

# ANÁLISIS DE LA EROSIÓN HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO TOMAYAPO Y SU INFLUENCIA EN LA VIDA ÚTIL DEL EMBALSE EL MOLINO

ANALYSIS OF WATER EROSION IN THE TOMAYAPO RIVER BASIN AND ITS INFLUENCE ON THE USEFUL LIFE OF THE EL MOLINO RESERVOIR

---

Fecha de recepción: 31/12/2022 | Fecha de aceptación: 31/03/2023

**Autores:**

**Perales Avilés Moisés<sup>1</sup>**

**Ponce Cabrera Mauricio Alejandro<sup>2</sup>**

**Zurita Morales María Alejandra<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Ingeniero Civil, Docente Investigador – Director del Centro de Investigación del Agua CIAGUA en la UAJMS

<sup>2</sup>Ingeniero Civil, Investigador Junior Facultad de Ciencias y Tecnología - UAJMS

<sup>3</sup>Ingeniera Civil, Docente Dpto. de Hidráulica y Obras Sanitarias de la Carrera de Ingeniería Civil en la UAJMS

**Correspondencia del autor(es):** moisesperales@uajms.edu.bo<sup>1</sup>

mauriponce160996@gmail.com<sup>2</sup> maria.zurita@uajms.edu.bo<sup>3</sup>

Tarija - Bolivia

## RESUMEN

Los procesos erosivos en una cuenca que ocasionan la sedimentación en los embalses dependen de las características del clima, región, naturaleza del suelo, vegetación y prácticas de manejo de suelos y otras variables adicionales.

Mediante el presente estudio se estima la tasa de erosión promedio del área de aporte de sedimentos del embalse El Molino a través de la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE), el manejo de imágenes satelitales y la información disponible del lugar. Para ello, es necesario determinar cada uno de los factores de USLE mediante metodologías aplicables a cuencas de zona alta.

El análisis de la tasa de erosión permite conocer el aporte de sedimentos promedio anual a través del uso de un factor de entrega de sedimentos (SDR). Por ende, se puede determinar el impacto en la vida útil del embalse y con ello proponer las medidas y planes necesarios para minimizar el volumen de arrastre de sedimentos en los lugares más propensos a la erosión.

Los resultados muestran que los valores estimados de tasa de erosión para la cuenca Tomapayo se encuentran entre leves y moderados, con un valor promedio anual de 11.93 t/ha/año lo que genera una proyección de vida útil estimada del embalse de aproximadamente 59 años.

## ABSTRACT

The erosive processes in a watershed that cause sedimentation in reservoirs depend on the characteristics of the climate, region, nature of the soil, vegetation and soil management practices, and other additional variables.

This study estimates the average erosion rate of the sediment contribution area of El Molino reservoir using the Universal Soil Loss Equation (USLE), satellite images and available information on the site. To do this, it is necessary to determine each of the USLE factors using methodologies applicable to upland watersheds.

The analysis of the erosion rate allows us to know the average annual sediment contribution through the use of a sediment delivery factor (SDR). Therefore, it is possible to determine the impact on the useful life of the reservoir and thus propose the necessary measures and plans to minimize the volume of sediment entrainment in the most erosion-prone locations.

The results show that the estimated erosion rate values for the Tomapayo basin are between slight and moderate, with an average annual value of 11.93 t/ha/year, which generates an estimated useful life projection for the reservoir of approximately 59 years.

**Palabras Clave:** USLE, aporte de sedimentos, sedimentación, vida útil del embalse.

**Keywords:** USLE, sediment contribution, sedimentation, useful life of the reservoir.

## 1. INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica se considera uno de los principales tipos de degradación de la tierra (Das y Sarma, 2017) y representa una de las formas más completas de degradación del suelo englobando tanto a la degradación física, química y biológica (Vallejos et al., 2018).

La erosión hídrica es el proceso complejo por el cual se produce el desprendimiento, transporte y deposición de las partículas de suelo por acción de la energía cinética de las gotas de lluvia (Gaitán et al., 2017), la escorrentía en movimiento y la gravedad (Cisneros et al., 2012). Asimismo, se reconoce que la erosión del suelo tiene consecuencias externas, como inundaciones, disminución de la recarga de las aguas subterráneas, sedimentación en los canales de los ríos y embalses (Janeau et al., 2003; Verstraeten y Poesen, 1999).

Los sedimentos constituyen un problema que afecta la calidad de las aguas en corrientes naturales y su utilización; a pesar de esto los procesos de sedimentación han sido poco estudiados. Son escasas las metodologías que relacionan las diferentes variables de una cuenca con la carga presente en las corrientes (Montoya Jaramillo y Montoya Ramírez, 2005).

Los sedimentos que ingresan a un embalse consumen el espacio de almacenamiento que originalmente estaba destinado al almacenamiento de agua, lo que impide la función prevista de la presa y el embalse. Además, la deposición de sedimentos también conduce a la liberación de cantidades más pequeñas de sedimentos en los tramos de los ríos aguas abajo de las represas, lo que da como resultado cambios en la morfología del río y la degradación del cauce del río aguas abajo (Annandale et al., 2016).

La disponibilidad de agua y el riesgo asociado a las fallas en el suministro de agua son de gran preocupación en la gestión de los recursos hídricos, especialmente en las regiones semiáridas que

presentan conflictos relacionados al manejo del agua y la población. Los embalses son comúnmente las fuentes de agua más importantes en las regiones semiáridas y la sociedad depende en gran medida de su sostenibilidad. No obstante, las diversas actividades sociales y económicas en las cuencas pueden generar como consecuencia la reducción de la disponibilidad de agua en los embalses, tanto en aspectos cuantitativos como cualitativos (Aráujo y Knight, 2005). Además, pueden surgir problemas adicionales a través de la entrega de sedimentos y contaminantes asociados a los sedimentos (Aráujo et al., 2006).

Aunque la sedimentación ocurre de forma natural, también se puede exacerbar por las malas prácticas de uso y manejo de la tierra adoptadas en las zonas altas de las cuencas hidrográficas (Arekhi et al., 2012).

La sedimentación es un parámetro importante que brinda la posibilidad de ser utilizado para predecir la capacidad en todas las zonas de almacenamiento y estimar la vida útil de un embalse; debido a que existe una relación única entre la capacidad de almacenamiento y la vida útil de un embalse (Dutta, 2016).

