

## I. INTRODUCCIÓN

La degradación de los suelos por erosión es un problema a nivel mundial de amplias repercusiones económicas, sociales y ecológicas. Los factores naturales y antrópicos son las causas, ligados a la historia geológica. Los efectos de la erosión se manifiestan tanto en el lugar de origen (cabecera de la cuenca) como fuera de él (diques, presas, ríos, lagos). En el lugar de origen ocasiona el adelgazamiento de la capa arable y la consiguiente disminución de la productividad del suelo y fuera del lugar de origen provoca la sedimentación de partículas, causando daños y perjuicios no sólo a la productividad sino también a la infraestructura de obras hidráulicas. (Córdova, 2015)

Uno de los principales problemas que afectan a los embalses, es su pérdida de capacidad debido al depósito de sedimento en su interior. A pesar que como parte del diseño de los embalses se calcula un volumen para almacenar los sedimentos provenientes de la cuenca de aporte, éste es muchas veces rebasado, y como consecuencia afecta el volumen útil del embalse.

La medición de sedimentos en un embalse es una tarea compleja; realizar la elección del sistema de medición es a menudo difícil porque depende de la disponibilidad de información y del grado de precisión deseado. Los métodos directos más utilizados son la batimetría y el aforo directo, sin embargo, con ambos procedimientos no es posible determinar cuál sería el depósito, si durante la vida del embalse cambiaran las condiciones de la cuenca de aporte o las características de la corriente. Por otra parte los métodos empíricos; tomando en cuenta que los sedimentos depositados en el embalse están relacionados con la producción de sedimentos en una cuenca, permiten calcular las tasas de erosión del suelo a partir de los tipos de usos y las técnicas de manejo, junto a otras variables de carácter pluviométrico y topográfico. (Camacho , 2005)

El presente estudio tiene por objetivo determinar la cantidad de sedimentos producidos en la Cuenca del río Pajchani, ubicado en el municipio de San Lorenzo, provincia Mendez, región de Tarija y país de Bolivia.

## 1.1. ANTECEDENTES

En el área de estudio no se cuenta con trabajos de investigación relacionados a la estimación de sedimentos con la metodología propuesta; sin embargo se han realizado trabajos similares aplicando el método de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y el modelo empírico de Gavrilovic a nivel nacional e internacional, los cuales sirvieron como base para la determinación de parámetros y aplicación correcta de los modelos empíricos. A continuación, se mencionan algunos de los estudios realizados:

El Noroeste Argentino fue objeto de análisis del comportamiento de una serie de modelos a escala distribuida como Gavrilovic, USLE y Miraki en un conjunto de cuencas, donde a su vez se procedió a su validación a partir de datos batimétricos de los embalses que se encuentran insertos dentro de la cuencas altas y medias de los Río Salí-Dulce (Embalses El Cadillal, Escaba y Río Hondo), Juramento-Salado (Embalse Cabra Corral) y Río Huaco-Los Sauces (Embalse Los Sauces). (Fundación para el Fomento de la Ingeniería del Agua, 2006). La aplicación del modelo USLE se aprecia que tiene un buen comportamiento para cuencas cuyas áreas están comprendidas dentro del gráfico de ajuste del factor de entrega. En los otros casos (Río Hondo y Cabra Corral), los valores obtenidos son sensiblemente menores a los medidos. Por otro lado, los métodos de Gavrilovic y Miraki tienen un comportamiento más estable para todo el rango de superficies de las cuencas analizadas.

El dique La Falda ubicado en la cuenca del Río San Francisco (Córdoba-Argentina), cuya cuenca abarca una superficie de 135 km<sup>2</sup>, se caracteriza por presentar condiciones de torrencialidad las mismas que dependen de las fuertes pendientes y un sustrato de roca impermeable en la cuenca. El objeto del estudio es calcular el volumen medio anual de sedimento erosionado (m<sup>3</sup> .año<sup>-1</sup>) y caracterizar el área fuente de sedimento, donde se utilizó la metodología de Gavrilovic para cuencas de montañas sin datos de aforo. (Beltramone, 2009). El trabajo citado no considera la retención de sedimento que realizan las pequeñas presas o azudes de retención cuenca arriba del embalse, no existe un Plan de Manejo de Cuenca sustentable, lo que condiciona todo tipo de obra para control de erosión y debido a las características torrenciales se precisaba una presa con un sistema de purga muy eficiente.

Choqueticlla en el siguiente trabajo determinó la pérdida de suelo por procesos naturales y antrópicos, aplicando el modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo y aplicaciones SIG, el mismo se desarrolló en la cuenca Soraga del departamento de Oruro – Bolivia. (Choqueticlla, 2010). La elaboración del trabajo tenía como objetivo analizar la colmatación en la presa Soraga, debido a procesos de deposición de sedimentos, el cual se llegó a concluir: que el 95% del área total presenta una tasa de erosión menor a 50 t/ha/año, teniendo un riesgo de erosión entre bajo a moderado, también se observa una pérdida de suelo que varía desde 0 a 290.2 t/ha/año, concentrándose los valores más altos en las laderas y colinas de pendiente fuerte.

La provincia de Córdoba localizado en República de Argentina, se realizó un trabajo para determinar los valores de la degradación específica de las cuencas de aporte a los principales embalses de la Provincia; donde aplicaron los modelos de Fournier (1960, 1962), Jansen y Painter (1974), Dendy y Bolton (1976), Djorovic y Gravilovic (1974). Donde se concluyó que el embalse La Falda se ha producido un tarquinamiento total lo que se constata con la realidad en el lugar, también se consideró como más representativo el valor obtenido por el método de Djorovic y Gravrilovic. (Reyna, Reyna, Lábaque, Riha, & Rafaelli, 2011)

En la cuenca del río Las Cañitas (Sierras Pampeanas, Córdoba-Argentina) se desarrolló un estudio de la producción de sedimentos, la cual se utilizó técnica de predicción como el método de Gavrilovic. (Andreazzini, Degiovanni, Spalletti, & Irigoyen, 2014). El objetivo de este trabajo fue estimar la tasa de producción actual de sedimentos de una subcuenca representativa de Sierras Pampeanas, donde se pudo concluir lo siguiente: los resultados obtenidos indican que los aspectos litológico-geomorfológicos tienen una marcada influencia en la producción de sedimentos en la cuenca, especialmente sobre el parámetro W. El parámetro R, dependiente de la morfometría, mostró menor variabilidad.

El municipio de Carmen de Carupa en el departamento de Cundinamarca - Colombia fue estudio de la estimación de aporte de suelo erosionado de la cuenca del río Hato, más específicamente en el embalse que lleva el mismo nombre mediante la implementación la Ecuación Universal de pérdida de Suelo (USLE). (Morales & Porras, 2014). El trabajo mencionado concluyó que una de las variables de mayor peso en la determinación de sedimentos es la textura del suelo (factor K), también se pudo evidenciar que los valores de

sedimentos están influenciados directamente por los datos de precipitación, a la misma vez las variables de precipitación, clasificación y formas de pendiente; permiten dar un mayor grado de confiabilidad a los resultados del modelo.

La cuenca del lago Poopó fue estudio de investigación para estimar el volumen de transporte de sedimentos en el lago, localizado en el departamento de Oruro (Bolivia), aplicando el método Gavrilovic y herramientas de Sistemas de Información Geografía (SIG) y teledetección, los resultados fueron evaluados con la pérdida de suelo presentada en una de sus sub-cuencas tal el caso de la sub-cuenca Tacagua del cual se tienen registros batimétricos. (Vallejos, Zamora, & Jorge , 2018). En el trabajo mencionado concluyo: que la cuenca del Lago Poopó aporta al lago un total de 2266504,24 m<sup>3</sup>/año de sedimentos por erosión (G), los mayores aportantes son las sub-cuencas de tacagua; marques, paria, sora sora y huana-jahuira con 388607,83; 255505,87; 222683,32; 190202,86 y 180589,49 m<sup>3</sup>/año respectivamente.

El año 2018 el reservorio Gallito Ciego del río Jequetepeque ubicado en el Perú fue estudio de una investigación para estimar el volumen muerto a través de los años y de la misma manera estimar su tiempo de vida, donde se aplicó el modelo de erosión RUSLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) y el coeficiente de aporte de sedimentos (SDR), los que fueron utilizados con resultados satisfactorios en cuencas de distintas partes del mundo. (Yali, 2018). Este estudio considero que los únicos factores que afectan directamente a la erosión son la erosividad (Factor R) y la cobertura vegetal (Factor C), también indica que los resultados estiman un tiempo de vida del reservorio Gallito Ciego de 128 años hasta quedar completamente colmatado desde su inicio de operaciones en 1988, siendo acelerado 10 años menos por cada evento extraordinario como lo sucedido en el año 1998.

La sub-cuenca del río Callazas en la región Tacna-Perú se realizó la estimación de la erosión y transporte potencial de sedimentos hasta el eje de la futura represa Callazas con una proyección de 50 años donde se obtuvieron valores de erosión hídrica de 108,9 (ton/ha.año) con el método de USLE y con la herramienta SIG un promedio de 64,3 (ton/ha.año). (Laqui, 2019). La estimación del volumen total muerto al eje de la futura represa Callazas es 0,372 MMC para USLE y para la fórmula de transporte de sedimentos con Engelud-Hansen un total de 0,485 MMC. La suma de ambas metodología nos da un volumen

muerto de 0,857 MMC el cual representa menos del 1 MMC del volumen muerto propuesto en el estudio de factibilidad en la represa Callazas.

## 1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Una de las principales funciones que tiene la construcción de una presa es el almacenamiento del agua en épocas de lluvias para su posterior uso en época de estiaje, para consumo de agua potable, riego, hidroeléctrica, etc., el cual está siendo afectado debido al depósito de sedimento en su interior a tasas superiores a las contempladas en su diseño.

La cuenca aportante de la presa La Hondura la cual entró en operación aproximadamente hace 10 años se caracteriza por presentar fuertes pendientes, suelos inestables y poca vegetación ver Figura 1, características que la convierten en una zona susceptible a presentar altos grados de erosión. Partiendo de ahí, el aporte de sedimentos al curso del río Pajchani y el depósito de sedimentos en el vaso de la presa en estudio, podría ser un problema latente que un futuro represente una amenaza al desempeño de la obra hidráulica, la productividad agrícola de la Comunidad Pajchani y todo lo que ello conlleva.

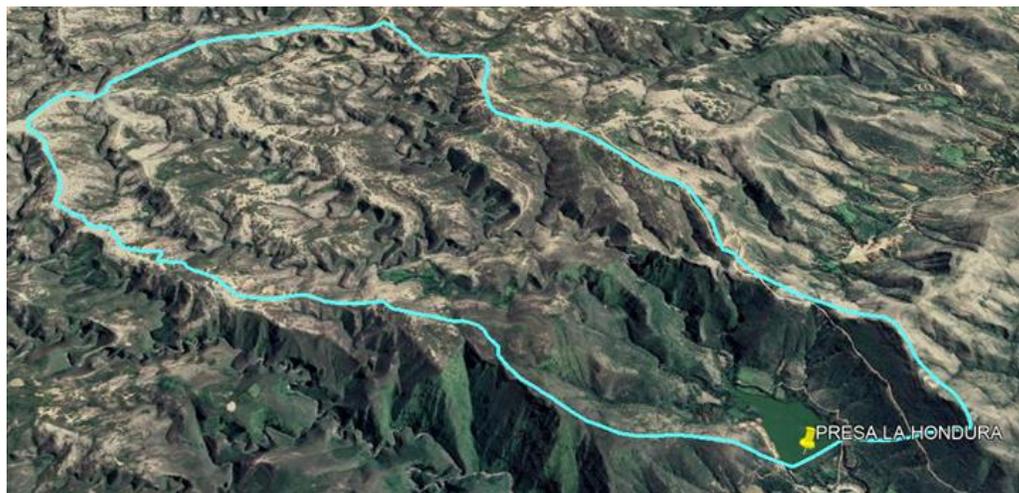


Figura 1. Imagen satelital de la cuenca aportante de la presa La Hondura.  
(Elaboración propia en Google Earth)

Actualmente no existen investigaciones recientes que nos indiquen el estado actual en cuanto a la pérdida de suelos en la cuenca aportante de la presa La Hondura y una cuantificación del volumen de sedimentos en el embalse. Sin embargo, en una reciente visita

de campo se pudo evidenciar que en las laderas de la presa existe un alto grado erosión de los suelos ver Figura 2 y 3, fenómeno que podría estar afectando el volumen disponible del embalse, ocasionando que la obra civil no sea sostenible en el tiempo. Además es importante mencionar que la presa en estudio no cuenta con un desfogue de fondo, lo que complica aún más la situación del incremento de sedimentos. Ya que éste tiene como función secundaria la limpieza de sedimentos acumulados en el fondo del embalse. A raíz de esta situación, surge la importancia de realizar un estudio sobre el estado actual del volumen de sedimento en el embalse y los factores que lo provocan para tomar medidas correspondientes.



*Figura 2.* Erosión en el estribo derecho de la presa.  
(Autoría propia)



*Figura 3.* Erosión en el estribo izquierdo de la presa.  
(Autoría propia)

### **1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuál es el volumen de sedimento que se tiene en el embalse de la presa La Hondura de la cuenca del río Pajchani desde que entró en operación?

## **1.4. HIPÓTESIS**

Mediante la aplicación de los modelos matemáticos USLE y Gavrilovic se determinarán los volúmenes de sedimentos que ingresaron al embalse de la presa La Hondura.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. Objetivo general**

Estimar el volumen de sedimento en el embalse de la presa La Hondura de la cuenca del río Pajchani, aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE) y el modelo empírico Gavrilovic con el propósito de evaluar la vida útil del embalse y conocer el volumen disponible para el aprovechamiento de los habitantes aguas abajo del proyecto con finalidad de mejorar su calidad de vida.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Determinar los diferentes parámetros de los métodos USLE y Gavrilovic a través de las características morfológicas, tipo de suelos, vegetación, precipitación y temperatura.
- Determinar los volúmenes de sedimentos con los métodos USLE y Gavrilovic.
- Realizar el análisis y comparación con los resultados de ambos métodos, USLE y Gavrilovic.

## **1.6. DELIMITACIONES**

### **1.6.1. Límite geográfico**

El área de estudio del proyecto comprende la presa La Hondura y la sub cuenca del río Pajchani de la cuenca del Guadalquivir, el cual se encuentra al sur de Bolivia, en el departamento de Tarija, Provincia Méndez perteneciente al municipio de San Lorenzo, distrito de Choroma.

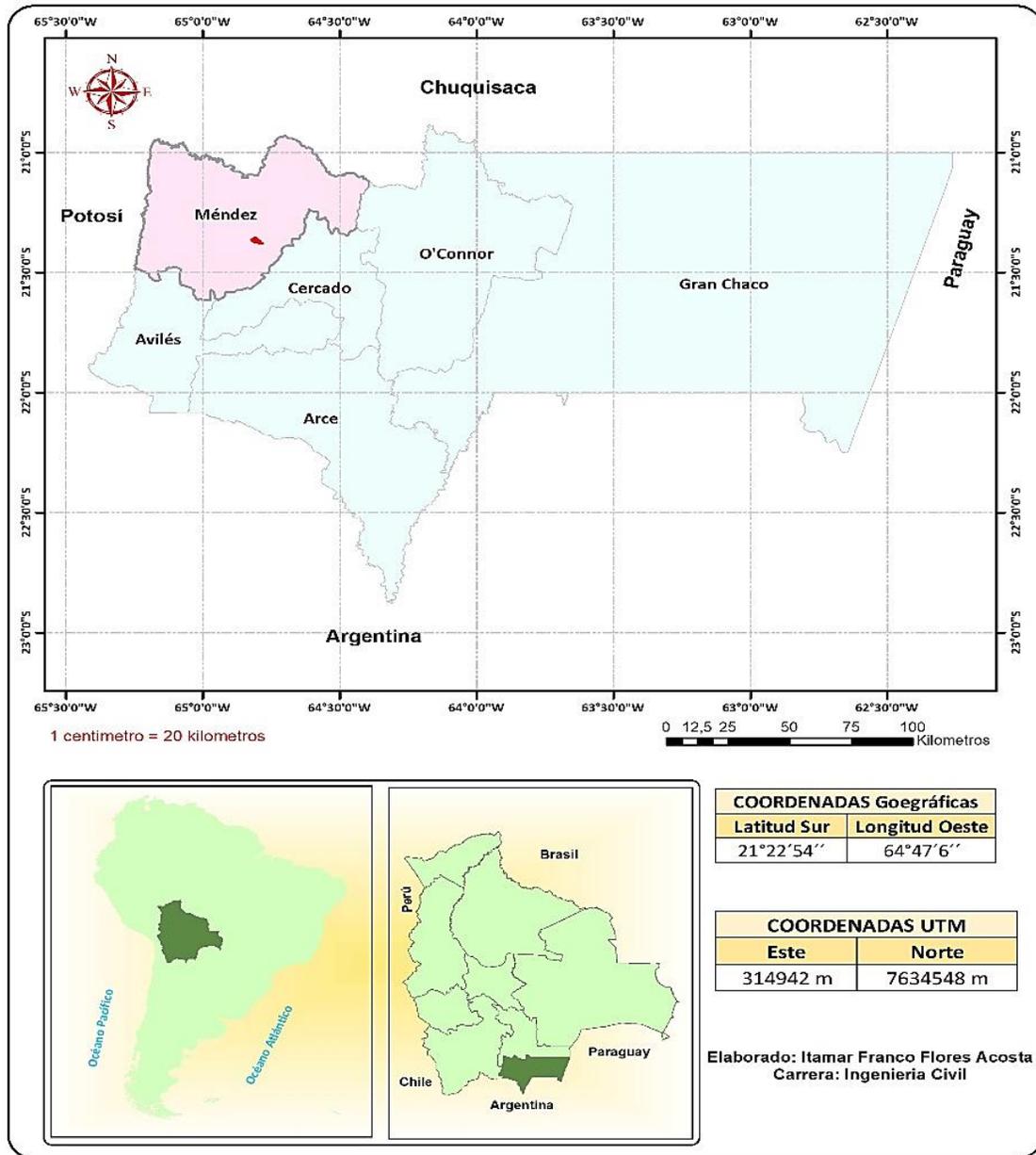


Figura 4. Ubicación del área de estudio.  
(Elaboración propia en ArcGis)

La vía de acceso al área de estudio consta de dos tramos: el primer tramo comprende la ruta asfaltada Tarija - Potosí por la variante Falda la Queñua de aproximadamente 18 km desde la ciudad de Tarija y el segundo tramo comprende un desvío de camino ripiado de 3,40 km hasta el cuerpo de la presa.

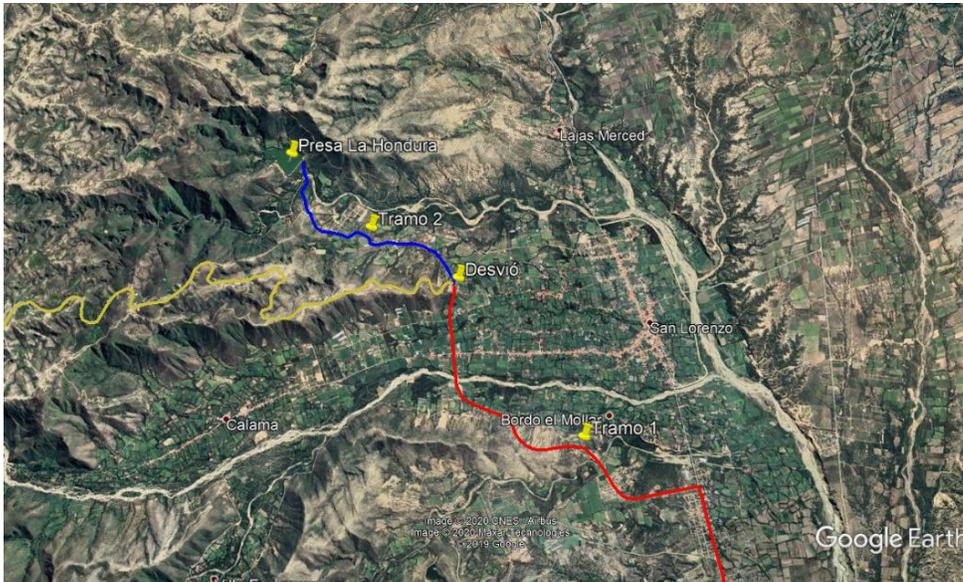


Figura 5. Vía de acceso a la presa La Hondura.  
(Elaboración propia en Google Earth)

### 1.6.2. Límite temporal

El estudio del trabajo se efectuará tomando como base los datos de precipitación de las estaciones cercanas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), que se tiene en los periodos 1978-2019 y la parte experimental que se realizó el 29 de Septiembre del año 2019.

### 1.7. ALCANCE DEL TRABAJO

El estudio del presente trabajo consiste en estimar el volumen de sedimento en el embalse de la presa La Hondura; mediante la aplicación de los modelos empíricos USLE y Gavrilovic. El trabajo contempla un muestreo de suelo, ensayo de laboratorio donde se determinó el contenido de materia orgánica y textura, una clasificación de la cobertura vegetal con la ayuda de una imagen satelital, la determinación de la intensidad máxima en 30 min a partir de lluvias máximas en 24 hrs. y la generación de curvas de nivel y red de drenaje para el factor topográfico.

### 1.8. JUSTIFICACIÓN

El mayor problema que enfrentan las presas emplazadas en cuencas que no cuentan con un plan de manejo integral es el acortamiento de la vida útil, ocasionada por la acelerada

colmatación de sedimentos a tasas muy superiores a las previstas en los diseños. El principal medio para evitar el problema de pérdida de capacidad de un embalse, es disminuir la erosión en las cuencas, incluso es la principal solución recomendada por diferentes autores. La aplicación de modelos matemáticos empíricos nos permiten estimar la pérdida de suelo en una cuenca y utilizar estos datos para recomendar modificaciones en el uso de la tierra, con el fin de mejorar la retención del suelo y reducir los efectos perjudiciales de dicha pérdida.

En nuestro país la aplicación de modelos matemáticos de estimación de pérdida de suelo en la determinación del volumen de sedimento que ingresa al embalse como es el modelo USLE, Gravilovic y otros similares son requeridos en las guías (EDTP) por el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) - Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR) para la elaboración de proyecto de riego medianos y mayores. (Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2018)

Los procesos erosivos y la producción de sedimentos tienen una significación especial en la cuenca aportante de la presa La Hondura, donde la topografía abrupta, la variabilidad climática, las características de los suelos, la poca vegetación, la localización de un embalse en la parte baja de la cuenca, y sobre todo la escasa información sobre sedimentología, se conjugan para resaltar la importancia de identificar y cuantificar los procesos erosivos existentes en la cuenca y el volumen de sedimento en el embalse.

Teniendo en cuenta lo anterior, en este trabajo se propone estimar el volumen de sedimento en el embalse de la presa La Hondura mediante la aplicación de dos métodos empíricos matemáticos reconocidos en la literatura; Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE por sus siglas en inglés) y Gavrilovic, los cuales consisten en cuantificar la pérdida de suelo en la cuenca. Los resultados obtenidos pueden ser de gran utilidad y complemento para la elaboración de planes como, de restauración forestal, de control de la erosión y conservación de suelos, de lucha contra la desertificación, entre otros. Por otra parte, la metodología empleada también puede extrapolarse a otras cuencas con similares características, para estimar de manera fiable el volumen de sedimentos y predecir la vida útil de los embalses asociados.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. MARCO HISTÓRICO

De los diversos modelos empíricos existentes para describir la relación entre la erosión laminar debida a la lluvia y lo principales factores que la controlan, el más conocido, estudiado y comprobado es la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), desarrollada en Estados Unidos por Wischmeier y Smith en 1965 y modificada en 1978. Este es un modelo matemático de tipo paramétrico que permite estimar cuantitativamente la erosión para determinadas condiciones de precipitación, suelo, relieve, cultivo y prácticas de manejo.

