

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.

1.1.ANTECEDENTES.

La sedimentación es considerada como uno de los principales problemas en los embalses u obras de almacenamiento. La producción de sedimentos en una cuenca está relacionada con los diversos procesos erosivos, característicos de las montañas y valles de la región, los sedimentos son recogidos y transportados por los ríos tributarios para ser depositados aguas abajo como en los vasos de almacenamiento de los embalses.

Estudios de erosión de suelos en cuencas ubicadas en zonas altiplánicas permiten observar que la tasa de erosión respecto a los últimos años ha cambiado, esto se debe en mayor efecto al cambio climático que genera un mayor número de eventos meteorológicos atípicos en este tipo de regiones, como lluvias de elevada intensidad en periodos de tiempo que no son acordes al registro histórico del lugar y nevadas. Considerando todo esto, la presencia de presas y embalses son las que padecen estos efectos disminuyendo su vida útil.

Existen diferentes metodologías para la estimación de la producción de sedimentos, siendo la más utilizada el modelo “Ecuación Universal de Pérdida de Suelo” (USLE), formulada inicialmente por Wischmeier y Smith en el año 1962 para posteriormente ser publicada de manera oficial en el año 1978. Este modelo permite estimar la cantidad de pérdidas anuales de suelo en un área a causa de la erosión superficial, y se lo determina de acuerdo con el resultado de la interacción de factores naturales (clima, suelo, relieve y vegetación) y de factores influenciados por el hombre (usos y manejo del suelo).

En años recientes el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) ha estado implementando un protocolo en el marco del “Programa de Monitoreo Hidro-meteorológico y Gestión Óptima de Embalses” para monitorear veintisiete presas de riego y agua potable ubicadas en La Paz, Potosí, Cochabamba, Chuquisaca, Oruro y Tarija.

1.1.1. PRESA EL MOLINO.

La idea del proyecto de una presa que permitiera regular las aguas del río Tomayapo para el aprovechamiento de los recursos hídricos datan de los años 1975 y 1978, de acuerdo con los informes técnicos de la oficina del Servicio Nacional de Desarrollo de la Comunidad y a los

esquemas de proyectos del Departamento de Recursos Hídricos de la Corporación de Desarrollo de Tarija (CODETAR).

En el año 1990, la empresa Consultores Galindo Cia. Ltda. por encargo de CODETAR elaboraron un estudio de factibilidad del proyecto de una presa en la comunidad El Molino para el mejoramiento de los sistemas de riego en el valle de Tomayapo que abarcaría 305 ha de riego. La presa de tierra propuesta tendría una altura de 22 m y un almacenamiento útil de 3,3 Hm³ para una regulación plurianual.

Siete años después, en el año 1997 la empresa CONSA S.R.L. Consultores Asociados, dentro del marco del Programa de Desarrollo Integral de la zona alta y valles de Tarija (PRODIZAVAT) elaboraron el estudio de Desarrollo Agropecuario y Factibilidad Agro Económica para el Proyecto “Presa Carolina” en donde se recomendaba la ejecución de dos embalses, uno en Carolina para el riego del valle de Iscayachi y otro en El Molino para el riego del Valle de Tomayapo.

Para la elaboración del diseño de la presa “El Molino”, en el año 2000 la Prefectura del Departamento de Tarija contrató a la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS), específicamente al Instituto Interuniversitario Boliviano de Recursos Hídricos (INIBREH). La presa diseñada era de hormigón (RCC¹) del tipo gravedad con una altura de 20 m y un almacenamiento total de 5,05 Hm³ para el riego de 346 ha en el valle de Tomayapo.

Después de que el proyecto de la presa “El Molino” fuera inscrito se presentó una oposición por parte de la comunidad El Molino para que se realizara el proyecto debido a que para la construcción de la presa se afectaría alrededor de 100 ha de cultivo.

Para el año 2003 la Prefectura contrató al consorcio “Asociación Accidental CEP” constituido por las empresas Arinsur S.R.L. y SSP S.R.L. para la elaboración del nuevo diseño del proyecto, situado en esta ocasión en la comunidad de Carolina en la confluencia de los ríos Sola y Chorcoya, pero manteniendo el nombre del proyecto como presa “El Molino”.

¹ Concreto Compactado con Rodillo

La licitación de la construcción del proyecto se realizó en el año 2006 y en diciembre del mismo año la Asociación Accidental “Consortio Tarija” fue adjudicada. La obra empezó su construcción oficialmente el 19 de julio de 2007, pero debido a deficiencias en el Diseño Final con el que se licitó el proyecto, éste sufrió dos nuevos rediseños y la ejecución real de la obra fue a finales del año 2009.

Finalmente, el 13 de enero de 2015 se realizó la recepción definitiva de la presa “El Molino”, después de aproximadamente siete años desde su ejecución oficial, en los cuales se presentaron varios problemas en la obra relacionados con el presupuesto y las fechas de entrega.

1.2. ANÁLISIS DE PROBLEMA.

1.2.1. PLANTEAMIENTO.

En muchas cuencas del Departamento de Tarija no se tiene información respecto al transporte y depósito de sedimentos en los embalses, que se han construido para diferentes fines como generación de energía eléctrica, riego de cultivos agrícolas y consumo humano. De hecho, la falta de monitoreos del aporte de sedimentos en los embalses no permite desarrollar procesos de planificación y una toma de decisiones en el corto, mediano y largo plazo, para evitar una colmatación y un efecto sobre la vida útil de las obras hidráulicas.

La variabilidad del arrastre de sedimentos hacia los embalses puede deberse a las características y uso del suelo, presencia de cobertura vegetal, precipitación y a los efectos del cambio climático.

La cuantificación de los sedimentos depositados en los embalses permite establecer el grado de afectación, su comportamiento y predecir las tendencias en los aportes de sedimentos. En el caso de la presa “El Molino” que se encuentra en la zona alta del Departamento de Tarija, es necesario conocer la tasa de aporte de sedimentos para estimar su incidencia en la vida útil del embalse.

1.2.2. FORMULACIÓN.

¿Por medio de la estimación de la tasa de erosión aplicando el modelo USLE en la cuenca de aporte de la presa “El Molino” se podrá determinar el aporte de sedimentos anual y estimar la vida útil del embalse?

1.2.3. SISTEMATIZACIÓN.

- ¿Cuáles son los factores del modelo USLE con mayor incidencia en la tasa de erosión de la cuenca?
- ¿Cuál es el aporte de sedimentos del embalse en relación con la producción de sedimentos en la cuenca delimitada por la presa?
- ¿Cómo se relacionan los resultados de aporte de sedimentos obtenidos mediante el modelo USLE con los del levantamiento batimétrico efectuado el año 2019?
- En función a los resultados, ¿Cuál es la duración estimada de vida útil del embalse de la presa “El Molino”?

1.3.OBJETIVOS.

1.3.1. OBJETIVO GENERAL.

- Analizar el aporte de sedimentos anual en la cuenca delimitada por la presa “El Molino” mediante la aplicación del modelo empírico de la “Ecuación Universal de Pérdida de Suelo” (USLE) en base al procesamiento de imágenes satelitales y tecnologías de información geográfica para estimar la vida útil del embalse.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Estimar cada uno de los factores del modelo USLE considerando las características físicas, climatológicas y fisiográficas de la cuenca delimitada por la presa “El Molino”; y determinar qué factores son los que tienen mayor incidencia en la tasa de erosión anual.
- Cuantificar la producción de sedimentos en la cuenca y el aporte de sedimentos del embalse utilizando el método de USLE con algunas adaptaciones en base a la información disponible.

- Comparar los resultados del aporte de sedimentos de la presa “El Molino” a través del uso del modelo USLE con los obtenidos mediante el levantamiento batimétrico del año 2019.
- Estimar la vida útil del embalse en función de los resultados obtenidos aplicando el modelo USLE para el periodo de 2015 – 2019.

1.4. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

1.4.1. TEÓRICA.

En el presente trabajo de investigación se propone estimar la vida útil de la presa “El Molino” mediante los resultados de producción y aporte de sedimentos determinados mediante el modelo USLE, considerando la importancia que tiene la sedimentación en la capacidad de almacenamiento de un embalse y el tiempo de operación de una presa; los resultados que se obtengan pueden ser útiles para estudios posteriores relacionados a la sedimentación en embalses que igualmente pertenezcan a zonas altas.

1.4.2. METODOLÓGICA.

Para llevar a cabo esta investigación se pretende establecer la tasa de erosión y aporte de sedimentos anual hacia el embalse de la presa “El Molino”, utilizando el método empírico USLE, por medio del manejo de imágenes de alta resolución y de técnicas enfocadas en los sistemas de información geográfica y teledetección; además, de la obtención de información de campo relacionados con las características de suelo y vegetación. Para esto, es importante probar diferentes modelos para calcular los factores de USLE e identificar aquellos que se adapten a las condiciones de información que se tiene del área donde se localiza la presa.

1.4.3. PRÁCTICA.

La cuantificación del aporte de sedimentos en función al tiempo permite tomar decisiones en relación con los factores que influyen en una mayor o menor medida en la producción de sedimentos. Asimismo, el monitoreo del proceso de sedimentación permite conocer anualmente la cantidad de sedimentos que disminuyen la capacidad de almacenamiento del embalse de la presa y predecir con mayor precisión la vida útil del mismo.

1.5.HIPÓTESIS.

Mediante el modelo USLE será posible analizar y evaluar la erosión de la cuenca delimitada por la presa “El Molino” y así estimar el aporte de sedimentos y su efecto en la vida útil del embalse.

CAPÍTULO II: MARCO DE REFERENCIA.

2.1.MARCO TEÓRICO.

2.1.1. MODELO USLE.

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE²) es un modelo de erosión diseñado para predecir las pérdidas de suelo promedio a largo plazo en base a la escorrentía de áreas específicas de campos de cultivos y sistemas de gestión. El uso generalizado en el campo ha fundamentado su utilidad y validez para este propósito. También es aplicable en tales condiciones en sitios de construcción (Wischmeier y Smith, 1978; p. 3).

El modelo USLE fue diseñado para la predicción de erosión en suelos preferentemente agrícolas y con base anual. No obstante, contiene algunos índices y factores que, con la debida adaptación, hacen que la ecuación pueda también utilizarse en algunas situaciones de manejo forestal (Mancilla Escobar, 2008; p. 4).

El modelo USLE está expresado en función de la siguiente ecuación:

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

Donde:

A = Pérdida de suelo medio anual (t/ha/año).

R = Factor de erosividad de lluvias (MJ/ha*mm/h).

K = Factor de erodabilidad del suelo (t/ha.MJ*ha/mm*h).

L = Factor de longitud de la pendiente.

S = Factor de la inclinación de la pendiente.

C = Factor de manejo de cobertura vegetal.

P = Factor de prácticas de conservación de suelos.

De acuerdo con Meinen y Robinson (2021; p. 11) para garantizar que los resultados obtenidos por medio de USLE sean eficientes se deben tomar buenas elecciones de diseño, es decir,

² Universal Soil Loss Equation

que las metodologías para obtener los datos de entrada de USLE estén respaldadas para su aplicación en Sistemas de Información Geográfica (SIG³).

Tabla 1. *Clasificación de erosión hídrica.*

CLASES DE EROSIÓN	PÉRDIDA DE SUELO (t/ha/año)
Leve	< 10
Moderada	10 – 50
Alta	50 – 200
Muy alta	> 200

Fuente: FAO-PNUMA-UNESCO (1980), recuperado de Hernando y Romana (2015).

2.1.1.1. FACTOR DE EROSIVIDAD DE LLUVIAS.

La erosión del suelo es un proceso mecánico que requiere de bastante energía. Gran parte de esta energía se obtiene de la energía cinética producida por la caída de las gotas de lluvia sobre el suelo a una determinada intensidad (Wischmeier y Smith, 1958; p. 285).

El concepto de erosividad de lluvias presentado por Hudson (1971) y Wischmeier y Smith (1978) describe la erosividad como una interacción entre la energía cinética de las gotas de lluvia y la superficie del suelo. Esto puede resultar en un mayor o menor grado de desprendimiento y transporte cuesta abajo de partículas de suelo según la cantidad de energía e intensidad de lluvia, considerando el tipo de suelo, las condiciones topográficas, el manejo del suelo y la cobertura vegetal (da Silva, 2004; p. 252).

Asimismo, la energía cinética de una tormenta se encuentra en función de la cantidad de lluvia y de la intensidad de los componentes de la tormenta. El tamaño medio de las gotas de lluvia aumenta con la intensidad, y la velocidad de caída libre de las gotas de agua aumenta a medida que se incrementa el tamaño de las gotas. Es decir, que la energía de la lluvia está directamente relacionada con la intensidad de la misma (Wischmeier y Smith, 1978; p. 5).

³ Geographic Information System

Tabla 2. *Clasificación de la erosividad de lluvias.*

CLASIFICACIÓN	EROSIVIDAD ANUAL (MJ/ha*mm/h)
Baja	$R \leq 2452$
Media	$2452 < R \leq 4905$
Media - Alta	$4905 < R \leq 7357$
Alta	$7357 < R \leq 9810$
Muy alta	$R > 9810$

Fuente: Carvalho (1994), citado en da Silva (2004).

2.1.1.2.FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO.

La erodabilidad o factor K, es una medida de la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y transporte de sus partículas, la cual está influenciada por numerosas propiedades, tales como textura, estabilidad estructural, contenido de materia orgánica, mineralogía de arcillas y constituyentes químicos, entre otros (Ramírez Ortiz et al., 2009; p. 59).

Para calcular la erodabilidad del suelo, se han investigado muchas estrategias con el propósito de comprender la erodabilidad del suelo, incluidas mediciones de propiedades físicas y químicas del suelo, mediciones instrumentales, modelos matemáticos y métodos gráficos. Aunque la medición directa de la erosión del suelo de parcelas grandes bajo lluvia natural durante largos periodos de tiempo puede proporcionar estimaciones precisas de la erosión del suelo; es un método costoso y que requiere mucho tiempo. Por lo cual, los modelos matemáticos son los más utilizados para la estimación de la erodabilidad del suelo (Zhao et al., 2018; p. 1507).

Algunos de los modelos de estimación de la erodabilidad del suelo más conocidos son el modelo del nomograma modificado (M-NOMO) establecido por Wischmeier y Smith (1978); el modelo de erosión – impacto de productividad (EPIC) que fue desarrollado por Sharpley y Williams (1990); los modelos de ajuste no lineal que utilizan las propiedades físicas y químicas del suelo, desarrollados por Torri et al. (1997) y Wang et al. (2012).

2.1.1.3. FACTOR DE LONGITUD Y GRADO DE PENDIENTE.

El factor de longitud y grado de pendiente es el que tiene la mayor influencia en el modelado de pérdida de suelo, por lo que es importante que sea determinado con precisión. El factor LS conlleva la mayor incertidumbre en términos de modelado de pérdida de suelo, depende

de la topografía e influye en la distribución del agua y la dirección de flujo, por lo que un modelo topográfico preciso es esencial para las predicciones de pérdida de suelo cuando se utiliza los modelos de USLE / RUSLE. El factor LS se deriva del parámetro de inclinación, S, y del parámetro de longitud de pendiente, L; y generalmente se determina mediante DEM rasterizados con el apoyo de técnicas GIS (Kruk et al., 2020; p. 2).

(Guanca, 2010) respecto al factor topográfico menciona que las superficies con pendientes bajas presentan una erosión nula o ligera, mientras que en áreas con pendientes elevadas la erosión puede ser moderada o alta.

2.1.1.4.FACTOR DE MANEJO DE COBERTURA VEGETAL.

La cobertura vegetal, después de la topografía, es el segundo factor más importante que controla el riesgo de erosión del suelo. En USLE, el efecto de la cobertura vegetal se incorpora en el factor de gestión de la cobertura (factor C). Se define como la relación entre la pérdida de suelo de la tierra cultivada en condiciones específicas y la pérdida correspondiente del barbecho continuo con labranza limpia. El valor del factor C depende principalmente del porcentaje de cobertura vegetal y la etapa de crecimiento. El efecto de la cobertura vegetal, los residuos de cultivos y las operaciones de labranza también deben tenerse en cuenta en el factor C (van der Knijff et al., 1999; p. 21).

La pérdida de suelo está directamente relacionada con la intensificación de los procesos erosivos en paisajes montañosos, estando fuertemente vinculado con la densidad de la cobertura vegetal, representada en el procesamiento de Imágenes de Satélite por el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Pacheco et al., 2014).

Tabla 3. *Clasificación del Factor C en función de los tipos de cultivos y prácticas agrícolas.*

USO DEL SUELO	FACTOR C
Zonas industriales o comerciales.	1
Zonas de extracción minera.	1
Viñedos.	0,525
Tierras de labor seco.	0,435
Terrenos regados permanentemente.	0,507
Terrenos principalmente agrícolas con vegetación natural.	0,435
Tejido urbano discontinuo.	1

Tejido urbano continuo.	1
Pastizales naturales.	0,130
Olivares.	0,525
Mosaico de cultivos.	0,435
Matorrales esclerófilos.	0,153
Matorral boscoso en transición.	0,153
Lámina de agua.	0
Frutales.	0,525
Espacios con vegetación escasa.	0,900
Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes.	0,435
Bosque mixto (inferior al 2%).	0,186
Bosque mixto (> 2% hasta 7%).	0,086
Bosque mixto (superior al 7%).	0,041
Bosque de frondosas (inferior al 2%).	0,186
Bosque de frondosas (> 2% hasta < 7%).	0,086
Bosque de frondosas (superior al 7%).	0,041
Bosque de coníferas (inferior al 2%).	0,186
Bosque de coníferas (> 2% hasta < 7%).	0,086
Bosque de coníferas (superior al 7%).	0,041

Fuente: Pacheco et al. (2014).

Tabla 4. *Correlación entre el NDVI y el Factor C del modelo USLE.*

NDVI		FACTOR C
Datos Calculados por medio de Imágenes Satelitales.	≥ 0	1
	0,1	0,9
	0,2	0,7
	0,3	0,4
	0,4	0,2
	0,5	0,1
	0,6	0,001
	0,7	0,0001
Información Teórica.	0,8	0,00001
	0,9	0,000001
	1	0

Fuente: Pacheco et al. (2014).

2.1.1.5. FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS.

Entre los factores de USLE y RUSLE, el factor de práctica de apoyo (Factor P) es importante porque tiene efectos significativos en la reducción de la erosión del suelo. El factor P se define como la relación entre la pérdida de suelo con una práctica de apoyo específica y la pérdida correspondiente con labranza ascendente y descendente. El factor P tiene en cuenta

las prácticas de control (contorneado, cultivo en franjas y terrazas) que afectan el potencial de erosión de la escorrentía al modificar el patrón de flujo, la pendiente o la dirección de la escorrentía superficial y al reducir la velocidad, la cantidad y la tasa de escorrentía. en la superficie del suelo. Cuanto menor sea el valor del factor P, mejor será la práctica para controlar la erosión del suelo (Xiong et al., 2019; p. 392).