La gestión adecuada de la sedimentación es clave para el uso sostenible de los embalses, considerando estos como recursos renovables, en beneficio de las generaciones actuales y futuras. Los nuevos proyectos de presas y embalses deben diseñarse, construirse y mantenerse teniendo en cuenta la amenaza a largo plazo de la sedimentación de los embalses; y los embalses existentes deben modificarse para un uso sostenible en la medida de lo posible (El Kadi Abderrezzak y Findikakis, 2018).

La cuenca del río Tomayo pertenece a la cuenca del río Pilcomayo, que es considerada como una de las cuencas más erosivas a nivel mundial, con una producción estimada de sedimentos por erosión superficial de 126 millones de toneladas anuales (Amarilla y Gamarra, 2008).

En el transcurso del tiempo se han desarrollado varios modelos para estimar la erosión del suelo como USLE (Wischmeier y Smith, 1978), RUSLE (Renard et al., 1997) y USLE-M (Kinnell y Risse, 1998).

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es uno de los modelos empíricos más ampliamente aceptados y aplicados, debido a su relativa simplicidad y robustez sobre la base de un enfoque global estandarizado a escala de cuenca (Efthimiou et al., 2016), es un modelo de erosión diseñado para predecir las pérdidas de suelo promedio a largo plazo en base a la escurrentía 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).

El departamento de Tarija, ubicado al sur de Bolivia, no cuenta con la información necesaria en relación con el transporte y depósito de sedimentos en sus embalses. En consecuencia, debido a la falta de monitoreo de los sedimentos, no se ha permitido el desarrollo de procesos de planificación y una toma de decisiones en el corto, mediano y largo plazo, para evitar la colmatación y un efecto sobre la vida útil de estos embalses.

El problema de la sedimentación en embalses a nivel nacional está siendo estudiada y monitoreada. En años recientes el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA) viene implementando un acciones en el marco del "Programa de Monitoreo Hidrometeorológico y Gestión Óptima de Embalses" para monitorear veintisiete presas de riego y agua potable ubicadas en La Paz, Potosí, Cochabamba, Chuquisaca, Oruro y Tarija.

Por tales motivos, se desea conocer cómo actúan los procesos de sedimentación en el embalse de la presa El Molino, ubicada en la provincia Méndez. Al pertenecer a una zona de montaña y en parte a la cuenca Alta del río Pilcomayo, se estima que la cuenca sea bastante erosiva.

El objetivo de la investigación es analizar el aporte de sedimentos anual promedio que se deposita en el embalse mediante la aplicación de USLE para estimar la vida útil del embalse.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra localizado en el municipio El Puente, provincia Eustaquio Méndez, colindando con los límites de las provincias de Avilés y Cercado, del departamento de Tarija, Bolivia.

**Tabla 1: Ubicación del embalse El Molino**

|                   |                |
|-------------------|----------------|
| Latitud Sur:      | 21°32'11"      |
| Latitud Oeste:    | 64°59'47"      |
| Coordenada Este:  | 293,237.21 m   |
| Coordenada Norte: | 7,617,164.15 m |
| Zona (U.T.M.):    | 20 K           |

*Fuente: Elaboración Propia*

El embalse El Molino se encuentra dentro de la cuenca del río Tomayapo, que a su vez forma parte de la cuenca Alta del río Pilcomayo.

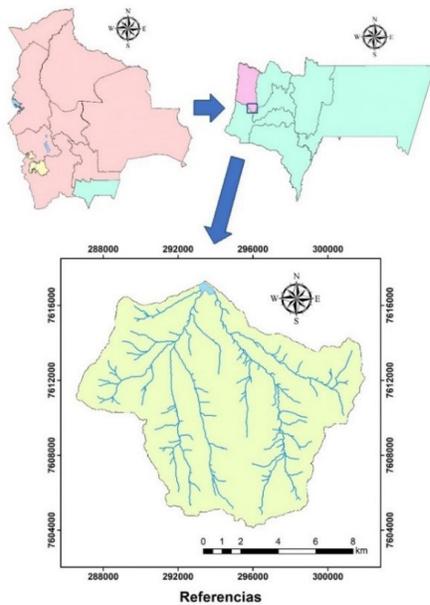
**Tabla 2: Características de la presa y el embalse El Molino**

| Descripción                               | Valor        | Unidad             |
|---|--------------|--------------------|
| Área de la cuenca de aporte               | 119.03       | [km <sup>2</sup> ] |
| Vol. inicial N.A.N. (2015)                | 2,402,200    | [m <sup>3</sup> ]  |
| Volumen útil del embalse                  | 2,155,177.50 | [m <sup>3</sup> ]  |
| Área del embalse a N.A.N.                 | 32.22        | [ha]               |
| Cota de coronamiento                      | 3,550.00     | [m.s.n.m.]         |
| Nivel de aguas extraordinarios (N.A.M.E.) | 3,549.02     | [m.s.n.m.]         |
| Nivel de aguas normales (N.A.N.)          | 3547         | [m.s.n.m.]         |
| Longitud de coronación                    | 369          | [m]                |
| Ancho de coronación                       | 3            | [m]                |
| Altura de la presa                        | 29           | [m]                |
| Tipo de presa                             | -            | CCR                |

*Fuente: CIAGUA, 2021; GAD Tarija, 2019.*

La cuenca presenta un clima árido y frío, en relación con la fisiografía las laderas son escarpadas a muy escarpadas y en invierno las zonas más elevadas presentan recubrimiento glaciar. Entre la vegetación predominante se encuentra la paja brava (*Stipa ichu*) y la thola (*Parastrephia lepidophylla*), los cultivos principales son ajo (*Allium sativum*), haba (*Vicia faba*), arveja (*Pisum sativum* L.), papa (*Solanum tuberosum*) y cebada (*Hordeum vulgare*).

**Figura 1: Ubicación del área de estudio.**



*Fuente: Elaboración Propia*

El periodo de estudio abarca desde el año 2015 en el cual la presa inició sus operaciones y el año 2019, donde el Centro de Investigación del Agua (CIAGUA) de la universidad Autónoma Juan Misael Saracho ha realizado un levantamiento topobatemétrico del embalse.