La metodología de Gavrilovic permite estimar la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca que es transportado a la sección del río que la define. En cuanto a características, es aplicado a cuencas de carácter torrencial y de alta montaña; considerando como parámetros definitorios: la precipitación, temperatura, suelo, relieve, vegetación, grado y tipo de intensidad de los procesos erosivos existentes en la cuenca. (Vallejos, Zamora, & Jorge , 2018)

La metodología de Gavrilovic 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. Originalmente, este método fue desarrollado para ser aplicado en cuencas de montaña en el Sur y Sudeste de Yugoslavia, y luego fue utilizado en Suiza, Italia, Croacia, Grecia entre otros. Más recientemente diferentes autores utilizan esta metodología en conjunto con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), para contrastar los resultados alcanzados con otros modelos obteniendo un buen nivel de aproximación. (UNESCO, 2014)

Esta metodología tuvo buenas respuestas en la estimación de producción de sedimentos en diversas zonas de montaña de Sudamérica, y en particular en Argentina, tanto en la región del noroeste como en la Patagonia, incluso se ha aplicado para localizar y caracterizar los sectores más susceptibles de presentar procesos de erosión superficial en la Alta Cuenca del Río Bermejo. (COBINABE, 2010)

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.2.1. Suelo

El suelo es la capa delgada de material intemperizado que cubre la superficie terrestre, de un espesor insignificante comparado con el de otras capas del planeta, sin embargo es de vital importancia para el desarrollo de la vida que se conoce por lo que resulta trascendental para el hombre conocer este recurso y promover su conservación por todos los medios a su alcance. (Córdova, 2015)

### 2.2.2. Erosión de los suelos

Erosión es el proceso que comprende el desprendimiento, el traslado o arrastre y la sedimentación o colmatación de las partículas de suelo ver Figura 6. La erosión es causada ya sea por acción del agua, del viento o por la actividad del hombre. La erosión puede ser natural (normal o geológica) y acelerada. (Universidad Nacional Agraria La Molina, 2016)

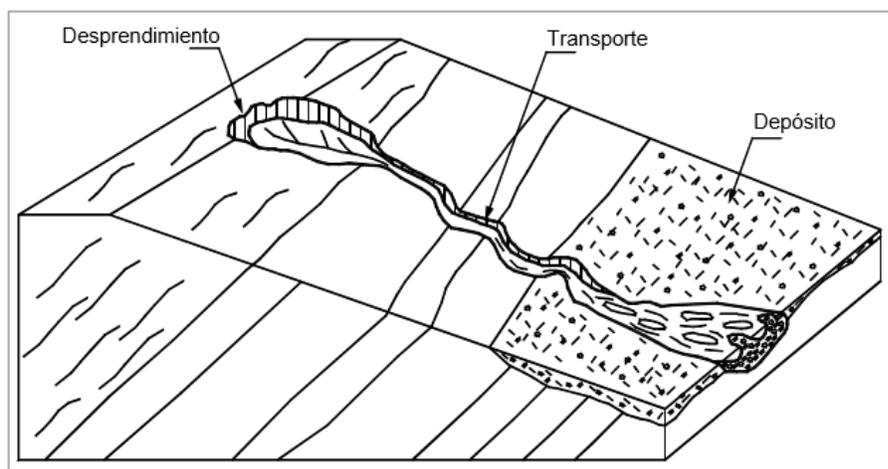


Figura 6. Proceso de erosión.  
(Suárez, 2001)

#### 2.2.2.1. Erosión natural

Es 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. Se considera

como una erosión normal porque se presenta en una situación de balance natural entre la formación del suelo y la erosión en sí. (Universidad Nacional Agraria La Molina, 2016)

#### **2.2.2.2. Erosión acelerada**

Es uno de los problemas más serios que tiene que enfrentar cualquier acción encaminada a lograr el desarrollo agrario, ya que además de ser la causa de bajos rendimientos de los cultivos, acorta la vida útil de las obras de regulación debido a la cantidad de sedimentos que acarrea el agua que se almacena; asimismo colmatando el lecho de los ríos, favoreciendo, en muchos casos, las inundaciones, los problemas de drenaje y la salinización de las tierras. Este tipo de erosión es impulsada fundamentalmente por el hombre. (Universidad Nacional Agraria La Molina, 2016)

#### **2.2.3. Tipos de erosión**

- **Erosión hídrica**

La erosión hídrica es el proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas del suelo causado por la acción del agua que disminuye la productividad de los suelos y afecta la salud de los ecosistemas. La erosión hídrica es un proceso complejo de preparación y separación del material en partículas individuales (arcilla, limo y arena) y pequeños agregados por acción del impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo. Las partículas desprendidas son arrastradas pendiente abajo por el escurrimiento superficial, lo cual produce, a su vez, el desprendimiento de nuevo material. (Ministerio de Agroindustria Presidencia de la Nación, 2017)

- **Erosión eólica**

La erosión por el viento ocurre cuando los suelos sin vegetación son expuestos a altas velocidades del viento. Cuando la velocidad del viento genera una fuerza tractiva superior a las fuerzas gravitacionales y cohesivas de las partículas de suelo, el viento desprende las partículas y las transporta en suspensión. (Suárez, 2001)

## **2.2.4. Formas de erosión hídrica**

### **2.2.4.1. *Erosión por salpicadura***

La erosión por golpeo de la lluvia ocurre por el impacto de las gotas de agua sobre una superficie desprotegida, el cual produce el desprendimiento y remoción de capas delgadas de suelo. Este impacto rompe la estructura del suelo y lo separa en partículas relativamente pequeñas, que luego son transportadas por la escorrentía. Al caer una gota de lluvia levanta partículas de suelo y las reparte en un área de aproximadamente un metro cuadrado, donde parte de la lluvia se infiltra y otra parte fluye sobre la superficie. La erosión causada por la lluvia está determinada por la cantidad, intensidad y duración de la misma; cuando la intensidad y cantidad de lluvias es alta la erosión será más rápida. (Suárez, 2001)

### **2.2.4.2. *Erosión laminar***

Es una forma de erosión superficial que se produce por acción del escurrimiento, perdiéndose una fina y uniforme capa de toda la superficie del suelo en forma de lámina. Este proceso produce una mayor pérdida neta de suelo que la erosión por salpicadura, siendo el tamaño de partículas más afectado el que se desprende debido a la energía de la lluvia. (Universidad Nacional de Río Cuarto, 2012)

### **2.2.4.3. *Erosión por surcos***

La erosión en surcos ocurre cuando el flujo superficial empieza a concentrarse sobre la superficie del terreno, debido a la irregularidad natural de la superficie. Al concentrarse el flujo en pequeñas corrientes sobre una pendiente, se genera una concentración del flujo el cual por la fuerza tractiva de la corriente produce erosión, formándose pequeños surcos o canales, los cuales inicialmente son prácticamente imperceptibles pero poco a poco se van volviendo más profundos. Si los canales de erosión tienen profundidades de menos de 30 centímetros se les clasifica como surcos y si la profundidad es mayor, como cárcavas. (Suárez, 2001)

#### **2.2.4.4. Erosión por cárcavas**

La erosión por cárcava se denomina a un canal con una sección superior a un pie<sup>2</sup>. Estos canales ya no pueden ser eliminados con prácticas agrícolas. Las cárcavas tienen una mayor capacidad de transporte de sedimentos que los surcos, debido a que las tasas de flujo son mayores. Las cárcavas actúan como cauces de concentración, transporte de agua y sedimentos, son canales mucho más largos que los surcos. Estos canales transportan corrientes concentradas de agua durante e inmediatamente después de las lluvias. (Suárez, 2001)

#### **2.2.5. Factores que originan la erosión hídrica**

La erosión del suelo es la reacción a la perturbación del equilibrio del sistema suelo - vegetación - clima. Las perturbaciones pueden ser naturales o provocadas por el hombre. La magnitud de los efectos varía en función de muchos fenómenos, los cuales se pueden agrupar convenientemente en factores, agentes y causas. Los agentes de la erosión son los sistemas de transporte en el movimiento del suelo; los factores son aquellos parámetros naturales o artificiales que determinan la magnitud de la perturbación, tal como clima, topografía, suelo, vegetación y manejo. La erosión podría no ocurrir aún bajo la presencia de agentes y factores; las causas incrementan los efectos de agentes y factores y aceleran el conjunto de los procesos involucrados. Los factores más importantes que afectan a la erosión son el clima, el suelo, la vegetación, la topografía y el hombre. (Guevara & De La Torre, 2019)

##### **2.2.5.1. Clima**

El efecto del clima es la erosividad, es decir su grado de agresividad sobre el suelo. Los factores que determinan la erosividad son la precipitación, la velocidad del viento, el balance hídrico, la escorrentía y la temperatura. (Guevara & De La Torre, 2019)

##### **2.2.5.2. Suelo**

La erosionabilidad o erodabilidad del suelo es una medida de la susceptibilidad al desprendimiento y transporte por los agentes de la erosión. La erodabilidad es un efecto integrado de los procesos que regulan la absorción de la lluvia y la resistencia de las partículas

del suelo al desprendimiento y posterior transporte. Estos procesos están influidos por las propiedades del suelo tales como tamaño de partículas, estabilidad de agregados, materia orgánica, cantidad y tipo de arcillas o por características edáficas que afectan la estructura del suelo y la transmisión de agua. (Universidad Nacional de Río Cuarto, 2012)

#### **2.2.5.3. Vegetación**

La parte aérea de la cubierta vegetal y su arquitectura foliar y caulinar interceptan la lluvia, amortiguando su fuerza de impacto de las gotas sobre el suelo, contribuyendo a disminuir su energía cinética inicial. La hojarasca caída y las raíces de las plantas protegen el suelo y mejoran su estructura, la infiltración y la capacidad de retención de agua, además de retardar el escurrimiento. (Universidad Nacional de La Plata, 2013)

#### **2.2.5.4. Topografía**

Existen varias características topográficas que ejercen una marcada influencia sobre la erosión; entre ellas: el grado de inclinación, longitud y forma de la pendiente, lo mismo que el tamaño y forma de la cuenca. La escorrentía es más agresiva sobre pendientes más pronunciadas y su capacidad de transporte se incrementa. Cuando las pendientes son más largas, la escorrentía se acumula, incrementando la erosión laminar. Las laderas cóncavas con pendientes más reducidas en el pie de las montañas, son menos erosionables que las convexas. (Guevara & De La Torre, 2019)

#### **2.2.5.5. Humano**

Las actividades antropogénicas juegan el papel más importante entre las causas que ocasionan la erosión del suelo, las cuales se manifiestan a través del uso y abuso (mal uso) de los recursos naturales, es decir el uso de la cuenca para prácticas agrícolas sobre la preparación del suelo para las plantas, deforestaciones, sistemas de cultivo, pastoreo, silvicultura, urbanismo, vialidad, entre otras. (Guevara & De La Torre, 2019)

#### **2.2.6. Presa**

Presa o represa es una estructura edificada con cualquier material, que atraviesa un cauce natural o artificial, para producir una elevación del nivel del agua o una acumulación

(embalse) y generar una distribución de caudales diferente a la natural o inicial. Según la Comisión Internacional de Grandes Presas (International Commission on Large Dams, ICOLD), a una presa se la define como una barrera o una estructura colocada cruzando un curso de agua o de un río con el fin de almacenar, controlar y derivar agua. En algunos países, a la estructura que cierra el paso del flujo se la denomina cortina y presa al conjunto de estructuras, incluida la cortina, que permiten el aprovechamiento de los recursos hídricos. (Sandoval, 2018)

### **2.2.7. Embalse**

Un embalse se forma como resultado de la construcción de una represa que cierra el cauce de un río y almacena un cierto volumen de agua para satisfacer las demandas de este recurso. El volumen que almacena depende de la altura de la presa y de la forma geométrica, definida por la topografía de la zona inundada, a la que, también se le denomina “vaso”. (Sandoval, 2018)

### **2.2.8. Proceso de sedimentación en embalses**

Cuando se construye una presa en el lecho de un río, ésta actúa como una trampa de sedimentos, y una parte de los sólidos transportados por la corriente queda retenida en el embalse, disminuyendo así el volumen de almacenamiento. La sedimentación que ocurre aguas arriba de una presa es un fenómeno de Hidráulica Fluvial que resulta ser inevitable, su origen es muy sencillo: al elevarse artificialmente los tirantes (calados) del río y aumentar considerablemente la sección transversal, la velocidad de la corriente disminuye, y aun en avenidas puede tener valores muy pequeños, lo que favorece la sedimentación. (Rocha, 1998)

Las características morfológicas y el régimen de explotación del propio embalse condicionarán la distribución final del sedimento. La mayor parte del material, especialmente el de mayor tamaño, queda enseguida depositado en la zona de la cola formando cuerpos de espesores y forma variables, sometidos a procesos de retrabajamiento en función de las variaciones del nivel del embalse. El material más fino se transporta en suspensión y va depositándose en el interior del embalse en cantidades decrecientes. Cerca de la presa, puede producirse un aumento de la tasa de deposición por el efecto pantalla que la propia presa

induce, se estima que al menos un 90% del material en suspensión queda atrapado y sólo una pequeña cantidad seguirá su curso aguas abajo del río a través de los desagües habituales del embalse. (Casamor & Calafat, 2018)

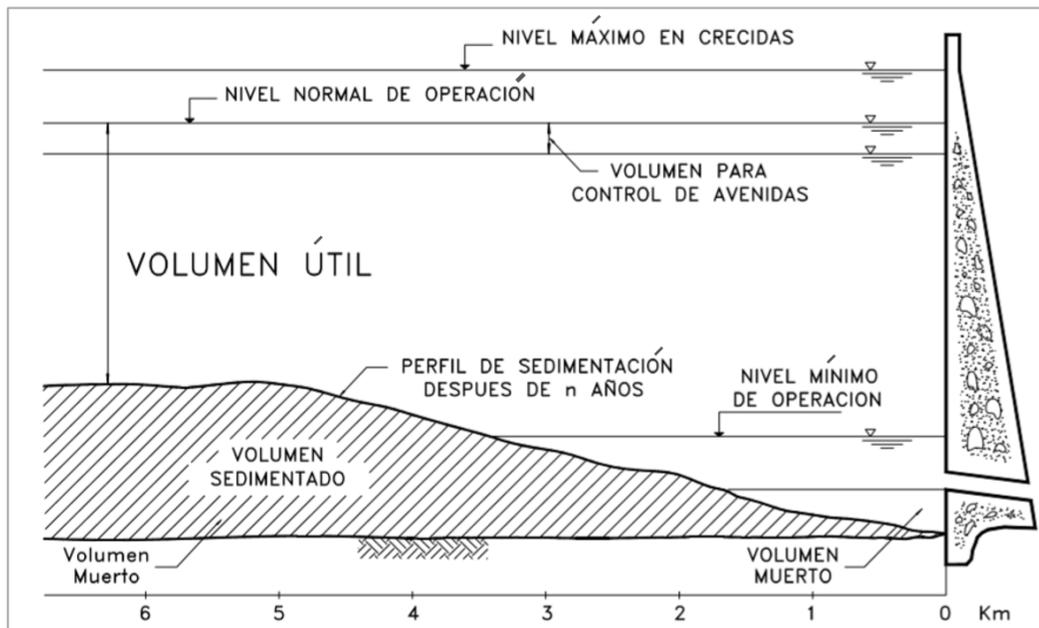


Figura 7. Embalse en proceso de sedimentación.  
(Rocha, 1998)

### 2.2.9. Efectos de la sedimentación de embalses

En ocasiones, y ya desde la fase de diseño, numerosos proyectos de obras hidráulicas no han contemplado la producción y movilización de sedimentos en las cuencas, lo cual lleva a adoptar diseños inadecuados para los efectos de la sedimentación en embalses, especialmente en cuencas con altas tasas de erosión.

Entre los efectos de la colmatación en los embalses se pueden destacar:

- La pérdida de capacidad de almacenamiento de agua. Al cabo de los años se puede llegar a reducir de forma importante la capacidad de los embalses.
- La retención de sedimentos en los embalses puede generar problemas de estabilidad de las estructuras hidráulicas situadas aguas abajo. De esta forma, se pueden producir

fenómenos de incisión del cauce y problemas de erosión localizada (pilas de puentes, etc.) aguas abajo de los embalses.

- Desde el punto de vista ecológico la retención de sedimentos supone además una modificación del transporte de nutrientes y de materia orgánica.
- La regresión de deltas. El curso del río se resiente hasta el mismo estuario, donde algunos deltas, están en retroceso por la falta de aporte de sedimentos.
- La alteración de la pendiente longitudinal del cauce.
- La limitación del uso recreativo de los embalses.
- La propensión a la eutrofia, etc. (Herrero, 2016)

#### **2.2.10. Transporte de sedimento**

La hidráulica fluvial estudia la erosión, el transporte y la sedimentación en el cauce, pero para que este proceso dinámico exista es necesario que se produzca el sedimento en la propia cuenca. Éste sufrirá un proceso de movimiento hasta el cauce fluvial y en él se producirá la erosión transporte y sedimentación.

El transporte de sedimentos del lecho puede ser dividido en transporte de fondo y transporte en suspensión. Los dos modos de transporte de material del lecho tienen influencia en los procesos de erosión y sedimentación de ríos aluviales. Numerosas ecuaciones han sido propuestas para calcular el transporte de sedimentos en función de las características morfológicas, hidráulicas y sedimentológicas locales de los cursos de agua como se muestra en la Figura 8. (Basile, 2018)

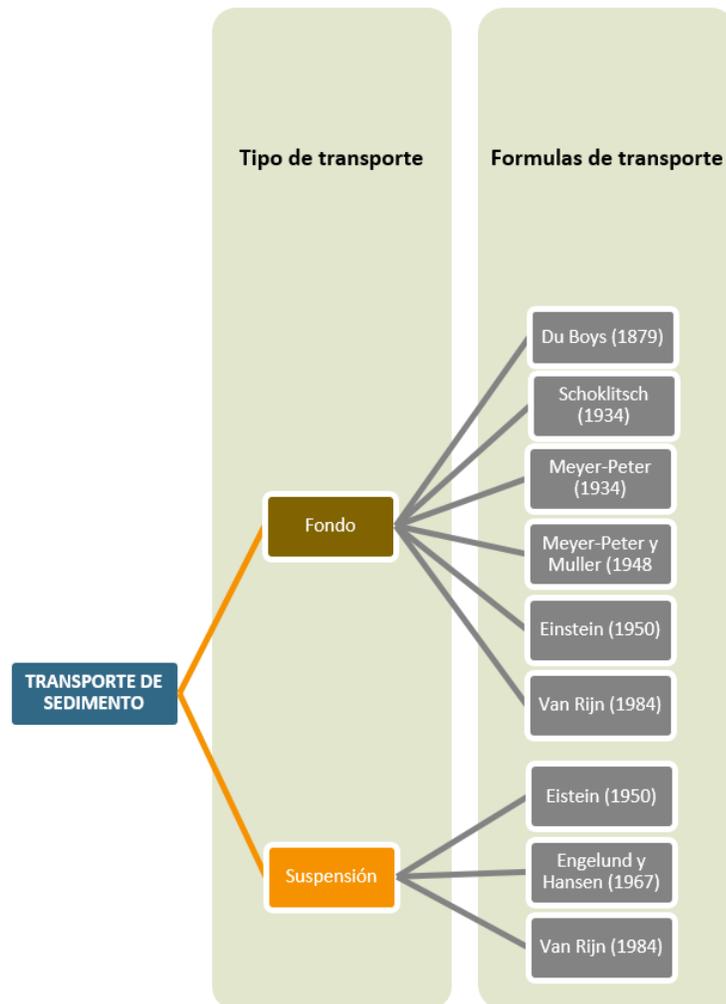


Figura 8. Fórmulas para la estimación del transporte de sedimentos. (Elaboración propia)

### 2.2.11. Métodos para estimar pérdida de suelo por erosión

La importancia económica y las repercusiones ambientales que tiene la erosión han llevado al desarrollo de muchos métodos para estimar las pérdidas de suelo, especialmente en áreas de cultivo o en cuencas hidrográficas. La complejidad de los procesos erosivos, la diversidad de factores que intervienen y la irregularidad espacio temporal, suponen una dificultad para poder hacer predicciones de las pérdidas de suelo que sean fiables. (Alcañiz, 2008)

Los métodos que tratan de estimar la pérdida de suelo y producción de sedimentos en cuencas hidrográficas se pueden sub-dividir en dos grupos que son los siguientes:

- Métodos con base en medición directa
- Métodos con base en modelación matemática

#### **2.2.11.1. Método de medición directa**

La medición directa como describe su nombre determina la producción de los sedimentos basándose en mediciones directas. Estas se dividen en tres grupos, que son los siguientes: muestreo sobre el cauce, sedimentación en embalses y análisis regionales. (USACE, 1995) citado por (Salazar, 2016)

##### **▪ Registro de descarga diaria de sedimentos**

El método compara los hidrogramas con los registros de concentración diaria de sedimentos. (Ramírez, 2009) citado por (Salazar, 2016)

##### **▪ Acumulación de carga de sedimentos**

El método cuantifica la suma los promedios de la producción de los sedimentos de descarga, de esta manera se termina los periodos que van desde las horas a años. (Ramírez, 2009) citado por (Salazar, 2016)

##### **▪ Curva de descarga de sedimentos y duración de flujo**

Consiste en la integración de la curva de duración de flujo con una curva de descarga de sedimentos en un punto a la salida de la cuenca. (Ramírez, 2009) citado por (Salazar, 2016)

#### **2.2.11.2. Método de modelos matemáticos**

Existen una gran variedad de modelos matemáticos que determinan la producción de sedimentos y están divididos en, simulación de procesos físicos y empíricos o de agrupación de variables. De esta división los métodos más empleados son los modelos empíricos, pero los que arrojan resultados más acertados son los métodos de procesos físicos. (Salazar, 2016)

Una desventaja de algunos modelos es no considerar el medio ambiente como dinámico con respecto al tiempo y espacio.

### **a) Simulación de procesos físicos**

Son aquellos que se basan en los procesos físicos que tiene la erosión, es decir que se basan en ecuaciones matemáticas que tienen en cuenta las leyes de conservación de la masa y la energía. (Alcañiz, 2008). A continuación se describen algunos modelos de simulación de procesos físicos.

#### **▪ WEEP**

Es un modelo basado en procesos físicos y trabaja con cálculos diarios. Determina espacial y temporalmente la pérdida de suelo y el depósito de sedimentos sobre el flujo superficial en cauces pequeños y embalses. Sin embargo, requiere un extenso registro de precipitaciones para modelar estocásticamente, así como de sedimentos sobre el cauce. (Salazar, 2016).

#### **▪ CREAMS**

Establecido por Knisel (1980), combina un componente hidrológico con la erosión – sedimentación y la concentración de nutrientes. Predice pérdidas anuales o mensuales, aunque necesita muchos datos meteorológicos y de condiciones de uso del suelo. (Alcañiz, 2008)

#### **▪ KINEROS2**

Está diseñado para modelar la interceptación, la infiltración, la escorrentía superficial y la erosión que producirían eventos de lluvia individuales. (Alcañiz, 2008)

#### **▪ EUROSEM**

El modelo Europeo de erosión, es un modelo dinámico con la capacidad de simular el transporte de sedimentos. Los resultados son el escurrimiento total, la pérdida de suelo total, el hidrograma de la tormenta y su sedimentograma. Sin embargo solo puede ser implementado en cuencas con buena cantidad de datos de aforos. (Morgan et al., 1998) citado por (Salazar, 2016)

## **b) Empírico o de agrupación de variables**

Los modelos empíricos que utilizan una serie de algoritmos matemáticos y de correlaciones con factores erosivos, pero sin que se pueda establecer una relación directa de causa-efecto con las pérdidas de suelo. (Alcañiz, 2008)

Entre los modelos existentes podemos destacar los más utilizados los siguientes:

### **▪ Fournier**

Es un método que evalúa la degradación específica de una cuenca, con base en sólo dos factores que intervienen en el fenómeno de erosión hídrica: el clima (como precipitación y temperatura) y el relieve. Estudiando numerosas cuencas en todo el mundo concluyó que la abundancia pluvial no es suficiente por sí sola para justificar la degradación específica de una cuenca. Una misma degradación puede ser debida a escorrentías muy diferentes.

Las cuencas que registraban una degradación específica elevada tenían un desigual reparto de la precipitación y una concentración de la lluvia en un período corto. Sin embargo las cuencas con un régimen de precipitaciones más uniforme tenían degradaciones inferiores. (Reyna, Reyna, Lábaque, Riha, & Rafaelli, 2011)

### **▪ Dendy y Bolton**

Estableció una ecuación para cuencas desde 2,5 a 75,000 km<sup>2</sup> de superficie, con precipitaciones inferiores a 2 pulgadas en base a datos de aproximadamente 800 embalses en los Estados Unidos de América para determinar la producción de sedimentos en cuencas. La ecuación depende de la superficie y el escurrimiento medio anual. (Walling et al., 1985) citado por (Salazar, 2016)

### **▪ Djorovic y Gavrilovic**

Este modelo estima la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca, al ser un método empírico, permite calcular el volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección de cierre de la cuenca. (Vallejos, Zamora, & Jorge, 2018)

- **USLE**

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es el modelo matemático más usado en la estimación de la pérdida de suelo debido a la erosión laminar y toma en cuenta variables como el relieve del terreno, la forma de la lluvia, el tipo de suelo, la vegetación y las prácticas de conservación. (Wishmeier y Smit, 1965) citado por (Salazar, 2016). Este modelo ha sido actualizado y ampliado en diferentes versiones (MUESLE, RUSLE).

En la Figura 9 se muestra en un gráfico donde se ilustran la clasificación de los modelos para la estimación de sedimentos mencionados anteriormente.

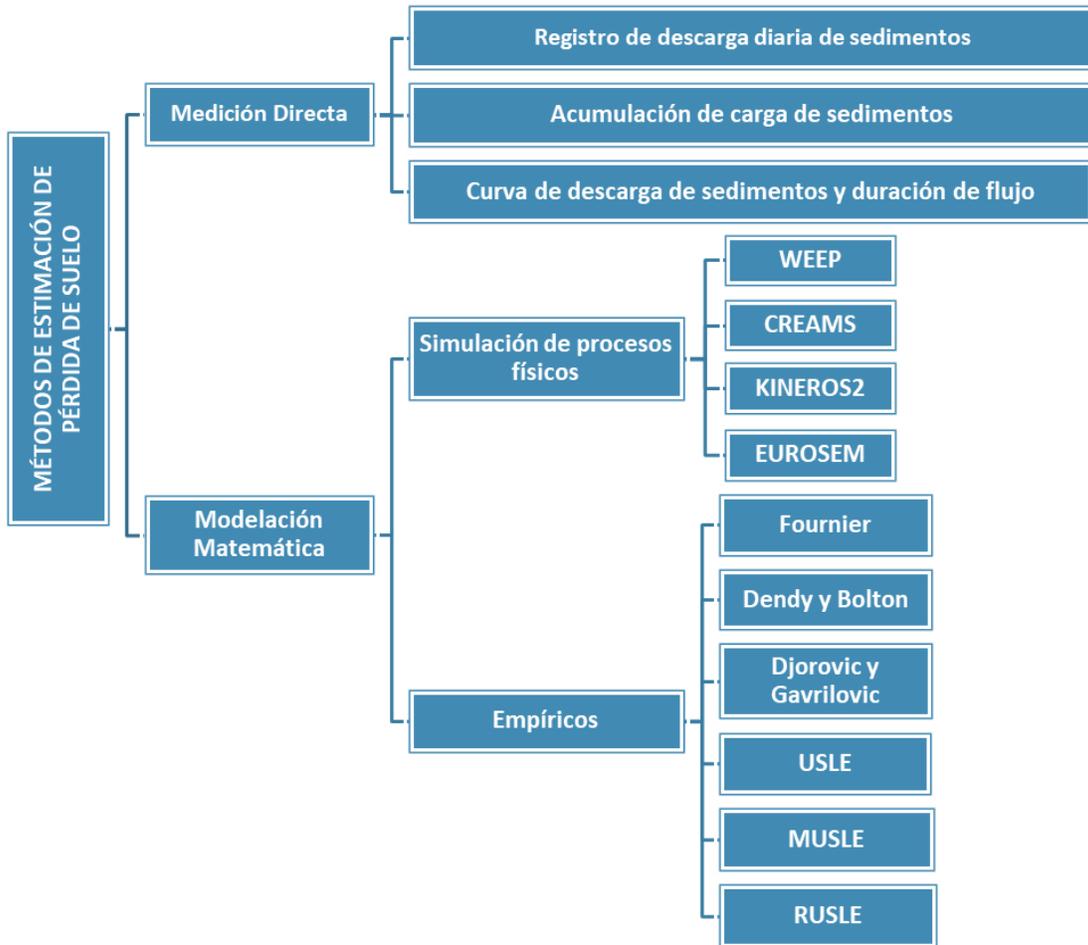


Figura 9. Modelos de estimación de sedimentos.  
(Elaboración propia)

### **2.2.12. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo - USLE**

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es un método para predecir la tasa de pérdida de suelo en cualquier combinación de suelo, topografía, clima, cobertura y prácticas de manejo. El método se fundamenta en la capacidad que poseen las lluvias para provocar erosión y en la resistencia natural de la tierra (Wischmeier y Smith, 1978). Es un método que se puede aplicar en cualquier región, ha sido empleada en todo el mundo para numerosos propósitos y en muy diferentes condiciones socioeconómicas y ambientales, siendo la más aceptada entre las personas encargadas de la gestión de cuencas con fines de producción o de conservación de suelos y de recursos hídricos. La USLE considera los principales factores que intervienen en el proceso de erosión hídrica (precipitación, suelo, relieve, coberturas y prácticas de conservación). Permite predecir la erosión actual y realizar simulaciones con diferentes escenarios mediante la siguiente expresión. (Ministerio de Agroindustria Presidencia de la Nación, 2017).