2.1.2. BATIMETRÍA.

Se conoce con el nombre de batimetría al proceso de medición de los sedimentos ya decantados, lo cual muestra la perspectiva más real del transporte y azolvamiento de sólidos hacia un embalse. Dicho proceso consiste básicamente en cuantificar los sedimentos totales, cuando estos ya han sido depositados durante un tiempo relativamente largo. Esta medición directa resulta ser una forma más exacta e inequívoca, permitiendo determinar el efecto de estratificación, la densidad resultante, la calidad mineralógica de las deposiciones, la capacidad de atrape y la distribución longitudinal de los sedimentos (Jom Morán, 2010; p. 11).



Figura 1. *Equipo para la medición batimétrica Z – Boat.*

Fuente: Perales Avilés y Zenteno Gareca (2021).

2.1.3. VIDA ÚTIL DE UN EMBALSE.

La sedimentación en embalses ha sido metódicamente estudiada desde la década de 1930, pero la Ingeniería de presas históricamente se ha enfocado en cuestiones estructurales, prestando relativamente poca atención al problema de la acumulación de sedimentos (Morris y Fan, 1998; p. 2.13).

Los embalses se han diseñado tradicionalmente sobre la base del concepto de "vida del embalse". Bajo este paradigma, el diseñador estima la tasa de flujo de sedimentos y proporciona capacidad de almacenamiento para 50 a 100 años de acumulación de sedimentos, posponiendo así el problema de la sedimentación. Este enfoque no solo ignora el problema a largo plazo de la pérdida de almacenamiento, sino que en muchos sitios los problemas de sedimentación están ocurriendo mucho antes de lo anticipado, porque se subestimó el rendimiento de sedimentos o debido al aumento de rendimiento de sedimentos resultante del cambio de uso de la tierra. Este enfoque tradicional también puede no anticipar la sedimentación rápida en áreas que interfieren con los usos recreativos, la función de toma, etc. (Morris, 2014; p. 280).

Strand y Pemberton (1987; p. 529) mencionan que todos los embalses formados por presas en cursos de agua naturales están sujetos a algún grado de afluencia y deposición de sedimentos. El problema al que se enfrenta el planificador del proyecto es estimar la tasa de deposición y el periodo de tiempo antes de que el sedimento interfiera con el funcionamiento útil de un reservorio. En el momento del diseño, se deben tomar las disposiciones necesarias para un almacenamiento suficiente de sedimentos en el reservorio para no perjudicar las funciones del reservorio durante la vida útil del proyecto o durante el periodo de análisis económico.

2.2. MARCO CONCEPTUAL.

2.2.1. CUENCA HIDROGRÁFICA.

Las cuencas hidrográficas se definen como espacios territoriales delimitados por un parteaguas (partes más altas de montañas) donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y/o ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado también punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (formando una cuenca denominada endorreica) o el mar (llamada cuenca exorreica). En estos territorios hay una interrelación e interdependencia espacial y temporal entre el medio biofísico (suelo, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación (tecnología y/o mercados) y las instituciones (organización social, cultura, reglas y/o leyes) (Cotler et al., 2013; p. 7).

2.2.1.1.PARTES DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA.

La composición de una cuenca hidrográfica puede variar en función al criterio que se tome en cuenta (Fig. 2), tal como expresa World Visión (2004; p. 11).



Figura 2. Partes de una cuenca hidrográfica.

Fuente: World Visión (2004).

- **Criterio 1 Altitud:** Si el criterio utilizado es la altura, se podrían distinguir la parte alta, media y baja, sucesivamente, en función de los rangos de altura que tenga la cuenca. Si la diferencia de altura es significativa y varía de 0 a 2500 m.s.n.m., es factible diferenciar las tres partes, si esta diferencia es menor, por ejemplo, de 0 a 1000 m.s.n.m., posiblemente sólo se distinguen dos partes, y si la cuenca es casi plana será menos probable establecer partes. Generalmente este criterio de la altura se relaciona con el clima y puede ser una forma de establecer las partes de una cuenca.
- **Criterio 2 Topografía:** Otro criterio muy similar al anterior es la relación con el relieve y la forma del terreno, las partes accidentadas forman las montañas y laderas, las partes onduladas, casi planas y planas, forman los valles; y finalmente otra parte es la zona por donde discurre el río principal y sus afluentes, a esta se le denomina cauce.

2.2.1.2. DIVISIÓN DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA.

La cuenca hidrográfica puede dividirse en espacios definidos por la relación entre el drenaje superficial y la importancia que tiene con el curso principal. El trazo de la red hídrica es fundamental para delimitar los espacios en que se puede dividir la cuenca. A un curso principal llega un afluente secundario, este comprende una subcuenca. Luego al curso principal de una subcuenca, llega un afluente terciario, este comprende una microcuenca, además están las quebradas que son cauces menores (World Visión, 2004; p. 12).

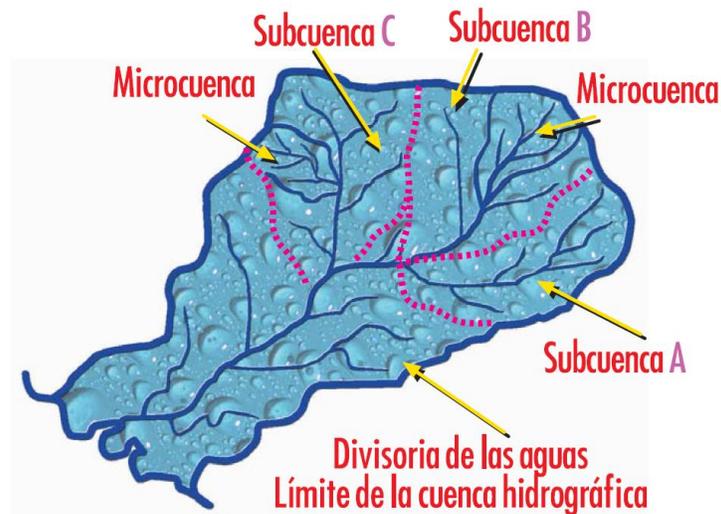


Figura 3. División de una cuenca hidrográfica.

Fuente: World Visión (2004).

2.2.1.3. CLASIFICACIÓN DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA.

La clasificación de las cuencas hidrográficas en función al orden de los ríos y/o al tamaño del área que encierran se clasifican en: cuencas, subcuencas y microcuencas.

Tabla 5. Clasificación de las cuencas, subcuencas y microcuencas.

UNIDAD	NÚMERO DE ORDEN	ÁREA (km ²)
Microcuenca	1, 2, 3	10 – 500
Subcuenca	4, 5	500 – 2000
Cuenca	6, 7 o más	Más de 2000

Fuente: Faustino y Jiménez (2000).

2.2.1.4.2. SEDIMENTACIÓN EN EMBALSES.

Como expresa Carrión (2004; p. 26) para el aprovechamiento de los cursos de agua se requiere, en muchos casos, de la construcción de presas de embalse. El objeto de éstas es regular el caudal del río mediante la creación de un lago artificial que proporciona un volumen de almacenamiento, obteniendo así el agua en la cantidad y oportunidad requerida para su uso en un proyecto.

Una presa construida en el lecho del río ocasiona que aguas arriba se produzca sedimentación (agradación) y aguas abajo, erosión (degradación).

Este tipo de presa actúa como una trampa de sedimentación, y la mayor parte de los sólidos transportados por la corriente quedan retenidos en el embalse, disminuyendo así el volumen de almacenamiento.

Por tal razón se considera en el diseño un volumen de embalse adicional al requerido para satisfacer las necesidades del proyecto, y que sirve para el depósito sedimentado en el embalse. Este volumen que se llenará con el transcurso del tiempo se le conoce generalmente con el nombre de volumen muerto, pero este término es equívoco. Podría decirse para mayor precisión que es el volumen perdido por cota de descarga.

2.2.2. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.

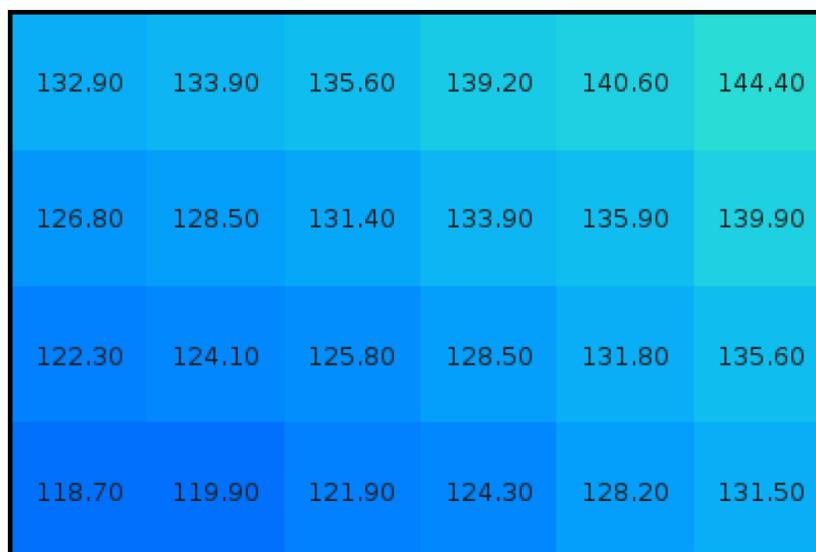
El término Sistema de Información Geográfica (SIG) suele aplicarse a sistemas informáticos orientados a la gestión de datos espaciales que constituyen la herramienta informática más adecuada y extendida para la investigación y el trabajo profesional en Ciencias de la Tierra y Ambientales. Se trata de herramientas complejas, reflejo de la complejidad del objeto de estudio de estas ciencias, fruto de la evolución y fusión de programas de muy distinto tipo que anteriormente se habían utilizado de forma independiente. Esta complejidad ha llevado al nacimiento, a partir del trabajo con SIG, de una nueva disciplina científica, todavía bastante discutida, conocida como Ciencia de la Información Geográfica (Sarría, 2006; p. 5).

2.2.2.1. MODELOS DE REPRESENTACIÓN GEOGRÁFICA.

2.2.2.1.1. MODELO RÁSTER.

En el modelo ráster, la zona de estudio se divide de forma sistemática en una serie de unidades mínimas (denominadas habitualmente celdas), y para cada una de estas se recoge la información pertinente que la describe. Se puede ver esto en detalle en la Figura 5, de manera que los límites de las celdas se hacen patentes y puede además representarse en cada una de ellas su valor asociado.

Aunque la malla de celdas puede contener información sobre varias variables, lo habitual es que trate una única variable. Es decir, que se tenga un único valor para cada una de las celdas. La división sistemática del ráster se efectúa en función de algún patrón definido, por lo cual los valores de las celdas presentan una relación intrínseca entre sí mismas (Olaya, 2020; p. 66).



132.90	133.90	135.60	139.20	140.60	144.40
126.80	128.50	131.40	133.90	135.90	139.90
122.30	124.10	125.80	128.50	131.80	135.60
118.70	119.90	121.90	124.30	128.20	131.50

Figura 5. Celdas de una malla ráster con sus valores asociados.

Fuente: Olaya (2020).

2.2.2.1.2. MODELO VECTORIAL.

En los modelos vectoriales no existen unidades fundamentales que dividen la zona recogida, sino que se recoge la variabilidad y características de esta mediante entidades geométricas, para cada una de las cuales dichas características son constantes. La forma de estas entidades (su frontera), se codifica de modo explícito.

El modelo vectorial modeliza el espacio geográfico mediante una serie de primitivas geométricas que contienen los elementos más destacados de dicho espacio. Estas primitivas son de tres tipos: puntos, líneas y polígonos (Olaya, 2020; pp. 71-72).

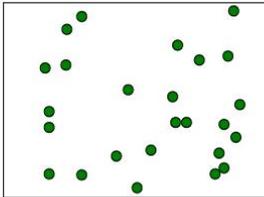
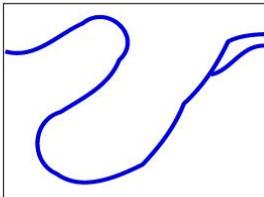
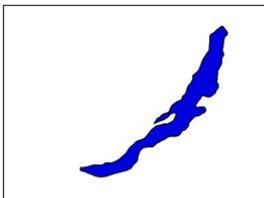
<i>Primitiva</i>	<i>Entidad espacial</i>	<i>Representación</i>	<i>Atributos</i>																								
Puntos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Altura</th> <th>Diámetro Normal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>17.5</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>22</td> <td>45.6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>15</td> <td>27.2</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>19.7</td> <td>36.1</td> </tr> <tr> <td>.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>.</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	ID	Altura	Diámetro Normal	1	17.5	35	2	22	45.6	3	15	27.2	4	19.7	36.1	.			.			.		
ID	Altura	Diámetro Normal																									
1	17.5	35																									
2	22	45.6																									
3	15	27.2																									
4	19.7	36.1																									
.																											
.																											
.																											
Líneas			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ancho máx(m)</th> <th>Calado máx(m)</th> <th>Longitud(km)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15</td> <td>4.3</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>6.3</td> <td>3.9</td> <td>5.2</td> </tr> </tbody> </table>	Ancho máx(m)	Calado máx(m)	Longitud(km)	15	4.3	35	6.3	3.9	5.2															
Ancho máx(m)	Calado máx(m)	Longitud(km)																									
15	4.3	35																									
6.3	3.9	5.2																									
Polígonos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Superficie(km)²</th> <th>Profundidad máx(m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>31494</td> <td>1637</td> </tr> </tbody> </table>	Superficie(km) ²	Profundidad máx(m)	31494	1637																				
Superficie(km) ²	Profundidad máx(m)																										
31494	1637																										

Figura 6. Primitivas geométricas en el modelo de representación vectorial.

Fuente: Olaya (2020).

2.2.2.2. SISTEMA DE COORDENADAS.

2.2.2.2.1. COORDENADAS GEOGRÁFICAS.

De acuerdo con Olaya (2020; p. 35) el sistema de coordenadas geográficas es un sistema de coordenadas esféricas mediante el cual un punto se localiza con dos valores angulares:

- **La latitud Φ** , es el ángulo entre la línea que une el centro de la esfera con un punto de su superficie y el plano ecuatorial. Las líneas formadas por puntos de la misma latitud se denominan paralelos y forman círculos concéntricos paralelos al ecuador. Por definición, la latitud es de 0° en el ecuador, que divide el globo en los hemisferios norte y sur.

- **La longitud λ** , es el ángulo formado entre dos de los planos que contienen a la línea de los Polos. El primero es un plano arbitrario que se toma como referencia y el segundo es el que, además de contener a la línea de los polos, contiene al punto en cuestión. Las líneas formadas por puntos de igual longitud se denominan meridianos y convergen en los polos.

2.2.2.2.2. COORDENADAS PROYECTADAS.

El sistema de coordenadas proyectadas es la representación bidimensional de la Tierra sobre una superficie plana. Se basa en un sistema de coordenadas geográficas esféricas o esferoidales y emplea unidades lineales que facilitan la medición de áreas y distancias.

La intersección de las coordenadas X y Y que conforman el sistema de coordenadas proyectadas se denomina el punto origen y a partir del mismo la coordenada en el eje horizontal X puede tomar valores positivos (Este) o negativos (Oeste). Lo mismo ocurre con la coordenada en el eje vertical Y que puede tomar valores positivos (Norte) y negativos (Sur) a partir del mismo punto.

2.2.3. TELEDETECCIÓN.

La teledetección o percepción remota ('Remote Sensing') es una disciplina científica que integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías utilizadas para la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y atmosféricos. Sus principales fuentes de información son las medidas y las imágenes obtenidas con la ayuda de plataformas aéreas y espaciales. Como su nombre indica, la teledetección supone la adquisición de información a distancia, sin contacto directo con el objeto estudiado (López Montecinos, 2019).

2.2.3.1. MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN.

“Los Modelos Digitales de Elevación (DEM⁴) son una categoría de modelos simbólicos que han nacido y se han desarrollado al amparo de las nuevas tecnologías” (Felicísimo, 1994; p. 4).

⁴ Digital Elevation Model

Asimismo, “Los DEM se han definido como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio” (Doyle, 1978, como se cita en Felicísimo, 1994; p. 4).

2.2.3.1.1. SATÉLITE ALOS – PALSAR.

El satélite ALOS fue lanzado en enero del 2006 por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, el satélite es conocido en Japón por el nombre de "DAICHI".

El satélite ALOS estuvo en operaciones desde el 16 de mayo de 2006 hasta el 22 de abril de 2011, recolectó imágenes de Radar en escenas de 50 km * 70 km de todo el planeta en un intervalo de tiempo de aproximadamente 45 días a través de su sensor de Radar de Apertura Sintética (SAR⁵) PALSAR.

Las imágenes PALSAR están disponibles según 3 niveles de procesamiento (Imagen Cruda, Datos comprimidos e Imagen expandida) con una resolución radiométrica de 16 bits (GeoSpatial, 2013).

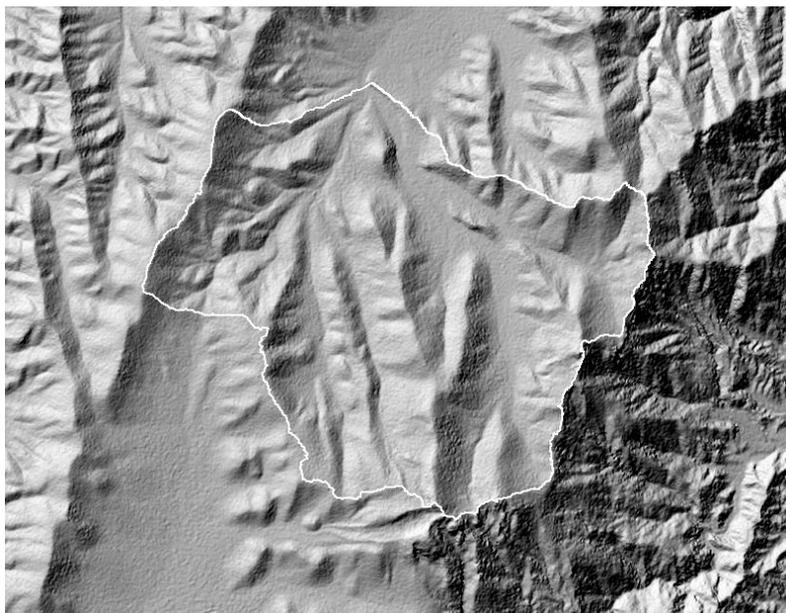


Figura 7. *Imagen satelital ALOS – PALSAR del Municipio El Puente, Provincia Méndez, Tarija.*

Fuente: *Alaska Satellite Facility* (2010).

⁵ Synthetic Aperture Radar

2.2.3.2.SISTEMAS SATELITALES.

Una imagen satelital es el resultado que se obtiene del capturar la radiación emitida o reflejada por la superficie de la tierra mediante un sensor colocado a bordo de un satélite artificial. Existen diferentes tipos de imágenes satelitales las cuales poseen varias características como colores, resolución, elevación, etc. En si la calidad de la fotografía tomada depende del instrumento utilizado y de la altitud.

La desventaja de las imágenes satelitales es que cuando la imagen a cubrir es extensa el procesamiento es bastante largo, además la imagen depende notablemente de la calidad de sensor que se esté utilizando, la imagen siempre se ve influenciada por las condiciones meteorológicas al momento de realizar la toma (Sánchez, 2012; p. 10).