## 2.2. PROPUESTA METODOLÓGICA

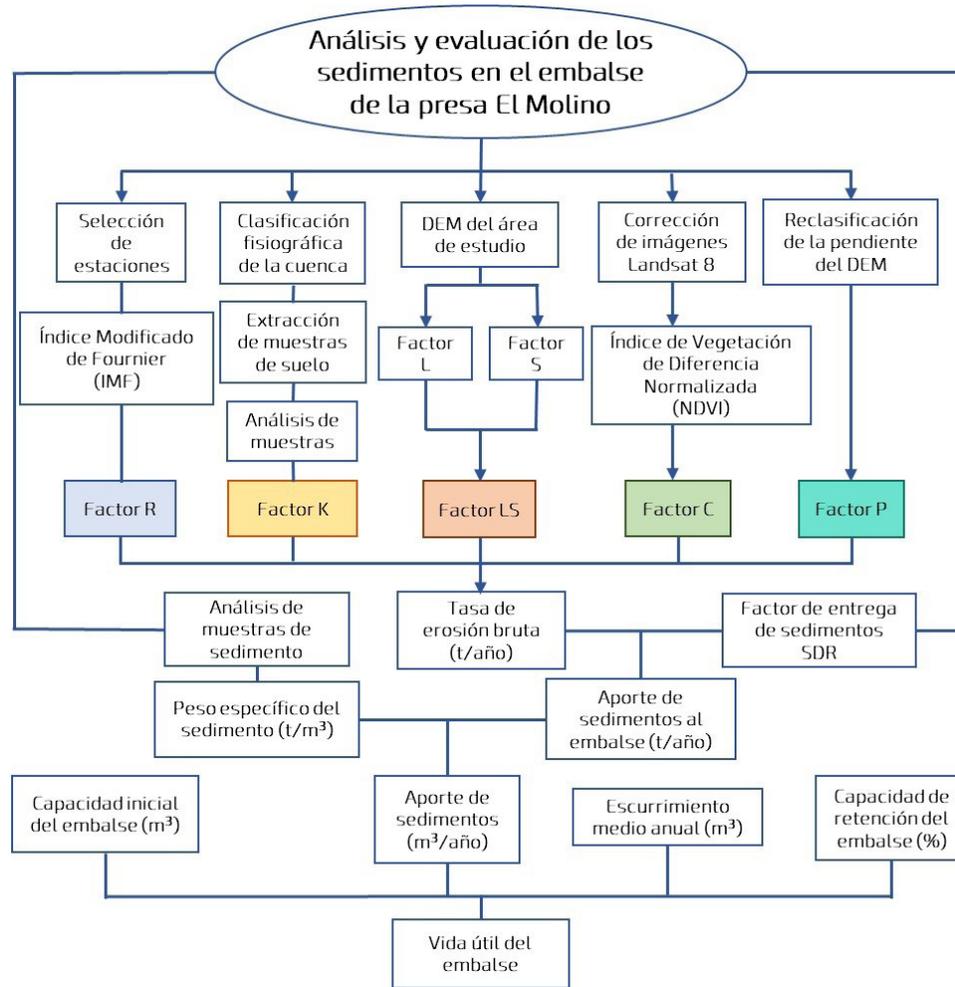
La presente investigación es de carácter exploratorio – descriptivo, involucra el estudio de una cuenca donde se tiene escasa información relacionada a los procesos erosivos y de sedimentación presentes en el área. Además, de la identificación de los sectores que presentan los valores más elevados de tasa de erosión.

Para la estimación de la tasa de erosión presente en la cuenca se determinó cada uno de los factores del modelo USLE por separado:

- **Factor R:** Se emplearon los datos de precipitación de la estación Campanario. Se utilizaron los datos de esta única estación debido a la inconsistencia y discontinuidad de registro de las otras estaciones cercanas. Con los datos de precipitación se determinó el Índice Modificado de Fournier (IMF) y a partir de ello el factor R.
- **Factor K:** Se realizó la extracción de 15 muestras de suelo en la cuenca para determinar mediante ensayos de laboratorio la granulometría, el peso específico del suelo y el contenido de materia orgánica.
- **Factor LS:** Se trabajó con el DEM ALOS PALSAR con una resolución espacial de 12,5 m. A partir del DEM se generó un ráster del factor LS con una resolución de 15 m.
- **Factor C:** Se emplearon imágenes LANDSAT 8 para generar ráster de NDVI con las bandas de luz infrarroja cercana (B5) y luz roja visible (B4); a partir de ellos se generaron los ráster desde 2015 hasta 2019 del factor C con una resolución de 15 m.
- **Factor P:** Para su determinación se empleó el DEM ALOS PALSAR, con la pendiente de la cuenca se realizó una reclasificación por tablas para generar el ráster del factor P.

A partir de la tasa de erosión, se puede determinar la producción de sedimentos y a su vez el aporte de sedimentos hacia el embalse. Finalmente, para la estimación de la vida útil del embalse se requiere conocer la capacidad inicial del embalse, aporte de sedimentos anual, escurrimiento medio anual y la capacidad de retención del embalse.

Figura 2: Procedimiento metodológico de la investigación.



Fuente: Elaboración Propia

La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) calculará la pérdida de suelo para un lugar determinado a través del producto de seis factores principales cuyos valores más probables en un lugar particular pueden expresarse numéricamente por la siguiente ecuación (Wischmeier y Smith, 1978):

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

Para la determinación de cada uno de los factores del modelo USLE se utilizaron las siguientes metodologías:

- El factor erosividad de lluvias (factor R) se estimó mediante la ecuación propuesta por ICONA (1988), mencionado en Mancilla Escobar (2008).

$$R = 2.56 * IMF^{1.065} \quad (2)$$

- Para el factor de erodabilidad del suelo (factor K) se empleó el método de Wischmeier y Smith (1978).

$$K = \frac{0.1317}{100} * [2.1 * M^{1.14} * 10^{-4} * (12 - 0M) + 3.25 * (S - 2) + 2.5 * (P - 3)] \quad (3)$$

- El método seleccionado para la determinación del factor de longitud y grado de pendiente (factor LS) fue el propuesto por Desmet y Govers (1996) y McCool et al. (1989), mencionados en Hrabalíková y Janeček (2017).