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

Donde:

A = pérdida anual del suelo [ton/ha/año]

R = factor lluvia o índice de erosividad pluvial [MJ.mm/ha.hr.año]

K = erosionabilidad del suelo [ton.ha.hr/ha.MJ.mm]

L = longitud de la pendiente (adimensional)

S = factor de pendiente (adimensional)

C = factor de cobertura vegetal (adimensional)

P = factor de prácticas de conservación (adimensional)

### 2.2.12.1. Factor lluvia o índice de erosividad pluvial (R)

El factor R es el factor de erosividad de la lluvia. Este factor indica el potencial erosivo de la lluvia que afecta en el proceso de erosión del suelo. Haciendo una analogía, se podría decir que una lluvia fuerte un día al año puede producir suficiente energía para erosionar el suelo que varias lluvias de mediana intensidad a lo largo de un año. El factor erosividad (R) es definido como la sumatoria anual de los promedios de los valores individuales del índice de tormenta de erosión ( $E \cdot I_{30}$ ). Donde E es la energía cinética por unidad de área,  $I_{30}$  es la máxima intensidad en 30 minutos de precipitación. (Yali, 2018).

Para el cálculo de R se determina si existe una precipitación mayor a 12,7 mm en un intervalo de 6 hr. De este modo se desprecian todas las precipitaciones con un volumen inferior a este umbral con excepción de aquellas en las que la intensidad es superior a 24 mm/hr en 15 min. (Wischmeier y Smith 1978), citado por (Saldaña, Nemmaoui, Cantón, Aguilar, & Aguilar, 2014).

Según (Wischmeier, 1958; Wischmeier y Smith, 1978; Brown y Foster, 1987), citado por (Angulo, 2011) definen la siguiente ecuación para el factor de erosividad:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (E \cdot I_{30})_k}{n}$$

Donde:

R = factor lluvia o índice de erosividad pluvial [J.mm/m<sup>2</sup>.hr.año]

$m_j$  = número de eventos erosivos del año j

$E \cdot I_{30}$  = índice de erosión [J.mm/m<sup>2</sup>.hr] de cada evento k

E = es la energía cinética del aguacero [J/m<sup>2</sup>]

$I_{30}$  = es la intensidad de lluvia máxima de 30 minutos de cada evento [mm/hr]

n = es el número de años

La energía cinética se calcula mediante la siguiente expresión. (Wischmeier y Smith 1978), citado por (Kohli, 2016).

$$E = \sum ([210,2 + 89 \cdot \log_{10}(I_i)] \cdot (I_i \cdot T_i))$$

Donde:

E = energía cinética del aguacero o lluvia [J/m<sup>2</sup>]

I<sub>i</sub> = intensidad de la lluvia del intervalo [cm/hr]

T<sub>i</sub> = duración del aguacero [hr]

Debido a la ausencia de esta información en las estaciones meteorológicas ha limitado la aplicación de la ecuación anterior, ya que para su cálculo debe contarse con registros pluviográficos horarios o diarios durante un número elevado de años. Por lo que se han desarrollado diferentes ecuaciones que adaptan la erosividad local mediante fórmulas que sólo requiera una data mensual o anual de precipitación. (Kohli, 2016)

Tabla 1  
*Ecuaciones para determinar el factor de erosividad pluvial*

AUTOR	ECUACIÓN
Fournier (1960), citado por (Calero, 2017)	$IF = \frac{p_{max}^2}{P}$ <p>Donde:            IF = Índice de Fournier            p<sup>2</sup><sub>max</sub>=precipitación del mes más lluvioso del año i [mm]            P = Precipitación total anual [mm]</p>
Arnoldus (1978), citado por (Calero, 2017)	$IMF = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P}$ <p>Donde:            IMF = Índice Modificado de Fournier</p>

---

	$p_i^2 = \text{precipitación mensual del mes } i \text{ [mm]}$ $P = \text{Precipitación total anual [mm]}$
Wischmeier & Smith (1978), citado por (Yali, 2018)	$R = \sum_{i=1}^{12} 1,735 \cdot 10^{(1,5 \cdot \log(p_i^2/P) - 0,08188)}$ <p>Donde:</p> <p>R = factor de erosividad de lluvias [MJ.mm/ha.hr.año]  <math>p_i</math> = precipitación mensual [mm]          P = precipitación anual [mm]</p>
Morgan (1974), citado por (Zúñiga, 2017)	$R = \frac{I_{30} \cdot (9,28 \cdot P - 8,838)}{1000}$ <p>Donde:</p> <p>R = factor de erosividad de lluvias [MJ.mm/ha.hr.año]  <math>I_{30} = 75 \text{ mm/hr.}</math> (Valor recomendado por Wischmeier)          P = precipitación media anual en [mm]</p>
Roose (1975), citado por (Zúñiga, 2017)	$R = 1,73 \cdot 0,5 \cdot P$ <p>Donde:</p> <p>R = factor de erosividad de lluvias [MJ.mm/ha.hr.año]          P = precipitación media anual en [mm]</p>

---

### 2.2.12.2. Factor de erosionabilidad o erodabilidad del suelo (K)

La erodabilidad del suelo está representada por el factor K que expresa la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado y está relacionado con la estabilidad estructural del mismo. Se calcula a partir del porcentaje de las distintas fracciones granulométricas, porcentaje de materia orgánica, permeabilidad y estructura. (Universidad Nacional de La Plata, 2013). Algunos suelos pueden erosionarse más rápidamente que otros aun cuando las pendientes, lluvia, cobertura y prácticas de manejo sean las mismas, debido a las propiedades intrínsecas del mismo. (Villanueva, 2004), citado por (Ramírez, 2010).

Los aspectos que se consideran como punto de partida para comprender el factor K están:

- A mayor estabilidad de los agregados, mejor se mantendrá la porosidad a lo largo de la precipitación, logrando una estabilidad en la capacidad de transmitir y almacenar agua.
- Cuanto mayor capacidad de suelo para el almacenamiento de agua, mayor retraso del proceso de escorrentía, disminuyendo el efecto destructivo sobre los agregados.
- Si el suelo tiene una mayor capacidad de transmitir el agua, menor será el volumen de la escorrentía generada, disminuyendo así el grado de erosión. (Calero, 2017).

El factor K puede variar en una escala de 0 a 1, donde 0 indica suelos con la menor susceptibilidad a la erosión y 1 indica suelos altamente susceptibles a la erosión hídrica del suelo; cabe mencionar que esta escala fue hecha para el sistema de unidades americanas, y adaptándose al sistema internacional la escala varía entre 0 y 0.07. (Yali, 2018).

- **Metodología de obtención del factor (K)**

El valor de erodabilidad del suelo se lo puede obtener de tres maneras según sea el caso y la disponibilidad de información:

- a) Método directo**

Consiste en realizar medición directa en campo durante un año de las pérdidas que ocasiona las precipitaciones en condiciones normalizadas, indicando el valor de las pérdidas anuales medias del suelo por unidad del factor R. (Calero, 2017).

- b) Método práctico**

Para la obtención del factor K, la metodología original propone la utilización del nomograma de erodabilidad (Wishmeier et al. 1971) que considera el porcentaje de limos + arenas finas, arenas, materia orgánica, estructura y permeabilidad del horizonte superficial del suelo. (Ministerio de Agroindustria Presidencia de la Nación, 2017).

El valor de K en el monograma está expresado en unidades inglesas, para transformarlo a unidades métricas deberá ser multiplicado por un factor de 0,1317; obteniendo el valor de erodabilidad del suelo en unidades K (ton.ha.hr/ha.MJ.mm).

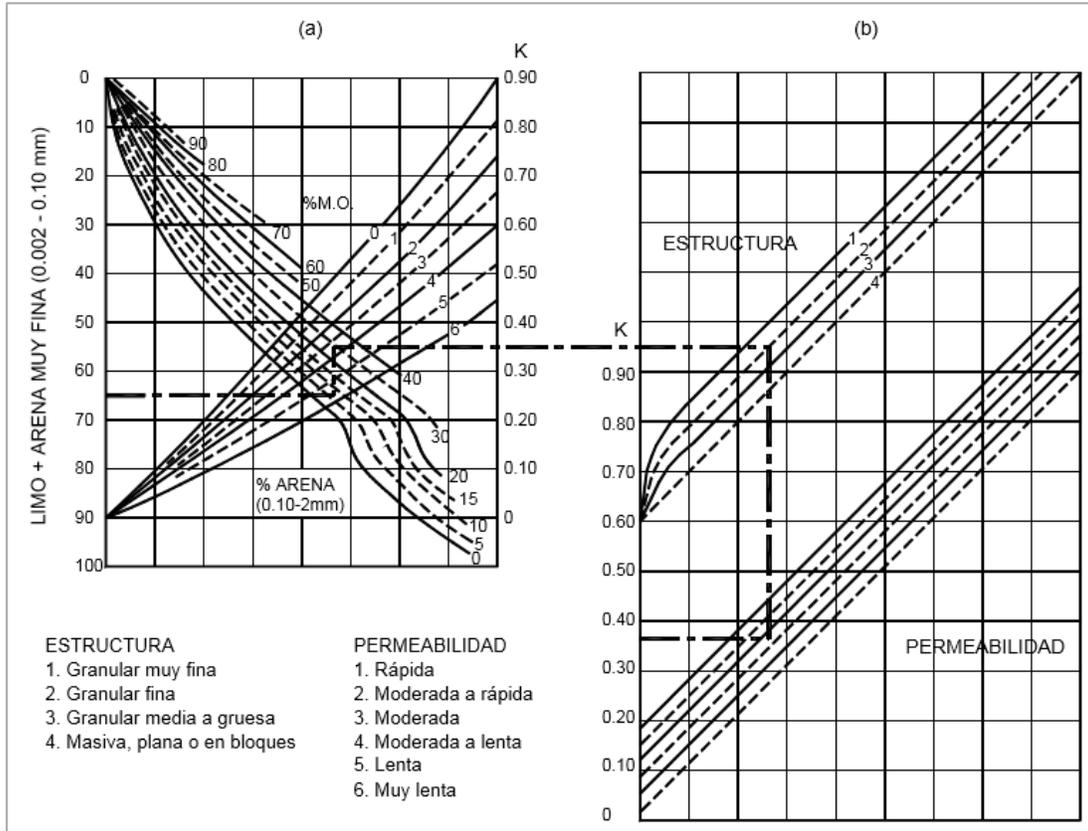


Figura 10. Monograma de erodabilidad del suelo K. (Suárez, 2001)

De igual manera Wischmeier and Smith (1978) propone la siguiente ecuación para la determinación del factor de erodabilidad del suelo K. (Yali, 2018)

$$K = \left[ \frac{2,1 \cdot 10^{-4} \cdot M^{1,14} \cdot (12 - OM) + 3,25 \cdot (s - 2) + 2,5 \cdot (p - 3)}{100} \right] \cdot 0,1371$$

Donde:

K = factor erodabilidad del suelo [ton.ha.hr/ha.MJ.mm]

M = factor representativo de la textura [100 - % arcilla] · [% limo + arena muy fina], expresándose también como:

[% partículas entre 0,002 y 0,1 mm] · [% partículas entre 0,002 - 2,0 mm]

OM = % de materia orgánica

s = número correspondiente a la estructura del suelo [granular, en bloque, laminar]

p = valor de permeabilidad del perfil del suelo.

Con el fin de simplificar la ecuación, prescindiendo de los términos donde aparecen los factores s y p, obteniendo un K simplificado a partir de datos provenientes de análisis de suelo, principalmente los referidos a la granulometría y al contenido de materia orgánica, y en función de las características propias de cada suelo se tiene la siguiente ecuación. (Universidad Nacional de La Plata, 2013)

$$K_{simplificado} = [10^{-6} \cdot 2,1 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - OM)] \cdot 0,1371$$

Según Auza (1999), citado por (Choqueticlla, 2010); el método más confiable en la determinación del factor K es la ecuación de Mannaerts (1999), el cual relaciona el tamaño medio de las partículas de suelo a la pérdida del mismo por erodabilidad.

$$K = 0,0034 + 0,0405 \cdot e^{\left[-0,5 \cdot \left(\frac{\log D_g + 1,659}{0,7101}\right)^2\right]}$$

$$D_g = e^{[0,01 \cdot \sum f_i \cdot \ln(m_i)]}$$

Donde:

K = factor de erodabilidad del suelo [ton.ha.hr/ha.MJ.mm]

D<sub>g</sub> = media geométrica del diámetro de las partículas [mm]

f<sub>i</sub> = fracción de las partículas primarias [%]

m<sub>i</sub> = promedio aritmético de los límites de tamaño de partículas [mm]

### c) Método alternativo

Utilizar el método de nomograma en áreas pequeñas es fácil pero, en ciertos casos resulta complicado en la identificación de la textura, estructura y permeabilidad del suelo cuando se trabaja con áreas de gran extensión porque no se dispone de mapas de suelos con información edafológica que ayude a determinar los parámetros del nomograma. (Calero, 2017)

Cuando la obtención de los datos resulta compleja o no se tienen los valores requeridos (textura, estructura y la permeabilidad) por las metodologías anteriores, se puede realizar una estimación general del valor de K en función al contenido de materia orgánica y textura del suelo como se muestran en la Tabla 2, estos valores están en unidades (ton.ha.hr/ha.MJ.cm).

Tabla 2  
*Factor de erodabilidad del suelo K*

Clase de Textura	Contenido de Materia Orgánica		
	0,50% K	2% K	4% K
Arena	0,07	0,04	0,03
Arena fina	0,21	0,18	0,13
Arena muy fina	0,55	0,47	0,37
Arena franca	0,16	0,13	0,11
Arena fina franca	0,32	0,26	0,21
Arena muy fina franca	0,58	0,50	0,40
Franco arenoso	0,36	0,32	0,25
Franco arenoso fino	0,46	0,40	0,32
Franco arenoso muy fino	0,62	0,54	0,43
Franco	0,50	0,45	0,38
Franco limoso	0,63	0,55	0,43
Limo	0,79	0,68	0,55
Franco arcilloso arenoso	0,36	0,33	0,28
Franco arcilloso	0,37	0,33	0,28
Franco arcilloso limoso	0,49	0,42	0,34
Arcilla arenosa	0,18	0,17	0,16
Arcilla limosa	0,33	0,30	0,25
Arcilla	0,17 – 0,38		

(Kohli, 2016)

### 2.2.12.3. Factor topográfico (LS)

La longitud y el gradiente de la pendiente se representan con L y S, respectivamente; sin embargo; a menudo se evalúan como un factor topográfico único, LS. La longitud de la pendiente se define como la distancia desde el punto de origen del flujo sobre la superficie hasta el punto donde la pendiente disminuye lo bastante como para que ocurra la deposición.

El gradiente de la pendiente es el campo o segmento de pendiente, expresado generalmente como un porcentaje. (Kirkby & Morgan, 1994).

El efecto de la pendiente sobre la pérdida de suelo por escorrentía fue comprobado experimentalmente en lotes de igual área, en suelos coluviales, con una precipitación media anual de 2701 mm, resultando aumentos progresivos en cantidad de suelo erodado a medida que aumenta el grado y longitud de pendiente, como se representa en la Figura 11. Henao, (1988), citado por (Universidad Nacional de La Plata, 2013).

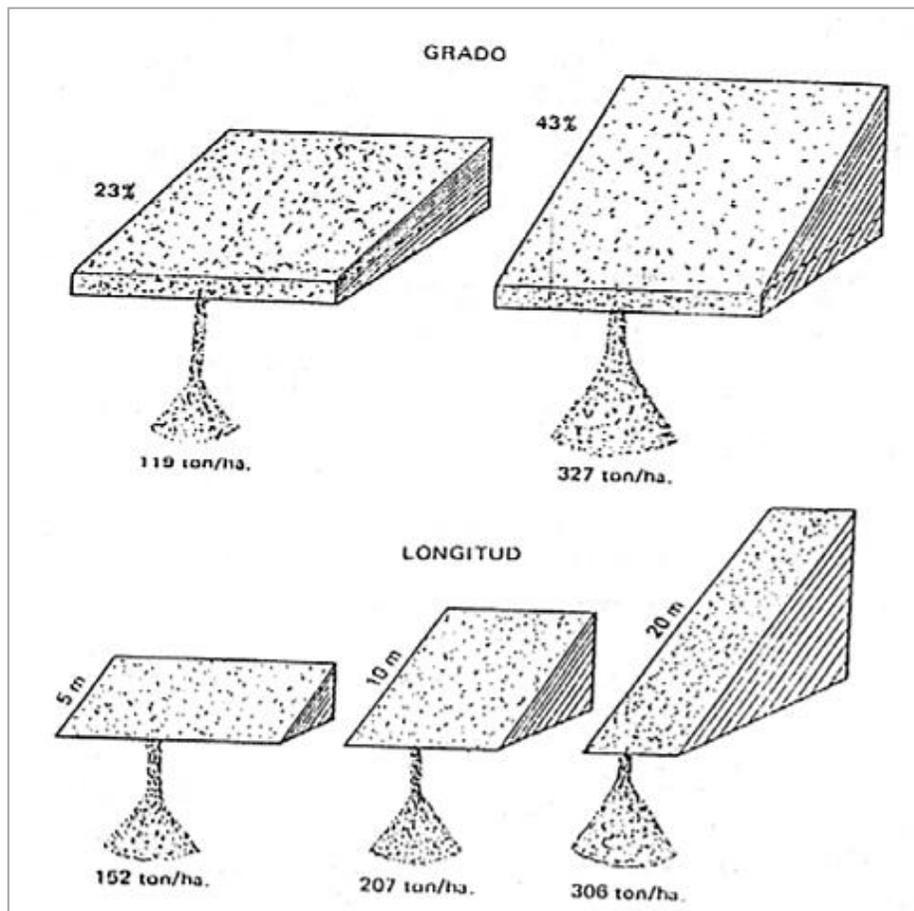


Figura 11. Efecto del grado y longitud de la pendiente sobre la pérdida de suelo.  
(Universidad Nacional de La Plata, 2013)

El factor LS integra la longitud y el gradiente, y se calcula mediante las ecuaciones que se describen más adelante, considerando áreas con pendientes menores al 9 % y áreas con pendientes mayores al 9 %, respectivamente. (Universidad Nacional de La Plata, 2013)

- Para pendientes,  $s < 9 \%$

$$L.S = \left(\frac{\lambda}{22,1}\right)^{0,3} \cdot \left(\frac{0,43 + 0,30 \cdot s + 0,043 \cdot s^2}{6,613}\right)$$

- Para pendientes,  $s \geq 9 \%$

$$L.S = \left(\frac{\lambda}{22,1}\right)^{0,3} \cdot \left(\frac{s}{9}\right)^{1,3}$$

Donde:

$\lambda$  = longitud de la pendiente en [m]

$s$  = factor de pendiente en [%]

La determinación de valores representativos de los parámetros “ $\lambda$ ” y “ $s$ ” en el caso de aplicarse el modelo a superficies de cierta extensión o pequeñas cuencas hidrográficas en que, a pesar de la homogeneidad de otros factores, estas variables pueden presentar amplias variaciones, puede obtenerse por los métodos de la “densidad de drenaje” y de “pendiente media” de Horton, y a través de “contorno punto extremo” de Williams y Berndt. (TRAGSA, 1998), citado por (Giménez, 2008)

- **Método de Horton**

$$\lambda = 0,5 \cdot \frac{A}{\sum L}$$

$$s_i = 100 \cdot H \cdot \left(\frac{LC_j + LC_{j+1}}{2 \cdot A_i}\right)$$

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n s_i \cdot A_i}{A}$$

Donde:

$\lambda$  = longitud de la pendiente en [km]

$A$  = área de la cuenca en [km<sup>2</sup>]

$\sum L$  = longitud total de los cursos que drenan por la cuenca en [km]

$A_i$  = superficie entre los contornos  $j$  y  $j+1$  [ $\text{km}^2$ ]

$s_i$  = porcentaje medio de pendiente para la superficie  $A_i$  entre los contornos (curva de nivel)  $j$  y  $j+1$

$H$  = diferencia de nivel entre los dos contornos [km]

$LC_j$  = longitud del contorno  $j$  [km]

$LC_{j+1}$  = longitud del contorno  $j+1$  [km]

$s$  = pendiente media de la cuenca [%]

▪ **Método de Williams y Berndt**

$$s = 0,25 \cdot Z \cdot \left( \frac{LC_{25} + LC_{50} + LC_{75}}{A} \right)$$

$$\lambda_i = \frac{LC \cdot LB}{2 \cdot n \cdot \sqrt{LC^2 - LB^2}}$$

$$\lambda = \frac{(\lambda_{25} + \lambda_{50} + \lambda_{75})}{3}$$

Donde:

$s$  = factor de pendiente [m/m]

$\lambda$  = longitud de la pendiente en [km]

$Z$  = desnivel de la cuenca, diferencia de cota mayor y menor [km]

$LC_{25}, LC_{50}, LC_{75}$  = longitud en [km] de los contornos en el 25%, 50% y 75% de  $Z$

$A$  = área de la cuenca en [ $\text{km}^2$ ]

$LC$  = longitud de curva de nivel [km]

$LB$  = longitud de contorno base [km]

$n$  = número de “puntos extremos”, es decir, número de puntos en que la curva de nivel corta a la red de drenaje

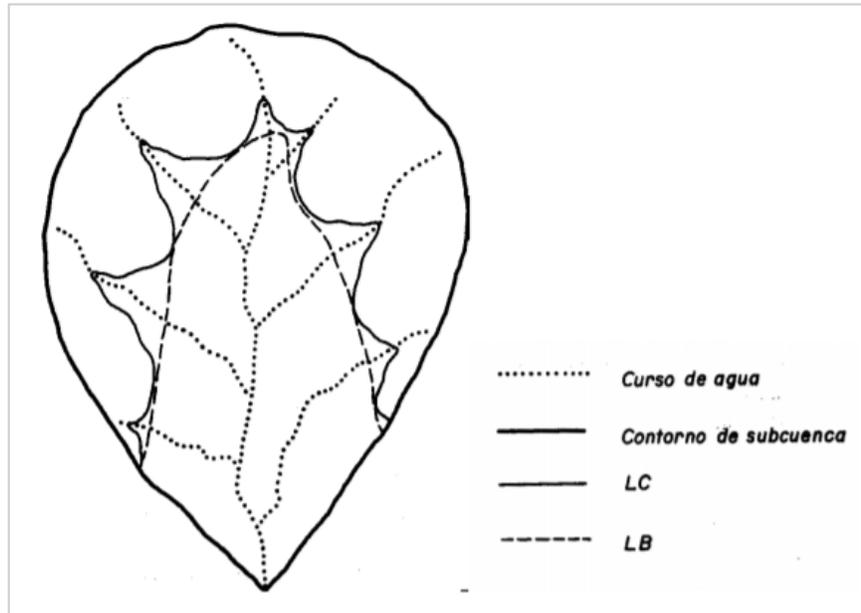


Figura 12. Representación gráfica de la aplicación del método “contorno-Punto extremo”.  
(Giménez, 2008)

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), permitiendo asignar directamente a una ladera el valor del factor LS según el porcentaje de la pendiente como se muestra en la tabla a continuación. (Zúñiga , 2017).

Tabla 3  
Valor de LS, según la pendiente del terreno

Grado de Pendientes (%)	Factor LS
0 a 3	0,3
3 a 12	1,5
12 a 18	3,4
18 a 24	5,6
24 a 30	8,7
30 a 60	14,6
60 a 70	20,2

70 a 100	25,2
> 100	28,5

---

(Zúñiga , 2017)

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

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

Marcano (2009), citado por (Zúñiga , 2017), indica que los bosques actúan como esponjas, capaces de recoger y almacenar grandes cantidades del agua de lluvia. Los suelos forestales absorben cuatro veces más agua de lluvia que los suelos cubiertos por pastos y 18 veces más que el suelo desnudo.

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; 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.

Para determinar el factor de cobertura vegetal se estudian las diferentes coberturas que cuenta la zona de estudio, para lo cual se tiene una tabla propuesta por Wischmeier.