2.2.3.2.1. SATÉLITE LANDSAT – 8.

Como menciona Bravo (2020; p. 31) el satélite LANDSAT – 8, fue lanzado el 11 de febrero de 2013, es un satélite óptico de resolución media cuyo objetivo es proporcionar información para actividades relacionadas con la agricultura, la educación, los negocios, la ciencia y también en el ámbito estatal.

Este satélite contiene dos sensores: Sensor operacional de imágenes de tierra (OLI) y un Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS).

OLI está formado por nueve bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas. Con las imágenes de resolución espacial, que oscilan entre los 15 y los 30 m.

TIRS está compuesto por dos bandas espectrales, las cuales detectan infrarrojos térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra.

Tabla 6. Las bandas que componen las imágenes LANDSAT – 8.

BANDAS	SENSOR	LONGITUD DE ONDA (µm)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)
Banda 1 – Costero aerosol	OLI	0,43 – 0,45	30
Banda 2 – Azul	OLI	0,45 – 0,51	30
Banda 3 – Verde	OLI	0,53 – 0,59	30
Banda 4 – Rojo	OLI	0,64 – 0,67	30
Banda 5 – Infrarrojo Cercano (NIR)	OLI	0,85 – 0,88	30
Banda 6 – Onda Corta Infrarroja (SWIR 1)	OLI	1,57 – 1,65	30
Banda 7 – Onda Corta Infrarroja (SWIR 2)	OLI	2,11 – 2,29	30
Banda 8 – Pancromática	OLI	0,50 – 0,68	15
Banda 9 - Cirrus	OLI	1,36 – 1,38	30
Banda 10 – Infrarrojo Térmico 1	TIR	10,6 – 11,19	100
Banda 11 – Infrarrojo Térmico 2	TIR	11,50 – 12,51	100

Fuente: USGS (2017).

2.3.MARCO ESPACIAL.

La cuenca delimitada por la presa “El Molino” está localizada en el municipio El Puente, provincia Eustaquio Méndez, colindando con los límites de las provincias de Avilés y Cercado, del departamento de Tarija, Bolivia. La presa se encuentra ubicada en coordenadas latitud sur 21°32'11" y longitud oeste 64°59'47". Asimismo, la cuenca es parte de la cuenca del Río Tomayapo, que a su vez forma parte de la cuenca del Río Pilcomayo.



Figura 8. Ubicación geográfica del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

2.4. MARCO TEMPORAL.

El periodo de tiempo que abarca el estudio de la producción de sedimentos en la presa “El Molino” está delimitado por el año 2015 en el cual la presa inicio sus operaciones y el año 2019, siendo el año en el que el Centro de Investigación del Agua (CIAGUA) realizó un levantamiento batimétrico en el embalse.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.

3.1.TIPO DE INVESTIGACIÓN.

La investigación es de carácter exploratorio debido a que involucra el estudio de la cuenca delimitada por la presa “El Molino” que no cuenta con estudios previos relacionados a los procesos de erosión de suelos y sedimentación. Asimismo, es de carácter descriptivo al ser necesario identificar y describir cómo actúan los factores del modelo USLE en el área de estudio.

3.2. MATERIALES E INFORMACIÓN.

- **MATERIALES.**
 - Software ArcGIS 10.5.
 - Software QGIS 3.16.
 - Google Earth.
 - Microsoft Excel.
 - GPS.
 - Pala.
 - Picota.
- **INFORMACIÓN.**
 - Modelo Digital de Elevación ALOS – PALSAR.
 - Imágenes LANDSAT – 8.
 - Base de datos de estaciones meteorológicas (SENAMHI).

3.3.MÉTODO DE INVESTIGACIÓN.

El método de investigación que se hará uso para realizar el estudio es el método analítico, por el cual se procederá a determinar cada uno de los factores del modelo USLE por separado y de manera ordenada. Empleando para ello, los modelos mencionados en la bibliografía consultada.

3.4.VARIABLES.

- **VARIABLES INDEPENDIENTES:** Los factores que propone el modelo USLE.
- **VARIABLES DEPENDIENTES:** La determinación de la tasa de erosión, aporte de sedimentos y vida útil de la presa.

3.5. POBLACIÓN DE ESTUDIO.

La población de estudio es la cuenca delimitada por la presa “El Molino” con un área de 119,35 km² de extensión, ubicada al sur de la provincia Méndez, del departamento de Tarija.

3.6. ÁREA DE ESTUDIO.

3.6.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PRESA.

El proyecto de la presa “El Molino” fue planificado por la Prefectura del Departamento de Tarija dentro del marco del Plan Boliviano de Lucha contra la Pobreza. Por lo cual, se contrató los servicios de la Asociación Accidental CEP para su diseño.

El diseño de la presa fue efectuado el año 2004 y empezó a operar el año 2015. Es una presa de gravedad y está fabricada con hormigón compactado con rodillo (HCR).

La documentación y las especificaciones técnicas de la presa se encuentran en el Diseño Final Presa El Molino (2004).

Tabla 7. Especificaciones técnicas de la presa “El Molino”.

Cota de coronamiento	3550,00	[m.s.n.m.]
Nivel de aguas extraordinarios (N.A.M.E.)	3549,02	[m.s.n.m.]
Nivel de aguas normales (N.A.N.)	3547,00	[m.s.n.m.]
Longitud de coronación	287,25	[m]
Ancho de coronación	3,00	[m]
Altura de la presa	17,00	[m]
Resistencia característica del hormigón	21,00	[MPa]
Resistencia característica del acero	420,00	[MPa]
Obras de toma	4	[unidades]
Descargadores de fondo	4	[unidades]
Aliviadero de crecidas	1	[unidad]
Cámaras Rompe Presión	7	[unidades]
	Válvulas de limpieza DN 100	
Cámaras de Derivación	7	[unidades]
	Válvulas de derivación DN 200	

Fuente: Diseño Final Presa El Molino (2004).

3.6.2. CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA.

De acuerdo con el clima, la zona de montaña y al tipo de suelo; los cultivos más característicos que se pueden encontrar en la cuenca se pueden observar en la Tabla 8.

Tabla 8. *Cultivos característicos de la cuenca delimitada por la presa “El Molino”.*

	
1) Cultivo de cebada (<i>Hordeum vulgare</i>).	2) Cultivo de haba (<i>Vicia faba</i>) en temporada de cosecha.
	
3) Cultivo de manzanilla (<i>Chamaemelum nobile</i>).	4) Cultivo de papa (<i>Solanum tuberosum</i>).

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.1. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS.

De acuerdo con sus características morfométricas (Tabla 9) la cuenca presenta un tiempo de concentración de 1,89 horas, con una baja densidad de drenaje y en función a la red hídrica y según el método de Strahler se clasifica como una cuenca de orden 4.

El mapa del orden de los ríos se muestra en el Anexo 1.

Tabla 9. *Parámetros morfométricos generales de la cuenca delimitada por la presa “El Molino”.*

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	VALOR
SUPERFICIE		
Área	km ²	119,35
Perímetro	km	66,99
Área del espejo de agua del embalse	km ²	0,32
Área de aporte de sedimentos	km ²	119,03
Longitud de la cuenca	km	17,35
COTAS		
Cota máxima	m.s.n.m.	4661
Cota mínima	m.s.n.m.	3574
CENTROIDE		
X centroide	m	294404,67
Y centroide	m	7610846,04
Z centroide	m.s.n.m.	4204
ALTITUD		
Altitud media	m.s.n.m.	4204
Altitud más frecuente	m.s.n.m.	3873
Altitud de frecuencia media (1/2)	m.s.n.m.	3961,21
PENDIENTE		
Pendiente promedio de la cuenca	%	29,39
RED HÍDRICA		
Longitud del curso principal	km	16,50
Orden de la red hídrica	-	4
Longitud de la red hídrica	km	146,55
Pendiente promedio de la red hídrica	%	1,63
PARÁMETROS GENERADOS		
Tiempo de concentración	Basso (h)	1,70
	California (h)	1,69
	Carter (h)	1,21
	Giandotti (h)	2,69
	Kirpich (h)	1,68
	Ven Te Chow (h)	2,35
	\bar{t}_c (h)	1,89
Pendiente del cauce principal	m/km	61,34
Factor de forma (Horton)	-	0,40
Coefficiente de Gravielus (I _c)	-	1,73
Coefficiente de Masividad (K _m)	m/km ²	35,22
Densidad de drenaje	km/km ²	0,94

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.2.CURVAS CARACTERÍSTICAS.

La cuenca presenta una altitud máxima de 4661 m.s.n.m. y una altitud mínima de 3574 m.s.n.m. Asimismo, en función al gráfico de la Figura 9 la curva hipsométrica representa a una cuenca que se encuentra en etapa de equilibrio o fase de madurez.

Tabla 10. Datos para la obtención de la curva hipsométrica y la frecuencia de altitudes.

COTAS (m.s.n.m.)		ALTURA PROMEDIO	ÁREA (km ²)		PORCENTAJE (%)		COTA (m.s.n.m.)
MÍNIMA	MÁXIMA		ÁREA ENTRE CURVAS	ÁREA ACUMULADA	ÁREA ENTRE CURVAS	ÁREA ACUMULADA	
3574	3628	3601,00	2,92	119,03	2,45	100,00	3574
3629	3682	3655,50	6,24	116,11	5,25	97,55	3629
3683	3737	3710,00	8,75	109,86	7,35	92,30	3683
3738	3791	3764,50	9,48	101,11	7,97	84,95	3738
3792	3845	3818,50	11,56	91,62	9,71	76,98	3792
3846	3900	3873,00	11,68	80,07	9,81	67,27	3846
3901	3954	3927,50	11,46	68,39	9,63	57,46	3901
3955	4008	3981,50	11,52	56,93	9,68	47,83	3955
4009	4063	4036,00	9,80	45,41	8,23	38,15	4009
4064	4117	4090,50	7,61	35,61	6,39	29,92	4064
4118	4171	4144,50	6,98	28,00	5,86	23,53	4118
4172	4226	4199,00	6,21	21,02	5,22	17,66	4172
4227	4280	4253,50	5,80	14,81	4,88	12,44	4227
4281	4334	4307,50	4,03	9,01	3,39	7,57	4281
4335	4389	4362,00	2,30	4,97	1,93	4,18	4335
4390	4443	4416,50	1,16	2,67	0,97	2,24	4390
4444	4497	4470,50	0,74	1,51	0,63	1,27	4444
4498	4552	4525,00	0,36	0,77	0,30	0,64	4498
4553	4606	4579,50	0,28	0,41	0,23	0,34	4553
4607	4661	4634,00	0,14	0,14	0,11	0,11	4607
						0,00	4661

Fuente: Elaboración propia.

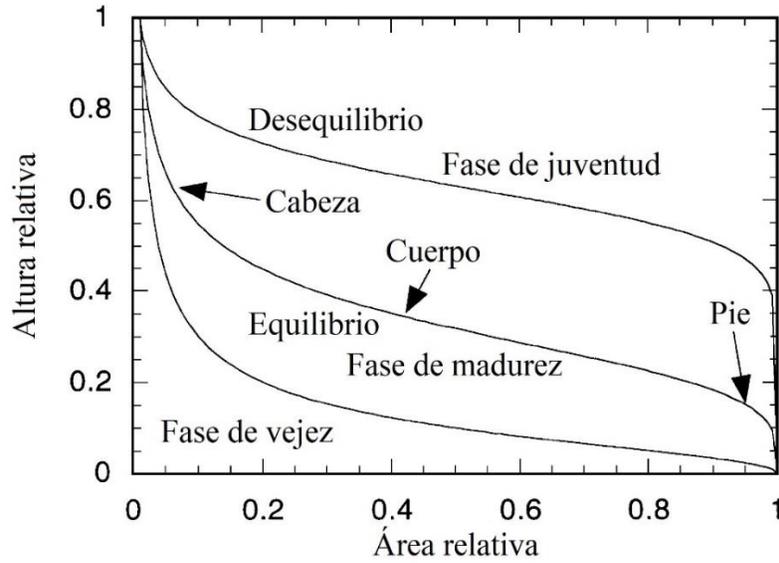


Figura 9. Curvas características del ciclo de erosión de una cuenca.

Fuente: Strahler (1964), recuperado de Willgoose y Hancock (1998).

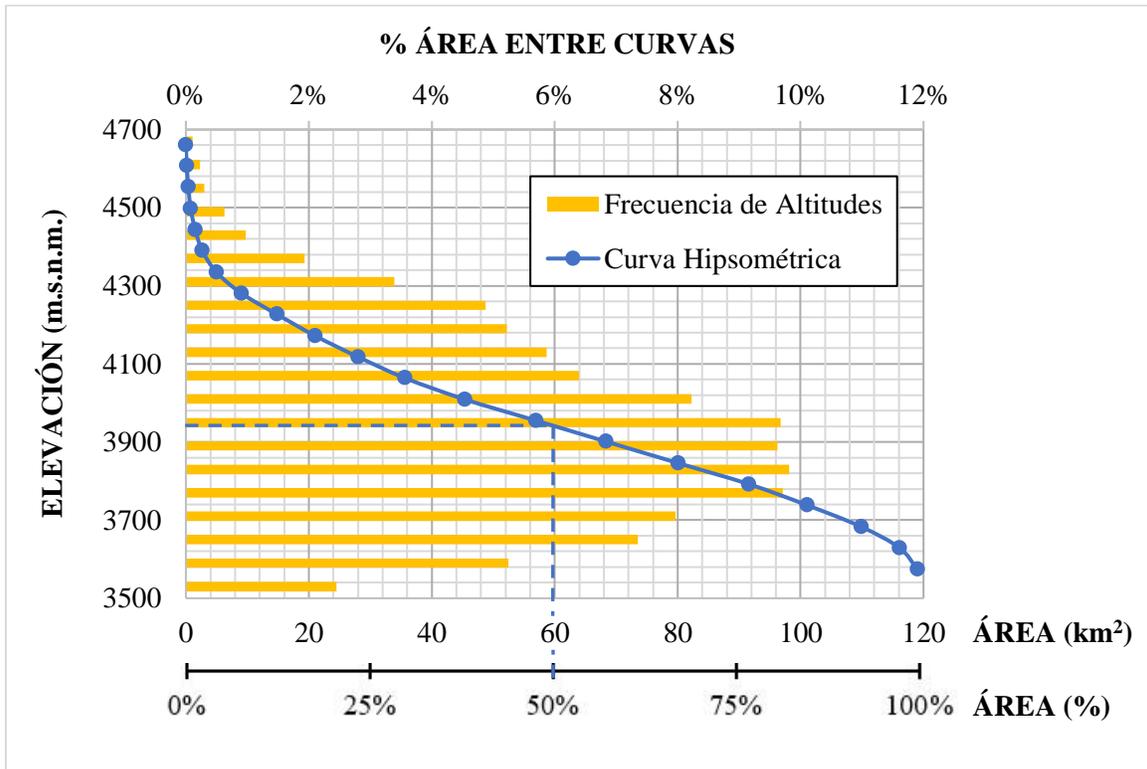


Figura 10. Curva hipsométrica y gráfica de frecuencia de altitudes.

Fuente: Elaboración propia.

3.8.FACTORES DEL MODELO USLE.

3.8.1. EROSIVIDAD DE LLUVIAS.

La erosividad de lluvias es el factor más sensible del modelo USLE y el que determina la magnitud de los valores de tasa de erosión en la cuenca.

Para el análisis del factor de erosividad de lluvias se seleccionó solo a la estación climatológica Campanario por ser la única estación consistente próxima a la cuenca y que cuenta con un amplio registro de datos meteorológicos.

Tabla 11. *Datos de precipitación de la estación Campanario.*

ALTURA DE PRECIPITACIÓN (mm)													
Estación: CAMPANARIO							Lat. S.: 21° 30' 45"						
Provincia: MENDEZ							Long. W.: 64° 58' 32"						
Departamento: TARIJA							Altura: 3460 m.s.n.m.						
AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	Total
1989	55,0	50,5	23,1	23,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,6	20,2	60,0	248,0
1990	81,4	65,5	30,3	9,2	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	16,2	49,0	119,8	372,8
1991	107,7	81,4	41,4	7,1	0,0	0,0	0,0	3,2	11,3	16,8	24,3	42,7	335,9
1992	108,0	58,8	25,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	6,4	24,2	161,6	384,4
1993	81,3	58,8	50,7	4,3	0,0	0,0	0,0	7,3	0,0	36,3	19,0	63,0	320,7
1994	99,1	172,7	35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	11,4	16,4	16,8	37,9	389,3
1995	114,7	60,6	60,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	36,2	5,0	76,0	354,5
1996	141,7	52,5	74,7	17,3	0,0	0,0	0,0	8,4	21,5	0,0	43,8	106,5	466,4
1997	72,3	127,9	84,1	29,6	5,0	0,0	0,0	0,0	32,8	0,0	21,0	32,5	405,2
1998	64,6	44,0	8,2	18,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	40,1	16,7	199,4
1999	62,7	107,5	94,4	21,1	0,0	0,0	0,0	0,0	10,2	33,3	0,3	18,8	348,3
2000	164,7	50,2	83,8	14,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	73,4	390,3
2001	91,9	108,9	69,1	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9	0,0	0,0	30,6	67,4	372,8
2002	28,3	57,7	63,1	2,9	0,0	8,5	0,2	0,0	0,0	80,2	36,7	23,5	301,1
2003	77,3	36,8	59,6	2,4	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	32,4	1,2	44,5	256,4
2004	75,6	54,9	69,7	9,3	0,0	0,0	0,0	10,9	2,0	2,1	14,0	31,5	270,0
2005	84,8	106,1	30,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,6	4,7	20,9	60,9	322,0
2006	130,3	116,5	58,2	19,4	12,7	0,0	0,0	0,0	0,0	59,4	8,7	28,6	433,8
2007	114,7	52,6	74,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	23,9	17,9	59,7	344,3
2008	123,8	77,6	59,7	10,8	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	13,9	34,6	134,2	454,7
2009	87,7	75,5	116,4	47,3	0,7	0,0	0,0	0,0	18,0	0,0	20,5	86,4	452,5
2010	84,6	96,9	19,9	4,1	13,3	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	98,5	319,9

2011	70,9	157,3	28,6	27,3	5,9	0,0	0,0	0,0	0,6	8,2	6,9	77,9	383,6
2012	148,5	134,9	86,1	26,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	10,3	26,0	34,1	466,0
2013	89,2	74,6	6,6	0,0	2,8	2,5	0,0	9,1	0,0	11,1	8,0	47,0	250,9
2014	167,4	81,7	20,3	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43,4	12,2	40,1	366,4
2015	129,9	70,1	69,4	22,4	13,2	0,0	0,0	0,0	0,0	20,7	45,7	12,3	383,7
2016	51,3	44,8	1,6	15,1	0,0	0,0	0,0	5,4	10,0	3,2	8,9	15,6	155,9
2017	101,5	58,4	96,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,5	9,7	36,9	63,6	379,0
2018	128,1	53,6	42,9	14,8	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	5,3	11,0	65,4	325,7
2019	42,7	49,8	36,3	20,1	7,4	0,0	13,7	0,0	0,0	7,6	8,9	48,5	235,0

Fuente: *SISMET - SENAMHI* (2021).