**Desmet y Govers (1996):**

$$L_{(i,j)} = \frac{(A_{(i,j),in} + D^2)^{(m+1)} - A_{(i,j),in}^{(m+1)}}{x_{(i,j)}^m * D^{(m+2)} * 22,13^m} \quad (4)$$

McCool et al. (1989):

$$\begin{matrix} Si \alpha < 0,09 & S = (10,8 * \sin \beta + 0,03) \\ Si \alpha \geq 0,09 & S = (16,8 * \sin \beta - 0,5) \end{matrix} \quad (5)$$

- Para el factor del manejo de cobertura vegetal (Factor C) se utilizó la fórmula desarrollada por van der Knijff et al. (1999).

$$C = e^{(-\alpha * \frac{NDVI}{(\beta - NDVI)})} \quad (6)$$

- El factor de prácticas de conservación de suelos se estimó a partir de una tabla del Factor P calibrada en función de la pendiente y el tipo de cultivo, desarrollada por KICT (1992), citado en Xiong et al. (2019).

Tabla 3: Factor P.

| Pendiente (%) | Cultivos en contorno | Cultivos en franjas | Cultivos en terrazas |
|---------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 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: Xiong et al., 2019.

Para determinar el aporte de sedimentos a partir de la erosión bruta presente en la cuenca se utilizó la siguiente ecuación:

$$SY = SDR * E \quad (7)$$

El factor de entrega de sedimentos (SDR) empleado fue el propuesto por la USDA (1972), citado en Das y Sarma (2017).

$$SDR = 0.5656 * A^{-0.11} \quad (8)$$

Los resultados que se obtuvieron por medio de USLE se expresan en toneladas y para convertir las unidades a m³ fue necesario extraer 5 muestras de sedimento de las proximidades del embalse para determinar el peso específico del sedimento depositado (t/m³) y con ello determinar el aporte de sedimentos (SY) en m³/año. Las metodologías empleadas fueron Lane y Koelzer (1943) y Miller (1953), citado en Strand y Pemberton (1982).

**Lane y Koelzer (1943):**

$$W_T = (W_1 + K * \log_{10} T) \quad (9)$$

**Miller (1953):**

$$W_T = W_1 + 0.4343 * K * \left[ \frac{T}{T-1} * (\ln T) - 1 \right] \quad (10)$$

El escurrimiento medio anual se determinó mediante la ecuación propuesta por la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2015).

$$V_m = A * C_e * P_m \quad (11)$$

Para la capacidad de retención del embalse se utilizaron las siguientes metodologías:

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

$$T_e = 100 * \left( 1 - \frac{1}{1 + 0.0021 * D * \frac{C}{W}} \right) \quad (12)$$

● Gill (1979):

$$T_e = \frac{(C/I)}{[0.012 + 1.02 * (C/I)]} \quad (13)$$

● Jothiprakash y Garg (2008):

$$T_e = \frac{\left(\frac{C}{I}\right)}{\left(0.00013 + 0,01 * \frac{C}{I} + 0.0000166 * \sqrt{\frac{C}{I}}\right)} \quad (14)$$

Finalmente, para estimar la vida útil del embalse se usó la ecuación propuesta por Gill (1979).

$$C - C_0 = \frac{G * T_e * \Delta t}{\bar{\gamma}} \quad (15)$$

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).

$\Delta t$  = 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 ( $t/m^3$ ).

Para estimar la duración de la vida útil del embalse ( $\Delta t$ ) de la Ecuación 15, también se toma en cuenta el criterio que se menciona en Singh (1980) 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.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. USLE

Los resultados del factor R se muestran a continuación.

Tabla 4: Valores del factor R.

| Año               | Factor R      |
|-------------------|---------------|
| 2015              | 265.23        |
| 2016              | 110.14        |
| 2017              | 256.47        |
| 2018              | 269.32        |
| 2019              | 120.68        |
| <b>PROMEDIO =</b> | <b>204.37</b> |

Fuente: Elaboración Propia

Figura 3: Resultados del factor R.

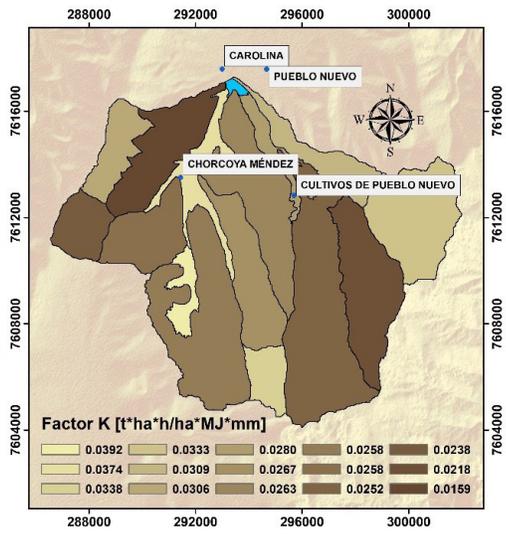


Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con los resultados del factor R, los valores más altos se presentaron en los años 2018 y 2015 con 269.32 y 265.23 MJ/ha\*mm/h, respectivamente. Mientras que los valores más bajos fueron de 120.68 y 110.14 MJ/ha\*mm/h correspondientes a los años 2019 y 2016. A partir de esto se puede determinar que el crecimiento porcentual del factor R para el 2018 fue de 31.78% y para el 2015 fue de 29.78% en relación con el valor promedio.

El mapa del factor de erodabilidad del suelo (factor K) muestra la distribución espacial de los valores en las 15 subdivisiones del área de la cuenca.

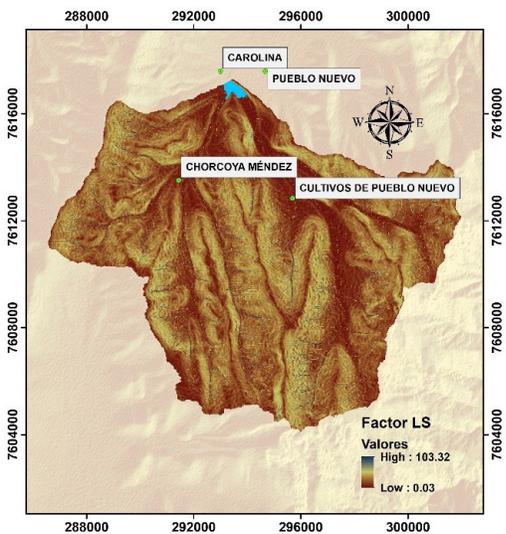
Figura 4: Mapa del factor K.