Tabla 4  
*Factor de cobertura vegetal*

<b>Cobertura Vegetal</b>	<b>Factor C</b>
Suelo desnudo	1
Bosque o matorral denso (alto mulch)	0,001
Pradera herbácea en buenas condiciones	0,01
Pradera sobre pastoreada	0,1
Pradera herbácea	0,01 - 0,025
Albolado denso	0,01 - 0,003

Albolado forestal clareado	0,003 - 0,009
Matorral con buena cobertura	0,003 - 0,013
Matorral ralo y eriales	0,20 - 0,013
Cultivos anuales y herbáceos	0,25
Pasturas	0,15
Cubierta escasa (60 %)	0,15 - 0,09
Cubierta inapreciable	0,45

Wischmeier (1978), citado por (Zúñiga, 2017)

Cobertura Vegetal	Factor C
Bosque no perturbado	0,001
Bosque perturbado	0,34
Tierras erosionadas con escasa vegetación	0,8
Suelo desnudo	1
Cultivos extensos en hileras, ej. maíz	0,5
Yuca y batata	0,2-0,8
Palmera, café, cacao	0,1-0,3
Pastos	0,07
Hortalizas	0,3

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

Expresa la relación que existe entre el valor medio de las pérdidas de suelo producidas en un campo donde se realizan prácticas de conservación de suelo, y las que se originarían en el mismo campo si se hicieran las labores a favor de la pendiente. Las prácticas de conservación utilizadas en tierras arables son la labranza en curvas de nivel, las franjas en contorno y los cultivos en terrazas. Por otra parte los drenajes estabilizados para la eliminación de los excesos de agua son parte necesaria de cada una de estas prácticas. Según las medidas de conservación de suelos que se aplican, los valores de P se asignan utilizando tablas elaboradas por el Soil Conservation Service de Estados Unidos. (Universidad Nacional de La Plata, 2013)

Tabla 5  
Factor de prácticas de conservación P

Pendiente (%)	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Cultivo en terrazas	
			Terrazas de desagüe	Terrazas de infiltración
2 - 7.	0,50	0,25	0,10	0,05
8 - 12.	0,60	0,30	0,12	0,05
13 - 18.	0,80	0,40	0,16	0,05
19 - 24.	0,90	0,45	0,18	0,06

(Universidad Nacional de La Plata, 2013)

Cuando las prácticas de suelo no se aplican o son muy pocas el valor de P es igual al valor de 1.

### 2.2.13. Método de Gavrilovic

La metodología de Gavrilovic (Gavrilovic, S., 1959; Gavrilovic, Z., 1988; Zemljic, M., 1971) estima la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca y que es transportado a la sección del río que la define. Es un método empírico que permite calcular el volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección de cierre de la cuenca (G); es el producto de la producción media anual de sedimento por erosión superficial (W) y del coeficiente de retención de sedimentos o factor de entrega (R). (COBINABE, 2010)

$$G = W \cdot R \quad [m^3/año]$$

Esta ecuación considera una serie de parámetros, los que establecen como representativos de cada uno de los factores determinantes en el proceso erosivo: precipitación, clima, relieve, suelo y vegetación, incluyendo éste último, un parámetro para estimar la influencia del grado de intensidad que han alcanzado los procesos erosivos presentes en la cuenca y el tipo de erosión predominante. (Reyna, Reyna, Lábaque, Riha, & Rafaelli, 2011).

El volumen promedio anual erosionado de sedimento se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F \quad [m^3/año]$$

Donde:

T = Coeficiente de temperatura

h = precipitación media anual en [mm/año]

Z = coeficiente de erosión

F = superficie de la cuenca en [Km<sup>2</sup>]

El parámetro T se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$T = \left[ \left( \frac{t}{10} \right) + 0,1 \right]^{1/2}$$

Siendo:

t = temperatura promedio anual [°C]

El coeficiente de erosión Z tiene la siguiente expresión:

$$Z = X \cdot Y \cdot (\phi + I^{1/2})$$

Donde:

X = coeficiente de uso del suelo

Y = coeficiente de resistencia del suelo a la erosión

$\phi$  = coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados

I = gradiente de la pendiente superficial en [%]

El coeficiente de uso de la tierra (X) describe la capacidad del uso de la tierra para resistir la erosión a través de la vegetación o de la cobertura artificial. El coeficiente de resistencia del suelo (Y) representa la capacidad del suelo para representar la erosión proveniente de la precipitación y generalmente se calcula a través de experimentos de laboratorio o mediciones de campo,  $\phi$  representa el grado en que procesos activos de erosión están presentes. (Moreda, Benjamin, Nalesso, Valdes, & Corrales, 2016)

Los valores de X, Y así como  $\phi$  pueden apreciarse en las siguientes tablas:

Tabla 6  
*Coficiente de uso del suelo X*

<b>Uso de suelo</b>	<b>X</b>
Zona desprovista de vegetación o con vegetación exigua	1
Vegetación herbácea de cobertura rala	0,6
Vegetación herbácea de cobertura semidensa a densa	0,4
Vegetación predominante arbustiva	0,7
Vegetación arbustiva y boscosa mezclada	0,6
Bosque de alta montaña - alta densidad	0,2
Bosque de alta montaña - media densidad	0,4
Bosque de alta montaña - baja densidad	0,6
Bosque de montaña - porte achaparrado	0,6
Área de actividad agropecuaria	0,8

*(Reyna, Reyna, Lábaque, Riha, & Rafaelli, 2011)*

Tabla 7  
*Coficiente de resistencia del suelo a la erosión Y*

<b>Categoría</b>	<b>Subcategoría</b>	<b>Valor de Y</b>
Sedimentos finos y suelos poco resistentes a la erosión	Arena, grava y suelo suelto	2,00
	Loes, toba, suelos salinos, suelos de estepa y similares	1,60
Sedimentos, morrenas, arcillas y otras rocas débiles	Meteorización de piedras calizas y margas	1,20
	Serpentina, piedra arenisca roja, depósitos de flysch	1,10
	Parapodzol, podzol, esquisto desintegrado, maschist, gneis, esquisto arcilloso, etc	1,00
Rocas blandas, estabilizada (pendiente de talud, esquistos, arcillas rígidas)	Caliza compacta y schistose, suelos tierra-roja y fumose-silicatos	0,90

	Suelo forestal marrón y suelos de montaña	0,80
	Suelos smonitsa, valle y húmedos (back bog)	0,60
Rocas duras resistentes a la erosión	Chernozem y depósitos aluviales de buena textura	0,50
	Rocas ígneas compactas desnudas	0,25

(Moreda, Benjamin, Nalesso, Valdes, & Corrales, 2016)

Tabla 8  
Coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados  $\phi$

Categoría	Subcategoría	Valor de $\phi$
Cuenca completamente erosionada con barrancos y deslizamientos de tierra	La cuenca o zona completamente conectada por barrancos y procesos de erosión profundos	1,00
	Alrededor del 80% del área está bajo arroyuelos y barrancos	0,90
50-80% de las cuencas con erosión en arroyuelos y deslizamientos	Alrededor del 50% del área está bajo arroyuelos y barrancos	0,80
	Toda el área está conectada por la erosión de la superficie, detritus y escombros, algunos arroyuelos y barrancos (erosión profunda) y fuerte erosión kárstica	0,70
Erosión laminar, talud de escombros, pendiente con arroyuelos y barrancos, erosión kárstica	Toda el área está conectada por la erosión, pero sin efectos visibles profundos (arroyuelos, barrancos, desprendimientos de rocas, etc.).	0,60
	El 50% del área está conectada por la erosión de la superficie, mientras que el resto de la cuenca está desconectada	0,50
Erosión laminar en un 20-50% de las cuencas	El 20% del área está conectada por la erosión de la superficie y el 80% está desconectada	0,30

	La superficie de la tierra sin efecto visible de erosión, desprendimientos o deslizamientos menores de rocas en canales fluviales	0,20
Signos menores de erosión en las cuencas	La superficie de la tierra sin efecto visible de la erosión, la mayoría son campos de cultivo	0,15
	La superficie de la tierra sin efecto visible de erosión, principalmente plantas creciendo bajo árboles más grandes o cultivos perennes (prados, pastizales, etc.).	0,10

(Moreda, Benjamin, Nalesso, Valdes, & Corrales, 2016)

En este método, 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 expresión para el coeficiente de retención de sedimentos según (Zemljic, 1971) es la siguiente: (COBINABE, 2010)

$$R = \frac{[(O \cdot D)^{1/2} \cdot (L + Li)]}{(L + 10) \cdot F}$$

Donde:

O = perímetro de la cuenca [km]

D = diferencia de nivel media en la cuenca [km]

D = Dm - Dc

Dm = cota media de la cuenca

Dc = cota mínima de la cuenca

Li = longitud total de los afluentes fluviales laterales [km]

L = longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal [km]

F = superficie de la cuenca [km<sup>2</sup>]

#### 2.2.14. Coeficiente de entrega de sedimentos o factor de entrega (SDR)

La explicación al fenómeno de la erosión y la sedimentación se da por el movimiento de material sólido como producto de la erosión hídrica, este material (V) es calculado a partir de los modelos de erosión como USLE; sin embargo, no toda la erosión es trasladada aguas abajo como producto de la erosión hídrica en una cuenca, a esto se le conoce como material sólido real (Vs) que es un porcentaje de la erosión total de un punto en la cuenca hacia su área colectora.

El material sólido que deriva en un punto de la red hídrica de la cuenca (Vs) es una proporción de la erosión generada en toda la colectora de este punto. La cantidad de sedimentos que llega a este punto como acumulación de todo un año es a lo que se conoce como producción anual de sedimentos.

$$SDR = \frac{\textit{Producción de sedimentos cuantificados}}{\textit{Erosión bruta de la cuenca}}$$

Donde la producción se determina a partir de la sedimentación de los embalses o de un centro de supervisión de los sedimentos, y la erosión bruta se determina utilizando técnicas de estimación como la ecuación universal de pérdida de suelo. (Yali, 2018)

Existen muchas fórmulas teóricas de calcular el factor de entrega que dependen principalmente del área de la cuenca colectora, definiendo un porcentaje en relación a esta, de aquí se desprenden las siguientes fórmulas:

$$SDR = 0,3750 \cdot A^{-0,2382} \text{ (Boyce, 1972)}$$

$$SDR = 0,4720 \cdot A^{-0,125} \text{ (Vanoni, 1975)}$$

$$SDR = 0,5656 \cdot A^{-0,11} \text{ (USDA SCS, 1979)}$$

Donde:

$$A = \text{área de la cuneca en km}^2$$

Además este factor de entrega también puede determinarse considerando no solamente el área de la cuneca, si no tomando en cuenta la pendiente del cauce principal y la red de hidrográfica que compone la cuenca.

$$SDR = CES = 36. A^{-0,2} - \frac{2}{\log(P)} + \log(BR)$$

Donde:

CES = % del total de material movilizado en la cuenca que sale de la misma

A = superficie de la cuenca en km<sup>2</sup>

P = pendiente del curso principal expresada en tanto por uno

BR = coeficiente de bifurcación de la red hidrográfica. (Sánchez, Martínez, & Yanes, 2018)

### **2.3. MARCO LEGAL Y/O NORMATIVO**

El desarrollo del presente trabajo se fundamenta en la Ley N° 1333 y en las guías del Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) - Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR), la cuales se encuentran actualmente vigente en nuestro país.

#### **2.3.1. Ley del Medio Ambiente (Ley N° 1333)**

La Ley de Medio Ambiente que fue promulgada el 27 de Abril de 1992 contempla como uno de sus objetivos la protección y aprovechamiento de los recursos naturales y el medio ambiente.

Dada la importancia de los recursos naturales en general, en el capítulo 2 del recurso agua y el capítulo 4 del recurso suelo establece lo siguiente:

**Artículo 37.** Constituye prioridad nacional la planificación, protección y conservación de las aguas en todos sus estados y el manejo integral y control de las cuencas donde nacen o se encuentran las mismas.

**Artículo 38.** El Estado promoverá la planificación, uso y aprovechamiento integral de las aguas para beneficio de la comunidad nacional, con el propósito de asegurar su disponibilidad permanente; priorizando acciones a fin de garantizar agua de consumo para toda la población.

**Artículo 43.** El uso de los suelos para actividades agropecuarias forestales deberá efectuarse manteniendo su capacidad productiva, aplicándose técnicas de manejo que eviten la pérdida o degradación de los mismos, asegurando de esta manera su conservación y recuperación.

**Artículo 45.** Es deber del Estado normar y controlar la conservación y manejo adecuado de los suelos.

### 2.3.2. Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) - Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (VRHR)

La principal guía para elaboración de proyectos de riego que tiene como instrumento técnico y de uso obligatorio en nuestro país a disposición de profesionales e instituciones del sector desde el mes de Octubre del año 2018 son las “Guías para la elaboración de estudios de diseño técnico de pre-inversión para proyectos de riego menores, medianos y mayores” establecidas por Ministerio de Medio Ambiente y Agua - Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego.

## 2.4. SITUACIÓN ACTUAL DEL ARTE

Tabla 9  
*Situación actual del arte*

IDENTIFICACIÓN		OBJETIVO GENERAL	CATEGORIAS/ VARIABLES	INSTRUMENTOS RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN	RESULTADOS
Laqui Fernando	Calizaya, Ramiro, “Estimación de la erosión y transporte potencial de sedimentos hasta el eje de la futura represa Callazas en sub-cuenca del río Callazas en la región Tacna-Perú”, En: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Repositorio Académico UPC, Perú, 2019.	Estimar la tasa potencial de erosión hídrica y el volumen del transporte de sedimentos hasta el eje de la futura represa Callazas en la Sub-Cuenca del Río Callazas en Tacna – Perú	Tasa de erosión Cuenca hidrográfica  Erosión hídrica Transporte de sedimento	En el informe técnico “Asesoría para el estudio de sedimentos con fines de diseño de la represa Calientes Santa Cruz”  Trabajo de Campo: Visita en época de estiaje y época de lluvia a la zona de estudio	Propone realizar estudios más avanzados en la eficiencia de retención de sedimentos, que permita optimizar el diseño.
Iñiguez Andrea	Yugar, Carla, “Producción de sedimento y Pérdida de suelo mediante Modelo	Estimar la producción de sedimento y pérdida de suelo mediante el	Sedimentación Pérdida de suelo	Estaciones meteorológicas de ASAANA, Imágenes Satelitales Landsat TM de	Propone realizar medidas de control de la erosión (manejo de cabeceras y manejo de

Djorovic & Gavrilovic en la Cuenca Poopó del Departamento de Oruro”, En: DDigital – UMSS, Servicio de Publicación de Documentación Digital de la Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, 2013.	modelo de Djorovic & Gavrilovic en la cuenca Poopó del departamento de Oruro.	Erosión hídrica Erosividad de la lluvia Erodabilidad del suelo USLE Índice entrega sedimento	resolución espacial de 30 metros Utiliza precipitaciones medias de los últimos 20 años Modelo Digital de Elevaciones-resolución 5m/pixel	causes) con obras civiles. Establecer medidas que prevean tasas de colmatación superiores a las previstas en el modelo, calibrar y validar el modelo para establecer grado de fiabilidad.
Sánchez, Yolanda - Martínez, Miguel – Yanes, Mariano, “Cálculo del volumen de sedimentos erosionados en la cuenca vertiente del Jerte”, En: SGE, Sociedad Geológica de España, España, 2018.	Cálculo del volumen de sedimentos erosionados en el Valle del Jerte			
Zúñiga Huaco, Javier Eduardo, “Determinación de la pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca-Arequipa, aplicando USLE y técnicas Geoespaciales”, En: UNALM, Escuela de posgrado maestría en gestión integral de cuencas hidrográficas, Lima-Perú, 2017.	Estimación de la pérdida de suelos en la cuenca aportante del embalse Aguada Blanca, aplicando la Ecuación Universal de Pérdida del Suelos (USLE) y técnicas geoespaciales	Cobertura vegetal Erosión Sedimentación Coeficiente de los factores USLE	Recopilación de información existente de suelo, cartas geológicas. Trabajo de campo: evaluación de los diferentes tipos de cobertura vegetal, instalación de reglas milimetradas para medición de pérdida de suelo, extracción de muestras a través de calicatas.	Ejecutar un trabajo de precipitación, infiltración y escorrentía en la cabecera de la cuenca, Realizar batimetrías periódicas en los embalses para conocer la cantidad de sedimento por efecto de la erosión.

(Elaboración propia)

### III. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación es de tipo experimental y descriptivo.

Se llevó a cabo un diseño de investigación experimental, debido a que se tomó parte activa en el muestreo de datos en campo en diferentes puntos de la zona de estudio, los cuales fueron estudiados en laboratorio y a raíz de estos resultados se aplicó las diferentes metodologías.

Además se considera que es de tipo descriptivo porque se realizó una caracterización del tipo de cobertura vegetal, el tipo de suelo y por último el tipo de erosión que se tiene en el área de estudio.

#### 3.2. UNIVERSO DE TRABAJO Y MUESTRA

El presente estudio tiene como universo el embalse de la presa La Hondura y su cuenca de aporte que forman parte de la cuenca del río Pajchani, ubicada en el departamento de Tarija en la Provincia Méndez, donde se realizó la estimación del volumen de sedimento que tiene el embalse de la presa.

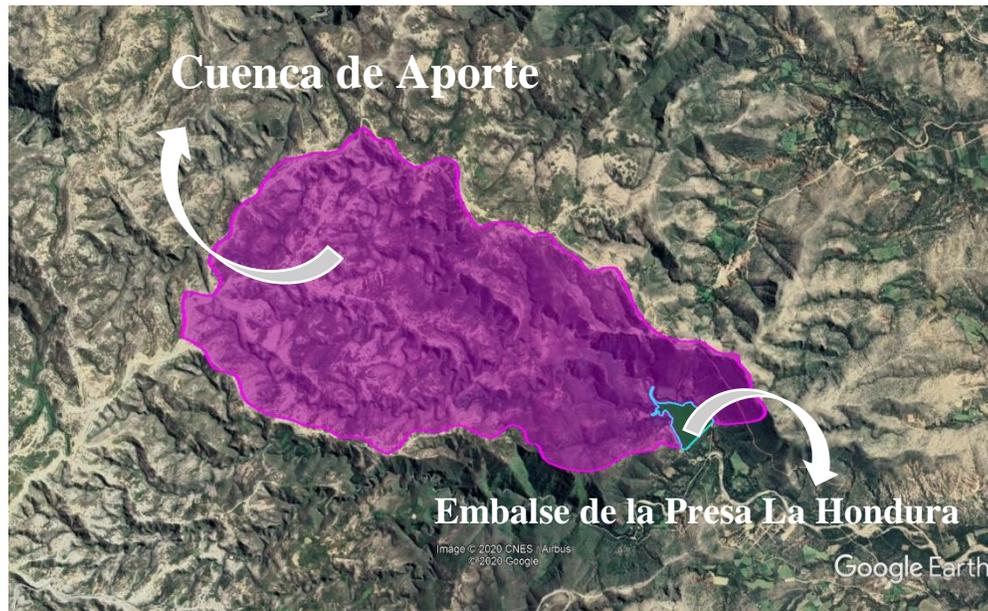


Figura 13. Universo de trabajo.  
(Elaboración propia en Google Earth)

### 3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 10

*Operacionalización de variables*

<b>Variables</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensión</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Variable independiente</b> Pérdida de suelo	Desprendimiento y transporte por los agentes de la erosión	Para su determinación se empleó el uso de dos modelos matemáticos en la estimación de la erosión	Erosión hídrica	-Precipitaciones altas -Contenido de materia orgánica del suelo -Pendientes fuertes -Cobertura vegetal. -Prácticas de conservación
<b>Variable dependiente</b> Volumen de sedimento	Material solido que se deposita en cualquier fondo, ya sea natural o artificial	Se realizó tomando en cuenta la pérdida de suelo en la cuenca de influencia	Volumen de sedimento en una presa	-Vida útil de la presa -Área de la cuenca.

(Elaboración propia)

### 3.4. INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

#### 3.4.1. Material de campo

- Mapa de la zona
- Cuaderno de trabajo para recopilar datos
- Gps
- Pico
- Pala

- Bolsas de plástico
- Cámara fotográfica
- Hojas para toma de datos
- Horno para secado de muestras de suelo
- Balanza analítica de precisión
- Crisoles
- Probeta
- Agua destilada
- Hidrómetro de bouyoucos.

#### **3.4.2. Material de gabinete**

- Computadora portátil
- Manual de ensayos y materiales de suelos según ABC
- Software ArcGis
- Software Google Earth

### **3.5. DESCRIPCIÓN DEL DESARROLLO DEL PROYECTO**

El desarrollo del proyecto está comprendido en tres fases como se describe a continuación:

#### **3.5.1. Fase de pre-campo**

La primera fase del estudio consistió en la recopilación de la información necesaria con el fin de conocer las características físicas de la zona de estudio. Se obtuvo información de datos técnicos de la presa que fue brindada por el PERTT, información histórica de la base de datos de precipitaciones y temperaturas del SENAMHI y además información de la red hidrográfica en formato (shp). También se descargó una imagen satelital y un modelo de elevación digital de terreno del área de estudio con el propósito de delimitar la cuenca y establecer los puntos de muestreo a realizar.

#### **3.5.2. Fase de campo**

Esta fase está comprendida por dos visitas que se realizaron en la zona de estudio:

- La primera visita se realizó con propósito de reconocimiento del área de estudio; donde se pudo explorar tanto el camino de acceso a la presa como el de la parte alta de la cuenca. Por otra parte, también se pudo verificar la topografía escarpada y la escasa vegetación con la que cuenta la zona.
- La segunda visita consistió en la toma de muestras de suelo de los diferentes puntos con el fin de realizar los análisis de textura y materia orgánica, también se realizó una clasificación del tipo de vegetación que existe en la zona.

### **3.5.3. Fase de gabinete**

En esta fase se procesó toda la información recopilada durante las fases de pre-campo y campo para obtener los factores que influyen en la aplicación de ambos modelos.

Posterior al cálculo de cada uno de los factores, se procedió a la determinación de los volúmenes de sedimento en el embalse de la presa aplicando los modelos USLE y Gavrilovic.

## **IV. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

El desarrollo del trabajo de investigación contempla una serie de etapas que se explican a continuación. Sin embargo, previo al trabajo de campo se realizó una revisión bibliográfica sobre las ecuaciones empleadas para los modelos USLE y Gavrilovic y sobre los diferentes métodos que se utilizan para la determinación de sus factores.

### **4.1. TRABAJO DE CAMPO**

Esta etapa está compuesta por los siguientes pasos: se inició con la delimitación de la cuenca utilizando un Modelo de Elevación Digital de Terreno (DEM) y el software ArcGis, posteriormente se hizo una visita de reconocimiento de la cuenca y la presa La Hondura; en la cual se observó características de la zona como pendientes pronunciadas, poca vegetación y terreno afectado por el proceso erosivo, etc. Por otra parte, esta visita ayudó a conocer los diferentes caminos de acceso a la zona para la elaboración de un plan de muestreo de suelo.

Para la elaboración del plan de muestreo de suelo se consultó la guía de Laboratorio de Agronomía (U.A.J.M.S.) y el Manual de Prácticas de Campo y de Laboratorio de Suelos (Regional Tolima), además de una imagen satelital. De esa manera se determinó que el muestreo sería en cuadrícula o grilla de 1 x 1 km; este tipo de muestreo permite que las muestras se distribuyan regularmente en todo el área de estudio y así extraer muestras representativas. Para este trabajo se identificaron nueve puntos para la extracción de suelo como se observa en la Figura 14.

La toma de la muestra consistió en una extracción de muestra simple, este tipo de extracción es recomendado cuando se requiere realizar análisis específicos de laboratorio, en función a esto se realizó una pequeña excavación con el uso de un pico y una pala de (20 x 20 cm) de lado y a una profundidad de (10 a 15 cm) como se observa en la Figura 15, el recojo de muestra por cada punto fue de aproximadamente de 5 kg. Posteriormente éstas fueron llevadas al Laboratorio de Suelo (U.A.J.M.S.) para su respectivo análisis de característica de textura y materia orgánica.

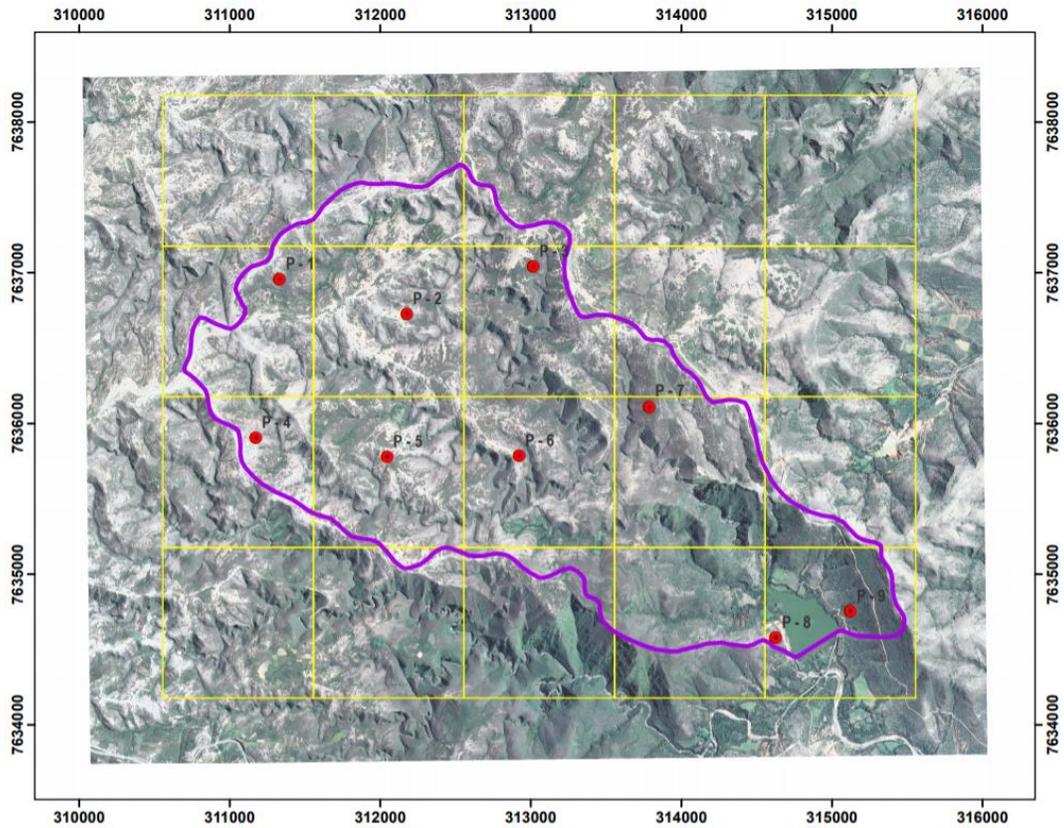


Figura 14. Ubicación de puntos de muestra de suelo.  
(Elaboración propia)

Tabla 11  
*Coordenadas de los puntos de muestreo de suelo*

PUNTOS	COORDENADAS UTM	
	X	Y
P-1	311330,63	7636958,27
P-2	312176,17	7636726,93
P-3	313016,72	7637039,72
P-4	311172,74	7635905,37
P-5	312046,77	7635777,12
P-6	312922,19	7635785,75
P-7	313786,09	7636112,52
P-8	314626,91	7634577,58
P-9	315122,29	7634754,92

(Elaboración propia)



*Figura 15.* Extracción de muestra de suelo.  
(Elaboración propia)

El trabajo en laboratorio que se realizó después de la extracción de muestras de suelo fue en la determinación del contenido de materia orgánica (M.O.) donde se empleó el método de pérdida por ignición o calcinación, cuyo procedimiento está sustentado en el Manual de suelos y materiales de la ABC y la guía de Laboratorio de Suelo de Agronomía (U.A.J.M.S.).