El índice Modificado de Fournier (IMF) propuesto por Arnoldus (1980), como se cita en Keya (2020) es una de las metodologías más extendidas a nivel mundial que se utiliza para la determinación de la erosividad de lluvias en base a los datos de precipitaciones; el IMF está expresado por la siguiente ecuación:

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

Donde:

IMF = Índice Modificado de Fournier (mm).

P_i = Precipitación de cada mes (mm).

P = Precipitación media anual (mm).

El factor de erosividad de lluvias en función al IMF se expresa mediante la siguiente expresión:

$$R = a * IMF^b \quad (3)$$

Donde:

R = Erosividad de lluvias (MJ/ha*mm/h).

a y b = Coeficientes que dependen del modelo de calibración.

Por el motivo de que la erosividad de lluvias es uno de los factores más sensibles para la determinación de la tasa de erosión por medio del modelo USLE, se propondrá el uso de cinco metodologías en función al IMF para su estimación expresados en la Tabla 12.

Tabla 12. Modelos de erosividad de lluvias en función del IMF.

AUTORES	FACTOR R $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{ha}} * \frac{\text{mm}}{\text{h}}\right)$	LUGAR DE CALIBRACIÓN
Arnoldus (1977)	$R = 0,264 * IMF^{1,50}$	Marruecos
ICONA (1988)	$R = 2,56 * IMF^{1,065}$	Badajoz, España
Ferrari et al (2005)	$R = 0,092 * IMF^{1,4969}$	Italia
Irvem et al (2007)	$R = 0,1215 * IMF^{2,4221}$	Turquía
Keya (2020)	$R = 0,676 * IMF^{1,016}$	Kurdistán Iraquí, Irak

Fuente: Mancilla Escobar (2008); Keya (2020).

Asimismo, otra metodología que se puede emplear para la estimación del factor de erosividad de lluvias, de acuerdo con los datos disponibles de la estación Campanario, es mediante el uso de las ecuaciones propuestas por Kirby y Morgan (1980), mencionado en Nívar y Synnott (2000) y Brown y Foster (1987), citado en Panagos et al. (2015).

- Kirby y Morgan (1980):

$$R = \frac{[\sum_{j=1}^n (1,213 + 0,89 * \log I_j) * (I_j * T_j)] * I_{30}}{173.6} \quad (4)$$

Donde:

R = Erosividad de la lluvia (MJ/ha*mm/h).

I_j = Intensidad de lluvia para un intervalo de tiempo específico (mm/h).

T_j = Intervalo de tiempo (h).

I_{30} = Intensidad máxima de una precipitación para una duración de 30 minutos (mm/h).

La energía cinética se encuentra presente en la ecuación 4, siendo el equivalente a una parte del numerador y esta expresada por la fórmula citada en Thorne (1984):

$$E = \sum_{j=1}^n [(1.213 + 0.89 * \log I_j) * (I_j * T_j)] \quad (5)$$

Donde:

E = Energía cinética de la tormenta (kg*m/m²*mm),

- Brown y Foster (1987):

$$R = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{m_j} (E * I_{30})_k \quad (6)$$

Donde:

R = Erosividad de lluvias promedio anual (MJ/ha*mm/h).

E = Energía cinética para un evento de lluvia erosiva (MJ/ha).

I_{30} = Intensidad máxima de una precipitación para una duración de 30 minutos (mm/h).

n = Número de años cubierto por el registro de datos.

j = Año de registro de datos.

m_j = Número de eventos de lluvia erosiva por año.

k = Evento de lluvia erosiva.

Para determinar el factor de erosividad de lluvias por el método de Kirby y Morgan - Brown y Foster se utilizaron los datos de la Tabla 13.

Tabla 13. Datos de precipitación máxima diaria de la estación Campanario.

PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA (mm)													
AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	P _{máxima} (mm)
1989	14,4	14,8	9,2	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15,2	11,8	19,8	19,8
1990	18,6	10,0	13,2	9,2	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	11,4	16,0	28,6	28,6
1991	27,6	22,8	9,8	6,8	0,0	0,0	0,0	3,2	9,8	14,2	10,2	19,6	27,6
1992	14,7	17,8	10,4	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	3,8	17,3	31,0	31,0
1993	31,2	17,4	16,2	4,3	0,0	0,0	0,0	7,3	0,0	13,8	10,7	27,2	31,2

1994	17,9	60,9	24,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,4	7,2	4,1	11,0	60,9
1995	28,1	18,1	15,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	16,0	5,0	12,2	28,1
1996	30,0	14,4	23,0	17,3	0,0	0,0	0,0	8,4	11,2	0,0	11,8	35,2	35,2
1997	15,0	20,2	25,2	11,2	5,0	0,6	0,0	0,0	19,0	0,0	14,7	6,8	25,2
1998	17,6	12,4	3,5	10,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,5	10,3	7,3	17,6
1999	9,8	25,2	27,1	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	10,2	11,8	0,3	7,2	27,1
2000	34,1	9,1	27,4	6,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	19,5	34,1
2001	12,1	16,5	18,1	0,0	0,0	0,0	0,0	4,9	0,0	0,0	23,2	23,4	23,4
2002	9,0	15,6	16,0	1,5	0,0	8,5	0,2	0,0	0,0	33,7	14,8	8,2	33,7
2003	18,2	14,8	15,8	1,8	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	11,7	0,4	33,2	33,2
2004	17,0	12,0	16,8	4,5	0,0	0,0	0,0	3,6	1,4	1,6	6,2	8,2	17,0
2005	22,3	29,6	11,9	5,3	0,0	0,0	0,0	0,0	7,1	2,7	6,9	16,4	29,6
2006	25,0	15,5	15,5	11,0	11,1	0,0	0,0	0,0	0,0	37,7	4,3	15,6	37,7
2007	32,3	19,0	21,8	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	10,9	6,5	17,1	32,3
2008	20,8	15,9	13,4	4,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	13,1	10,2	25,7	25,7
2009	26,5	21,8	20,2	17,1	0,7	0,0	0,0	0,0	18,0	0,0	7,6	26,2	26,5
2010	14,4	22,1	12,2	3,5	8,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	31,8	31,8
2011	15,4	49,7	13,4	9,3	4,5	0,0	0,0	0,0	0,6	5,5	2,4	14,4	49,7
2012	22,7	21,5	29,2	11,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	8,1	7,9	8,1	29,2
2013	13,9	14,8	3,4	0,0	2,8	2,1	0,0	9,1	0,0	10,6	7,0	14,5	14,8
2014	67,1	19,3	9,5	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,5	6,2	15,1	67,1
2015	31,1	40,0	27,2	12,0	9,1	0,0	0,0	0,0	0,0	13,3	33,1	10,1	40,0
2016	25,3	16,2	0,6	12,5	0,0	0,0	0,0	5,4	6,9	2,3	4,1	6,5	25,3
2017	42,0	16,9	27,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,5	9,7	22,4	25,5	42,0
2018	30,5	10,8	12,2	8,4	0,0	0,0	0,0	0,0	4,6	2,8	7,6	23,5	30,5
2019	17,2	19,6	12,2	12,8	7,4	0,0	9,5	0,0	0,0	7,6	6,1	12,6	19,6

Fuente: *SISMET - SENAMHI* (2021).

Con los datos de la Tabla 13 como se menciona en Villón (2006) se puede efectuar la prueba de bondad de ajuste de Smirnov – Kolmogorov para la distribución Gumbel.

Por consiguiente, se realiza una discretización de la precipitación mediante el método de Bell (1969), citado en Manley (1992):

$$P_t^T = (0.21 * \ln T + 0.52) * (0.54 * t^{0.25} - 0.50) * P_1^{10} \quad (7)$$

Donde:

P_t^T = Lluvia de duración [t] y periodo de retorno [T] (mm).

P_1^{10} = Lluvia de duración de 1 hora y periodo de retorno de 10 años (mm).

T = Periodo de retorno (años).

t = Duración de la lluvia (min).

La lluvia de duración de 1 hora y periodo de retorno de 10 años (P_1^{10}) se calcula utilizando la fórmula de Espíldora (1971), citado en Lemus y Navarro (2003):

$$CD_t = \frac{P_{24}^{10}}{P_1^{10}} \quad (8)$$

Donde:

CD_t = Cociente entre la precipitación caída en 24 horas y la precipitación correspondiente en 1 hora, asociadas a un mismo periodo de retorno.

P_{24}^{10} = Precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años (mm).

P_1^{10} = Precipitación máxima en 1 hora para un periodo de retorno de 10 años (mm).

La precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 10 años (P_{24}^{10}) se lo obtiene mediante la distribución probabilística para la distribución de Gumbel.

A partir de los resultados de precipitación que se obtienen por el método de Bell (1969), se estima nuevos valores de precipitación mediante un hietograma de diseño para un periodo de retorno de 10 años, utilizando para ello el método de bloques alternos, que se menciona en Chow et al. (1994).

Seguidamente, en función de los valores de precipitación hallados por el método de bloques alternos, se estima la energía cinética de la ecuación 5 y la intensidad máxima de una precipitación para una duración de 30 minutos (I_{30}).

De igual forma, para determinar el número de eventos de lluvia erosiva (m_j) de la ecuación 6 se utilizaron los datos de precipitación máxima diaria (Tabla 13), días con lluvia (Tabla 14) y los criterios de Renard et al. (1997):

- Precipitaciones menores a 12,7 mm no se consideran eventos erosivos.
- Precipitaciones que presentan un pico de al menos 6,35 mm en 15 minutos se consideran eventos erosivos.

- Precipitación que presenta una altura menor a 1,27 mm con una duración de 6 horas se utiliza para dividir precipitaciones de mayor duración en dos eventos erosivos.

Tabla 14. Datos de días con lluvia de la estación Campanario.

DÍAS CON LLUVIA													
AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
1989	10	9	5	5	0	0	0	0	0	2	3	15	36
1990	13	14	6	1	0	0	0	1	0	5	8	14	41
1991	18	11	14	2	0	0	0	1	3	3	7	5	37
1992	22	7	5	0	0	1	0	0	0	2	6	13	48
1993	11	10	9	1	0	0	0	1	0	3	4	7	40
1994	9	7	2	0	0	0	0	0	2	3	6	6	18
1995	10	5	6	0	0	0	0	0	1	3	1	9	21
1996	13	7	8	1	0	0	0	1	3	0	5	8	37
1997	11	12	11	4	1	1	0	0	4	0	5	6	43
1998	12	11	5	3	0	0	0	0	0	3	10	7	12
1999	19	13	13	3	0	0	0	0	1	5	1	5	26
2000	22	13	12	3	0	0	0	0	0	0	2	10	44
2001	16	16	11	0	0	0	0	1	0	0	3	9	39
2002	8	11	12	2	0	1	1	0	0	6	4	5	33
2003	15	5	17	2	2	0	0	0	0	5	5	10	47
2004	17	14	20	5	0	0	0	6	2	4	5	15	37
2005	16	20	10	4	0	0	0	0	2	2	12	17	53
2006	19	16	13	8	2	0	0	0	0	8	7	12	68
2007	15	11	14	1	0	0	0	0	1	6	9	14	54
2008	24	8	14	5	0	0	0	1	0	3	9	19	68
2009	17	10	18	10	1	0	0	0	1	0	5	11	67
2010	16	14	5	2	2	0	0	0	0	1	0	11	41
2011	18	21	12	5	2	0	0	0	1	3	5	19	70
2012	19	17	16	5	0	0	0	0	1	2	6	10	52
2013	17	18	5	0	1	2	0	1	0	2	3	16	51
2014	17	18	11	3	0	0	0	0	0	11	4	9	55
2015	18	11	17	8	3	0	0	0	0	3	3	6	52
2016	9	11	3	4	0	0	0	1	2	1	5	7	20
2017	8	7	7	0	0	0	0	0	4	1	2	10	34
2018	17	13	10	3	0	0	0	0	1	3	3	7	24
2019	9	6	5	2	1	0	2	0	0	1	3	7	17
PROMEDIO ≈													42

Fuente: *SISMET - SENAMHI* (2021).

En el Anexo 1 se presenta un mapa donde se puede observar la ubicación de la estación Campanario en referencia al área de estudio.

3.8.2. ERODABILIDAD DEL SUELO.

El factor de erodabilidad del suelo representa la susceptibilidad del suelo de ser removido por el impacto de la lluvia o por el flujo de agua superficial. Es decir, el Factor K está en función de las características edáficas del suelo.

Para determinar la erodabilidad del suelo se procedió en primera instancia a identificar las unidades fisiográficas del área de estudio. Para ello se contó con la supervisión y colaboración de L. Espinoza (comunicación personal, 1 de mayo de 2021), quien trabajó previamente en el proyecto de ZONISIG⁶ del año 2001.

Las bases de la identificación fisiográfica fueron las imágenes que se muestran en Google Earth, la combinación de las bandas 2, 6 y 7 de las imágenes LANDSAT – 8, que muestran el comportamiento geológico de la cuenca, y el reconocimiento en campo del lugar.

Debido a que el recorrido en campo no fue extenso se puede considerar a la clasificación fisiográfica realizada como una clasificación no supervisada (Fig. 12).

⁶ Zonificación Agroecológica y Socioeconómica – Departamento de Tarija.

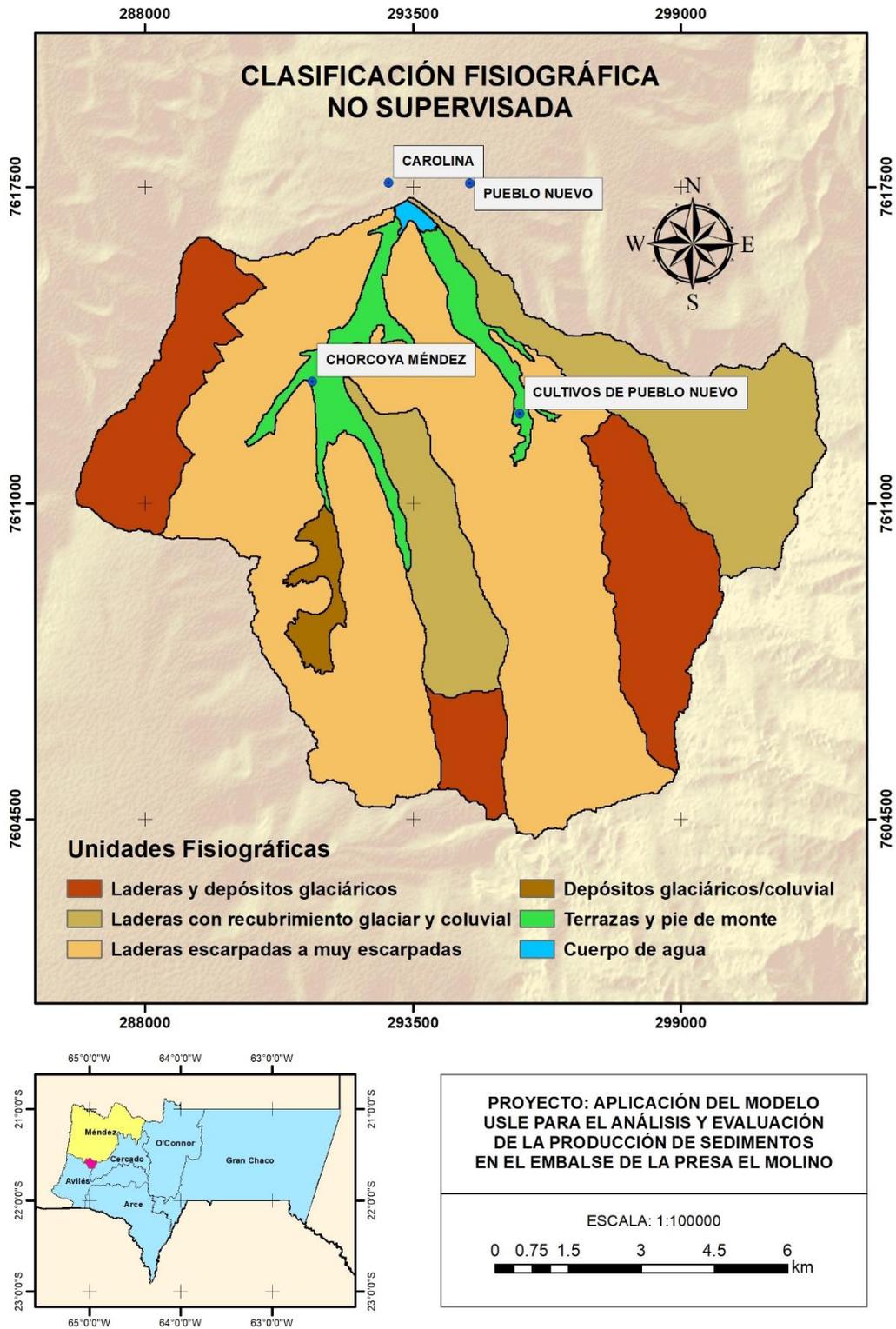


Figura 12. *Mapa de unidades fisiográficas.*
Fuente: Elaboración propia en colaboración con Espinoza (2021).

En referencia al mapa que se muestra en la Fig. 13 se estableció la ubicación de las muestras de suelo que se analizarán en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias y Tecnología de la Universidad Autónoma “Juan Misael Saracho” (FCYT – UAJMS).

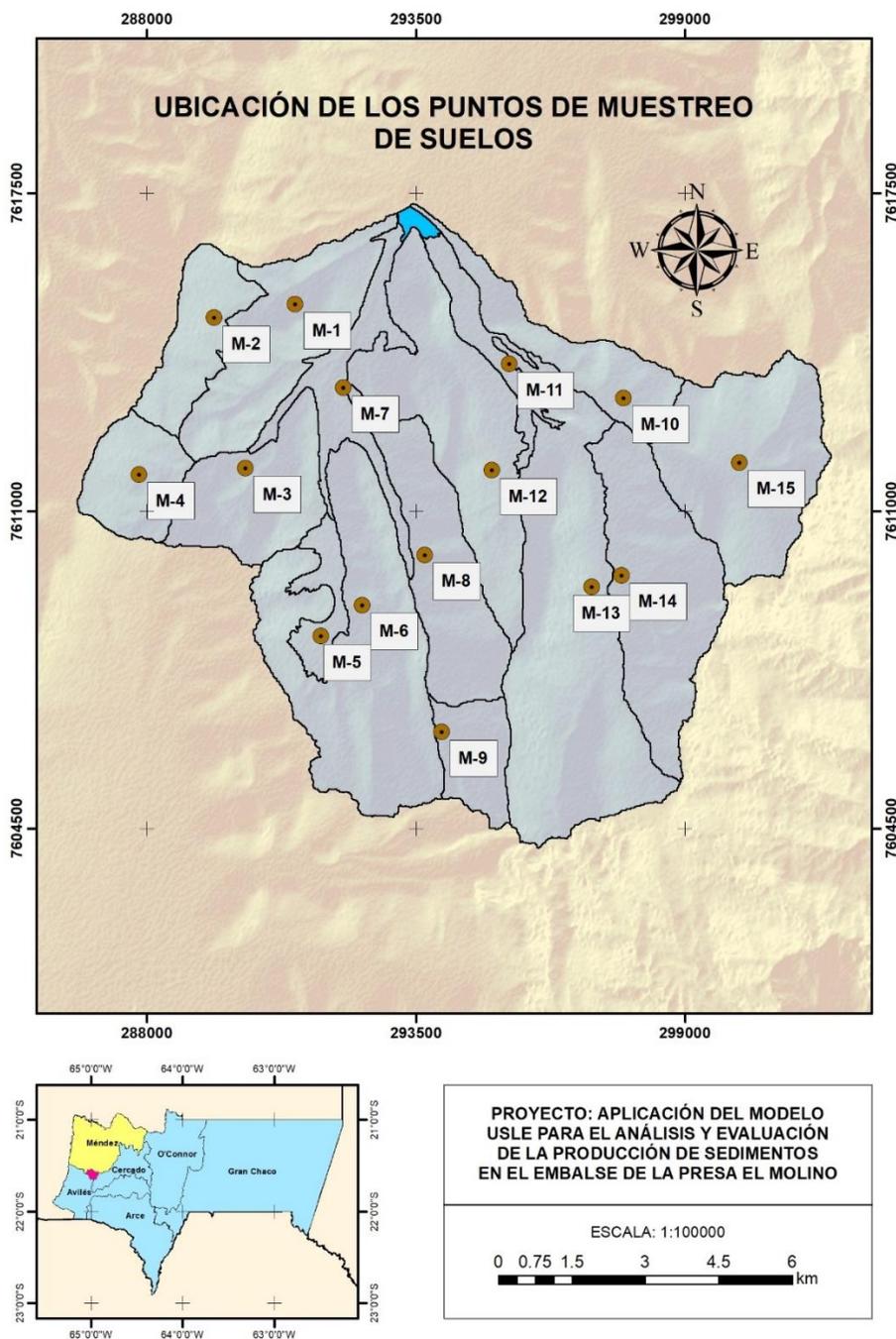


Figura 13. Mapa de muestreo de suelos.