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del Factor LS se muestran en la Figura 5.

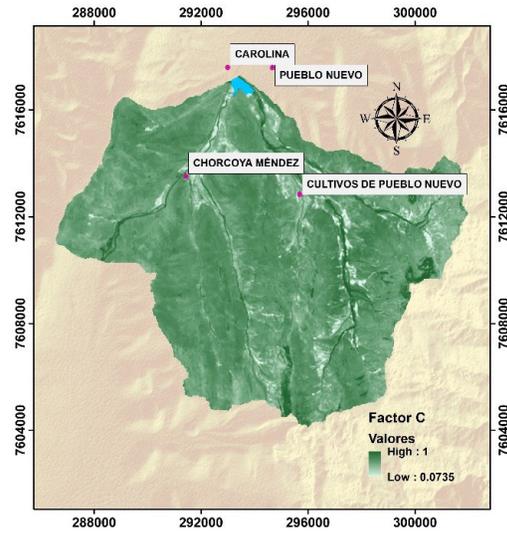
Figura 5: Mapa del factor LS.



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del factor C desde 2015 hasta 2019 no presentaron variaciones significativas.

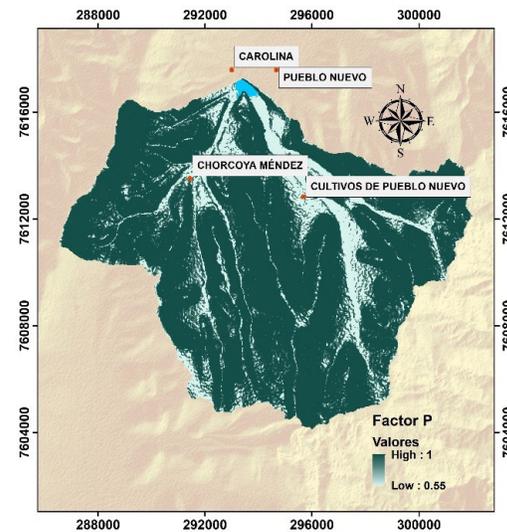
Figura 6: Mapa del factor C promedio (2015 – 2019).



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados del factor de prácticas de conservación de suelos mostraron que el valor promedio de 0.9 es el que predomina en la cuenca.

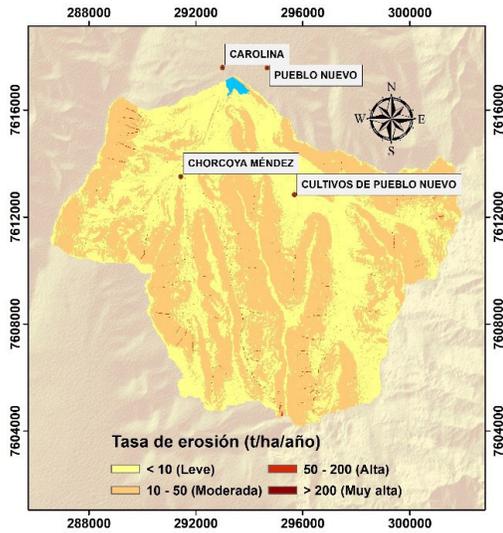
Figura 7: Mapa del factor P.



Fuente: Elaboración Propia

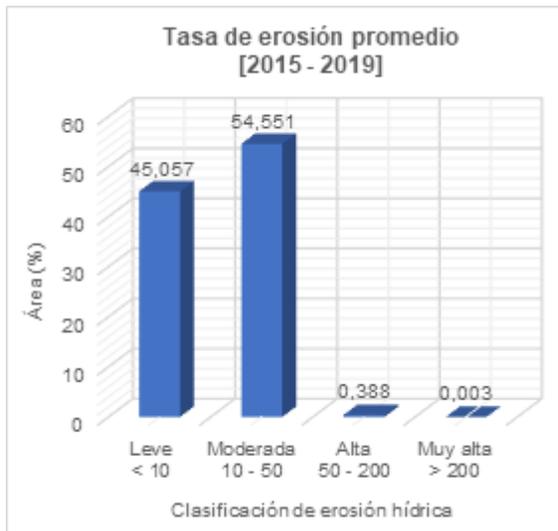
A partir de la multiplicación de los seis factores del modelo de USLE se obtienen los valores de tasa de erosión para el periodo 2015 – 2019.

Figura 8: Mapa de tasa de erosión promedio (2015-2019).



Fuente: Elaboración Propia

Figura 9: Resultados de los valores de tasa de erosión.



Fuente: Elaboración Propia

### 3.2. APOORTE DE SEDIMENTOS

Los resultados de tasa de erosión obtenidos mediante USLE se muestran a continuación:

Tabla 5: Resultados de tasa de erosión promedio anual

| AÑO        | VALOR PROMEDIO (t/ha/año) |
|------------|---------------------------|
| 2015       | 15.03                     |
| 2016       | 6.49                      |
| 2017       | 15.08                     |
| 2018       | 16.03                     |
| 2019       | 7.01                      |
| PROMEDIO = | 11.93                     |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la tasa de erosión bruta se obtuvieron como producto de la multiplicación entre los valores de tasa de erosión de USLE y el área de drenaje en ha.

Tabla 6: Resultados de tasa de erosión bruta.

| AÑO  | EROSIÓN BRUTA (t/año) |
|------|-----------------------|
| 2015 | 178,858.04            |
| 2016 | 77,250.36             |
| 2017 | 179,497.57            |
| 2018 | 190,828.24            |
| 2019 | 83,387.98             |

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de aporte de sedimentos al aplicar el factor de entrega de sedimentos de la USDA se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7: Resultados de aporte de sedimentos (t/año).

| AÑO  | MODELO USLE           |      |
|------|-----------------------|------|
|      | SDR <sub>USDA</sub> = | 0.33 |
|      | SY(t/año)             |      |
| 2015 | 59,799.48             |      |
| 2016 | 25,827.92             |      |
| 2017 | 60,013.30             |      |
| 2018 | 63,801.60             |      |
| 2019 | 27,879.98             |      |

Fuente: Elaboración Propia

Al emplear el peso específico del sedimento depositado en el embalse (t/m<sup>3</sup>) se determinaron los valores de aporte de sedimentos en (m<sup>3</sup>/año).