A continuación, se puede apreciar un resumen fotográfico del proceso de ignición o calcinación de la materia orgánica presente en el suelo.



*Figura 16.* Muestra de suelo antes del proceso de ignición o calcinación de M.O.  
(Elaboración propia)



*Figura 17.* Suelo en el horno de ignición o calcinación.  
(Elaboración propia)



*Figura 18.* Muestra de suelo después del proceso de ignición o calcinación de M.O. (Elaboración propia)

Posterior a la determinación del contenido de M.O. se realizó la determinación de la textura en cada una de las muestras, el procedimiento que se optó para la clasificación de la textura es a través del método de hidrómetro de Bouyoucos, el cual se encuentra en la guía de Laboratorio de Suelo de Agronomía (U.A.J.M.S.). Con este ensayo se determinó el (% arena), (% limo) y (% arcilla) existente en cada una de las muestras, cuyo dato sirvió para la aplicación del triángulo de textura del Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), que además clasifica los suelos en cuatro grupos hidrológicos según el Soil Conservation Service (SCS) (A, B, C, D).



*Figura 19.* Determinación del (%) arena, limo y arcilla.  
(Elaboración propia)



*Figura 20.* Proceso de decantación del material.  
(Elaboración propia)

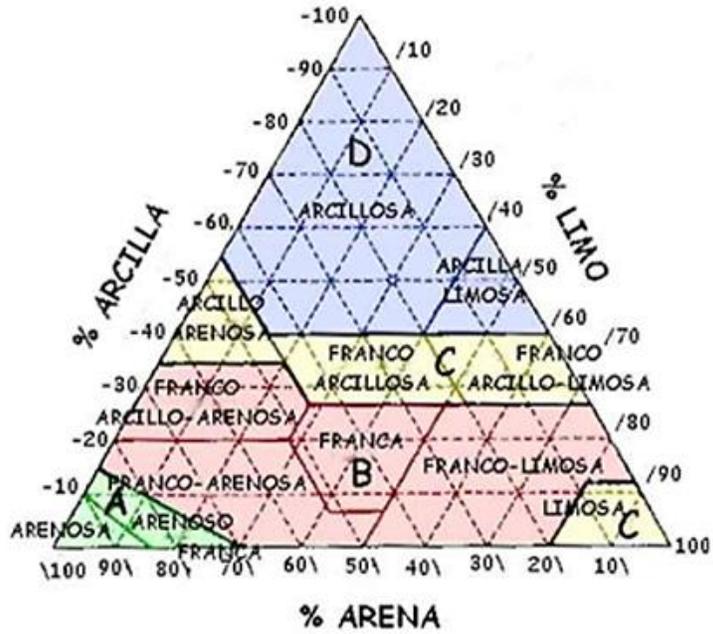


Figura 21. Triángulo de textura de suelo.  
(Soil Conservation Service)

Por otra parte, el trabajo de campo realizado fue importante para la evaluación de los diferentes tipos de cobertura vegetal existente en el área de estudio y aledañas a los puntos de muestreo de suelo. Esta evaluación sirvió para corroborar lo que se interpretó preliminarmente mediante una imagen satelital que se descargó de la plataforma de SAS Planet.



Figura 22. Vegetación herbácea.  
(Elaboración propia)



*Figura 23.* Matorral ralo.  
(Elaboración propia)



*Figura 24.* Tierra erosionada con escasa vegetación.  
(Elaboración propia)

#### **4.2. TRABAJO DE GABINETE**

Esta etapa consistió en el análisis y proceso de la información recolectada y obtenida en campo:

#### 4.2.1. Caracterización de la cuenca

Se descargó un Modelo de Elevación de Terreno ASTER con una resolución espacial de 30 x 30 m que se utilizó para determinar algunos parámetros geomorfométricos de la cuenca en estudio como el área, perímetro, pendiente media, altitud media, longitud del río principal y la pendiente del río principal, utilizando como ayuda del proceso el software ArcGis.

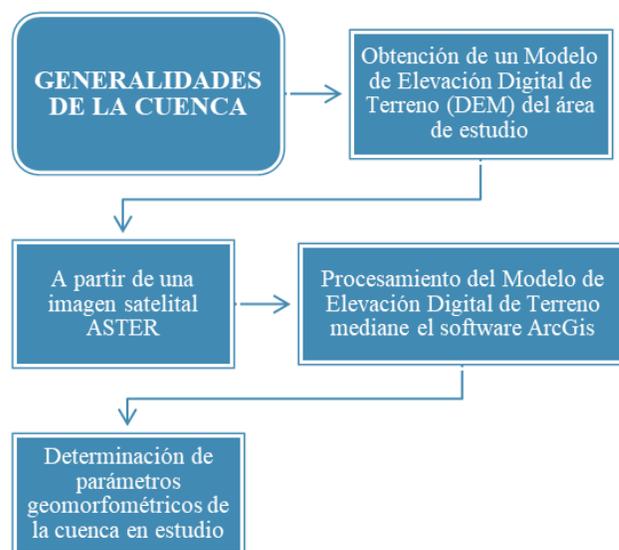


Figura 25. Proceso para la determinación de parámetros geomorfométricos de la cuenca.  
(Elaboración propia)

#### 4.2.2. Estimación de los factores del método USLE

##### a) Factor de erosividad pluvial (R)

Se inició con la identificación y selección de estaciones cercanas al área de estudio, se obtuvo información del SENAMHI de precipitación de cuatro estaciones las cuales fueron sometidas al proceso de análisis de consistencia y homogeneidad, también fueron sujetas al análisis de prueba de bondad de ajuste de Smirnov-Kolmogórov para la Distribución Gumbell.

Posterior a la verificación de la consistencia, homogeneidad y bondad de ajuste se realizó la zonificación y sub-zonificación pluviométrica, donde se seleccionó la estación de

Tucumillas para la determinación del factor (R) ya que es la más representativa de la subzona pluviométrica, además de contar con la mayor cantidad de años de registro.

El factor R se ha determinado a través del método tradicional que propone en el punto 2.2.12.1., pero al no disponer información de registros de pluviómetros de lluvia se acude a los registros de lluvias máximas en 24 horas y los registros de lluvias diarias totales representativas de cada año ( $P > 12,7$  mm).

Con estos datos se ha generado el hietograma para calcular la intensidad máxima requerida, mismo que se genera a través de la Metodología de Bell y Bloque Alternos.

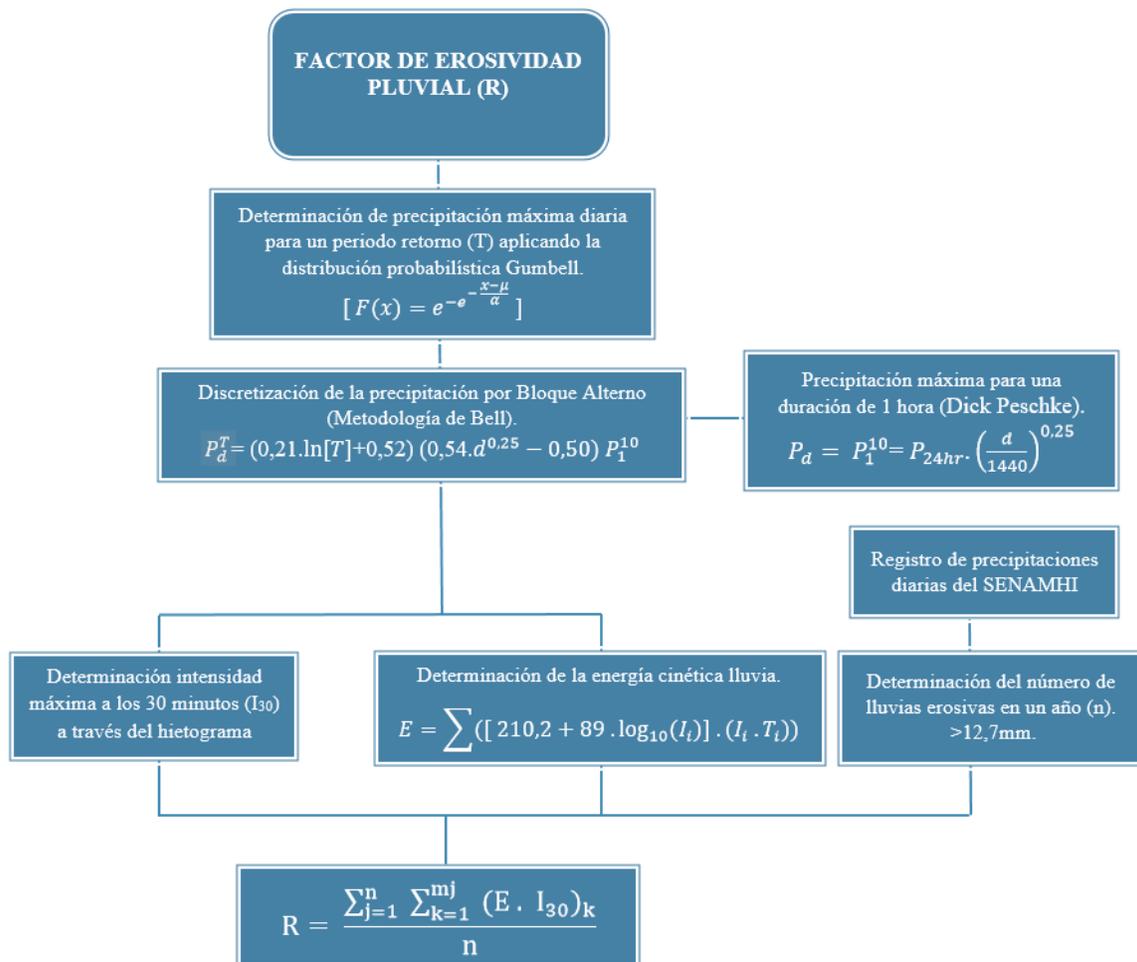


Figura 26. Esquema metodológico para la obtención del factor R. (Elaboración propia)

## b) Factor de erodabilidad del suelo (K)

El proceso que se siguió en la obtención del factor K consistió inicialmente en un trabajo de campo para la toma de muestras de suelo, que de acuerdo a la bibliografía revisada, para este tipo de investigación se debe realizar una extracción de muestra simple. Este tipo de muestreo es recomendado cuando se requiere realizar análisis específicos de laboratorio, como en este caso que se realizó análisis de la materia orgánica y textura de suelo.

Posteriormente de haber realizado el procedimiento explicado en el punto 4.1, se determinó la erodabilidad del suelo mediante la aplicación de dos metodologías; ambos presentaron resultados muy similares. La primera metodología consistió en la aplicación de la Tabla 2 la cual requiere para su obtención del factor (K) la textura y (%) de materia orgánica de cada muestra extraída y la segunda se determinó a través de la aplicación de la ecuación Mannaerts donde se considera como datos de entrada el (%) arena, limo y arcilla presentes en las muestras de suelo.

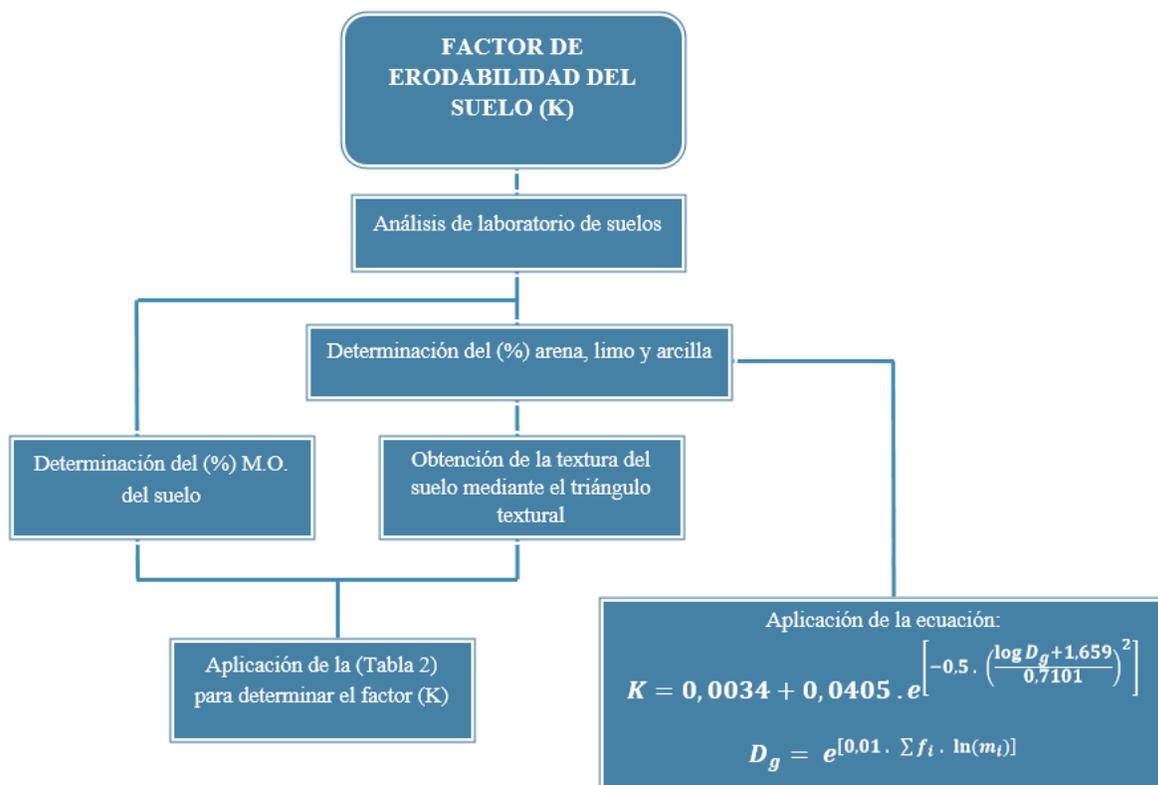


Figura 27. Esquema metodológico para la obtención del factor K. (Elaboración propia)

### c) Factor topográfico (LS)

El cálculo de este factor se realizó a través de tres metodologías: Método por tablas, Método de Horton y Método de Williams y Berndt. Para la aplicación de estos métodos se partió de un Modelo de Elevación Digital de Terreno DEM (ASTER) con una resolución espacial de 30 x 30 m que fue procesado en el software ArcGis, donde se determinó la pendiente media de la cuenca, la red de drenaje y curvas de nivel de acuerdo a las exigencias de las metodologías.

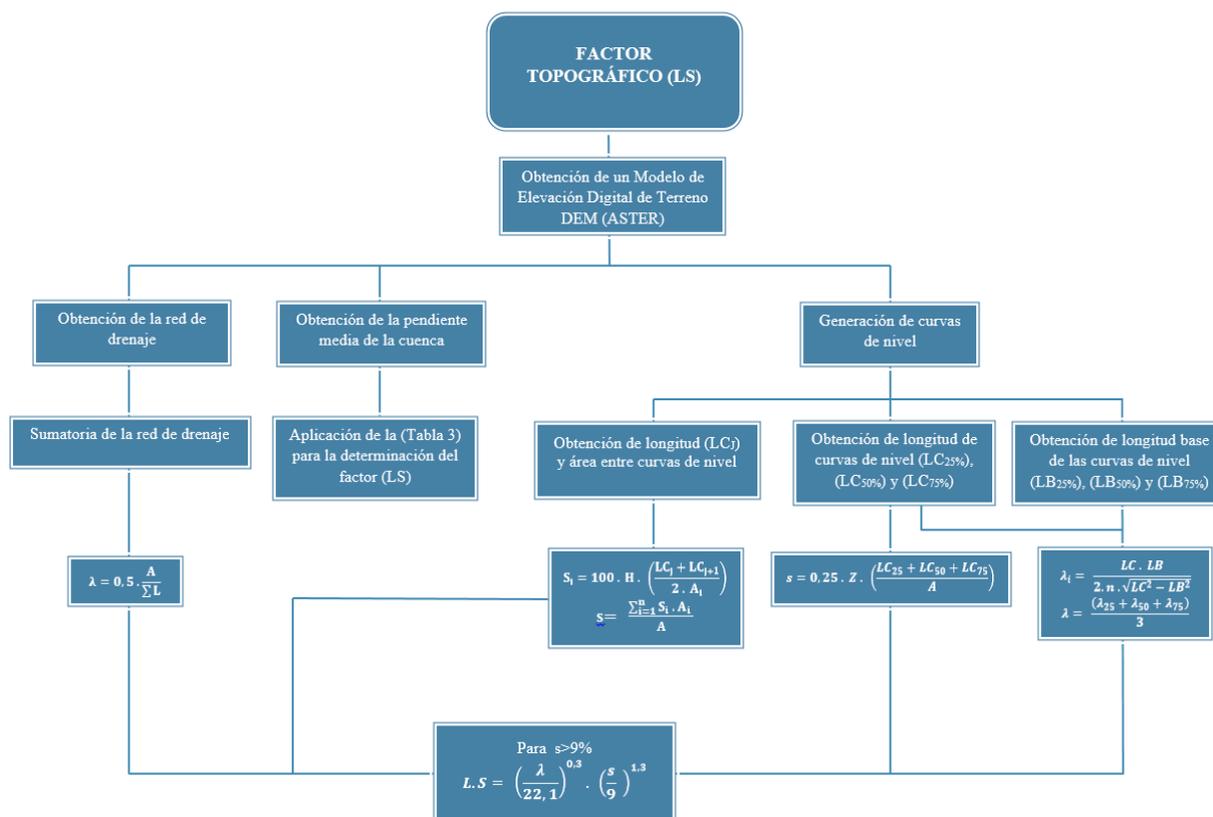


Figura 28. Esquema metodológico para la obtención del factor LS. (Elaboración propia)

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

El factor de cobertura ha sido determinado a través de la ayuda de una imagen satelital donde se realizó una clasificación de la cobertura vegetal de la zona de estudio, la misma que fue verificada con el trabajo de campo. En función a esa clasificación se asignó los valores del factor (C) mediante la utilización de la Tabla 4.

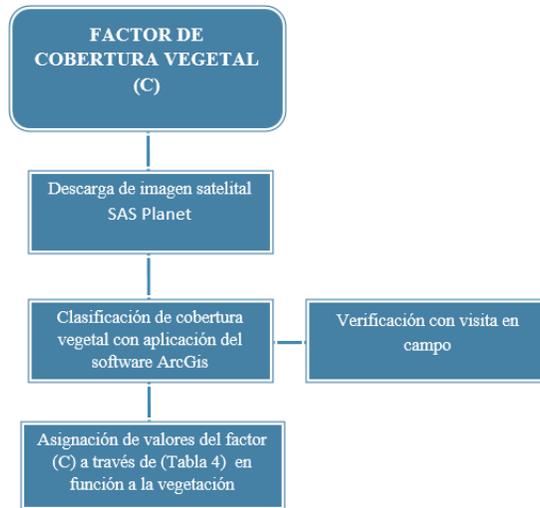


Figura 29. Esquema metodológico para obtener el factor C. (Elaboración propia)

**e) Factor de prácticas de conservación (P)**

En caso de este factor se asignó la unidad como valor en toda la cuenca, ya que no se observó prácticas de conservación de suelos.

**f) Estimación de pérdida anual del suelo (A)**

La estimación de la pérdida de suelo media anual se determinó a través de la multiplicación de cada uno de los factores calculados anteriormente.

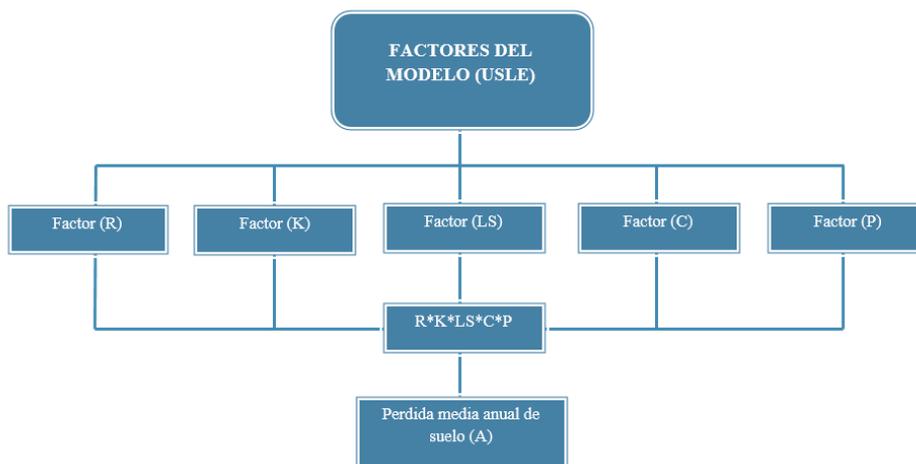


Figura 30. Esquema metodológico para obtener la pérdida media anual de suelo A. (Elaboración propia)

#### 4.2.3. Estimación de los coeficientes del método Gavrilovic

Los coeficientes de Gavrilovic son estimados de acuerdo a los procedimientos que se muestran en los incisos más adelante.

##### a) Coeficiente de temperatura (T)

El coeficiente de temperatura se determinó siguiendo el flujograma que se muestra a continuación.

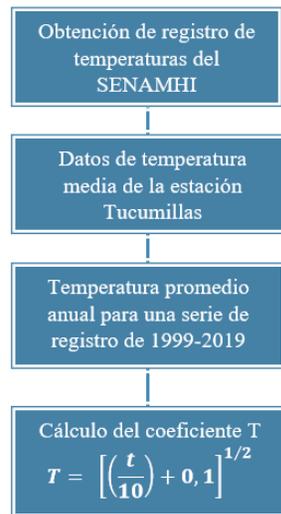


Figura 31. Esquema metodológico para el coeficiente T. (Elaboración propia)

##### b) Precipitación media anual (h)

La determinación de la precipitación media anual se realizó con los datos de la información meteorológica de precipitación de la estación Tucumillas, la cual cuenta con una serie de registro 1977-2019.

##### c) Coeficiente de uso del suelo (X)

La determinación del coeficiente de uso de suelo se realizó a través de la interpretación de una imagen satelital de la zona de estudio, misma que fue verificada con el recorrido de campo. La asignación de este coeficiente se realizó con el uso de la Tabla 6.

#### d) Coeficiente de resistencia del suelo a la erosión (Y)

La asignación del coeficiente de resistencia del suelo a la erosión se realizó con la aplicación de la Tabla 7, donde preliminarmente se efectuó una inspección de campo en diferentes puntos para conocer el tipo de suelo presente en la cuenca en estudio, la cual fue corroborada con la clasificación propuesta en el estudio de balance hídrico de la cuenca Guadalquivir del año 2016.

#### e) Coeficiente de evaluación de los procesos erosivos observados ( $\phi$ )

El coeficiente de proceso erosivo fue evaluado a través del uso de una imagen satelital y la inspección visual que se ha realizado en campo en diferentes sitios de la cuenca, esto sirvió como base fundamental para la asignación del coeficiente a través de empleo de la tabla propia del modelo Tabla 8.

#### f) Coeficiente de erosión (Z)

El coeficiente de erosión se determinó siguiendo el proceso del flujograma que se muestra a continuación.

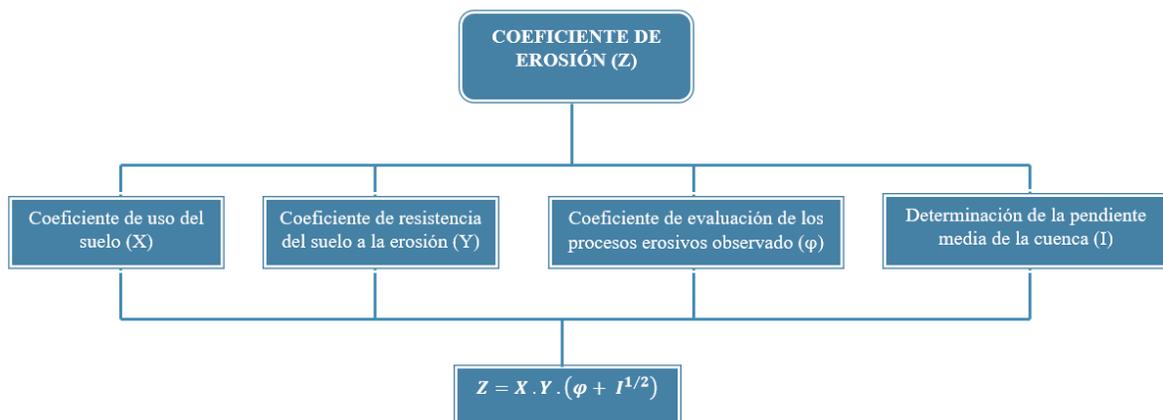


Figura 32. Esquema metodológico para la obtención del coeficiente Z. (Elaboración propia)

### g) Volumen de erosión (W)

El volumen promedio anual erosionado se determina siguiendo la multiplicación de los coeficientes anteriormente obtenidos mediante la aplicación de la fórmula que presenta el modelo Gavrilovic.