Fuente: Elaboración propia.

Las metodologías de Benítez Ordoñez et al. (2014) y Lizcano Toledo et al. (2017) fueron los principios que se emplearon para la extracción de las muestras de suelo.

Por su parte, las metodologías que se emplearon para estimar el factor K fueron las siguientes:

- Wischmeier y Smith (1978):

$$K = \frac{0,1317}{100} * [2,1 * M^{1,14} * 10^{-4} * (12 - 0M) + 3,25 * (S - 2) + 2,5 * (P - 3)] \quad (9)$$

Donde:

K = Factor de erodabilidad del suelo (t/ha.MJ*ha/mm*h).

OM = Materia orgánica (%).

S = Código de la estructura del suelo.

P = Código de permeabilidad.

$M = (\% \text{ limo} + \% \text{ arena muy fina}) * (100 - \% \text{ arcilla})$

- Sharpley y Williams (1990):

$$K = 0,1317 * \left\{ 0,2 + 0,3 * e^{[-0,0256 * SAN * (1 - \frac{SIL}{100})]} \right\} * \left(\frac{SIL}{CLA + SIL} \right)^{0,3} \quad (10)$$

$$\left(1 - \frac{0,25 * C}{C + e^{(3,72 - 2,95 * C)}} \right) * \left(1 - \frac{0,7 * SN1}{SN1 + e^{(-5,51 + 22,9 * SN1)}} \right)$$

Donde:

K = Factor de erodabilidad del suelo (t/ha.MJ*ha/mm*h).

$$SN1 = 1 - \frac{SAN}{100} \quad (11)$$

SAN = Porcentaje de arena.

SIL = Porcentaje de limo.

CLA = Porcentaje de arcilla.

C = Porcentaje de Carbono Orgánico.

$OM = \text{Materia orgánica (\%)}$.

$$OM = 1,724 * C \quad (12)$$

Para determinar el código de la estructura del suelo y el código de permeabilidad, necesarios para la Ecuación 9, se empleó el triángulo de texturas elaborado por United States Department of Agriculture (USDA, 1977); mencionado en González Naranjo et al. (2012) y la Tabla 15.

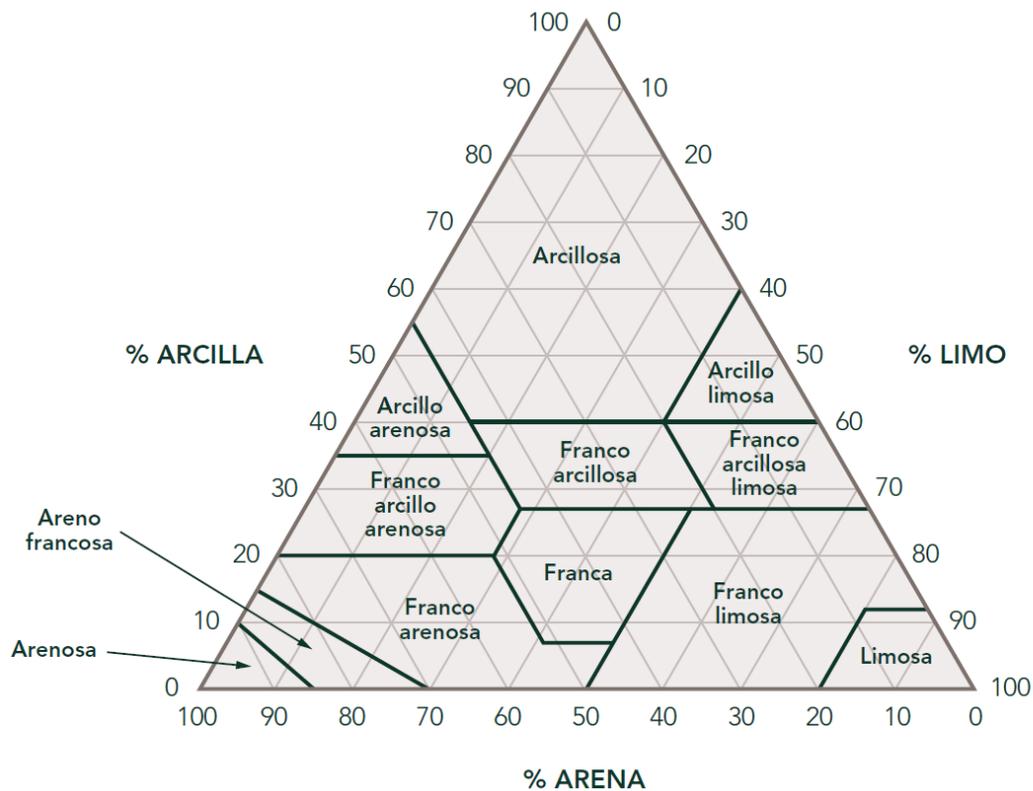


Figura 14. Triángulo de texturas.

Fuente: USDA (1977), recuperado de González Naranjo et al. (2012).

Tabla 15. *Códigos de la estructura y permeabilidad del suelo.*

TEXTURA	CÓDIGO DE ESTRUCTURA	CÓDIGO DE PERMEABILIDAD
Arcillo Limosa, Arcillosa	1	6
Franco Arcillo Limosa, Arcillo Arenosa	2	5
Franco Arcillo Arenosa, Franco Arcillosa	2	4
Franco, Franco Limosa	2	3
Areno Francosa, Franco Arenosa	2; 3; 4	2
Arenosa	3; 4	1

Fuente: Adaptado de Tran et al. (2011).

Para la justificación del número de muestras de suelo se utilizaron los resultados de manera independiente del factor K de Wischmeier y Smith (1978) y Sharpley y Williams (1990) para efectuar para ambas metodologías, como se explica en Villón (2006), la prueba de bondad de ajuste de Smirnov – Kolmogorov para la distribución normal.

Seguidamente, para la justificación se utilizó la fórmula que se menciona en Nanjundeswaraswamy y Divakar (2021):

$$n = \frac{z^2 * \sigma^2}{E^2} \quad (13)$$

Donde:

n = Número de muestras.

z = Área bajo la curva de la distribución normal para un nivel de confianza determinado.

σ = Desviación estándar para la distribución normal.

E = Margen de error.

Para el uso de la ecuación 13 la desviación estándar (σ) y el margen de error (E) deben tener las mismas unidades de medición.

En el Anexo 6 se muestra el procedimiento de la justificación del número de muestras de suelo para las metodologías de Wischmeier y Smith (1978) y Sharpley y Williams (1990).

3.8.3. LONGITUD Y GRADO DE PENDIENTE.

El Factor LS representa la combinación del factor de longitud de la pendiente y el grado de inclinación de la pendiente, característicos de la topografía del área de estudio.

Para determinar el factor LS se empleó el DEM ALOS – PALSAR con una resolución de píxel de 12,5 * 12,5 m. Las ecuaciones que se emplearon en la determinación de este factor se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Métodos para calcular el Factor LS del modelo USLE.

MÉTODO	ECUACIÓN	DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES
Desmet y Govers (1996)	$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j),in} + D^2)^{(m+1)} - A_{(i,j),in}^{(m+1)}}{x_{(i,j)}^m * D^{(m+2)} * 22,13^m}$	<p>A = Área de acumulación de flujo. D = La resolución del ráster. m = Indicador de la longitud de la pendiente, puede obtenerse por la ecuación de McCool. x = Coeficiente que corrige la longitud de la trayectoria del flujo a través de las celdas ráster según la dirección del flujo y se calcula en base a la exposición (para sistemas pixelados se asume el valor de 1).</p>
Griffin et al. (1988)	$L = (m + 1) * \left(\frac{A_s}{22,13}\right)^m$	<p>A_s = Área de acumulación de flujo. m = 0,4 (Rango de valores: 0,2 – 0,6).</p>
McCool et al. (1989)	$L = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^m \quad m = \left(\frac{\beta}{1 + \beta}\right)$ $\beta = \frac{\left(\frac{\sin \theta}{0,0896}\right)}{3 * (\sin \theta)^{0,8} + 0,56}$	<p>λ = Longitud acumulada de la pendiente. θ = Pendiente en radianes.</p>
	<p>Si α < 0,09 S = (10,8 * sin β + 0,03)</p> <p>Si α ≥ 0,09 S = (16,8 * sin β - 0,5)</p>	<p>θ = Pendiente en m/m. β = Pendiente en radianes.</p>
Nearing (1997)	$S = -1,5 + \frac{17}{(1 + e^{(2,3-6,1*\sin \beta)})}$	<p>β = Pendiente en radianes.</p>
Moore y Burch (1986)	$L = \left(\frac{A_s}{22,13}\right)^m$	<p>A_s = Área de acumulación de flujo. m = 0,4 (Rango de valores: 0,4 – 0,6).</p>
Moore y Wilson (1992)	$S = \left(\frac{\sin \beta}{0,0896}\right)^n$	<p>β = Pendiente en radianes. n = 1,3 (Rango de valores: 1,22 – 1,3).</p>

Wischmeier y Smith (1978)	$LS = \left(\frac{\lambda}{22,13}\right)^m * (65,4 * \sin^2 \beta + 4,5 * \sin \beta + 0,0654)$	λ = Longitud acumulada de la pendiente. β = Pendiente en radianes. m = Variable exponencial de longitud - pendiente. $m = 0,5$ si $\beta > 0,05$ $m = 0,4$ si $0,03 < \beta > 0,05$ $m = 0,3$ si $0,01 < \beta > 0,03$ $m = 0,2$ si $\beta < 0,01$
---------------------------	---	--

Fuente: Hrabalíková y Janeček (2017); Kruk et al. (2020).

3.8.4. MANEJO DE COBERTURA VEGETAL.

El factor de manejo de cobertura vegetal representa el efecto de la cubierta vegetal como capa protectora de los procesos erosivos del suelo por el impacto de las gotas de agua durante las precipitaciones y la fuerza del flujo de agua superficial.

Para la determinación del Factor C se emplearon las imágenes del satélite LANDSAT – 8. Para ello, los modelos que se utilizaron fueron los calibrados por van der Knijff et al. (1999) y Pacheco et al. (2014).

- van der Knijff et al. (1999):

$$C = e^{\left(-\alpha * \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)}\right)} \quad (14)$$

Donde:

α y β = Parámetros que determinan la forma de la curva NDVI-C. Para la obtención de mejores resultados, se recomienda utilizar los valores de 2 y 1, respectivamente.

- Pacheco et al. (2014):

$$C = 11,288 * NDVI^5 - 35,785 * NDVI^4 + 40,316 * NDVI^3 - 17,326 * NDVI^2 + 0,5099 * NDVI + 0,9977 \quad (15)$$

Se obtuvo el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para ambos modelos de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (16)$$

Donde:

NIR = Banda de luz infrarroja cercana.

Red = Banda de luz roja visible.

3.8.5. PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS.

El factor prácticas de conservación de suelo refleja la eficacia en el control de la erosión debido a la implantación de diferentes prácticas de cultivo de conservación, como el laboreo a nivel, el cultivo en fajas alternantes y el aterrazado.

Las prácticas de conservación de suelos es uno de los factores más inciertos que constituye al modelo USLE debido a la dependencia de la labor del hombre en los campos de cultivo.

Cuando no se posee información previa que sea de utilidad para identificar el Factor P, se procede a realizar una reclasificación del área de interés en base a la pendiente, de manera que se pueda otorgar valores de factor P a cada pixel que compone el área de la cuenca.

Para el estudio de las prácticas de conservación de suelos del área de aporte de sedimentos de la presa “El Molino” se emplearon los valores tabulados propuestos por Wischmeier y Smith (1978) y Korea Institute of Construction Technology (KICT, 1992); citado en Xiong et al. (2019), que se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. *Factor de Prácticas de Conservación de Suelos.*

PENDIENTE (%)	CULTIVOS EN CONTORNO	CULTIVOS EN FRANJAS	CULTIVOS EN TERRAZAS
Wischmeier y Smith, 1978 (Estados Unidos)			
1 – 2	0,60	0,30	0,12
3 – 8	0,50	0,25	0,10
9 – 12	0,60	0,30	0,12
13 – 16	0,70	0,35	0,14
17 – 20	0,80	0,40	0,16
21 – 25	0,90	0,45	0,18
KICT, 1992 (Korea del Sur)			
0 – 7	0,55	0,27	0,10
7 – 11,3	0,60	0,30	0,12

11,3 – 17,6	0,80	0,40	0,16
17,6 – 26,8	0,90	0,45	0,18
> 26,8	1,00	0,50	0,20

Fuente: Wischmeier y Smith (1978); Xiong et al. (2019).

Además, también se empleó la ecuación formulada por Lombardi Neto (1995), como se cita en Machado de Oliveira et al. (2007):

$$P = \begin{cases} 0,6 & 0 \leq \theta \leq 5\% \\ 0,69947 - 0,08991 * \theta + 0,01184 * \theta^2 - 0,00035 * \theta^3 & 5\% < \theta \leq 20\% \\ 1 & \theta > 20\% \end{cases} \quad (17)$$

Donde:

θ = Pendiente (%).

3.9. APORTE DE SEDIMENTOS.

3.9.1. MODELO USLE.

La cantidad de sedimentos que es transportado en su mayoría por los ríos tributarios a un embalse no es el mismo que el que se produce en su totalidad en el área de aporte. Esta cantidad se puede estimar por medio de dos datos de entrada, la erosión bruta y un factor de entrega que se ajuste a la producción de sedimentos.

El aporte de sedimentos delimitado en una cuenca se puede expresar por medio de la siguiente ecuación:

$$SY = SDR * E \quad (18)$$

Donde:

SY = Aporte de sedimentos en el punto más bajo de un área delimitada (t/año).

SDR = Factor de entrega de sedimentos.

E = Erosión bruta (t/año).

La función del factor de entrega de sedimentos es la de establecer la cantidad de sedimentos que llegan a un embalse en referencia al total de sedimentos producidos en la cuenca que delimita el embalse. Para el actual estudio se ha aplicado el SDR mencionado en USDA (1972), citado en Das y Sarma (2017).

$$SDR = 0,5656 * A^{-0,11} \quad (19)$$

Donde:

SDR = Factor de entrega de sedimentos calibrado para Texas, Estados Unidos.

A = Área de drenaje (km^2).

La erosión bruta se ha calculado utilizando los resultados obtenidos por el modelo USLE expresados en (t/ha/año) y el área de aporte de sedimentos del embalse.

3.9.1.1. PESO ESPECÍFICO DE LOS SEDIMENTOS.

Para obtener el aporte de sedimentos en $\text{m}^3/\text{año}$ se ha utilizado el peso específico del sedimento depositado en el embalse.

Para la determinación del peso específico se ha extraído muestras de sedimento de los puntos de entrada de sedimento al embalse.

El peso específico de los sedimentos se ha calculado mediante la aplicación de las siguientes fórmulas:

- Lane y Koelzer (1943):

$$W_T = (W_1 + K_1 * \log_{10} T) * X_1 + (W_2 + K_2 * \log_{10} T) * X_2 + (W_3 + K_3 * \log_{10} T) * X_3 \quad (20)$$

Donde:

W_T = Peso específico del sedimento después de T años en el embalse (lb/ft^3).

W_1, W_2, W_3 = Peso específico inicial de la arena, limo y arcilla, respectivamente (lb/ft^3).

X_1, X_2, X_3 = Porcentaje de arena, limo y arcilla, respectivamente.

K_1, K_2, K_3 = Constante de consolidación de la arena, limo y arcilla, respectivamente.

T = Periodo en años del funcionamiento del embalse.

Tabla 18. Valores de peso específico y constantes de consolidación para Lane y Koelzer (1943).

OPERACIÓN DEL EMBALSE	ARENA		LIMO		ARCILLA	
	W ₁ (lb/ft ³)	K ₁	W ₂ (lb/ft ³)	K ₂	W ₃ (lb/ft ³)	K ₃
Sedimento siempre sumergido o casi siempre sumergido.	93	0	65	5,7	30	16
Regulado a vaciados moderados.	93	0	74	2,7	46	10,7
Regulado normalmente a vaciados importantes.	93	0	79	1	60	6
Embalse normalmente vacío.	93	0	82	0	78	0

Fuente: Lane y Koelzer (1943).

- Miller (1953), citado en Strand y Pemberton (1982):

$$W_T = W_1 + 0,4343 * K * \left[\frac{T}{T-1} * (\ln T) - 1 \right] \quad (21)$$

Donde:

W_T = Peso específico promedio después de T años de funcionamiento del embalse (lb/ft³).

W_1 = Peso unitario inicial (lb/ft³).

K = Constante de consolidación basada en el tipo de funcionamiento del embalse y los ensayos de tamaño del sedimento.

T = Periodo de funcionamiento del embalse en años.

Tabla 19. Constantes de consolidación para Miller (1953).

OPERACIÓN DEL EMBALSE	VALOR DE K EN UNIDADES INGLESAS (SI)		
	K _{arena}	K _{limo}	K _{arcilla}
Sedimento sumergido.	0	5,7	16
Descargas moderadas.	0	1,8	8,4
Descargas considerables.	0	0	0

Fuente: Miller (1953), recuperado de Strand y Pemberton (1982).

El peso unitario inicial se ha obtenido mediante la siguiente expresión:

$$W_1 = W_c * p_c + W_m * p_m + W_s * p_s \quad (22)$$

Donde:

p_c, p_m, p_s = Porcentajes de arcilla, limo y arena, respectivamente, de la entrada de sedimento.