Tabla 8: Resultados del aporte de sedimentos anual (m<sup>3</sup>/año).

| AÑO  | MODELO USLE                           |                                       |
|------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|      | Peso específico (t/m <sup>3</sup> ) = | 1.37                                  |
|      | SY(m <sup>3</sup> /año)               |                                       |
|      |                                       | SY <sub>acum.</sub> (m <sup>3</sup> ) |
| 2015 | 43,569.44                             | 43,569.44                             |
| 2016 | 18,818.02                             | 62,387.46                             |
| 2017 | 43,725.23                             | 106,112.69                            |
| 2018 | 46,485.35                             | 152,598.04                            |
| 2019 | 20,313.13                             | 172,911.18                            |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3. VIDA ÚTIL DEL EMBALSE

Para la determinación de la vida útil se utilizaron los datos y procedimientos que se especifican en la Tabla 9.

Tabla 9: Vida útil del embalse de la presa El Molino.

| DATOS  |      |  |              |                                      |   | UNIDADES        |                |
|--|------|--|--------------|--------------------------------------|---|-----------------|----------------|
| Capacidad inicial del embalse  |      |  |              |                                      |   | 2,402,200       | m <sup>3</sup> |
| Escurrimiento medio anual (/)  |      |  |              |                                      |   | 3,969,353.65    | m <sup>3</sup> |
| Aporte de sedimentos anual   |      |  |              |                                      |   | 34,582.24       | m <sup>3</sup> |
| Vida útil del embalse cuando su capacidad de almacenamiento se reduce al |      |  |              |                                      |   | 20              | %              |
| CAPACIDAD (C) (m <sup>3</sup> )  | C/I  | CAPACIDAD DE RETENCIÓN DEL EMBALSE (%) | PROMEDIO (%) | VOLUMEN DEPOSITADO (m <sup>3</sup> ) | INCREMENTO DE VOLUMEN (m <sup>3</sup> ) | DURACIÓN (AÑOS) |                |
| 2,402,200  | 0.61 | 97.19                                  | 96.93        | 33,519.73                            | 480,440                                 | 14.33           |                |
| 1,921,760  | 0.48 | 96.67                                  | 96.25        | 33,283.92                            | 480,440                                 | 14.43           |                |
| 1,441,320  | 0.36 | 95.82                                  | 95.00        | 32,852.67                            | 480,440                                 | 14.62           |                |
| 960,880  | 0.24 | 94.18                                  | 91.87        | 31,771.93                            | 480,440                                 | 15.12           |                |
| 480,440  | 0.12 | 89.57                                  |              |                                      | Σ =                                     | 58.51           |                |
| VIDA ÚTIL DEL EMBALSE ≈  |      |  |              |                                      |   | 59              |                |

Fuente: Elaboración Propia

## 4. DISCUSIÓN

Los resultados de la tasa de erosión promedio anual obtenidos por USLE muestran que la erosión predominante en el área es de clasificación leve a moderada. Como lo indica van der Knijff et al. (1999) una explicación posible es que el principal tipo de erosión presente en el área sea la erosión por cárcavas, y que no se la puede predecir utilizando el enfoque de USLE a menos que se disponga de imágenes DEM muy detalladas. Además de que la erosión por cárcavas está relacionada con la geología característica del lugar.

La posible razón de que la variabilidad interanual entre los resultados del factor R sea tan alta es que se trabajó con una base de datos inferior a los 22 años, que es el periodo mínimo recomendado para la determinación del factor R (Renard et al., 1997; Verstraeten et al., 2006).

De acuerdo con Torri et al. (1997) la variación entre los resultados del factor K se puede deber a factores como la existencia de diferentes condiciones medias antecedentes de la superficie del suelo y al periodo limitado de medición de pérdida de suelo. En algunas situaciones la relación entre la estructura y permeabilidad del suelo genera una variación significativa sobre los valores del factor K a causa de la influencia negativa de las propiedades independientes del suelo como los minerales, materia orgánica y carbono (Ostovari et al., 2016; Vaezi y Sadeghi, 2011).

La precisión del factor LS que se obtiene mediante un DEM depende de los métodos de cálculo elegidos y de sus atributos básicos como la resolución, la longitud total del flujo y la pendiente (Kruk et al., 2020). A medida que aumenten la resolución y la precisión del DEM, la topografía se describirá con mayor precisión y las estimaciones de erosión se aproximarán a los valores reales (Hickey, 2000).

Según van der Knijff et al. (1999) en algunos casos se subestiman los valores del factor C derivados del

NDVI cuando se emplean imágenes satelitales de baja resolución. Mientras que cuando no se tiene información respecto a las prácticas de conservación de suelos del lugar, se puede determinar el factor P en base al grado de la pendiente del terreno (Xiong et al., 2019).

De los resultados de USLE, se observa que el factor R es el que determina la magnitud de la tasa de erosión y por su parte, el factor LS es el que se encarga de la distribución espacial de los valores de tasa de erosión en la cuenca.

Aráujo et al. (2006) menciona que la sedimentación de los embalses tiene un impacto relevante en la disponibilidad de agua en regiones semiáridas. Teóricamente, la eficiencia de retención de un embalse disminuirá continuamente una vez que se inicie el almacenamiento; sin embargo, para la mayoría de los embalses no es práctico analizar la eficiencia de retención en intervalos menores a 10 años debido a la variabilidad de la entrada anual de sedimentos (Strand y Pemberton, 1982).

Al realizar la comparativa entre los resultados obtenidos mediante el modelo USLE con los del CIAGUA (2021) se observa que existe una diferencia de 4,78 % entre los resultados de USLE y la topobatimetría.