### h) Coeficiente de retención (R)

El coeficiente de retención de este método se halló en función de los parámetros geomorfométricos de la cuenca y de los afluentes que la componen, mismos que fueron obtenidos a través de la utilización del software ArcGis.

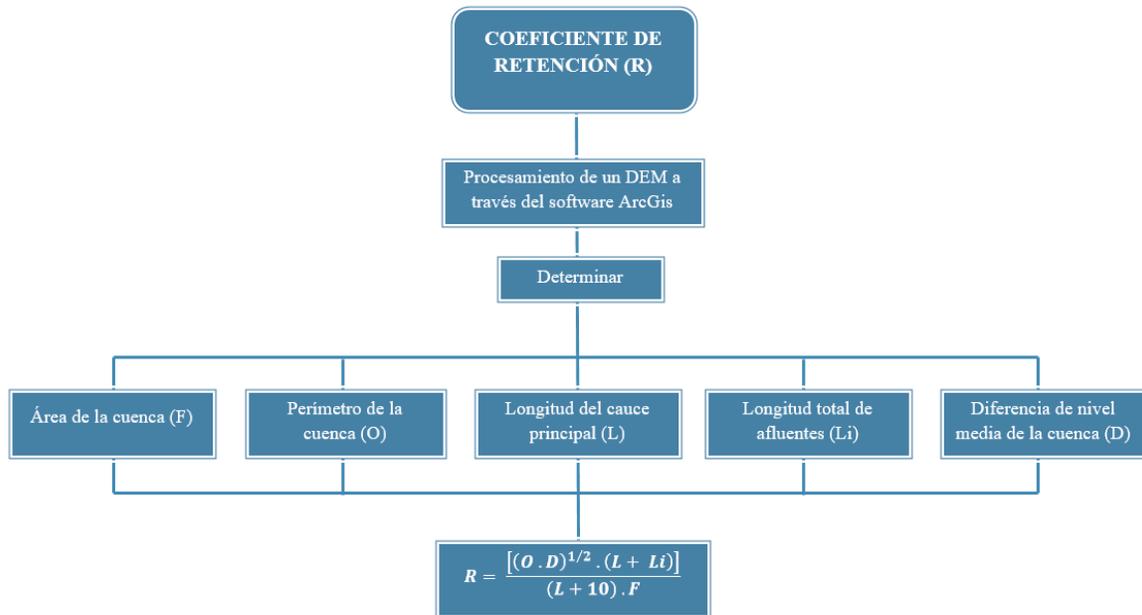


Figura 33. Esquema metodológico para la determinación del coeficiente R. (Elaboración propia)

### i) Estimación de la descarga media anual de suelo erosionado (G)

El volumen de sedimento ha sido obtenido a partir del producto de la producción media anual de sedimento por erosión superficial (W) y del coeficiente de retención de sedimentos (R) como se detalla en esta metodología.

#### 4.2.4. Estimación de volúmenes de sedimento

La estimación de los volúmenes de sedimento que ingresan en el embalse de la presa La Honduras se realizó considerando diferentes periodos de vida útil de la presa 10, 15, 20, 25 y 30 años, con el propósito de conocer como estaría variando el incremento del volumen de sedimento en función de los años.

Para esta determinación se adoptó el peso específico del sedimento de 1,50 ton/m<sup>3</sup>, mismo que ha sido utilizado en el estudio de Análisis de Funcionalidad y Riesgo de la Presa Pajchani.

Se debe tomar en cuenta que el método USLE permite calcular fundamentalmente la cantidad de suelo erosionado, pero no da información en cuanto a su posible tránsito dentro de la cuenca, donde es susceptible de ser depositado, ya que no todo el sedimento producido por la erosión superficial ingresa a la red hidrográfica y es transportado por los cursos de agua. (Hidalgo, 2018).

Debido a esta situación, el procedimiento debe asumir que el aporte de sedimentos al embalse es solo una fracción del total de sedimentos erosionados en el área de aporte. Por esta razón se realizó la multiplicación del volumen erosionado en la cuenca y el factor de entrega de sedimento.

Para determinar el factor de entrega de sedimento, se ha aplicado la siguiente ecuación. (Avendaño et al., 1994), citado por (Sánchez, Martínez, & Yanes, 2018).

$$CES = 36. A^{-0,2} - \frac{2}{\log(P)} + \log(BR)$$

Donde:

CES = % del total de material movilizado en la cuenca que sale de la misma

A = superficie de la cuenca en km<sup>2</sup>

P = pendiente del curso principal expresada en tanto por uno

BR = coeficiente de bifurcación de la red hidrográfica.

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. ASPECTOS GENERALES DE LA CUENCA

En este punto se muestra algunos de los parámetros geomorfométricos de la cuenca que son requeridos para la aplicación de los modelos.

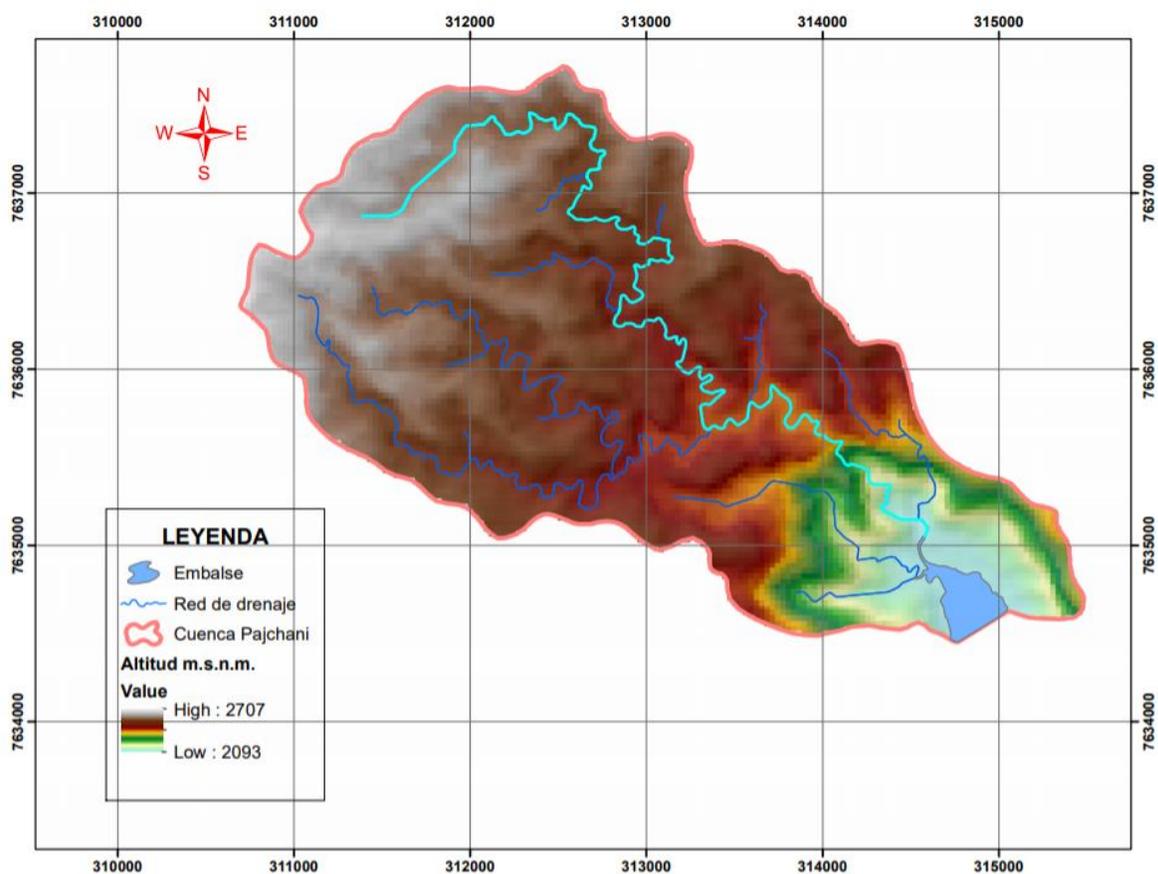


Figura 34. Mapa de la cuenca Pajchani.  
(Elaboración propia)

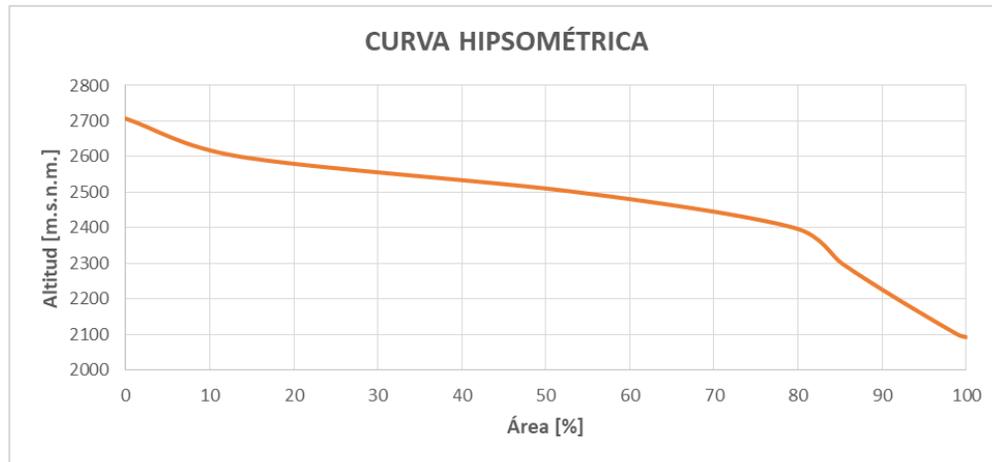


Figura 35. Curva hipsométrica.  
(Elaboración propia)

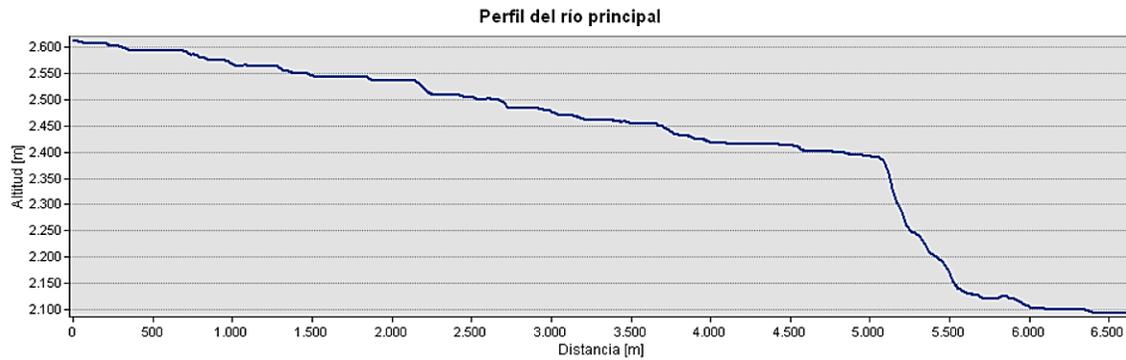


Figura 36. Perfil del río principal.  
(Elaboración propia)

Tabla 12  
*Parámetros geomorfológicos cuenca Pajchani*

Descripción	Valor	Unidad
Área cuenca	8,07	[Km <sup>2</sup> ]
Perímetro cuenca	13,66	[Km]
Pendiente media	32,11	[%]
Cota máxima	2707,00	[m.s.n.m.]
Cota mínima	2093,00	[m.s.n.m.]
Índice de compacidad	1,34	[adimensional]
Altitud media	2510,00	[m.s.n.m.]
Coefficiente de masividad	311,03	[m/Km <sup>2</sup> ]
Longitud río principal	6654,19	[m]

Pendiente río principal	4,34	[%]
Densidad de drenaje	2,37	[Km/Km <sup>2</sup> ]
Coefficiente de torrencialidad	1,86	[ríos/Km <sup>2</sup> ]
Tiempo de concentración	58,80	[min]

(Elaboración propia)

Los parámetros obtenidos que se muestran en la Tabla 12, ayudan a realizar una descripción de las características físicas de la cuenca en estudio. Según el resultado de índice de compacidad la cuenca en estudio tiene una forma alargada lo que significa que la susceptibilidad de concentrar volúmenes de escurrimiento es considerado bajo. En cuanto a la densidad de drenaje que relaciona la longitud total de los cauces de la cuenca y la superficie de la misma es relativamente moderada, este valor es un indicador de la respuesta de la cuenca ante una tormenta.

Por otro lado el coeficiente de masividad es un parámetro que nos sirve para clasificar si una cuenca es de montaña o llana, en este caso en función al resultado obtenido se clasifica a la cuenca es estudio como moderadamente montañosa. Esta clasificación concuerda con la zona de estudio ya que según la visita realizada se evidenció que presenta pocas zonas con un relieve pronunciado en comparación con otras zonas que presentan ciertas adulaciones con pendientes moderadas.

El tiempo de concentración es un indicativo de la máxima concentración de agua en el cauce, según la clasificación de Fuentes (2004). El valor que muestra la Tabla 12, nos dice que el tiempo de concentración es moderado no produciendo así concentraciones elevadas, esto se puede atribuir a la pendiente del cauce principal; según el perfil y resultado de la pendiente se observa que el recorrido del cauce principal presenta una pendiente suave.

En caso del coeficiente de torrencialidad el resultado obtenido tiene relación con los parámetros anteriormente calculados como la forma de la cuenca, el tiempo de concentración y pendiente del cauce principal, arrojando un resultado que muestra que la cuenca tiene características no torrenciales.

## 5.2. DATOS TÉCNICOS DE LA PRESA LA HONDURA

La presa La Hondura inicio el proceso de construcción a partir del año 2006 por el PERTT (Programa Ejecutivo de Rehabilitación de Tierras de Tarija) y fue terminada a finales del año 2008 por administración directa del PERTT con la única finalidad para uso de riego. La presa está construida sin obra de toma y sin desagüe de fondo.

Tabla 13  
*Datos técnicos Presa La Hondura*

<b>Descripción</b>	<b>Datos</b>
Nombre	Presa La Hondura
Tipo de presa	Presa de Material Homogéneo con Núcleo Central
Material de construcción	Material granular en los espaldones, con núcleo de material arcilloso
Cota de coronamiento de la presa	2106,90 [m.s.n.m.]
Longitud de coronamiento	356 [m]
Ancho de coronamiento	4,60 [m]
Altura máxima desde el nivel de fundación+	25,70 [m]
Talud aguas arriba	1 H : 3,5 V
Talud aguas abajo	1 H : 3 V
Uso del embalse	Riego
Volumen total de almacenamiento	1187261,60 [m <sup>3</sup> ]
Capacidad útil del embalse	1151643,80 [m <sup>3</sup> ]
Nivel de aguas normales (NAN)	2106,30 [m.s.n.m.]
Nivel mínimo de embalse	2088,00 [m.s.n.m.]
Nivel de aguas muertas	2088,00 [m.s.n.m.]
Aporte medio anual de la cuenca	2804100 [m <sup>3</sup> /s]

(Programa Ejecutivo de Rehabilitación de Tierras de Tarija - PERTT)

### 5.3. PRECIPITACIONES

#### a) Análisis de consistencia

Para el análisis de consistencia se tomó en cuenta la información de cuatro estaciones meteorológicas que se hallan cerca del área de estudio, además se utilizó la estación se cuenta del Aeropuerto como estación patrón para el análisis de consistencia. Ver Tabla 14.

Tabla 14

*Estaciones meteorológicas*

N°	Estación	Ubicación Política		Ubicación Geográfica		Altitud (m.s.n.m.)	Estado
		Dpto.	Provincia	UTM			
				Este	Norte		
1	Trancas	Tarija	Méndez	311649,17	7642673,58	2198	Funciona
2	Canasmoro	Tarija	Méndez	318531,07	7638106,95	2080	No funciona
3	Sella Qdas.	Tarija	Méndez	325720,40	7634154,92	2145	Funciona
4	Tucumillas	Tarija	Méndez	310261,59	7625708,99	2557	Funciona
5	Aeropuerto	Tarija	Cercado	322831,23	7616377,7	1849	Funciona

(Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI)

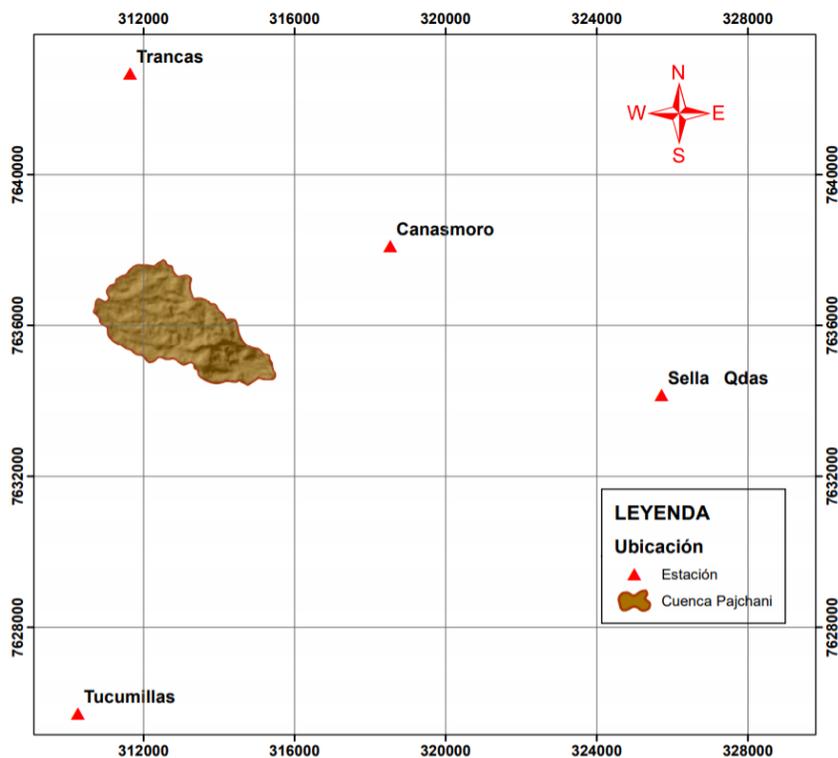


Figura 37. Mapa de ubicación de estaciones.  
(Elaboración propia)

Los registros de las estaciones pluviométricas consideradas se adjuntan en el Anexo 1.

La verificación del análisis de consistencia fue evaluada mediante el método de la curva doble masa como se muestra a continuación:

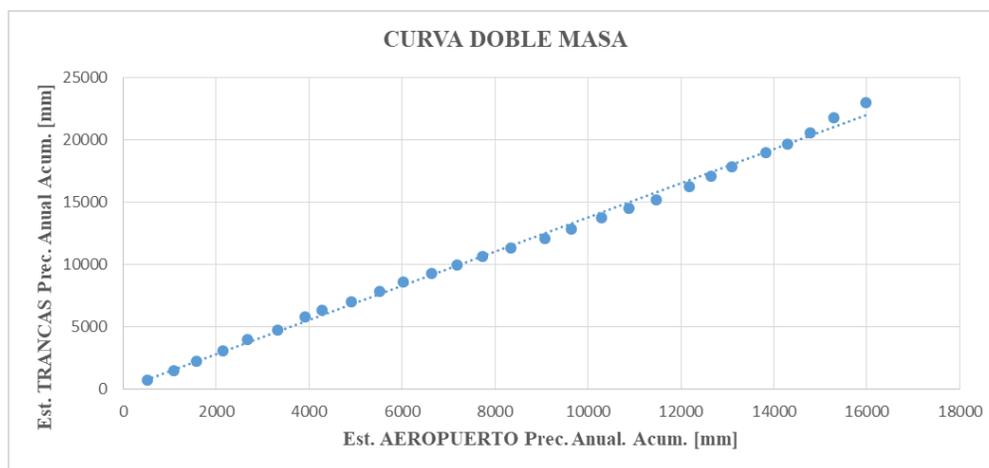


Figura 38. Análisis de curva doble masa estación (Aeropuerto-Trancas).  
(Elaboración propia)

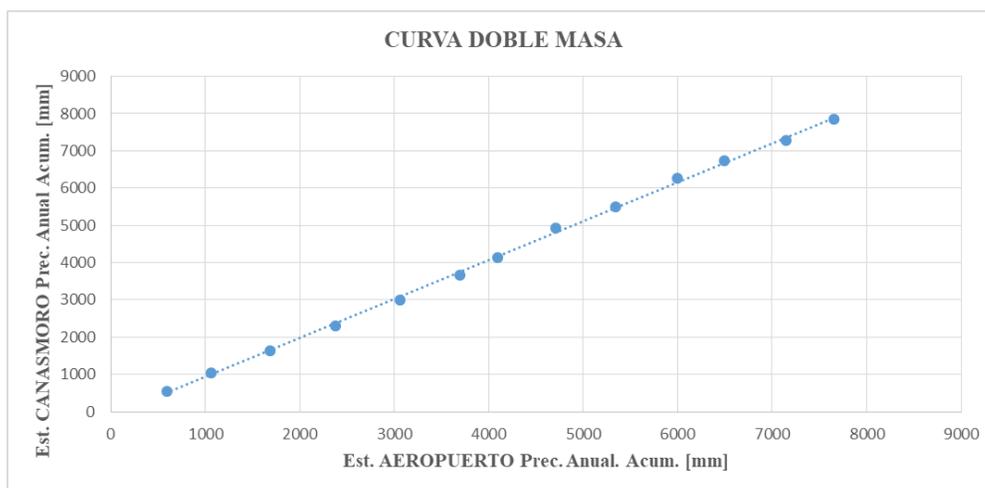


Figura 39. Análisis curva doble masa estación (Aeropuerto-Canasmoro).  
(Elaboración propia)

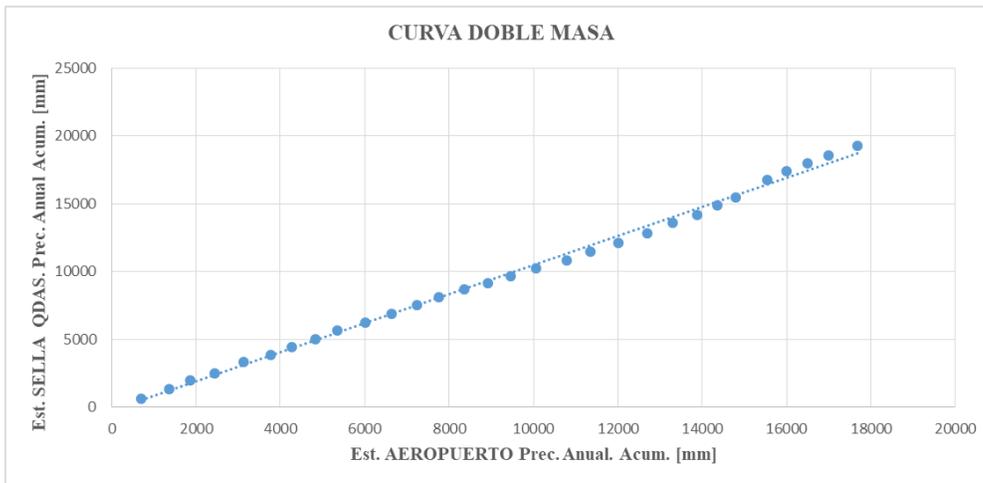


Figura 40. Análisis curva doble masa estación (Aeropuerto-Sella Qdas.).  
(Elaboración propia)

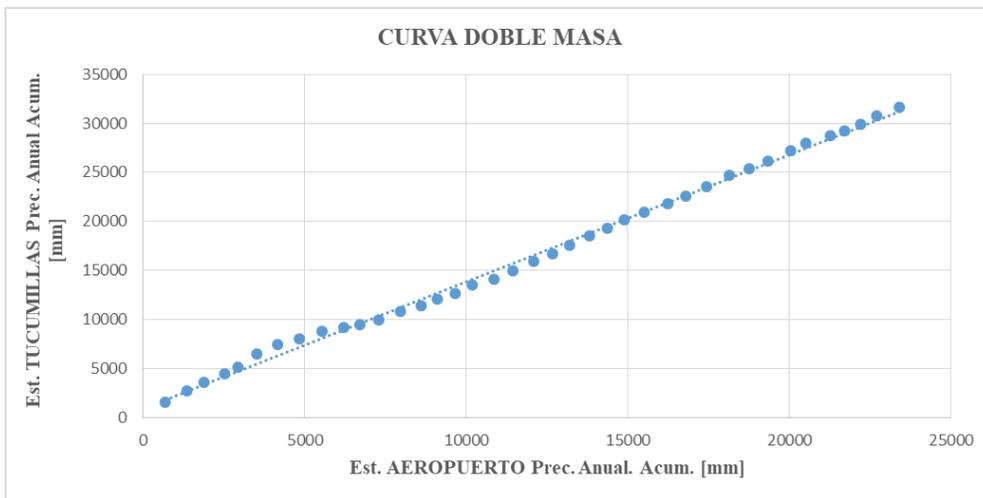


Figura 41. Análisis curva doble masa estación (Aeropuerto-Tucumillas).  
(Elaboración propia)

Tabla 15

*Resumen del análisis de consistencia*

<b>Estación</b>	<b>r</b>	<b>Resultado</b>
Trancas	0,998	<b>Consistente</b>
Canasmoro	0,999	<b>Consistente</b>
Sella Qdas.	0,998	<b>Consistente</b>
Tucumillas	0,998	<b>Consistente</b>

(Elaboración propia)

El respectivo proceso de cálculo de las gráficas se encuentra desarrollado en Anexo 2.