W_c, W_m, W_s = Peso unitario inicial para la arcilla, limo y arena, respectivamente (lb/ft³).

Tabla 20. *Coefficientes de peso unitario inicial para Miller (1953).*

OPERACIÓN DEL EMBALSE	PESO UNITARIO INICIAL (lb/ft ³)		
	W _c	W _m	W _s
Sedimento sumergido.	26	70	97
Descargas moderadas.	35	71	97
Descargas considerables.	40	72	97
Normalmente vacío.	60	73	97

Fuente: Miller (1953), recuperado de Strand y Pemberton (1982).

Para la composición porcentual del sedimento depositado en el embalse en los métodos de Lane y Koelzer (1943) y Miller (1953) se ha utilizado la clasificación de la Tabla 21.

Tabla 21. *Clasificación del sedimento en función al tamaño de las partículas propuesto por la American Geophysical Union (AGU).*

TIPO DE SUELO	RANGO DE TAMAÑO (mm)
Arena	2 – 0,062
Limo	0,062 – 0,004
Arcilla	Menos de 0,004

Fuente: Strand y Pemberton (1982).

Para la justificación del número de muestras de sedimento se utilizaron los resultados de manera independiente del peso específico de Lane y Koelzer (1943) y Miller (1953) para efectuar para ambos métodos, como se explica en Villón (2006), la prueba de bondad de ajuste de Smirnov – Kolmogorov para la distribución normal.

Por consiguiente, para la justificación se utilizó la ecuación 13.

En el Anexo 1 se muestra el mapa del muestreo de sedimentos y en el Anexo 6 se encuentra la justificación del número de muestras de sedimento para los métodos de Lane y Koelzer (1943) y Miller (1953).

3.9.2. BATIMETRÍA.

La información topográfica y batimétrica del embalse de la presa “El Molino” ha sido proporcionada por el Centro de Investigación del Agua (CIAGUA).

Tabla 22. *Levantamiento Topográfico y Batimétrico del Embalse de la presa “El Molino”.*

AÑO	ENTIDAD
2009	Unidad de Recursos Hídricos de la Prefectura de Tarija
2019	Centro de Investigación del Agua (CIAGUA - UAJMS)

Fuente: Recuperado del Informe Técnico del levantamiento Topobatimétrico del Embalse de la Presa El Molino, CIAGUA (2021).

La producción de sedimentos ha sido estimada para el periodo comprendido desde el año 2015, inicio de operación del embalse, hasta el año 2019, en el cual se ha realizado la batimetría.

Para la obtención del volumen inicial del embalse correspondiente al año 2015 se ha utilizado la topografía efectuada en el año 2009.

Del levantamiento de datos se ha generado la curva de Elevación vs Volumen, para posteriormente estimar la producción de sedimentos que se ha depositado en el embalse.

Tabla 23. *Datos de la curva Elevación vs Volumen.*

COTA (m.s.n.m.)	VOLUMEN Topografía 2009 (m ³)	VOLUMEN Batimetría 2019 (m ³)	DIFERENCIA DE VOLUMEN Topografía-Batimetría (m ³)
3534	3585,07	0,00	3585,07
3535	15058,09	1591,50	13466,59
3536	36595,10	4940,98	31654,12
3537	71521,66	33214,18	38307,48
3538	128063,44	81992,88	46070,56
3539	207147,02	152421,85	54725,17
3540	309177,01	239586,55	69590,46
3541	435077,43	352111,49	82965,94
3542	581763,73	488357,47	93406,26

3543	750450,44	650577,13	99873,31
3544	943010,43	834675,94	108334,49
3545	1161042,33	1047016,19	114026,14
3546	1404320,71	1278890,73	125429,98
3547	1673176,95	1536399,69	136777,26
3548	1970632,90	1821196,47	149436,43
3549	2295995,34	2138036,00	157959,34
3549,3	2402200,00	2237170,38	165029,62
3550	2650207,95	2484305,10	165902,85
3551	3038502,56	2874688,52	163814,04
3552	3462458,09	3302447,04	160011,05

Fuente: CIAGUA (2021).

Elevación vs Volumen

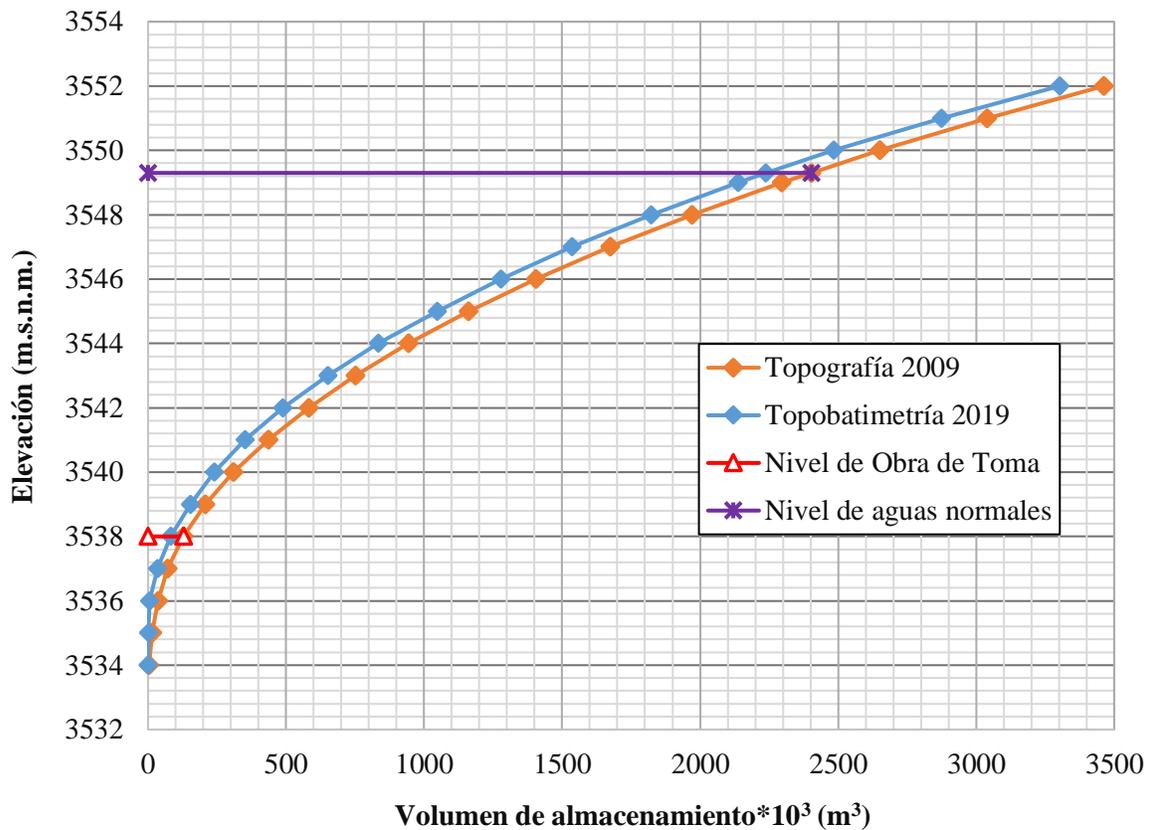


Figura 15. Curva de Elevación vs Volumen de la Topografía y la Topobatimetría.

Fuente: CIAGUA (2021).

Los resultados obtenidos de los levantamientos topográfico y batimétrico se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Resultados obtenidos de la topografía y batimetría.

Volumen Inicial N. A. N. (3549,3 msnm) Inicio de Operación 2015	2402200,00	[m ³]
Volumen Topobatimetría 2019 N. A. N. (3549,3 msnm)	2237170,40	[m ³]
Diferencia de capacidad de almacenamiento (2015 - 2019)	165029,60	[m ³]
Aporte de sedimentos anual	33005,92	[m ³ /año]
Volumen muerto (3538 msnm)	128063,40	[m ³]
Volumen útil	2155177,50	[m ³]
Años de operación del embalse	5	[años]

Fuente: CIAGUA (2021).

Los resultados de la batimetría serán empleados para ajustar una ecuación del factor R que permita determinar cuál de las metodologías propuestas para la estimación de este factor se adapta mejor a las características de la cuenca para ser utilizada en el modelo USLE. Asimismo, se usará el aporte de sedimentos anual obtenido a través de la batimetría para compararlo con los resultados obtenidos mediante el modelo USLE.

3.10. VIDA ÚTIL DEL EMBALSE.

La vida útil de un embalse hace referencia al periodo de tiempo previsto en el cual el vaso de almacenamiento puede operar de acuerdo con sus especificaciones iniciales de diseño en función a la reducción de su capacidad a causa de los procesos de sedimentación.

La vida útil de un embalse está en función de la siguiente información:

- Capacidad inicial del embalse (m³).
- Escurrimiento medio anual (m³).
- Aporte de sedimentos anual (m³).
- Capacidad de retención del embalse (%).

De los datos señalados para la estimación de la vida útil, se considera como información conocida la capacidad inicial del embalse y el aporte de sedimentos.

Con relación al escurrimiento medio anual se ha utilizado la ecuación mencionada en la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2015):

$$V_m = A * C_e * P_m \quad (23)$$

Donde:

V_m = Volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca (m³).

A = Área de la cuenca (m²).

C_e = Coeficiente de escurrimiento anual.

P_m = Precipitación promedio anual de la cuenca (m).

Para la determinación del coeficiente de escurrimiento. En primer lugar, se ha obtenido el valor ponderado del parámetro K en función a la Tabla 25.

Tabla 25. Valores de K en función del tipo y uso de suelo.

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS		
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.		
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos.		
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.		
USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:			
En Hileras	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,24	0,27	0,30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -	0,14	0,20	0,28
Del 50 al 75% - Regular -	0,20	0,24	0,30
Menos del 50% - Excesivo -	0,24	0,28	0,30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 25 al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,30

Zonas urbanas	0,26	0,29	0,32
Caminos	0,27	0,30	0,33
Pradera permanente	0,18	0,24	0,30

Fuente: SEMARNAT (2015).

El coeficiente de escurrimiento anual (C_e) se ha calculado utilizando el valor del parámetro K y una de las fórmulas de la Tabla 26.

Tabla 26. Fórmulas para determinar el Coeficiente de escurrimiento anual (C_e).

K: PARÁMETRO QUE DEPENDE DEL TIPO Y USO DE SUELO	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO ANUAL (C_e)	RANGO DE VALIDEZ
Si K resulta menor o igual que 0,15	$C_e = \frac{K * (P - 250)}{2000}$	Las fórmulas se considerarán válidas para valores de Precipitación promedio anual (P) entre 350 y 2150 mm.
Si K es mayor que 0,15	$C_e = \frac{K * (P - 250)}{2000} + \frac{(K - 0,15)}{1,5}$	

Fuente: SEMARNAT (2015).

Por su parte, para la capacidad de retención del embalse se ha utilizado las siguientes ecuaciones:

- Brown (1943), citado en Coppola et al. (2020):

$$T_e = 100 * \left(1 - \frac{1}{1 + 0,0021 * D * \frac{C}{W}} \right) \quad (24)$$

Donde:

T_e = Capacidad de retención del embalse (%).

C = Capacidad del embalse (m^3).

W = Área de aporte de la cuenca (km^2).

D = Coeficiente que va desde 0,046 a 1 (con un valor promedio de 0,1).

De acuerdo con Avendaño et al. (1993) como se cita en Bodoque et al. (2001) para embalses con un régimen de explotación de tipo 1, es decir, de embalses siempre o casi siempre llenos se asume el valor de 1 para el coeficiente (D).

- Gill (1979):

$$T_e = \frac{(C/I)}{[0,012 + 1,02 * (C/I)]} \quad (25)$$

Donde:

T_e = Capacidad de retención del embalse (decimal).

C = Capacidad del embalse (m³).

I = Volumen medio anual de escurrimiento (m³).

- Jothiprakash y Garg (2008):

$$T_e = \frac{\left(\frac{C}{I}\right)}{\left(0,00013 + 0,01 * \frac{C}{I} + 0,0000166 * \sqrt{\frac{C}{I}}\right)} \quad (26)$$

Donde:

T_e = Capacidad de retención del embalse (%).

C = Capacidad del embalse (m³).

I = Volumen medio anual de escurrimiento (m³).

Las ecuaciones para estimar la capacidad de retención del embalse, previamente mencionadas, han sido calibradas en función de la curva de eficiencia de retención de Brune (1953), para sedimentos medianos.

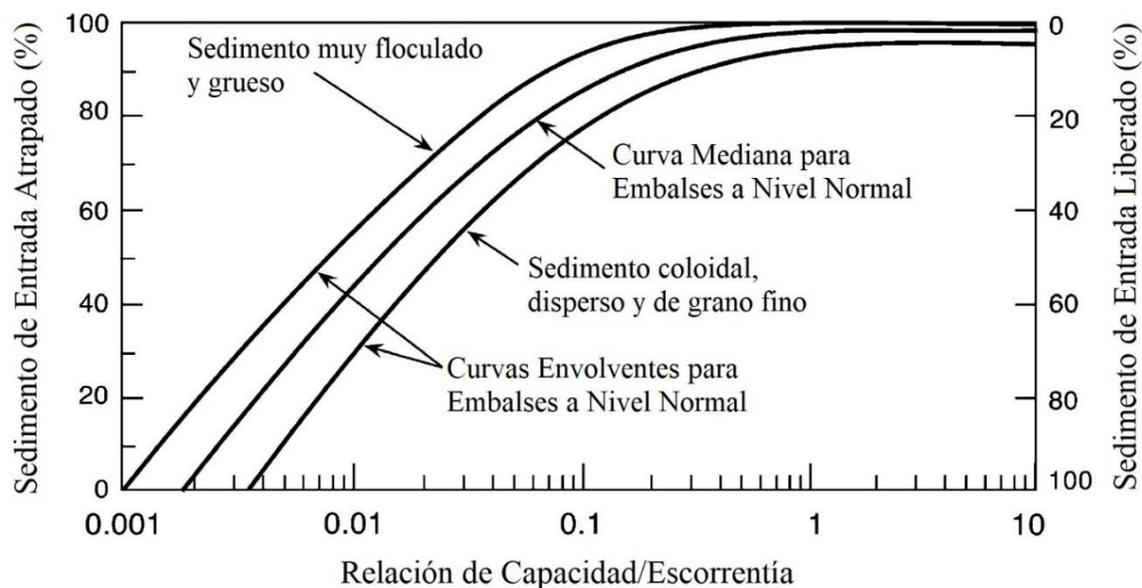


Figura 16. Curva de Eficiencia de Retención de Brune (1953).

Fuente: Brune (1953), recuperado de Morris (2014).

Finalmente, para la estimación de la vida útil del embalse se ha utilizado la fórmula propuesta por Gill (1979) y el criterio que se menciona en Singh (1980; p. 233), que plantea que “la vida útil de un embalse se considera terminada cuando su almacenamiento efectivo se reduce en un 20% de la capacidad inicial del embalse”.

La fórmula de Gill (1979) para la estimación de la vida útil de un embalse se expresa de la siguiente manera:

$$C - C_0 = \frac{G * T_e * \Delta t}{\bar{\gamma}} \quad (27)$$

Donde:

C_0 = Capacidad inicial del embalse (m^3).

C = Capacidad reducida del embalse en un tiempo t (m^3).

G = Peso característico del aporte de sedimentos anual (t).

T_e = Capacidad de retención del embalse (decimal).

Δt = Breve intervalo de tiempo en años en el cual la capacidad del embalse se reduce de C_0 a C .

$\bar{\gamma}$ = Peso específico del sedimento depositado (t/m^3).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS.

4.1.FACTOR DE ERODABILIDAD DEL SUELO.

Para ambas metodologías se ha analizado el tamaño de las partículas de las muestras de suelo de acuerdo con la clasificación propuesta por la USDA.

Tabla 27. *Clasificación de la USDA para el tamaño de las partículas.*

CLASIFICACIÓN	
Arena (2-0,05 mm)	SUBCLASIFICACIÓN
	Arena muy gruesa (2 – 1 mm)
	Arena gruesa (1 – 0,5 mm)
	Arena mediana (0,5 – 0,25 mm)
	Arena fina (0,25 – 0,1 mm)
	Arena muy fina (0,1 – 0,05 mm)
Limo (0,05 – 0,002 mm)	
Arcilla (menos de 0,002 mm)	

Fuente: USDA (1987).

- Los resultados por el método de Wischmeier y Smith (1978) se pueden observar en las Tablas 28 y 29.

Tabla 28. *Textura de las muestras de suelo.*

TEXTURA DE LAS MUESTRAS DE SUELO							
CÓDIGO DE MUESTRA	COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL SUELO				TEXTURA	S	P
	Arena (2 – 0,05 mm)		Limo (0,05 – 0,002 mm)	Arcilla (menos de 0,002 mm)			
	Arena (2 – 0,1 mm)	Arena muy fina (0,1 – 0,05 mm)					
M – 1	68,94	7,98	13,34	9,73	Franco Arenosa	4	2
M – 2	24,22	38,34	29,78	7,66	Franco Arenosa	3	2
M – 3	49,97	8,43	33,63	7,97	Franco Arenosa	3	2
M – 4	48,39	12,90	32,72	5,99	Franco Arenosa	3	2
M – 5	18,77	17,77	46,48	16,98	Franca	2	3
M – 6	57,13	15,08	22,10	5,69	Franco Arenosa	3	2
M – 7	14,23	15,35	53,88	16,54	Franco Limosa	2	3
M – 8	44,25	12,80	35,50	7,45	Franco Arenosa	3	2
M – 9	30,93	10,89	43,61	14,57	Franca	2	3
M – 10	44,06	22,68	25,42	7,84	Franco Arenosa	3	2
M – 11	45,16	12,83	32,61	9,40	Franco Arenosa	3	2
M – 12	40,60	10,78	35,54	13,09	Franca	2	3
M – 13	53,83	14,72	24,67	6,78	Franco Arenosa	3	2

M - 14	68,81	12,83	15,12	3,24	Areno Francosa	3	2
M - 15	33,41	18,24	38,93	9,43	Franca	2	3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Erodabilidad del suelo en función de Wischmeier y Smith (1978).

ERODABILIDAD DEL SUELO							
CÓDIGO DE MUESTRA	COORDENADAS UTM		M	OM	S	P	FACTOR K $\left(\frac{t}{ha * MJ} * \frac{ha}{mm} * h\right)$
	ESTE	NORTE					
M - 1	291037	7615231	1925,14	5,06	4	2	0,0159
M - 2	289379	7614959	6289,65	7,00	3	2	0,0306
M - 3	290016	7611881	3871,09	4,71	3	2	0,0258
M - 4	287841	7611749	4288,99	6,04	3	2	0,0238
M - 5	291567	7608442	5334,61	4,02	2	3	0,0392
M - 6	292407	7609082	3505,89	3,83	3	2	0,0258
M - 7	292022	7613525	5777,62	5,03	2	3	0,0374
M - 8	293682	7610107	4470,17	5,60	3	2	0,0267
M - 9	294029	7606484	4655,95	3,96	2	3	0,0338
M - 10	297752	7613314	4432,62	4,46	3	2	0,0309
M - 11	295413	7614013	4116,78	4,60	3	2	0,0280
M - 12	295057	7611837	4025,34	4,60	2	3	0,0263
M - 13	297099	7609451	3671,70	4,46	3	2	0,0252
M - 14	297709	7609687	2704,43	2,80	3	2	0,0218
M - 15	300121	7611997	5177,03	4,98	2	3	0,0333

Fuente: Elaboración propia.