**Tabla 10: Comparativa entre USLE y la topobatimetría de los resultados de aporte de sedimentos anual acumulado.**

| AÑO  | COMPARACIÓN                           |                                 |
|------|---------------------------------------|---------------------------------|
|      | USLE<br>$SY_{acum}$ (m <sup>3</sup> ) | BATIMETRÍA<br>(m <sup>3</sup> ) |
| 2014 | 0                                     | 0                               |
| 2015 | 43,569.44                             | -                               |
| 2016 | 62,387.46                             | -                               |
| 2017 | 106,112.69                            | -                               |
| 2018 | 152,598.04                            | -                               |
| 2019 | 172,911.18                            | 165,029.60                      |

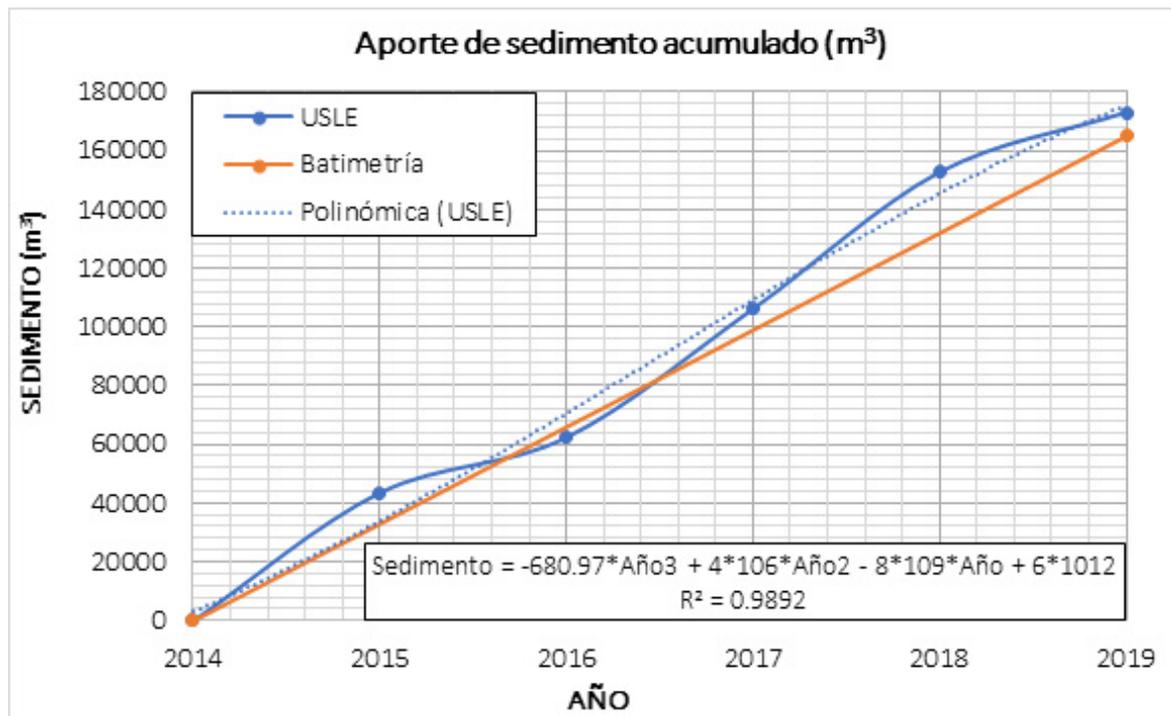
*Fuente: Elaboración Propia.*

La cantidad final de sedimentos que sale de las cuencas como carga de sedimentos, depende de la relación de los tres subprocesos: desprendimiento, transporte y deposición. Dependiendo del grado de progreso de la erosión, el proceso puede ocurrir de varias formas (láminas, cárcavas, zanjas) que dependen de diversos factores entre los que

se mencionan: características físicas del suelo, morfología del terreno, clima y tipo de protección del suelo (Flórez et al., 2018).

En la Figura 11 se puede ver la aproximación entre los resultados del modelo USLE y la batimetría, donde los resultados de USLE se ajustan con un coeficiente de correlación de 98.92%.

Figura 10: Gráfica del aporte de sedimentos anual acumulado.



Fuente: Adaptado de CIAGUA (2021).

## 5. 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.

- 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.
- 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.
- De acuerdo con los resultados obtenidos de escurrimiento medio anual (3,969,353.65 m<sup>3</sup>), aporte de sedimentos anual (34,582.24 m<sup>3</sup>) y capacidad de retención; se estima que en aproximadamente 59 años la capacidad del embalse El Molino se reducirá de 2,402,200 a 480,440 m<sup>3</sup>.
- Se evidencia la necesidad de formular e implementar planes para monitorear periódicamente la sedimentación del embalse El Molino para documentar la capacidad de almacenamiento restante y estimar cuándo se verán afectadas las instalaciones importantes de la presa y del embalse. Al mismo tiempo, es necesario formular un plan de gestión de sedimentos a largo plazo. Este plan de gestión debería incluir la aplicación de prácticas sostenibles de gestión de sedimentos o la eventual puesta fuera de servicio del embalse.
- Dado que el embalse El Molino no fue diseñado para gestionar la sedimentación, se necesitan nuevas estrategias de gestión activas y enérgicas para lograr la sostenibilidad del embalse.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- 🔖 Amarilla, M., y Gamarra, M. (2008). Estudios de Erosión, Transporte y Sedimentación en la Cuenca del Río Pilcomayo. *Somos Pilcomayo*, 2, 40–41.
- 🔖 Annandale, G. W., Morris, G. L., y Karki, P. (2016). Extending the Life of Reservoirs. Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-River Hydropower (World Bank Group).
- 🔖 Aráujo, J. C. D., Güntner, A., y Bronstert, A. (2006). Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 51(1), 157–170. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.1.157>
- 🔖 Aráujo, J. C. D., y Knight, D. W. (2005). Assessment of sediment yield of watersheds by reservoir survey and simulation modelling in Brazilian semiarid environment. *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins*, 124–130.
- 🔖 Arekhi, S., Darvishi Bolorani, A., Shabani, A., Fathizad, H., y Ahamdy-asbchin, S. (2012). Mapping Soil Erosion and Sediment Yield Susceptibility using RUSLE, Remote Sensing and GIS (Case study: Cham Gardalan Watershed, Iran). *Advances in Environmental Biology*, 6, 16.
- 🔖 CIAGUA. (2021). Informe Técnico del levantamiento Topobatómico del Embalse de la Presa El Molino. S/Editorial.
- 🔖 Cisneros, J. M., Cholaky, C. G., Cantero Gutiérrez, A., González, J. G., Reynero, M. A., Diez, A., y Bergesio, L. (2012). Erosión hídrica Principios y técnicas de manejo Capítulo 3: El proceso de la erosión hídrica (Primera Edición). UniRío Editora.
- 🔖 Coppola, A., Di Renzo, G. C., Altieri, G., y D'Antonio, P. (2020). Innovative Biosystems Engineering for Sustainable Agriculture, Forestry and Food Production (Vol. 67). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39299-4>

