.	Total
0 0 0 1	Recopilación de Información						
0 0 1 1	Información del SENAMHI - Hidrometeorológico	20 años	Cuadros Excel	35		700	
0 0 1 2	Información de ANA - AAA VI Marañón - Hidrometría		Shapefile	150		150	
0 0 1 3	Información ALA - Cajamarca - Caudales	3 años	Cuadros Excel	50		150	
0 0 1 4	Información Cartográfica - cartas Nacionales	4	Shapefile	60		240	
0 0 1 5	Información Gobierno Regional - Cajamarca		Shapefile	200		200	
0 0 1 6	Información de Empresas Privadas		Shape / Cdro Excel	300		300	
0 0 1 7	Información Bibliográfica - Compra de Libros	6	Impreso	70		350	
0 0 0 2	Equipos						
0 0 2 1	Alquiler de GPS	1		30 u/dia		450	
0 0 2 2	Alquiler Contrometro	1		90 u/dia		210	
0 0 2 3	Alquiler de Camioneta	1		350 u/dia		5250	
0 0 0 3	Recurso Humano						
0 0 3 2	Pasajes de Cajamarca a Lima (viceversas)	10 viajes	3 meses	200		2000	
Total						10000	

(*) Información Relativa tentativa por el optante

Anexo N° H – Matriz de consistencia

Título: “Evaluación de los métodos de USLE y Gavrilović en la Determinación De La Perdida De Suelo y su influencia en el aporte de sedimentos Por Erosión Hídrica En La Cuenca Del Río Mashcón en los años 1995 al 2013”

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES V. I	DISEÑO	POBLACION Y MUESTRA
¿Cuál es la evaluación de los métodos de USLE y Gavrilović para la determinación de la pérdida de suelo y su influencia en el aporte de sedimentos por erosión hídrica en la cuenca del río Mashcón en los años 1995 al 2013?	Evaluar de los métodos USLE y Gavrilović en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón en los años 1995 al 2013.	<p>Ho = La diferencia de la aplicación de los métodos USLE y Gavrilović no es significativa en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón en los años 1995 al 2013.</p> <p>H1 = La diferencia de la aplicación de los métodos USLE y Gavrilović si es significativa en la determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón en los años 1995 al 2013.</p>	Diferencia de los resultados de la aplicación de los métodos USLE y Gavrilović	<p>Método de calculo</p> <p>Comparativa de los métodos</p> <p>Eficacia de los métodos</p>	<p>✓ Ecuaciones empíricas</p> <p>✓ Cálculos Hidrológicos</p> <p>✓ Procesos de calculo</p> <p>✓ Fundamentos de métodos aplicados.</p> <p>✓ Disponibilidad de información.</p> <p>✓ Modelamiento de cálculo de pérdida de suelos.</p> <p>✓ Coeficiente de aporte de sedimentos en la cuenca.</p> <p>✓ Volumen de aporte de sedimentos en la cuenca.</p> <p>✓ Relación de erogación de sedimentos en el río principal</p> <p>✓ Aproximación de resultados</p> <p>✓ Resultados de otros estudios</p>	El diseño de la investigación es no experimental	Consideramos a la población y a la muestra, como uno solo, la razón que nuestra población es la cuenca del río Mashcón
P. ESPECIFICO	O. ESPECIFICO		VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES V. D	TIPO	TÉCNICAS-INSTRUMENTOS
¿Cuál es el volumen de pérdida de suelo por erosión hídrica según los métodos de USLE y Gavrilović utilizando herramientas de análisis espacial, en la cuenca del río Mashcón?	Estimar el volumen de perdida de suelo por erosión hídrica según los métodos de USLE y Gavrilović utilizando herramientas de análisis espacial, en la cuenca del río Mashcón.		Determinación de la pérdida anual de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos	<p>Identificación de Zonas de Erosión Hídrica</p> <p>Estimación de la tasa media anual de erosión de suelos - USLE</p>	<p>✓ Pendiente</p> <p>✓ Precipitación mensual y anual.</p> <p>✓ Textura del suelo</p> <p>✓ Cobertura vegetal</p> <p>✓ Superficie de la cuenca</p> <p>✓ Red hidrográfica</p> <p>✓ Precipitación mensual y anual.</p> <p>✓ Textura del suelo</p> <p>✓ Contenido de materia orgánica</p> <p>✓ Pendiente del terreno</p> <p>✓ Longitud entre el rango de pendientes</p> <p>✓ Cobertura vegetal</p>	Transeccional, o también conocido transversales.	En la presente investigación no se realizó encuestas a la población, sin embargo, hubo reuniones con personal técnico de la AAA IV Marañon, se utilizaron como materia prima para esta investigación la obtención de la información cartográfica, datos meteorológicos y
¿Cuál es el aporte del volumen de sedimentos superficial al cauce principal a partir del cálculo de la pérdida de suelo por erosión hídrica	Estimar el aporte del volumen de sedimentos superficial al cauce principal a partir del cálculo de perdida de suelo por erosión hídrica						

<p>en la cuenca del río Mashcón?</p> <p>¿Cuál es la diferencia de los resultados de la aplicación de los métodos de USLE y Gavrilović, en la determinación del volumen de suelos por erosión hídrica y aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón?</p>	<p>en la cuenca del río Mashcón.</p> <p>Evaluar la diferencia de los resultados de la aplicación de los métodos de USLE y Gavrilović, en la determinación del volumen de suelos por erosión hídrica y su influencia en el aporte de sedimentos en la cuenca del río Mashcón.</p>				<ul style="list-style-type: none"> ✓ Prácticas de conservación. ✓ Superficie de la cuenca. 		<p>climáticos, como también equipos y software</p>
				<p>Estimación de la tasa media anual de aporte de sedimentos - Gavrilović</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Precipitación media mensual y anual. ✓ Temperatura media mensual. ✓ Características del suelo. ✓ Pendiente del terreno. ✓ Cobertura vegetal. ✓ Superficie de la cuenca. ✓ Longitud total de la red hidrográfica. ✓ Altitud media de la cuenca. ✓ Perímetro de la cuenca. ✓ Superficie de la cuenca. 		
				<p>Capacidad de transporte de sedimento según clase granulométrica</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pendiente del terreno ✓ Ancho del cauce ✓ Caudal ✓ Diámetro representativo de la clase granulométrica i-esima ✓ Diámetro medio aritmético Fracción de la clase i-esima en el estrato de mezcla (textura) 		
				<p>Volumen de sedimento</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Erosión anual de suelos ✓ Superficie de la cuenca ✓ Pendiente media del curso principal de la cuenca 		