- Los resultados del método de Sharpley y Williams (1990) se muestran en las Tablas 30 y 31.

Tabla 30. Composición de las muestras de suelo.

COMPOSICIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO				
CÓDIGO DE MUESTRA	GRANULOMETRÍA DEL SUELO			OM
	SAN	SIL	CLA	
M - 1	76,92	13,34	9,73	5,06
M - 2	62,56	29,78	7,66	7,00
M - 3	58,40	33,63	7,97	4,71
M - 4	61,29	32,72	5,99	6,04
M - 5	36,55	46,48	16,98	4,02
M - 6	72,21	22,10	5,69	3,83

M - 7	29,58	53,88	16,54	5,03
M - 8	57,05	35,50	7,45	5,60
M - 9	41,82	43,61	14,57	3,96
M - 10	66,73	25,42	7,84	4,46
M - 11	57,99	32,61	9,40	4,60
M - 12	51,37	35,54	13,09	4,60
M - 13	68,54	24,67	6,78	4,46
M - 14	81,63	15,12	3,24	2,80
M - 15	51,64	38,93	9,43	4,98

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Erodabilidad del suelo en función de Sharpley y Williams (1990).

CÓDIGO DE MUESTRA	COORDENADAS UTM		SN1	C	FACTOR K $\left(\frac{t}{ha * MJ} * \frac{ha}{mm} * h\right)$
	ESTE	NORTE			
M - 1	291037	7615231	0,23	2,93	0,0180
M - 2	289379	7614959	0,37	4,06	0,0271
M - 3	290016	7611881	0,42	2,73	0,0287
M - 4	287841	7611749	0,39	3,50	0,0283
M - 5	291567	7608442	0,63	2,33	0,0346
M - 6	292407	7609082	0,28	2,22	0,0233
M - 7	292022	7613525	0,70	2,92	0,0375
M - 8	293682	7610107	0,43	3,25	0,0295
M - 9	294029	7606484	0,58	2,30	0,0332
M - 10	297752	7613314	0,33	2,59	0,0252
M - 11	295413	7614013	0,42	2,67	0,0283
M - 12	295057	7611837	0,49	2,67	0,0296
M - 13	297099	7609451	0,31	2,59	0,0248
M - 14	297709	7609687	0,18	1,62	0,0177
M - 15	300121	7611997	0,48	2,89	0,0309

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32. Resultados de los mapas del Factor K.

FACTOR K $\left(\frac{t}{\text{ha} * \text{MJ}} * \frac{\text{ha}}{\text{mm}} * h\right)$		MÉTODOS	
		1	2
		Wischmeier y Smith (1978)	Sharpley y Williams (1990)
VALORES DEL FACTOR K	MÍNIMO	0,0159	0,0177
	MÁXIMO	0,0392	0,0375
	PROMEDIO	0,0267	0,0262
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0,005039	0,004980

Fuente: Elaboración propia.

El primer método presenta una desviación estándar de 0,005039 y el segundo una desviación de 0,004980 por lo cual ambos resultados son igualmente válidos, por su parte el valor promedio del primer método es 0,0267 y el del segundo es 0,0262, siendo el valor del primero 1,75 % mayor al del segundo.

Para la estimación de la tasa de erosión se ha utilizado los resultados obtenidos por el primer método. Los resultados obtenidos del factor K por medio del método de Wischmeier y Smith se pueden observar en el mapa de la Fig. 17.

En el Anexo 4, se puede observar el mapa con los resultados obtenidos por el método de Sharpley y Williams.

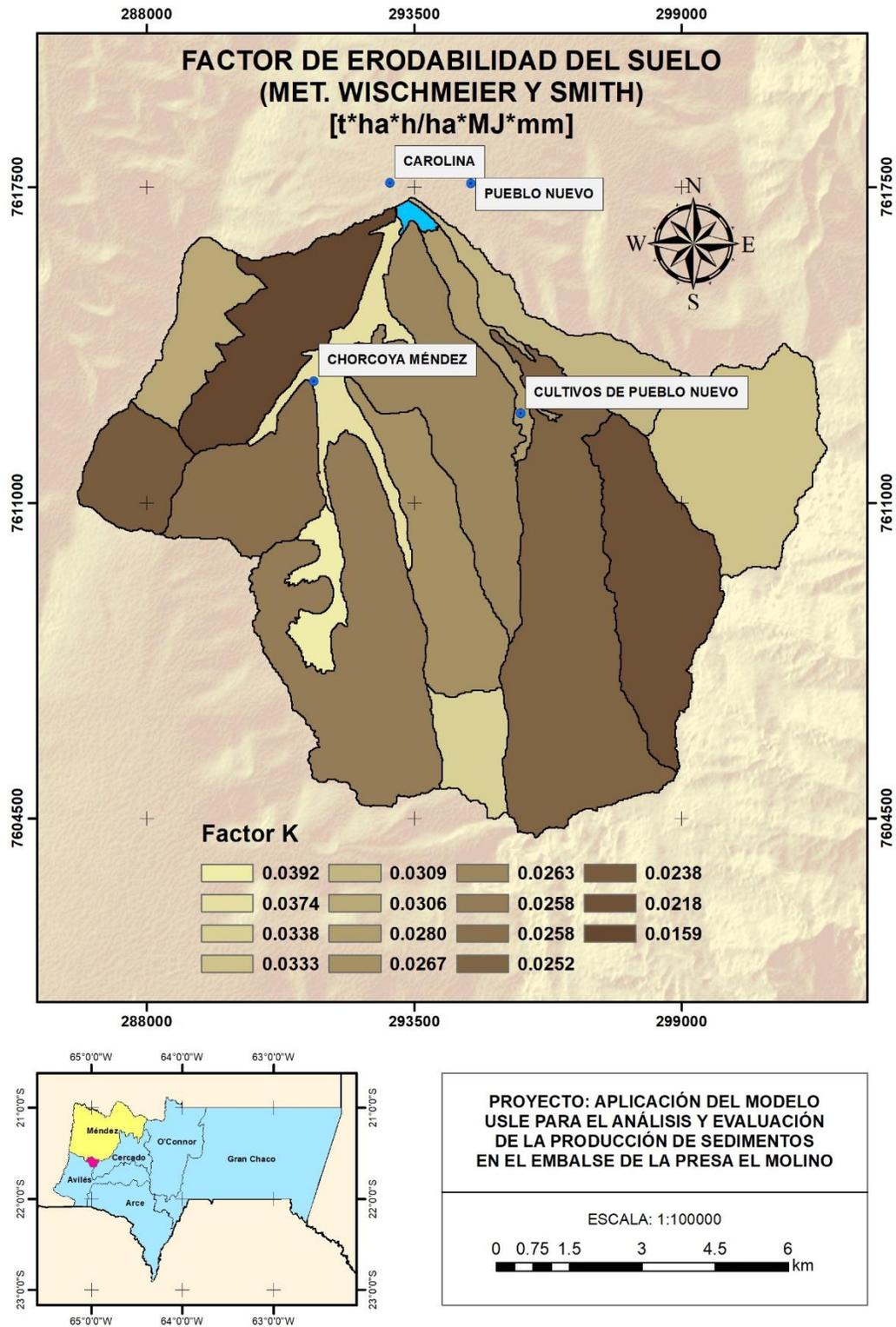


Figura 17. *Mapa del Factor de Erodabilidad del Suelo.*

Fuente: Elaboración propia.

4.2.FACTOR DE LONGITUD Y GRADO DE PENDIENTE.

Los resultados del Factor LS se pueden observar en la Tabla 33.

Tabla 33. *Resultados del Factor LS.*

MÉTODOS		1	2	3
		Desmet y Govers (1996) - McCool (1989)	Desmet y Govers (1996) - Nearing (1997)	Griffin (1988) - Moore y Wilson (1992)
VALORES DEL FACTOR LS	MÍNIMO	0,03	0,05	0,00
	MÁXIMO	103,32	105,73	98,85
	PROMEDIO	3,70	4,20	4,51
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		2,41	2,88	4,98
MÉTODOS		4	5	6
		McCool (1989)	Moore y Burch (1986) - Moore y Wilson (1992)	Wischemeier y Smith (1978)
VALORES DEL FACTOR LS	MÍNIMO	0,03	0,00	0,03
	MÁXIMO	69,42	70,61	81,67
	PROMEDIO	4,65	3,22	7,77
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		3,87	3,56	6,76

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados se observa que el primer método es el que presenta la desviación estándar más baja, mientras que el método seis muestra el valor más alto.

Asimismo, el método tres presenta valores próximos a los del primer y segundo método, a pesar de que su valor de desviación estándar es mucho mayor que el que presentan las otras dos metodologías.

Por su parte, los métodos cuatro, cinco y seis presentan los valores más bajos del factor LS.

El primer método es el que mejor se adapta a los sistemas SIG y es el que ha sido utilizado en la estimación del modelo USLE.

Los resultados del factor LS de Desmet y Govers – McCool se muestran en la Fig 18.

En el Anexo 4, se puede visualizar los mapas del factor LS de las demás metodologías.

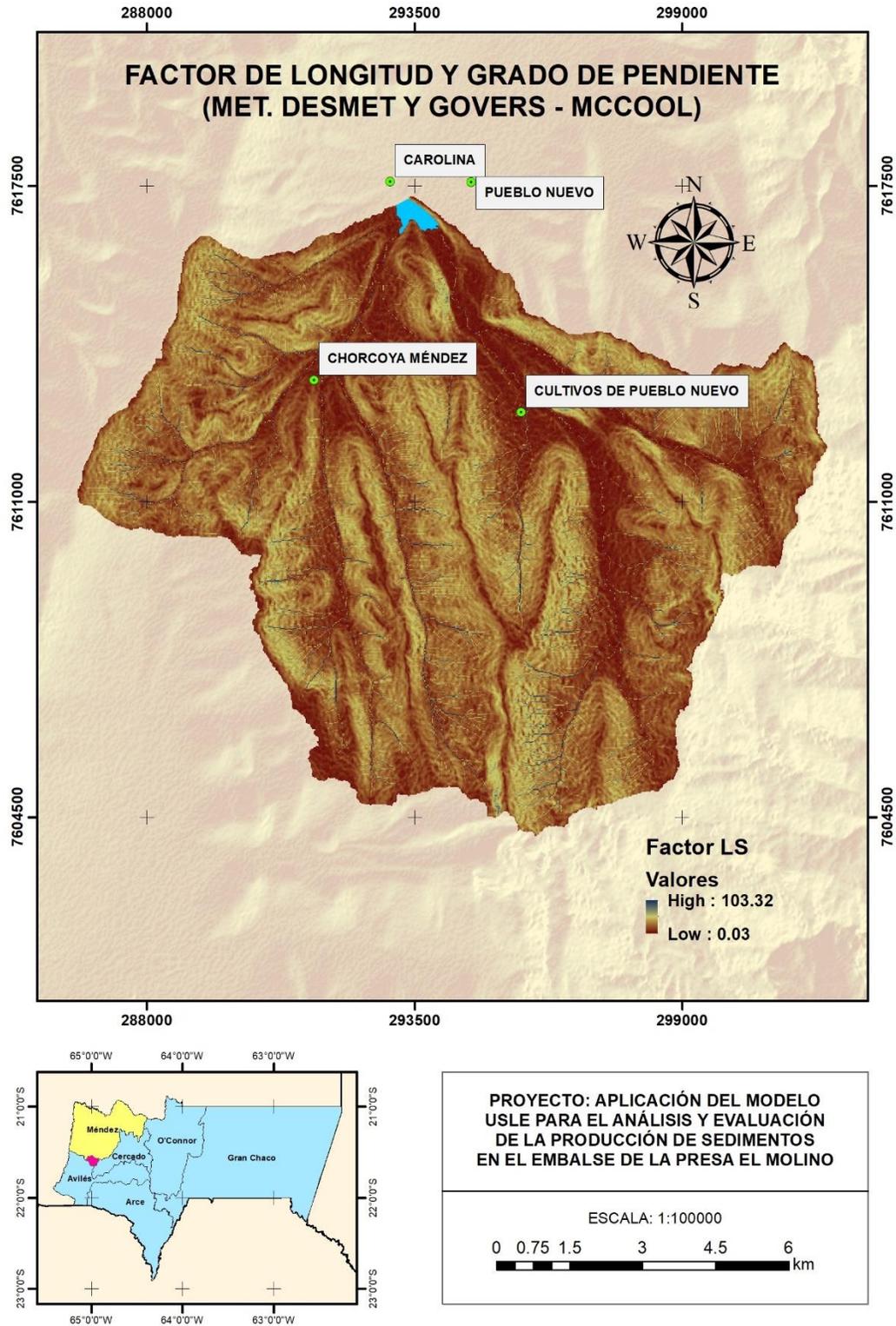


Figura 18. Mapa del Factor de Longitud y Grado de Pendiente.

Fuente: Elaboración propia.

4.3.FACTOR DE MANEJO DE COBERTURA VEGETAL.

Los resultados de manejo de cobertura se muestran en la Tabla 34.

Tabla 34. *Resultados del Factor C.*

MÉTODO 1		van der Knijff (1999)				
AÑO		2015	2016	2017	2018	2019
VALORES DEL FACTOR C	MÍNIMO	0,0536	0,0812	0,0719	0,0796	0,0623
	MÁXIMO	1	1	1	1	1
	PROMEDIO	0,5949	0,6220	0,6192	0,6272	0,6131
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0,0761	0,0657	0,0698	0,0663	0,0655
MÉTODO 2		Pacheco (2014)				
AÑO		2015	2016	2017	2018	2019
VALORES DEL FACTOR C	MÍNIMO	0,0202	0,0406	0,0310	0,0339	0,0249
	MÁXIMO	0,9984	0,9980	0,9981	0,9982	0,9982
	PROMEDIO	0,6578	0,6945	0,6907	0,7017	0,6824
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0,1014	0,0878	0,0931	0,0893	0,0878

Fuente: Elaboración propia.

En función a los resultados, se puede observar que en cada año la desviación estándar fue menor en el primer método.

Tanto el primer como en el segundo método, los valores se ajustan a los límites del factor C, siendo el rango entre 0 y 1. Los valores del factor C iguales o cercanos a 1 reflejan la ausencia de vegetación y los valores próximos al 0 reflejan una presencia alta de vegetación como bosques frondosos o de coníferas.

Para el modelo USLE se ha tomado en cuenta los resultados del primer método.

Los resultados del primer y segundo método se pueden visualizar en el Anexo 4.

4.4.FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DE SUELOS.

El Factor P fue determinado a partir de la selección de cultivos en contorno, esto se justifica por medio del rango de valores que puede adoptar P, variando de 0 a 1. Los valores de 0 reflejan una alta presencia de cultivos y un valor de 1 refleja la ausencia de cultivos.

Para la estimación del factor P se ha asumido que el tipo de cultivo que se practica en la cuenca es el de contorno, de acuerdo con los valores que adquiere el factor P para ese tipo de cultivos.

Tabla 35. Resultados del Factor P.

MÉTODOS		1	2	3
		KICT (1992)	Lombardi Neto (1995)	Wischmeier y Smith (1978)
VALORES DEL FACTOR P	MÍNIMO	0,55	0,50	0,50
	MÁXIMO	1,00	1,00	0,90
	PROMEDIO	0,90	0,92	0,82
DESVIACIÓN ESTÁNDAR		0,1447	0,1462	0,1323

Fuente: Elaboración propia.

Para el modelo USLE se empleó los resultados del primer método. Los resultados del factor P de las tres metodologías se encuentran en el Anexo 4.

4.5.FACTOR DE EROSIVIDAD DE LLUVIAS.

Los resultados del factor R de las seis metodologías empleadas se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36. Resultados del Factor R.

AÑO	IMF (mm)	FACTOR R $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{ha}} * \frac{\text{mm}}{\text{h}}\right)$				
		MÉTODOS				
		1	2	3	4	5
		Arnoldus (1977)	ICONA (1988)	Ferrari (2005)	Irvem (2007)	Keya (2019)
2015	78,05	182,05	265,23	62,59	4657,18	56,57
2016	34,20	52,79	110,14	18,20	631,02	24,46
2017	75,63	173,63	256,47	59,70	4314,41	54,79
2018	79,18	186,01	269,32	63,95	4822,07	57,40
2019	37,26	60,05	120,68	20,69	776,88	26,69
PROMEDIO =		130,91	204,37	45,03	3040,31	43,98
MÉTODO 6						
Kirby y Morgan (1980) – Brown y Foster (1987)						
Factor R para cada evento de lluvia erosiva (R_i) =		2,67			$\frac{\text{MJ}}{\text{ha}} * \frac{\text{mm}}{\text{h}}$	
Número de eventos de lluvia erosiva por año (m) =		40	50	60	-	
FACTOR R PROMEDIO ANUAL (R_{anual}) =		106,71	133,38	160,06	$\frac{\text{MJ}}{\text{ha}} * \frac{\text{mm}}{\text{h}}$	

Fuente: Elaboración propia.

Para determinar con cuál de las seis metodologías se trabajará en el modelo USLE, se realizó el ajuste de una ecuación del Factor R utilizando los métodos calibrados en función al IMF, los demás factores del modelo USLE y los resultados de la batimetría del año 2019.

$$R = 1,0353 * IMF^{1,2695} \quad (28)$$

Con la ecuación ajustada del factor R se obtuvieron los resultados que se pueden visualizar en la Tabla 37.

Tabla 37. Resultados del Factor R utilizando la ecuación ajustada.

AÑO	FACTOR R $\left(\frac{\text{MJ}}{\text{ha}} * \frac{\text{mm}}{\text{h}}\right)$
2015	261,49
2016	91,72
2017	251,22
2018	266,30
2019	102,28
PROMEDIO =	194,60

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el valor promedio del factor R de la ecuación ajustada, el valor promedio más próximo es el del método de ICONA, con una diferencia de 5,02 %. Por consiguiente, para el modelo de USLE se utilizó el método de ICONA.

El procedimiento de la estimación del factor de erosividad de lluvias por la metodología de Kirby y Morgan – Brown y Foster se encuentra en el Anexo 2 y el ajuste de la ecuación del factor R se encuentran en el Anexo 3.

4.6. INTERPRETACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.6.1. RESULTADOS DEL MODELO USLE.

Los resultados de la estimación de la tasa de erosión por el modelo USLE se muestran en la Tabla 38.

Tabla 38. Resultados del modelo USLE.

USLE						
AÑOS		2015	2016	2017	2018	2019
VALORES DE PÉRDIDA DE SUELO MEDIA ANUAL (t/ha/año)	MÍNIMO	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	MÁXIMO	410,62	182,33	449,00	500,02	207,19
	PROMEDIO	15,03	6,49	15,08	16,03	7,01
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (t/ha/año)		11,01	4,71	11,03	11,66	5,08

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que la desviación estándar es baja en cada uno de los años que comprende el periodo de estudio. Además, de que los valores de pérdida de suelo media anual para los años 2015, 2017 y 2018 son los más elevados y para los años 2016 y 2019 los valores son más bajos en comparación.