- Das, T., y Sarma, A. K. (2017). Estimation of annual average soil loss and preparation of spatially distributed soil loss map: A case study of Dhansiri River basin. *S/Editorial*, 46.
- Dutta, S. (2016). Soil erosion, sediment yield and sedimentation of reservoir: A review. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(3), 123. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0182-y>
- Efthimiou, N., Lykoudi, E., Panagoulia, D., y Karavitis, C. (2016). Assessment of soil susceptibility to erosion using the EPM and RUSLE models: The case of Venetikos river catchment. 18, 164–179.
- El Kadi Abderrezzak, K., y Findikakis, A. N. (2018). Reservoir Sedimentation: Challenges and Management. *HydroLink*, 3, 32.
- Flórez, M. M. T., Parra Sánchez, L. N., Bolaños Benitez, S. V., Gallo Sánchez, L. J., Poveda Sáenz, A., y Agudelo Echavarría, D. M. (2018). Tasas de sedimentación y características de sedimentos de fondo en tres embalses de Antioquia, Colombia. *Ingeniería del agua*, 22(4), 177–194. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8001>
- GAD Tarija. (2019). Programa de diversificación productiva para el desarrollo departamental de Tarija.
- Gaitán, J., Navarro, M. F., Vuegen, L. T., Pizarro, M. J., Carfagno, P., y Rigo, S. (2017). Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la República Argentina (Primera Edición). Ediciones INTA.
- Gill, M. A. (1979). Sedimentation and useful life of reservoirs. *Journal of Hydrology*, 44(1–2), 89–95. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90148-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90148-3)
- Hickey, R. (2000). Slope Angle and Slope Length Solutions for GIS. *Cartography*, 29(1), 1–8. <https://doi.org/10.1080/00690805.2000.9714334>
- Hrabalíková, M., y Janeček, M. (2017). Comparison of different approaches to LS factor calculations based on a measured soil loss under simulated rainfall. *Soil and Water Research*, 12(No. 2), 69–77. <https://doi.org/10.17221/222/2015-SWR>
- Janeau, J. L., Maglinao, A. R., Lorent, C., Bricquet, J. P., y Boonsaner, A. (2003). The off-site effect of soil erosion: A case study of the Mae Thang reservoir in Northern Thailand. *International Water Management Institute*, 191–202.
- Jothiprakash, V., y Garg, V. (2008). Re-look to conventional techniques for trapping efficiency estimation of a reservoir. *International Journal of Sediment Research*, 23(1), 76–84. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(08\)60007-4](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(08)60007-4)
- Kinnell, P. I. A., y Risse, L. M. (1998). USLE-M: Empirical Modeling Rainfall Erosion through Runoff and Sediment Concentration. *Soil Science Society of America Journal*, 62(6), 1667–1672. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200060026x>
- Kruk, E., Klapa, P., Ryczek, M., y Ostrowski, K. (2020). Influence of DEM Elaboration Methods on the USLE Model Topographical Factor Parameter on Steep Slopes. *Remote Sensing*, 12(21), 3540. <https://doi.org/10.3390/rs12213540>
- Lane, E. W., y Koelzer, V. A. (1943). A study of methods used in Measurement and Analysis of Sediment Loads in Streams. Iowa Institute of Hydraulic Research.
- Mancilla Escobar, G. A. (2008). Uso y Conservación de Suelos "Uso de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE) en el campo forestal". Universidad de Chile.
- Montoya Jaramillo, L. J., y Montoya Ramírez, R. D. (2005). Transporte de sedimentos en las corrientes del departamento de Antioquia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 4(7), 127–140.

- 🔖 Ostovari, Y., Ghorbani-Dashtaki, S., Bahrami, H.-A., Naderi, M., Dematte, J. A. M., y Kerry, R. (2016). Modification of the USLE K factor for soil erodibility assessment on calcareous soils in Iran. *Geomorphology*, 273, 385–395. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.08.003>
- 🔖 Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., y Yoder, D. C. (1997). *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* (Primera Edición). United States Department of Agriculture (USDA).
- 🔖 Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2015). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015. Diario Oficial de la Federación.
- 🔖 Singh, G. (1980). *Irrigation Engineering*. Rajsons Publications Pvt. Ltd.
- 🔖 Strand, R. I., y Pemberton, E. L. (1982). *Reservoir Sedimentation Technical Guideline for Bureau of Reclamation*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
- 🔖 Torri, D., Poesen, J., y Borselli, L. (1997). Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. *CATENA*, 31(1–2), 1–22. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(97\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(97)00036-2)
- 🔖 Vaezi, A. R., y Sadeghi, S. H. R. (2011). Evaluating the RUSLE model and developing an empirical equation for estimating soil erodibility factor in a semi-arid region. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3), 912–923. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110903-229-10>
- 🔖 Vallejos, P., Zamora, G., y Jorge, J. (2018). Estimación de la tasa sedimentos en la cuenca minera del lago Poopo mediante el modelo potencial de erosión de suelos (EPM) y tendencias ante variaciones climáticas—Uso de herramientas SIG y teledetección. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4, 50–67.
- 🔖 van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., y Montanarella, L. (1999). *Soil Erosion Assessment in Italy*. Space Applications Institute.
- 🔖 Verstraeten, G., y Poesen, J. (1999). The nature of small-scale flooding, muddy floods and retention pond sedimentation in central Belgium. *Geomorphology*, 29(3–4), 275–292. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00020-3)
- 🔖 Verstraeten, G., Poesen, J., Demarée, G., y Salles, C. (2006). Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. *Journal of Geophysical Research*, 111, 1–11. <https://doi.org/10.1029/2006JD007169>
- 🔖 Wischmeier, W. H., y Smith, D. D. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses*. United States Department of Agriculture (USDA).
- 🔖 Xiong, M., Sun, R., y Chen, L. (2019). Global analysis of support practices in USLE-based soil erosion modeling. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 43, 391–409. <https://doi.org/10.1177/0309133319832016>