De acuerdo a las gráficas y al coeficiente de correlación obtenida para las estaciones empleadas, se puede concluir que las cuatro estaciones consideradas son consistentes.

### b) Análisis de homogeneidad

Posterior al análisis y verificación de la consistencia, las estaciones fueron sujetas a un análisis de homogeneidad de los registros máximos diarios por el método Test Mann-Kendall.

El desarrollo del análisis de homogeneidad se encuentra detallado en el Anexo 3.

Tabla 16  
*Resumen de homogeneidad Test Mann-Kendall*

Símbolo	Estación			
	Trancas	Canasmoro	Sella Qdas.	Tucumillas
n	28	13	31	40
I	141	30	206	320
T	236	44	257	442
S	95	14	51	122
V	1,86	0,79	0,85	1,41
$\alpha$	0,05	0,05	0,05	0,05
Vcrit	1,64	1,64	1,64	1,64
$V < V_{crit}$	Hipótesis nula (estación homogénea)			
$V > V_{crit}$	Hipótesis alternativa (estación no homogénea)			
Serie	<b>No homogénea</b>	<b>Homogénea</b>	<b>Homogénea</b>	<b>Homogénea</b>

(Elaboración propia)

De acuerdo al análisis de homogeneidad realizado en las cuatro estaciones, se puede concluir que los valores son satisfactorios para el nivel de significancia aplicado, dando como resultados que las estaciones empleadas son homogéneas.

### c) Distribución de probabilidades

La distribución de probabilidad que se utilizó es la distribución de Gumbell o de valores extremos tipo I, debido a que es la más adecuada para el análisis de valores máximos. Posteriormente esta fue sujeta al análisis de prueba de bondad de ajuste Smirnov-Kolmogórov.

Tabla 17  
*Resultados del análisis de ajuste*

<b>Estación</b>	<b><math>\Delta</math></b>	<b><math>\Delta_0</math></b>	<b>Ajuste</b>
Trancas	0,0859	0,2520	Se ajusta
Canasmoro	0,7626	0,3610	No se ajusta
Sella Qdas.	0,1439	0,2380	Se ajusta
Tucumillas	0,0892	0,2150	Se ajusta

(Elaboración propia)

En el Anexo 4 se detalla el procedimiento de la prueba de bondad de ajuste.

### d) Zonificación y sub-zonificación pluviométrica

El análisis de la zonificación y sub-zonificación es realizado para identificar lluvias que presenten de similares características.

#### ▪ Zonificación pluviométrica

Según el análisis de la gráfica se observa que existe más de una zona pluviométrica, ver Figura 42, la estación de Tucumillas que corresponde a la zona A y las estaciones de Trancas, Canasmoro y Sella Qdas. correspondiente a la zona B.

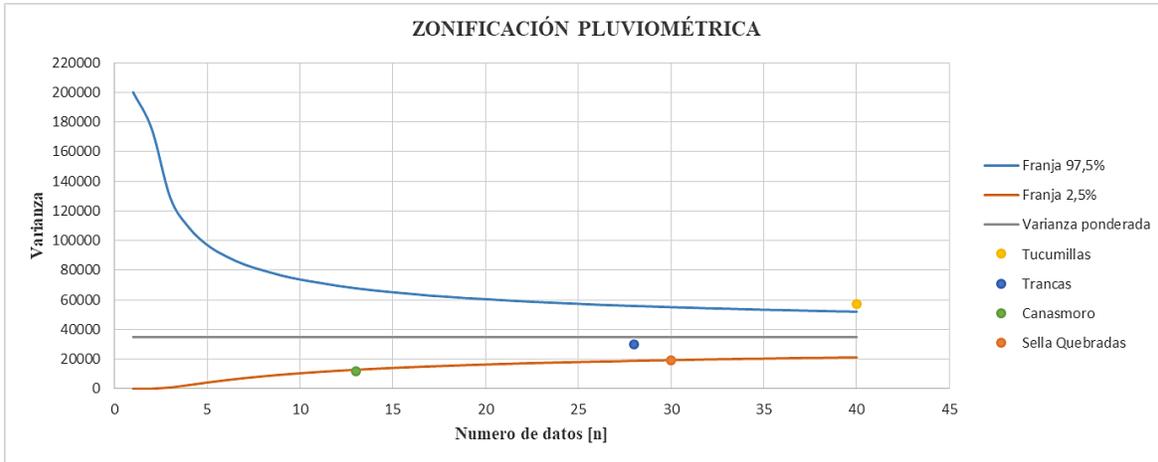


Figura 42. Zonificación pluviométrica.  
(Elaboración propia)

▪ **Sub-zonificación pluviométrica**

De acuerdo a los cálculos se observa que existe más de una sub-zona pluviométrica, ver Figura 43, por lo cual fueron agrupadas en dos sub-zonas según los valores más aproximados de su media. Consecutivamente se realizó la verificación de la existencia de estas sub-zonas que de acuerdo a resultados se corroboró que las estaciones de Trancas y Tucumillas pertenecen a la sub-zona I, ver Figura 44 y las estaciones de Canasmoro y Sella Qdas., corresponden a la sub-zona II, ver Figura 45.

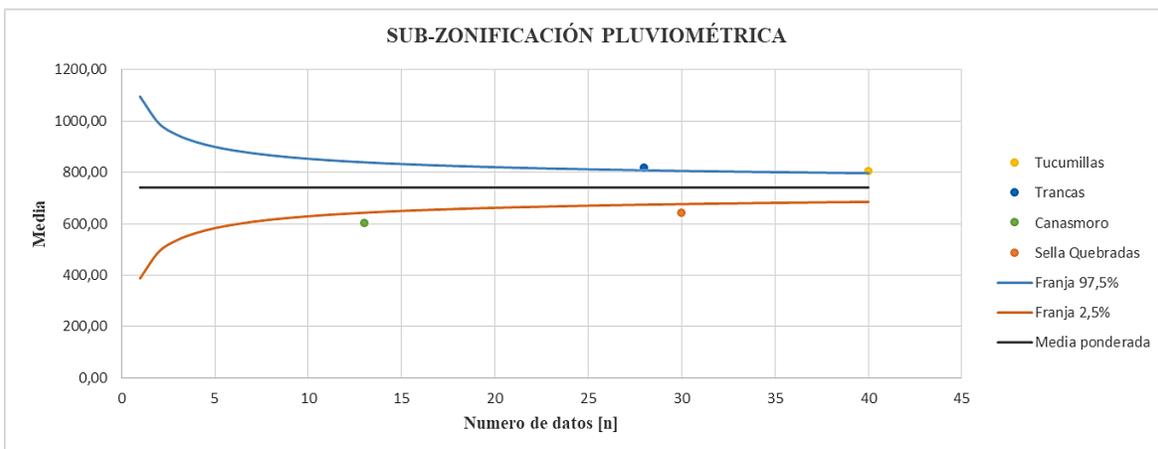


Figura 43. Sub-zonificación pluviométrica.  
(Elaboración propia)

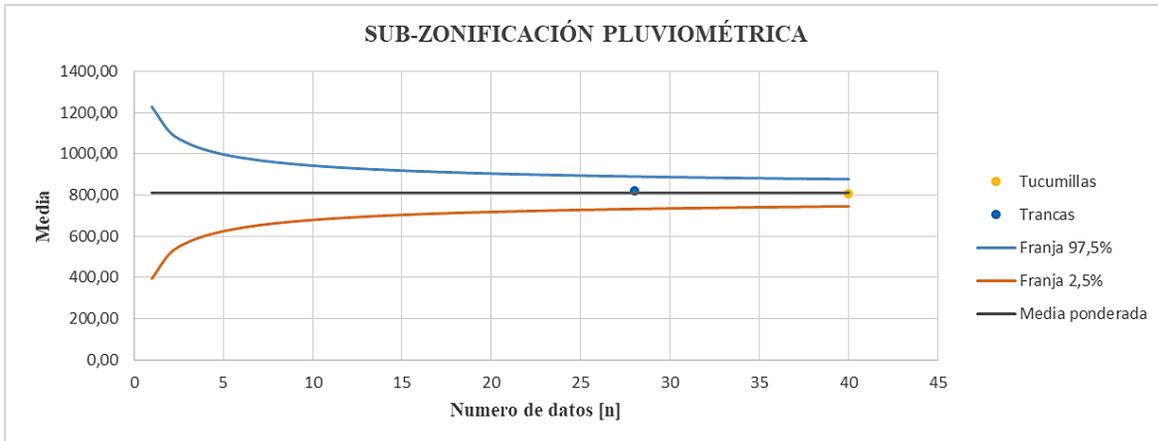


Figura 44. Sub-zonificación I.  
(Elaboración propia)

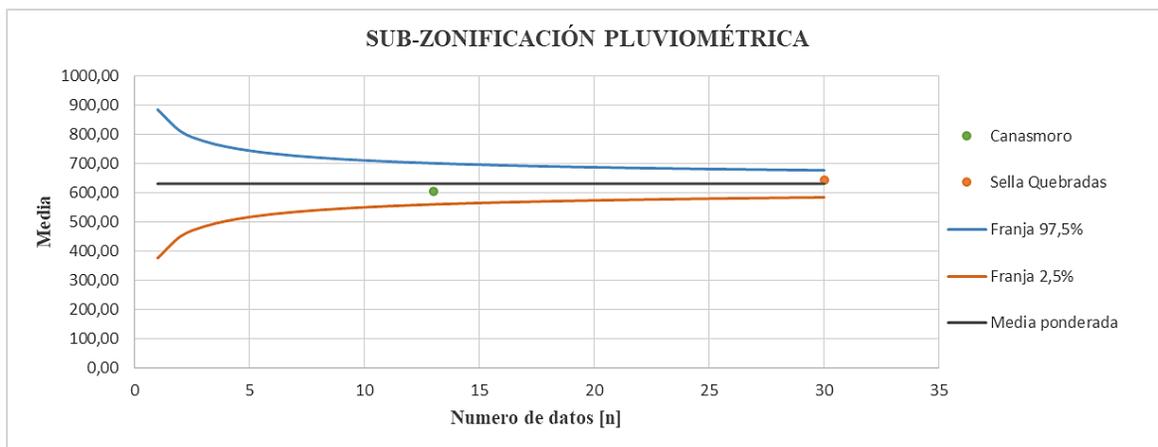


Figura 45. Sub-zonificación II.  
(Elaboración propia)

El desarrollo de la zonificación y sub-zonificación pluviométrica se encuentra detallado en el Anexo 5.

De acuerdo a los resultados obtenidos hasta este punto, se tomó en cuenta la sub-zona I que contiene a la estación de Tucumillas por ser la más representativa de la sub-zona pluviométrica ya que cuenta con la mayor cantidad de años de registro como así también presenta la menor variación del altitud con respecto a la altitud media de la cuenca.

#### 5.4. ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE EROSIVIDAD PLUVIAL (R)

El factor de erosividad pluvial se determinó de acuerdo al procedimiento planteado anteriormente en el inciso a) del punto 4.2.2.

▪ **Determinación de la intensidad máxima a los 30 minutos**

Tabla 18

*Hietograma de diseño para un periodo de retorno  $T = 10$  años*

Duración [min]	Precipitación [mm]	$\Delta P$ [mm]	Hietograma Prec. [mm]	Hietog. Intensidad [mm/hr]
0	0,00	0,00	0,00	0,00
5	10,50	10,50	1,19	14,28
10	15,72	5,22	1,39	16,68
15	19,22	3,50	1,70	20,40
20	21,93	2,71	2,24	26,88
25	24,17	2,24	3,50	42,00
30	26,09	1,92	10,50	126,00
35	27,79	1,70	5,22	62,64
40	29,31	1,52	2,71	32,52
45	30,70	1,39	1,92	23,04
50	31,97	1,27	1,52	18,24
55	33,16	1,19	1,27	15,24
60	34,26	1,10	1,10	13,20

(Elaboración propia)

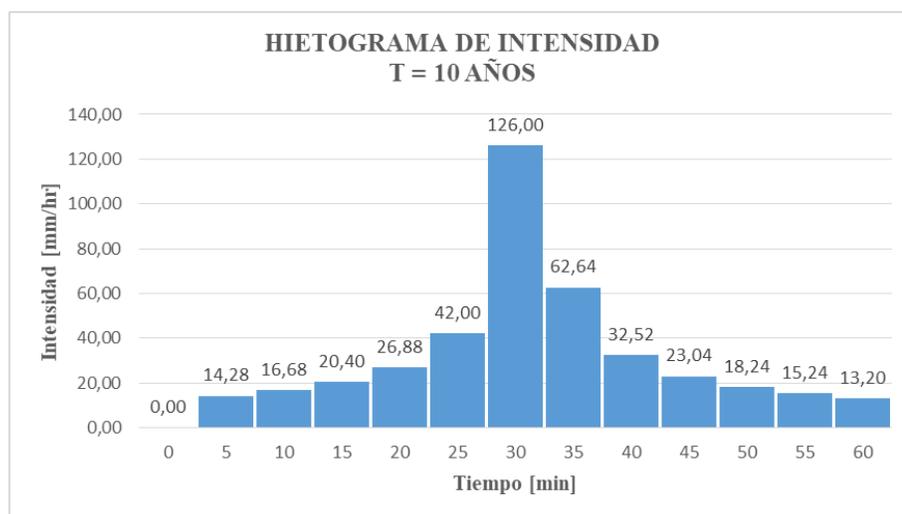


Figura 46. Gráfica del hietograma de intensidad para un  $T = 10$  años.  
(Elaboración propia)

De la gráfica del hietograma se determinó la intensidad máxima a los 30 minutos.

$$I_{30} = 52,18 \text{ mm/hr.}$$

- **Determinación de la energía cinética de la lluvia**

Tabla 19  
*Energía cinética de la lluvia (E)*

Intensidad (I <sub>i</sub> ) [cm/hr]	T <sub>i</sub> [hr]	E <sub>i</sub> [J/m <sup>2</sup> ]
0,00	0,0000	0
1,43	0,0833	26,7
1,67	0,0833	32,01
2,04	0,0833	40,42
2,69	0,0833	55,69
4,20	0,0833	92,98
12,60	0,0833	323,54
6,26	0,0833	146,64
3,25	0,0833	69,27
2,30	0,0833	46,46
1,82	0,0833	35,39
1,52	0,0833	28,68
1,32	0,0833	24,3
<b>Σ E =</b>		<b>922,08</b>

(Elaboración propia)

- **Determinación del número de lluvias erosivas**

Tabla 20  
*Número de lluvias erosivas en la estación Tucumillas*

Año	N° de lluvias >12,7 mm	Año	N° de lluvias >12,7 mm	Año	N° de lluvias >12,7 mm
1977	3	1991	26	2005	19
1978	20	1992	21	2006	22
1979	57	1993	16	2007	23
1980	34	1994	16	2008	33
1981	36	1995	26	2009	25
1982	32	1996	17	2010	14
1983	29	1997	18	2011	29
1984	66	1998	14	2012	22
1985	37	1999	18	2013	15
1986	22	2000	22	2014	13
1987	25	2001	21	2015	22
1988	12	2002	30	2016	14
1989	16	2003	22	2017	13
1990	17	2004	21	2018	25
				2019	19

(Elaboración propia)

Según los resultados de la Tabla 20 se aprecia que los valores más representativos se encuentran entre **20** a **25** lluvias erosivas en un año.

▪ **Determinación del factor R**

Tabla 21

*Factor de erosividad pluvial R*

N° de lluvias erosivas	n° de años de la serie estudiada	E [J/m <sup>2</sup> ]	I <sub>30</sub> [mm/hr]	Factor R [MJ.mm/ha.hr.año]
20	41	922,08	52,18	234,70
25				293,38

(Elaboración propia)

El proceso de cálculo para la obtención de este factor se encuentra en el Anexo 6.

**5.5. ESTIMACIÓN DE LA ERODABILIDAD DEL SUELO (K)**

La erodabilidad del suelo se determinó de acuerdo al procedimiento descrito anteriormente en el inciso b) del punto 4.2.2.

El análisis de obtención del factor (K) está desarrollado en el Anexo 7.

**a) Método por tabla**

Tabla 22

*Cálculo del factor K en función al contenido de materia orgánica y textura*

Muestra	Textura del suelo	Clasificación según SCS	Materia orgánica [%]	Área [km <sup>2</sup> ]	Valor K [ton.ha.hr/ha.MJ.mm]
M-1	Franco arcilloso	C	6,51	0,92	0,028
M-2	Franco arenoso	B	9,49	0,51	0,025
M-3	Franco arenoso	B	6,38	0,55	0,025
M-4	Franco arenoso	B	8,56	0,87	0,025
M-5	Franco	B	7,47	1,09	0,038
M-6	Franco arenoso	B	7,99	1,38	0,025
M-7	Franco arenoso	B	6,64	1,10	0,025
M-8	Franco arcilloso	B	5,39	0,66	0,028
M-9	Franco arenoso	C	6,01	0,91	0,025

(Elaboración propia)

## b) Método ecuación de Mannaerts

Tabla 23

*Cálculo del factor K en función al (%) arena, limo y arcilla*

Muestra	Arena [%]	Limo [%]	Arcilla [%]	Área [km <sup>2</sup> ]	Valor K [ton.ha.hr/ha.MJ.mm]
M-1	33,00	40,00	27,00	0,92	0,042
M-2	56,00	31,00	13,00	0,51	0,025
M-3	55,00	26,00	16,00	0,55	0,028
M-4	54,00	30,00	16,00	0,87	0,028
M-5	45,00	40,00	15,00	1,09	0,032
M-6	60,00	28,00	12,00	1,38	0,023
M-7	64,00	24,00	12,00	1,10	0,021
M-8	37,00	30,00	33,00	0,66	0,042
M-9	59,00	25,00	16,00	0,91	0,025

(Elaboración propia)

Tabla 24

*Resumen de resultados factor K*

Método	Valor K [ton.ha.hr/ha.MJ.mm]
Tabla	0,028
Ecuación de Mannaerts	0,029

(Elaboración propia)

De acuerdo a la similitud de resultados obtenido por ambos metodos de este factor, el valor a considerar para la determinación de la pérdida media anual de suelo es la media de estos dos valores, obteniendo.

$$K = 0,0285 \text{ [ton.ha.hr/ha.MJ.mm]}$$

## 5.6. ESTIMACIÓN DEL FACTOR TOPOGRÁFICO (LS)

El proceso metodológico que se siguió en la obtención del factor topográfico se encuentra en el inciso c) del punto 4.2.2.

**a) Método por tabla**

		<b>Grado de Pendientes (%)</b>	<b>Factor LS</b>
		0 a 3	0,3
		3 a 12	1,5
		12 a 18	3,4
<b>Pendiente [%]</b>		18 a 24	5,6
32,11		24 a 30	8,7
		30 a 60	14,6
		60 a 70	20,2
		70 a 100	25,2
		> 100	28,5

		<b>Factor LS</b>
		14,6

**b) Método de Horton**

Tabla 25  
*Cálculo del factor LS según Horton*

<b>Altitud [m.s.n.m.]</b>	<b>Área [km<sup>2</sup>]</b>	<b>LCj [km]</b>	<b>s [%]</b>	<b>Longitud red drenaje [Km]</b>	<b>λ [Km]</b>	<b>LS</b>
2093	0,00	0,00				
2100	0,08	1,45				
2200	0,58	2,93				
2300	0,53	3,46				
2400	0,46	3,10	33,59	19,13	0,21	10,89
2500	2,07	8,59				
2600	3,24	6,12				
2707	1,10	3,58				

(Elaboración propia)

**c) Método de Williams y Berndt**

Tabla 26  
*Cálculo del factor LS según Williams y Berndt*

<b>Contorno</b>	<b>LB [km]</b>	<b>LC [km]</b>	<b>λ [Km]</b>	<b>s [%]</b>	<b>LS</b>
25%	2,36	3,37			
50%	1,71	3,17	0,38	30,03	11,24
75%	4,26	9,25			

(Elaboración propia)

Tabla 27  
Resumen de resultados factor LS

Método	Valor LS
Tabla	14,6
Horton	10,89
Williams y Berndt	11,24

(Elaboración propia)

En el Anexo 8 se puede seguir el proceso de cálculo del factor topográfico.

El valor del factor LS que se considera para posteriores cálculos es la media de los dos últimos métodos, ya que presenta menor variación de sus resultados con respecto al primer método.

$$LS = 11,07$$

### 5.7. ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE COBERTURA VEGETAL (C)

De acuerdo a lo que se planteó en el inciso d) del punto 4.2.2. se determina el factor C., mismo que se encuentra desarrollo en el Anexo 9.

Tabla 28  
Valores del factor C

Cobertura vegetal	Superficie [%]	factor C <sub>i</sub>	Factor C
Matorral ralo y eriales	30,73	0,2	0,44
Vegetación herbácea	25,11	0,1	
Zona de cultivos	0,8	0,5	
Tierras erosionadas con escasa vegetación	43,3	0,8	

(Elaboración propia)

### 5.8. ESTIMACIÓN DEL FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN (P)

La asignación del factor (P) está en base a las prácticas de conservación de suelo que se tiene en el área de estudio, en nuestro caso corresponde a.

$$P = 1$$

## 5.9. DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA MEDIA ANUAL DE SUELO (A) – USLE

Tabla 29  
*Valores de pérdida de suelo por erosión*

Grado de erosión	Pérdida de suelo [ton/ha/año]
Ninguna o ligera	< 10
Moderada	10 a 50
Fuerte	50 a 200
Muy fuerte	> 200

(Salazar, 2016)

La pérdida media anual de suelo se ha determinado mediante la multiplicación de los cinco factores obtenidos anteriormente.

Tabla 30  
*Resultados de la pérdida media anual de suelo - USLE*

Nº lluvias erosivas >12,7mm	Factor (R) [MJ.mm/ha.hr.año]	Factor (K) [ton.ha.hr/ha.MJ.mm]	Factor (LS)	Factor (C)	Factor (P)	Pérdida de suelo (A) [ton/ha/año]
20	234,70					32,58
25	293,38	0,0285	11,07	0,44	1	40,73

(Elaboración propia)

## 5.10. DETERMINACIÓN DE LA DESCARGA MEDIA ANUAL DE SUELO EROSIONADO (G) - GAVRILOVIC

La determinación de la descarga media anual de suelo erosionado se ha realizado de acuerdo a lo que se planteó en el punto 4.2.3. mencionado anteriormente. El procedimiento de cálculo se encuentra en el Anexo 10.

Tabla 31  
*Descarga media anual de suelo erosionada - Gavrilovic*

Coefficiente de temperatura (T)	Coefficiente de erosión (Z)	Coefficiente de retención (R)	Volumen promedio anual (W) [m <sup>3</sup> /año]	Descarga media anual (G) [m <sup>3</sup> /año]
1,24	4,25	0,33	217958,35	71926,26

(Elaboración propia)

## 5.11. CURVA ALTURA VOLUMEN

La elaboración de la curva altura volumen se ha realizado en función a la información de la topografía del vaso brindada por el Programa Ejecutivo de Rehabilitación de Tierras de Tarija – PERTT.

Tabla 32

*Valores de área y volumen presa La Hondura*

Cota [m.s.n.m.]	Área [m <sup>2</sup> ]	Vol. Parcial [m <sup>3</sup> ]	Vol. Acum. [m <sup>3</sup> ]	Vol. acum. [hm <sup>3</sup> ]
2088	8983,48	0,00	0,00	0,00
2089	27581,75	18282,62	18282,62	0,02
2090	34837,40	31209,58	49492,19	0,05
2091	42944,95	38891,18	88383,37	0,09
2092	48964,08	45954,52	134337,88	0,13
2093	53986,06	51475,07	185812,95	0,19
2094	59066,06	56526,06	242339,01	0,24
2095	66059,75	62562,91	304901,92	0,30
2096	70893,45	68476,60	373378,52	0,37
2097	75514,84	73204,15	446582,66	0,45
2098	79430,10	77472,47	524055,13	0,52
2099	83337,52	81383,81	605438,94	0,61
2100	87427,33	85382,43	690821,37	0,69
2101	91463,96	89445,65	780267,01	0,78
2102	97803,05	94633,51	874900,52	0,87
2103	102277,27	100040,16	974940,68	0,97
2104	106536,85	104407,06	1079347,74	1,08
2105	110854,01	108695,43	1188043,17	1,19
2106	115607,81	113230,91	1301274,08	1,30
2106,3	120399,67	35401,12	1336675,20	1,34
2107	120488,48	84310,85	1420986,05	1,42
2108	125237,25	122862,87	1543848,91	1,54

Cota vertedero  
excedencia



(Elaboración propia)

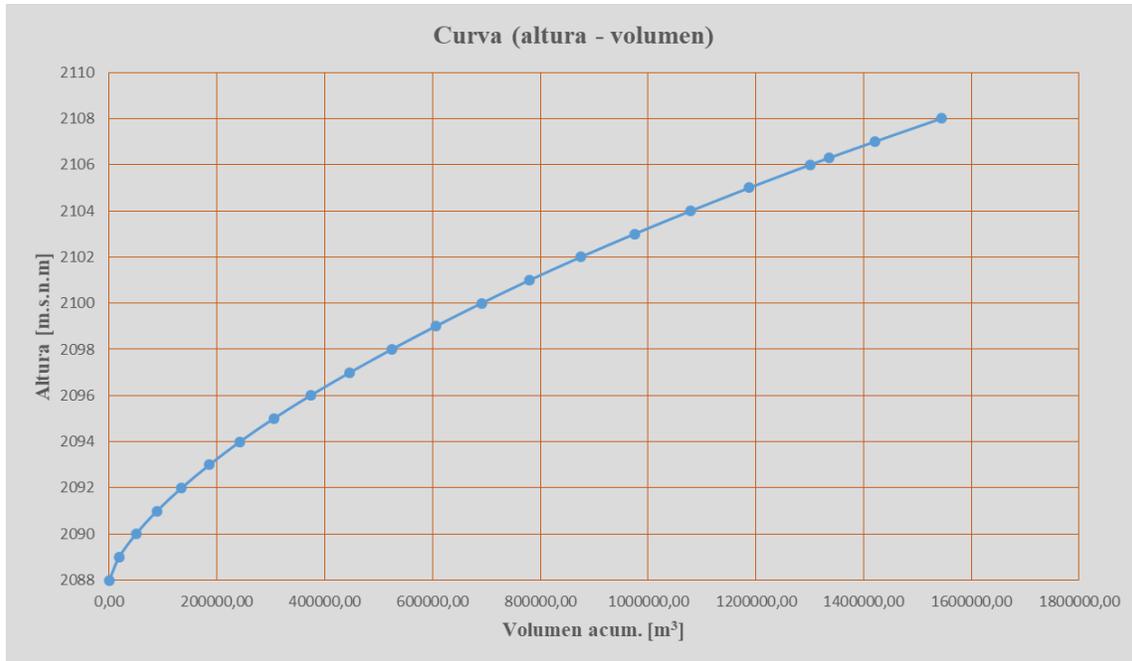


Figura 47. Curva altura volumen Presa La Hondura (Elaboración propia)

## 5.12. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE SEDIMENTO

### 5.12.1. Metodología USLE

Antes de realizar la determinación del volumen de sedimento en el embalse de la presa La Hondura se procedió al cálculo del coeficiente de entrega de sedimento (CES).