Teniendo como base los resultados del modelo USLE se ha estimado la tasa de erosión promedio del periodo 2015 – 2019.

Tabla 39. Resultados de tasa de erosión promedio.

TASA DE EROSIÓN PROMEDIO		
PERIODO		2015 - 2019
VALORES DE TASA DE EROSIÓN (t/ha/año)	MÍNIMO	0,01
	MÁXIMO	342,64
	PROMEDIO	11,93
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (t/ha/año)		8,69

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del modelo USLE de cada año y la tasa de erosión promedio se encuentran reflejados en los mapas dentro del Anexo 9.

4.6.2. APORTE DE SEDIMENTOS EN EL EMBALSE.

Para la determinación del aporte de sedimentos. En primer lugar, se ha convertido los valores de tasa de erosión (t/ha/año) a valores de erosión bruta (t/año).

Tabla 40. Resultados de erosión bruta.

AÑO	EROSIÓN BRUTA (t/año)
2015	178858,04
2016	77250,36

2017	179497,57
2018	190828,24
2019	83387,98

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, se ha utilizado el factor de entrega de sedimentos propuesto por USDA para el cálculo del aporte de sedimentos reflejado en la Tabla 41.

Tabla 41. *Resultado del aporte de sedimentos (t/año).*

AÑO	MODELO USLE	
	SDR _{USDA} =	0,33
	SY(t/año)	
2015	59799,48	
2016	25827,92	
2017	60013,30	
2018	63801,60	
2019	27879,98	

Fuente: Elaboración propia.

Para el peso específico de los sedimentos se ha utilizado la composición granulométrica de las muestras de sedimento extraídas de las proximidades del embalse.

Tabla 42. *Ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos en coordenadas UTM.*

CÓDIGO DE MUESTRA	COORDENADAS UTM		ALTITUD (m.s.n.m.)
	ESTE	NORTE	
P – 1	293177	7616609	3547
P – 2	293229	7616518	3543
P – 3	293696	7616569	3542
P – 4	293940	7616617	3542
P – 5	293997	7616663	3543

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de peso específico por los métodos de Lane y Koelzer (1943) y Miller (1953), se muestran en las Tablas 43 y 44, respectivamente.

Tabla 43. *Peso específico de las muestras de sedimento en función de Lane y Koelzer (1943).*

CÓDIGO DE MUESTRA	COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL SUELO SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE LA AGU		PESO ESPECÍFICO INICIAL (lb/ft ³)	CONSTANTE DE CONSOLIDACIÓN	PESO ESPECÍFICO DESPUÉS DE 5 AÑOS DE CONSOLIDACIÓN (kg/m ³)
P - 1	Arena	83,82	93	0	1410,56
	Limo	12,37	65	5,7	
	Arcilla	3,80	30	16	
P - 2	Arena	75,14	93	0	1375,33
	Limo	20,64	65	5,7	
	Arcilla	4,21	30	16	
P - 3	Arena	25,33	93	0	1104,09
	Limo	52,57	65	5,7	
	Arcilla	22,09	30	16	
P - 4	Arena	92,30	93	0	1453,86
	Limo	6,30	65	5,7	
	Arcilla	1,40	30	16	
P - 5	Arena	80,23	93	0	1396,98
	Limo	16,03	65	5,7	
	Arcilla	3,74	30	16	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 44. *Peso específico de las muestras de sedimento en función de Miller (1953).*

CÓDIGO DE MUESTRA	COMPOSICIÓN PORCENTUAL DEL SUELO SEGÚN LA CLASIFICACIÓN DE LA AGU		PESO ESPECÍFICO INICIAL (lb/ft ³)	W ₁ (kg/m ³)	VALORES DE CONSTANTE DE CONSOLIDACIÓN		PESO ESPECÍFICO DESPUÉS DE 5 AÑOS DE CONSOLIDACIÓN (kg/m ³)
					INDV.	POND.	
P - 1	Arena	83,82	97	1457,04	0	1,31	1466,28
	Limo	12,37	70		5,7		
	Arcilla	3,80	26		16		
P - 2	Arena	75,14	97	1416,59	0	1,85	1429,62
	Limo	20,64	70		5,7		
	Arcilla	4,21	26		16		
P - 3	Arena	25,33	97	1075,14	0	6,53	1121,12
	Limo	52,57	70		5,7		
	Arcilla	22,09	26		16		
P - 4	Arena	92,30	97	1510,62	0	0,58	1514,72
	Limo	6,30	70		5,7		
	Arcilla	1,40	26		16		

P - 5	Arena	80,23	97	1441,88	0	1,51	1452,53
	Limo	16,03	70		5,7		
	Arcilla	3,74	26		16		

Fuente: Elaboración propia.

El valor del peso específico utilizado para convertir el aporte de sedimentos de t/año a m³/año se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45. Valor del peso específico del sedimento.

CÓDIGO DE MUESTRA	PESO ESPECÍFICO (t/m ³)		VALOR PROMEDIO
	MÉTODOS		
	1	2	
	Lane y Koelzer (1943)	Miller (1953)	
P - 1	1,41	1,47	1,37
P - 2	1,38	1,43	
P - 3	1,10	1,12	
P - 4	1,45	1,51	
P - 5	1,40	1,45	

Fuente: Elaboración propia.

Por lo consiguiente, con los resultados de aporte de sedimentos (t/año) y peso específico (t/m³) se ha obtenido los resultados de aporte de sedimentos (m³/año) que se reflejan en la Tabla 46.

Tabla 46. Resultados del aporte de sedimentos en el embalse.

AÑO	MODELO USLE	
	SY(m ³ /año)	SY _{acum} (m ³)
2014	0	0
2015	43569,44	43569,44
2016	18818,02	62387,46
2017	43725,23	106112,69
2018	46485,35	152598,04
2019	20313,13	172911,18

Fuente: Elaboración propia.

En función a los resultados del modelo USLE se ha graficado la producción de sedimento acumulado en comparativa con los resultados de la batimetría proporcionados por el CIAGUA (Tabla 24).

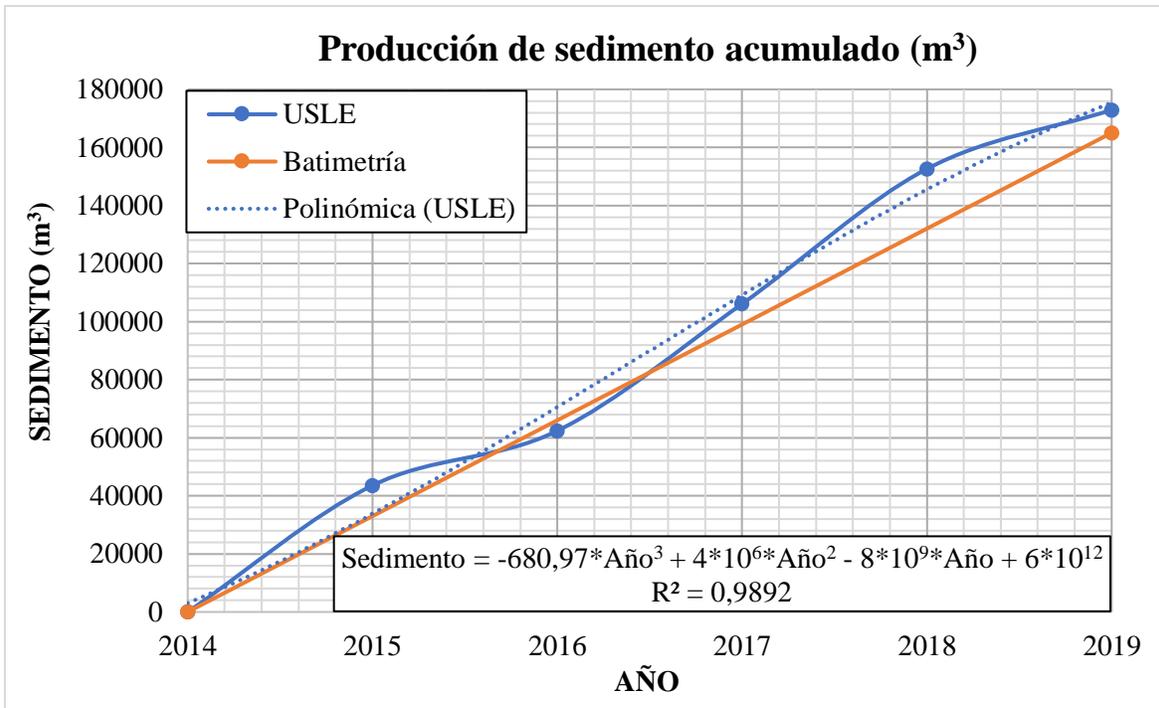


Figura 19. Gráfica de producción de sedimento acumulado.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.3. VIDA ÚTIL DEL EMBALSE.

Para estimar la vida útil del embalse de la presa “El Molino”. En primer lugar, se ha estimado el volumen medio anual de escurrimiento.

El coeficiente de escurrimiento anual (C_e) se ha calculado en función a la Tabla 25 y la precipitación promedio anual (mm).

La precipitación promedio anual se ha calculado como el promedio de altura de precipitación anual de la estación Campanario del periodo 1989 – 2019, sin contar con el año 2016 por ser un valor atípico que subestima el valor del promedio.

Tabla 47. Valor del coeficiente de escurrimiento anual.

USO DEL SUELO	TIPO DEL SUELO	VALOR DE K	ÁREA (km ²)	K*ÁREA	K _{PONDERADO}
Barbecho, áreas incultas y desnudas	A	0,26	47,16	12,26	0,27
Barbecho, áreas incultas y desnudas	B	0,28	65,11	18,23	
Cultivos en hilera	B	0,27	7,08	1,91	
PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL (mm)		351,10	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO ANUAL (C_e)		0,0947

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de valor de volumen medio anual de escurrimiento se observa en la Tabla 48.

Tabla 48. Valor de volumen medio anual de escurrimiento.

DATOS		VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO (m ³)
Área de la cuenca (m ²)	119347875	
Coeficiente de escurrimiento anual (C _e)	0,09	3969353,65
Precipitación promedio anual (m)	0,35	

Fuente: Elaboración propia.

Para la capacidad de retención del embalse se ha calculado el promedio de los resultados de los métodos de Brown (1943), Gill (1979) y Jothiprakash y Garg (2008) como se muestra en la Tabla 49.

Tabla 49. Valores de capacidad de retención del embalse.

CAPACIDAD DEL EMBALSE		CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE SEDIMENTOS (%)			VALOR PROMEDIO
		MÉTODOS			
		1	2	3	
PORCENTAJE (%)	m ³	Brown (1943)	Gill (1979)	Jothiprakash y Garg (2008)	
100	2402200	97,69	96,17	97,69	97,19
80	1921760	97,14	95,71	97,16	96,67
60	1441320	96,22	94,96	96,29	95,82
40	960880	94,43	93,50	94,60	94,18
20	480440	89,45	89,35	89,91	89,57

Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la vida útil del embalse se muestra en la Tabla 50.

Tabla 50. Vida útil del embalse de la presa “El Molino”.

DATOS						UNIDADES	
Capacidad inicial del embalse						2402200	m ³
Esguerrimiento medio anual (<i>I</i>)						3969353,65	m ³
Aporte de sedimentos anual						34582,24	m ³
Vida útil del embalse cuando su capacidad de almacenamiento se reduce al						20	%
CAPACIDAD (<i>C</i>) (m ³)	<i>C/I</i>	CAPACIDAD DE RETENCIÓN DEL EMBALSE (%)	PROMEDIO (%)	VOLUMEN DEPOSITADO (m ³)	INCREMENTO DE VOLUMEN (m ³)	DURACIÓN (AÑOS)	
2402200	0,61	97,19	96,93	33519,73	480440	14,33	
1921760	0,48	96,67					
1441320	0,36	95,82	96,25	33283,92	480440	14,43	
960880	0,24	94,18	95,00	32852,67	480440	14,62	
480440	0,12	89,57	91,87	31771,93	480440	15,12	
$\Sigma =$						58,51	
VIDA ÚTIL DEL EMBALSE ≈						59	

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1.CONCLUSIONES.

- En la estimación de los factores del modelo USLE, se ha obtenido que los valores del factor de erosividad de lluvias (Factor R) varían entre 110,14 y 269,32 MJ/ha*mm/h, en el caso del factor de erodabilidad del suelo (Factor K) los valores varían entre 0,0159 y 0,0392 t*ha*h/ha*MJ*mm, en el factor de longitud y grado de pendiente (Factor LS) los valores varían dentro del rango entre 0,03 y 103,32; para el factor de cobertura vegetal (Factor C) los valores varían entre 0,0536 y 1; y finalmente para el factor de prácticas de conservación de suelos (Factor P) los valores varían de 0,55 a 1. Estos valores indican que el grado y la longitud de las pendientes, la composición y estructura del suelo, la baja presencia de cobertura vegetal y la limitada extensión de las prácticas de cultivo en las zonas de la cuenca media; limitan la capacidad de infiltración de los suelos, el cual favorece al escurrimiento y transporte de sedimentos hacia el embalse.

➤ **Factor R.**

De acuerdo con los resultados del factor R promedio anual de las seis metodologías propuestas se puede observar que el método de Irvem es el que presenta el valor más alto, y el método de Keya el más bajo, con 3040,31 y 43,98 MJ/ha*mm/h, respectivamente. Por lo tanto, se puede concluir que los resultados del factor R dependen de las características del lugar de calibración de cada una de las metodologías empleadas, siendo el método de ICONA el que más se ajusta a las características de la cuenca y el utilizado para estimar la tasa de erosión mediante el modelo USLE.

➤ **Factor K.**

En función a los resultados del factor K del método de Wischmeier y Smith se puede concluir que las áreas con mayor porcentaje de arena son las menos susceptible a la erosión y en contraste, las áreas donde predomina el limo y la arcilla presentan una mayor erodabilidad del suelo. En adición, los porcentajes de contenido de materia orgánica que se presentan en la cuenca son similares y debido a esto no inciden en la variación de los resultados del factor K.

➤ **Factor LS.**

De acuerdo con los resultados del modelo USLE, se concluye que el factor LS, determinado por el método de Desmet y Govers – McCool, es el que determina la distribución espacial de los valores de tasa de erosión.

Asimismo, las zonas altas donde se localizan los surcos y cárcavas (naciente de los ríos) presentan los valores más altos de erosión.

➤ **Factor C.**

Los resultados del factor C obtenidos por el método de van der Knijff no presentan una variación significativa entre los años comprendidos en el periodo 2015 – 2019, debido al corto tiempo de estudio en donde la cobertura vegetal no tuvo variaciones.

➤ **Factor P.**

Respecto a los resultados del factor P estimados de la metodología de KICT se puede concluir que los cultivos y áreas de pastoreo se concentran en las áreas en donde la pendiente es más baja y que el área más predominante en la cuenca es en donde no se realizan prácticas de conservación de suelos.

- Los resultados de tasa de erosión promedio presentan valores entre 6,49 y 16,03 t/ha/año, presentando los valores más altos en los años 2015, 2017 y 2018; y los valores más bajos en los años 2016 y 2019. A la variación de los resultados de los años 2016 y 2019 en comparación con la de los años 2015, 2017 y 2018; se le puede atribuir a que la altura de precipitación anual obtenida de la estación de Campanario presenta valores muy bajos para los años 2016 y 2019, de 155,90 y 235 mm, respectivamente. Asimismo, según los datos de precipitación de la estación Campanario, el valor más bajo de altura de precipitación registrado se presentó en el año 2016.

Por su parte, de acuerdo con el factor de entrega de sedimentos propuesto por la USDA, los valores de aporte de sedimentos anual representan el 33,43 % del total de sedimento que el área de aporte del embalse genera cada año.

- La comparación entre los resultados de aporte de sedimentos anual obtenidos por el modelo USLE y los obtenidos por el levantamiento batimétrico realizado por el

CIAGUA para el periodo 2015 - 2019; demuestran que los valores del modelo USLE se encuentran 4,78 % por encima de los resultados del levantamiento batimétrico.

Por lo cual, se puede concluir que los criterios y métodos utilizados para la estimación de cada uno de los factores han sido seleccionados correctamente y que a ello se le atribuye que la diferencia no sea elevada entre los resultados de la batimetría y los estimados utilizando el modelo USLE.

- De acuerdo con los resultados obtenidos de escurrimiento medio anual (3969353,65 m³), aporte de sedimentos anual (34582,24 m³) y capacidad de retención; se estima que en aproximadamente 59 años la capacidad del embalse de la presa “El Molino” se reducirá de 2402200 a 480440 m³.

Por lo consiguiente, se puede concluir que la erosión de la cuenca y su consiguiente estimación del aporte de sedimentos tiene un efecto significativo sobre la vida útil del embalse. Asimismo, el valor obtenido de la vida útil del embalse podría ser mucho menor si a partir del año 2020 los valores de altura de precipitación presentan fluctuaciones próximas o mayores a las presentadas en los años 2015, 2017 y 2018.

5.2.RECOMENDACIONES.

- En lo referente a la estimación de los factores del modelo USLE, se recomienda la implementación de un programa de monitoreo de los factores contemplados, para contar con una base de información confiable y actualizada.

➤ **Factor R.**

Para la estimación con una mayor exactitud del factor de erosividad de lluvias se sugiere la instalación de una red de estaciones meteorológicas dentro del área de aporte del embalse, con la capacidad de realizar mediciones de precipitación en intervalos de tiempo cortos.

Por su parte, con relación a los resultados del método de Kirby y Morgan – Brown y Foster no se recomienda su aplicación si los datos de precipitación disponibles fueron medidos en intervalos de tiempo superiores a los treinta minutos y si tampoco se tiene la información de eventos de lluvia erosiva por año, debido a la incertidumbre que se genera en la determinación de la energía cinética y el factor R, respectivamente.

➤ **Factor K.**

Para el factor de erodabilidad de suelos se recomienda que las entidades correspondientes elaboren mapas vectoriales referentes a la clasificación de suelos a una escala adecuada.

➤ **Factor LS.**

En referencia al factor LS, es recomendable que se trabaje con métodos calibrados para su uso en SIG, para evitar errores en su determinación.

➤ **Factor C.**

En el manejo de imágenes satelitales para la determinación del factor C, es necesario realizar las correcciones correspondientes antes de realizar algún procesamiento con ellas.

Asimismo, las entidades correspondientes deberían disponer de mapas referentes a la vegetación de la cuenca.

➤ **Factor P.**

Los valores más bajos de factor P no siempre van a estar presentes en las zonas con baja pendiente por lo cual se debería contar con mapas de cultivos, pastoreo y uso del suelo para tener una mayor confiabilidad en su estimación.

- En lo referente a la producción de sedimentos para alargar la vida útil del embalse, se recomienda la implementación de obras de contención de sedimentos en las zonas en las que se presenta los valores más altos de tasa de erosión para reducir el volumen de sedimentos transportados hacia el embalse.

También se sugiere reforestar las áreas con menor presencia de cobertura vegetal para disminuir la remoción de sedimentos en temporada de lluvias.