Tabla 33

Proceso de cálculo del coeficiente de entrega de sedimento CES

Orden río	Nº río	Rb	Nº ríos involucrados	BR	A [Km <sup>2</sup> ]	P [m/m]	CES [%]
1	15						
2	8	1,88	23	2,28	8,07	0,0434	25,54
3	5	1,6	13				
$\Sigma$	28						

(Elaboración propia)

El resultado del coeficiente de entrega de sedimento CES muestra que solo el 25,54 % de todo el material erosionado en la cuenca está llegando al embalse, quedando el 74,46 % del suelo erosionado sedimentado a lo largo de su recorrido, un porcentaje de este material puede quedar depositado en el recorrido de sus laderas antes que ingresen a la red hidrográfica y otra fracción puede ser atrapado o depositado cuando está siendo transportado por los cursos de agua.

**a) Para:** Número de lluvia erosiva = 20

Tabla 34

*Volumen de sedimento en función a la vida útil – N° lluvia erosiva = 20*

Vida útil [años]	Área cuenca [ha]	Peso específico sedimento [ton/m <sup>3</sup> ]	Pérdida de suelo (A) [ton/ha/año]	CES [%]	Volumen sedimento [m <sup>3</sup> ]	Altura sedimento [m]
10					44766,61	1,85
15					67149,92	2,45
20	807	1,50	32,58	25,54	89533,23	3,03
25					111916,54	3,51
30					134299,84	4,00

(Elaboración propia)

**b) Para:** Número de lluvia erosiva = 25

Tabla 35

*Volumen de sedimento en función a la vida útil – N° lluvia erosiva = 25*

Vida útil [años]	Área cuenca [ha]	Peso específico sedimento [ton/m <sup>3</sup> ]	Pérdida de suelo (A) [ton/ha/año]	CES [%]	Volumen sedimento [m <sup>3</sup> ]	Altura sedimento [m]
10					55965,14	2,17
15					83947,71	2,89
20	807	1,50	40,73	25,54	111930,28	3,51
25					139912,84	4,11
30					167895,41	4,65

(Elaboración propia)

### 5.12.2. Metodología Gavrilovic

Tabla 36

*Volumen de sedimento en función a la vida útil*

Vida útil [años]	Descarga media anual (G) [m <sup>3</sup> /año]	Volumen sedimento [m <sup>3</sup> ]	Altura sedimento [m]
10		719262,60	12,32
15		1078893,90	16,00
20	71926,26	1438525,20	19,14
25		1798156,50	22,07
30		2157787,80	25,00

(Elaboración propia)

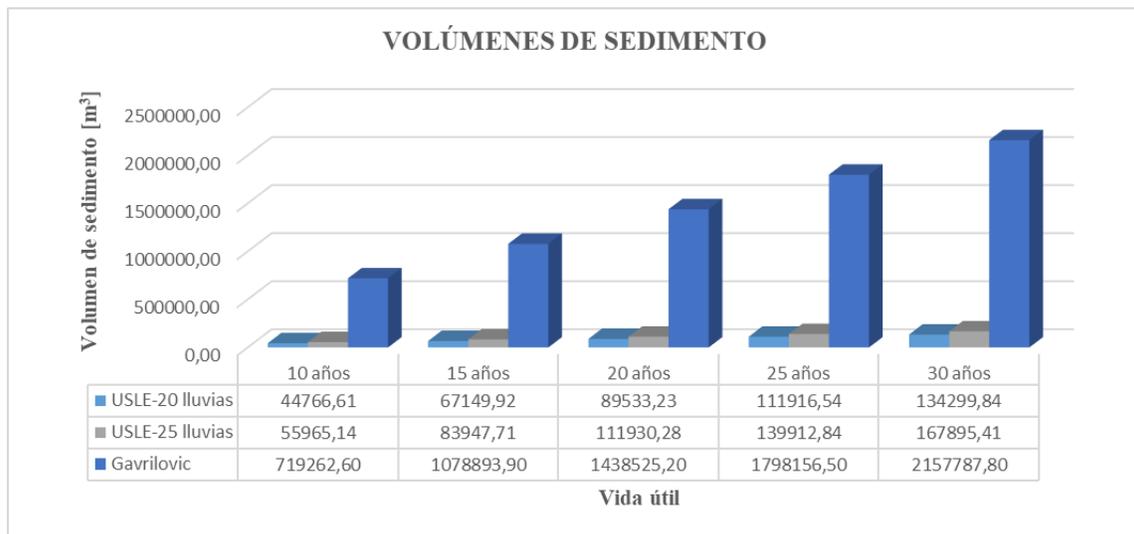


Figura 48. Comparación de volúmenes de sedimento método USLE y Gavrilovic.  
(Elaboración propia)

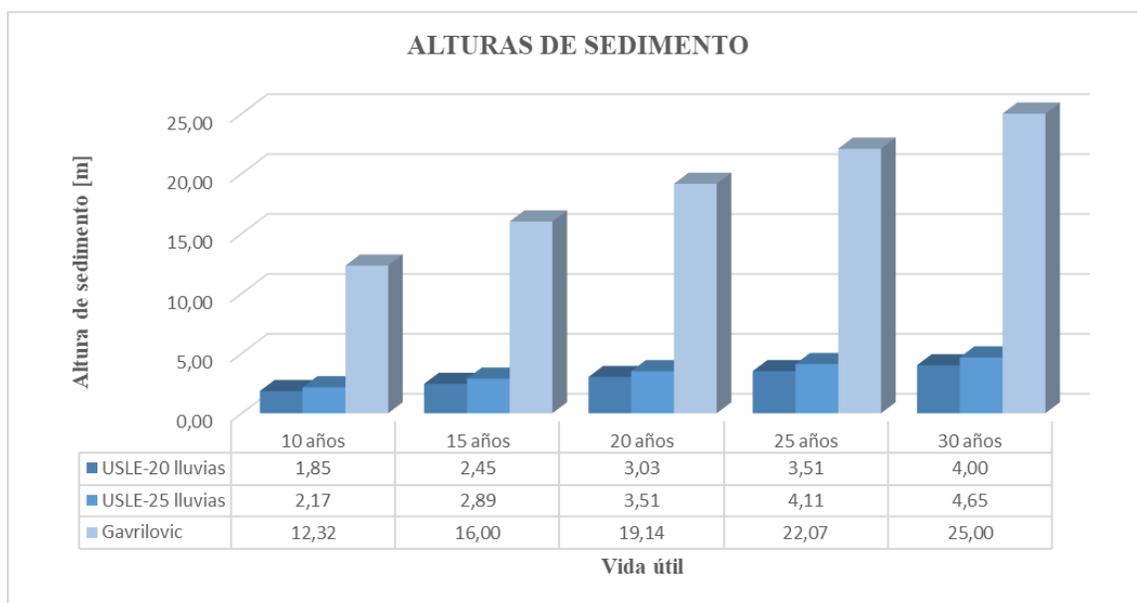


Figura 49. Comparación de alturas de sedimento método USLE y Gavrilovic.  
(Elaboración propia)

### 5.12.3. Metodología de Gavrilovic aplicando el coeficiente de pendiente

Según el proyecto desarrollado por el MMayA; “Estimación de la Pérdida de Suelos y Producción de Sedimentos en la Cuenca Pedagógica Cayara – Santa Lucia Mediante el Método Gavrilovic”, clasifican la pendiente del terreno con base a la tabla del coeficiente de pendiente, el cual ha sido utilizado en diferentes investigaciones tanto a nivel nacional como internacional.

$$Z = X \cdot Y \cdot (\varphi + j^{1/2})$$

Tabla 37  
Coeficiente de pendiente (*j*)

Pendiente	Valor de <i>j</i>
0 - 10 %	0,05
10 - 20 %	0,15
20 - 40 %	0,30
40 - 60 %	0,50
60 - 80 %	0,70

(Ministerio de Medio Ambiente y Agua, 2019)

En función a la aplicación del coeficiente de pendiente se tiene los siguientes resultados de Gavrilovic, cuyo proceso de cálculo se puede apreciar en el Anexo 11.

Tabla 38  
*Volumen de sedimento aplicando el coeficiente de pendiente*

Vida útil [años]	Descarga media anual (G) [m <sup>3</sup> /año]	Volumen sedimento [m <sup>3</sup> ]	Altura sedimento [m]
10		59845,50	2,27
15		89768,25	3,03
20	5984,55	119691,00	3,68
25		149613,75	4,30
30		179536,50	4,88

(Elaboración propia)

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 38 se observa que la aplicación del coeficiente de pendiente en el método de Gavrilovic arrojan resultados más cercanos a los obtenidos por USLE y la Batimetría, en comparación a los calculados en la Tabla 36 donde no se considera el coeficiente de pendiente. Con base a este último proceso de cálculo el resultado obtenido es utilizado en la determinación del tiempo de la vida útil de la presa.

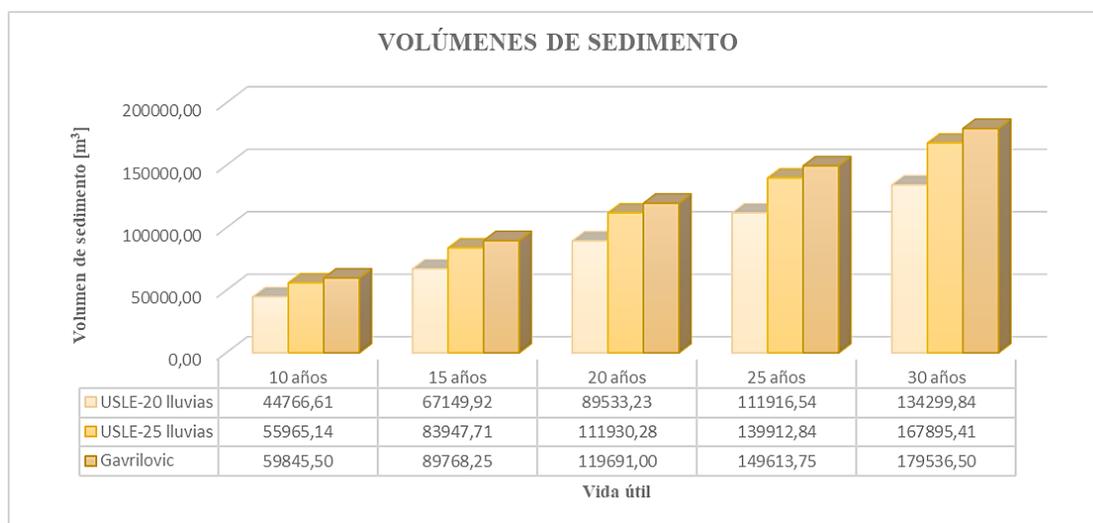


Figura 50. Volúmenes de sedimento método USLE y Gavrilovic considerando el coeficiente de pendiente.

(Elaboración propia)

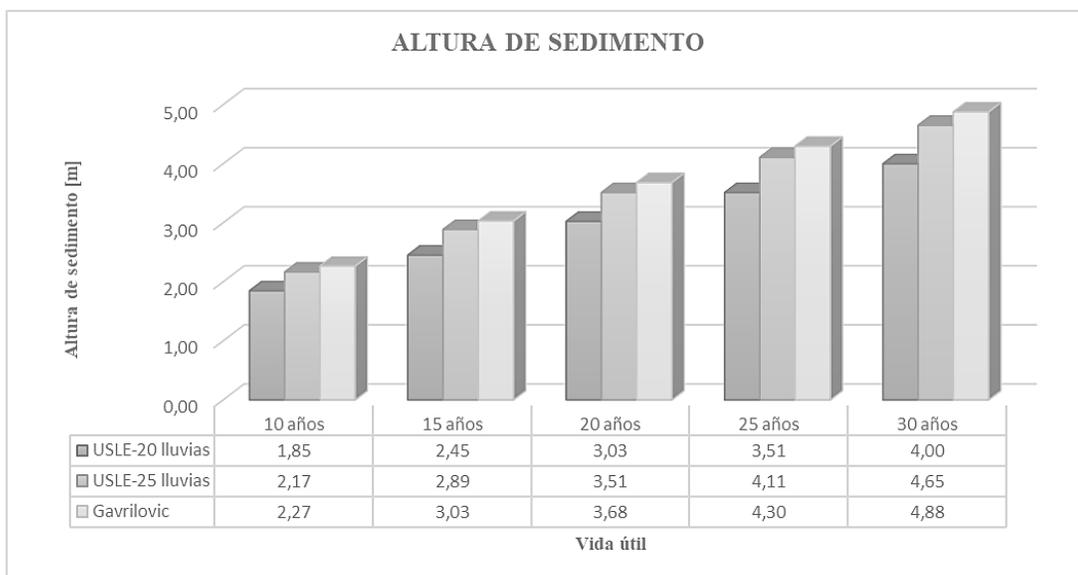


Figura 51. Altura de sedimento método USLE y Gavrilovic considerando el coeficiente de pendiente. (Elaboración propia)

#### 5.12.4. Tiempo de vida útil estimado

Se dice que una presa llega al fin de su ciclo de vida útil cuando el 80% de su capacidad es reemplazado por sedimento. Gómez Navarro (1988), citado por (Choqueticlla, 2010). Sin embargo no ocurre en todas la presas, también va depender de donde esté ubicada la obra de toma ya que sirve como un parámetro de referencia de la vida útil que puede tener una presa.

Tabla 39

*Comparación de resultados en la estimación del tiempo de la vida útil de la presa La Honduras*

	USLE-20 lluvias	USLE-25 lluvias	Gavrilovic
Volumen anual sedimento	4476,661 m <sup>3</sup> /año	5596,514 m <sup>3</sup> /año	5984,55 m <sup>3</sup> /año
Volumen de almacenamiento	1336675,20 m <sup>3</sup>		
<b>Tiempo de vida</b>	<b>239 años</b>	<b>191 años</b>	<b>179 años</b>
Volumen sedimento actual (estimado)	44766,61 m <sup>3</sup>	55965,14 m <sup>3</sup>	59845,50 m <sup>3</sup>
<b>Tiempo de vida restante</b>	<b>229 años</b>	<b>181 años</b>	<b>169 años</b>

(Elaboración propia)

De acuerdo a los resultados obtenidos con la aplicación de ambas metodologías, el área aportante del embalse de la Presa La Hondura presenta una pérdida de suelo moderada según la clasificación de la Tabla 29. Estos resultados reflejan la realidad de la zona de estudio; de acuerdo a la visitas de campo se pudo evidenciar que presenta cobertura vegetal pobre, pendientes fuertes que contribuyen a la pérdida del suelo y presencia de erosión.

Según el método USLE los resultados alcanzados de pérdida de suelo son 32,58 y 40,73 (ton/ha/año) de acuerdo al número de lluvias erosivas más representativas que se tiene en la estación de estudio, clasificándose de esa manera como erosión moderada según Tabla 29. En el caso del método de Gavrilovic donde se toma en cuenta el coeficiente de pendiente se tiene que la pérdida de suelo es de 33,71 (ton/ha/año), que de acuerdo a clasificación también corresponde a un grado de erosión moderada.

En cuanto a los cálculos de volumen y altura de sedimento en la presa La Hondura, el método USLE presenta resultados con mejor estimación de volumen y altura de sedimento en el área de estudio ya que los factores que intervienen en el modelo han sido determinados a través de un análisis de los datos de precipitación, cálculo de energía de la lluvia e intensidad, análisis de laboratorio de las propiedades físicas del suelo de las nueve muestras extraídas, determinación de curvas de nivel, red de drenaje y un análisis de la cobertura vegetal arrojando valores de volúmenes para diferentes lluvias erosivas de 44766,61 m<sup>3</sup> y 55965,14 m<sup>3</sup>, y alturas de 1,85 m y 2,17 m para una vida útil de 10 años, lo cual se traduce en una disminución del volumen de almacenamiento de agua a 1291908,58 m<sup>3</sup> y 1280710,06 m<sup>3</sup> respecto al volumen inicial de 1336675,20 m<sup>3</sup>. También en función al aporte anual de sedimento se estima que la presa tiene un tiempo de vida restante de 229 años y 181 años lo cual representa que la presa en ese tiempo estará colmatada de sedimento al 80 % de su capacidad.

En caso del método Gavrilovic se puede apreciar que existe una amplia diferencia en los resultados obtenidos con ambos métodos, ver Tabla 36 y 38; esto se debe a que el primer cálculo mediante Gavrilovic no se toma en cuenta el coeficiente de pendiente en la obtención del coeficiente de erosión (Z) si no que se aplica directamente la pendiente superficial en porcentaje; debido a esto se tiene valores muy altos en volumen y por ende altura de sedimento. Por otra parte el segundo proceso de cálculo de Gavrilovic donde si se considera

el coeficiente de pendiente cuyo valor está vinculado con la pendiente superficial arroja resultados más cercanos a los obtenidos por método USLE ver Figura 50 y 51. En este caso la presa estará colmatada a un 80 % de su capacidad en un tiempo restante de 169 años.

La Tabla 40 muestra la diferencia que existe entre ambos métodos en cuanto al proceso de cálculos u obtención de los diferentes factores y coeficientes que interviene en los mismos, donde se puede apreciar que el método Gavrilovic toma un proceso empírico en su cálculo a comparación al método USLE.

Tabla 40

*Comparación de datos de entrada y cálculo con ambos métodos USLE y Gavrilovic*

USLE			Gavrilovic		
Datos de entrada	Factores	Proceso de cálculo	Datos de entrada	Coefficientes	Proceso de cálculo
Precipitaciones		<b>Ecuación</b>	Temperaturas	Coeficiente de temperatura (T)	<b>Ecuación</b>
Energía cinética de la lluvia	Factor de erosividad (R)		Cubierta vegetal	Coeficiente de uso de suelo (X)	<b>Uso de Tabla</b>
Intensidad máxima 30 minutos			Tipo de Suelo	Coeficiente de resistencia del suelo (Y)	<b>Uso de Tabla</b>
Contenido de materia orgánica	Factor de erodabilidad (K)	<b>Ecuación y Tabla</b>	Estado erosivo existente	Coeficiente de procesos erosivos ( $\phi$ )	<b>Uso de Tabla</b>
Textura del suelo			Pendiente superficial	Coeficiente de pendiente (j)	<b>Uso de Tabla</b>
Curvas de nivel	Factor topográfico (LS)	<b>Ecuación</b>			
Red de drenaje					
Tipos de cobertura vegetal	Factor de cobertura vegetal (C)	<b>Tabla</b>			
Tipos de prácticas de conservación	Factor de prácticas conservación (P)	<b>1</b>			

(Elaboración propia)

Por otra parte, con base a la información preliminar que actualmente está manejando el CIAGUA, específicamente del proyecto “LEVANTAMIENTO TOPOBATIMÉTRICO DEL EMBALSE LA HONDURA” el cual se encuentra en etapa de ejecución, se tiene un primer resultado en el periodo 2009 a 2019, se realizó la siguiente comparación con los métodos utilizados en este trabajo de investigación:

Tabla 41  
*Comparación del volumen de sedimento USLE, Gavrilovic-  
 Batimetría periodo 2009-2019*

Periodo de análisis 2009-2019			
	<b>USLE</b>	<b>Gavrilovic</b>	<b>Batimetría CIAGUA</b>
20 lluvias	0,044 Hm <sup>3</sup>	0,059 Hm <sup>3</sup>	0,039 Hm <sup>3</sup>
25 lluvias	0,055 Hm <sup>3</sup>	0,059 Hm <sup>3</sup>	0,039 Hm <sup>3</sup>

(Elaboración propia)

Como se observa en la Tabla 41 el método que más se aproxima al resultado obtenido por el CIAGUA es la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE), ocurre lo contrario con el método Gavrilovic, lo cual se atribuye al empirismo del método y a la incertidumbre en la asignación de los coeficientes de uso, resistencia y proceso erosivo del suelo, mismo que se realiza mediante el uso de tablas.

Por otra parte es importante mencionar que la presa la Honduras fue construida con el propósito para uso de riego, para beneficiar a las comunidades de Pajchani y Tarija Cancha Norte. Según el estudio de Análisis de Funcionalidad y Riesgo de la Presa Pajchani, el área regable del sistema para las dos comunidades es aproximadamente 452 ha, actualmente solo se está regando el 12,63 % de esa área que equivale a 57,10 ha; estos valores ponen en evidencia que no se está aprovechando la inversión realizada en la construcción de la presa para el aprovechamiento de la actividad agrícola.

Además cabe mencionar que los resultados obtenidos de volúmenes de sedimento en el periodo 2009 – 2019 mediante el método USLE y Gavrilovic no están afectando a la capacidad útil del embalse para el cual fue construida.

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. CONCLUSIONES

- En esta tesis se estimó los volúmenes de sedimento que ingresan al embalse de la presa La Honduras con la aplicación de los métodos USLE y Gavrilovic considerando diferentes periodos de vida útil para la presa 10, 15, 20, 25 y 30 años.
- De acuerdo a los resultados obtenidos mediante Gavrilovic, se observa que este método sobre estima los volúmenes de sedimento en el embalse de la presa lo cual puede deberse a al empirismo y a la incertidumbre de la asignación de los coeficientes de uso del suelo, resistencia del suelo y el proceso erosivo en la cuenca, donde se emplea el uso de tablas. Sin embargo, si se aplica el coeficiente de pendiente a la metodología de Gavrilovic los resultados tienen una mejor aproximación a los obtenidos mediante USLE y la batimetría.
- Los resultados de pérdida de suelo a través del método USLE muestran que el grado de erosión existente en la cuenca es moderado, este grado de erosión podría incrementarse y acelerar el proceso de colmatación del embalse si no se considera la implementación de prácticas de conservación de suelo.
- Cada factor que conforma la ecuación universal de pérdida de suelo es de gran influencia en la obtención de la erosión hídrica ya que su relación es proporcional con la tasa de pérdida de suelo, también es necesario destacar que para obtener la erosividad de la lluvia R, es necesario contar con un registro de precipitaciones en el entorno del área de estudio con el propósito de obtener una estimación mucho más representativa.
- La escala espacial de la cuenca de aporte a la presa La Honduras favorece en la determinación de sus factores, debido al tamaño de la cuenca fue posible realizar un muestreo representativo de suelo y una clasificación con el apoyo de imágenes satelitales.
- La aplicación del modelo USLE permite generar escenario futuros de pérdida de suelo en la cuenca de estudio para la implementación temprana de proyectos que contrarresten la pérdida y el aumento de volumen de material erosionado, siempre

y cuando se realice una variación de la erosividad pluvial, cobertura vegetal y prácticas de conservación.

- Los resultados obtenidos a través de los métodos USLE y Gavrilovic han sido comparados con el dato de la batimetría vertidos por el CIAGUA. El resultado de volumen de sedimento a través de la batimetría es de  $0,039 \text{ Hm}^3$  y el de este trabajo se tiene para USLE  $0,044 \text{ Hm}^3$  y Gavrilovic  $0,059 \text{ Hm}^3$ , por lo tanto es aceptable el resultado obtenido mediante el método USLE por presentar una mayor aproximación respecto al resultado de la batimetría, esto se debe que mediante el método USLE se realizó el cálculo de cada uno de sus factores; como los ensayos laboratorio para obtención del contenido de materia orgánica y textura del suelo, se determinó el número de lluvias erosivas, la energía de la lluvia e intensidad, también se procedido a la determinaron las curvas de nivel, red de drenaje y se realizó un análisis de la cobertura vegetal existe en la zona. No pasa lo mismo con Gavrilovic por ser un método más empírico donde la asignación de sus coeficientes genera incertidumbre ya que se lo hace mediante el uso de tablas que propone el mismo.

## **6.2. RECOMENDACIONES**

- La cuenca de estudio no presenta obras de conservación de suelo y agua que ayuden en la reducción de los sedimentos que se desplazan por sus laderas hacia las corrientes naturales, por lo tanto se recomienda que cuando se tenga cuencas con características similares, se deba realizar estos tipos de obras.
- Instalar más estaciones meteorológicas a nivel regional para el monitoreo de las precipitaciones con el propósito de obtener mayor información de los eventos de lluvia que sirven en la determinación de un factor R más representativo.
- Implementar un plan de mediciones batimétricas periódicas (anual) en el embalse para conocer la cantidad de sedimento que ingresa por efecto de la erosión en la cuenca y conocer la evolución del sedimento que se va acumulando.
- Realizar un estudio a más detalle de suelo de la cuenca aportante al embalse de la presa La Hondura para mejorar la calidad de su información en la determinación del factor K, ya que expresa la susceptibilidad del suelo ser erosionado.

- Efectuar un plan de conservación de la cuenca en estudio, con el propósito de atacar el problema de la erosión en su origen y frenar el crecimiento del volumen de sólido arrastrados por el río.