

# **CAPÍTULO I**

## **GENERALIDADES**

## **1. Generalidades**

### **1.1. Antecedentes**

El distrito rural VI del municipio de Tupiza que cuenta con una población de 5.662 habitantes (AATEC, 2016 - 2020) al cual pertenecen las comunidades de Entre Ríos, La Angostura, Peña Blanca, La Deseada, Chuquiago, Villa Victoria, Nazareno, Tomatas, Santa Rosa, Suipacha y Charaja, sus principales actividades son la agropecuaria y el turismo. Estas comunidades están ubicadas en las orillas del río San Juan del Oro, dicho río tiene comportamiento muy variado en diferentes épocas del año en especial en épocas de lluvia donde aumenta su caudal de forma repentina y de gran magnitud causando gran daño a los terrenos de cultivo de las comunidades antes mencionadas debido al desborde de este río porque no se cuenta con obras de protección para poder controlar estos eventos.

En los últimos años se dieron los casos más lamentables en estas comunidades ya que dichas crecidas del río arrasaron con gran cantidad de terrenos agrícolas e inundo muchos otros como se puede verificar con la siguiente información:

Puente ferroviario de Entre Ríos está destruido (24/01/2013 Noticias)

El puente ferroviario sobre el río San Juan de Oro, que une Bolivia con Argentina, fue arrastrado por la crecida del afluente. Además, entre el viernes y domingo, 37 comunidades de la provincia Sud Chichas quedaron en total aislamiento por las riadas. La fuerte tormenta se llevó el único puente ferroviario que conecta Tupiza-Villazón y La Quiaca (Argentina); y también un puente carretero vecinal que comunica a Tupiza con la comunidad de Chuquiago y otras.

El puente de acero sobre el río San Juan del Oro data de más de 100 años y sucumbió ante el escaso mantenimiento y fenómeno climático. Esta vía férrea es el principal tránsito que une a Bolivia y Argentina. Es utilizada por turistas que visitan el valle de Tupiza hasta el salar de Uyuni. Además, el ferrocarril es el principal medio de transporte para la exportación de zinc, plomo y otros minerales. (Razon, Tupiza Bolivia Popular, 2013)

El desborde del río Tupiza se lleva 47 casas; el presidente se traslada a la zona (31 de enero de 2018 / 15:33)

La intensidad de las lluvias continúa causando destrozos en varios puntos del país y esta vez fue en Tupiza, donde este miércoles el desborde del río del mismo nombre colapsó 47 viviendas y un puente y dejó al menos un centenar de damnificados.

El ministro de Defensa, Javier Zavaleta, reportó el envío de la ayuda humanitaria para atender las necesidades de los damnificados en Tupiza, donde barrios enteros fueron afectados por el desborde del río, algo que los pobladores aseguran que no había ocurrido antes.

Desde ese lugar, la red Unitel entrevistó a un vecino que relató que 42 casas se perdieron en los barrios 21 de Diciembre y Santa Elena, aunque la cifra oficial proporcionada por el titular de Defensa es de 47. “Se han perdido todas las viviendas”, aseguró, mientras el canal mostraba imágenes cómo las calles de Tupiza se encontraban inundadas. (Razon, Tupiza Bolivia Popular, 2018)

1 de febrero de 2023 #TUPIZA

Las comunidades de Suipacha, Tomatas, Santa Rosa y otros pertenecientes al Municipio de Tupiza existe inundaciones en sus terrenos por la crecida de los ríos Tupiza y San Juan del Oro, las diferentes familias que viven en estos lugares piden una colaboración ayuda clamorosa a las autoridades de Tupiza, Potosí y al Gobierno Central, alerta roja por las constantes lluvias que se tiene por las inclemencias de la naturaleza. (Interactiva Press, 2023)

*Figura. 1-1. Inundaciones y pérdidas de cultivo en zona de estudio.*



*Fuente:* (Interactiva Press, 2023)

Teniendo como antecedentes estos eventos extremos se puede ver la necesidad urgente de gestionar medidas de mitigación para poder hacer frente a futuros desastres a causa de las precipitaciones extremas en la zona, ya que después de todo lo ocurrido en estas

comunidades no se ha realizado ningún tipo de estudio o proyecto de protección fluvial que puedan ayudar a las familias a controlar las crecidas del río, por tal motivo este proyecto se centrará en la construcción de un modelo hidráulico con el software IBER que nos pueda ayudar a identificar las zonas más expuestas a las inundaciones y desborde del río San Juan del Oro.

## **1.2. Descripción del problema**

### **1.2.1. Planteamiento del problema**

El problema de las inundaciones y desbordamientos de los ríos es un problema generalizado que plantea importantes amenazas tanto para las vidas humanas como para las propiedades. Es un fenómeno complejo que está influenciado por una variedad de factores, incluido el cambio climático, las prácticas de uso del suelo, el desarrollo urbano, prevención con obras de protección, etc. La creciente intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, como fuertes lluvias y tormentas, están contribuyendo a las constantes desbordes e inundaciones de ríos.

En el sitio de estudio estos eventos se han vuelto cada vez más frecuentes y lamentablemente tienen consecuencias devastadoras, como; la destrucción de caminos, puentes, daños materiales, pérdida de cultivos, y pérdidas de vidas humanas.

Los impactos de las inundaciones del río San Juan del Oro, a menudo se sienten con mayor intensidad en las comunidades que se ubican en laderas de este río siendo así más vulnerables ya que carecen de recursos e infraestructura suficientes para hacer frente a estas situaciones, causa de esto en los últimos 15 años se tuvo una pérdida de terrenos cultivables de aproximadamente 8 (ha) esto causa que muchos productores dejen el rubro y emigren hacia las ciudades capitales del país o al país vecino de la Argentina ya que la falta de planificación de mediantes o estudios de recuperación y protección de terrenos es casi nula por parte de las autoridades llamadas a prever estos requerimientos y cada año que pasa ha aumentado la exposición de esta población a riesgo de inundaciones o desborde del río.

### **1.2.2. Formulación del problema**

¿Cómo influyen las precipitaciones intensas, el incremento repentino del caudal del río San Juan del Oro y la falta de obras de protección fluvial en la frecuencia y magnitud de las inundaciones que afectan a los terrenos de cultivo, infraestructuras viales y la

economía de las comunidades del Distrito VI del municipio de Tupiza, durante los periodos de lluvias intensas en los últimos años?

### **1.2.3. Sistematización del problema**

- ¿Cuál es el problema principal identificado?
- ¿Qué factores contribuyen a este problema?
- ¿Qué consecuencias se han observado?
- ¿Qué población o zona es más vulnerable?
- ¿Qué acciones se han tomado hasta ahora?
- ¿Qué necesidades o vacíos existen?
- ¿Por qué es urgente atender este problema?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

- ✓ Identificar zonas vulnerables a inundaciones y desbordes de río en el distrito rural VI del municipio de Tupiza realizando una modelación hidráulica aplicando el software Iber en el río San Juan del Oro.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- ✓ Elaborar, en las comunidades del Distrito VI del municipio de Tupiza, un diagnóstico histórico y actual mediante la recopilación de información sobre eventos pasados de inundación, con el fin de identificar las zonas más vulnerables y las principales causas que han generado estos desastres.
- ✓ Desarrollar, en un tramo del río San Juan del Oro, la modelación hidráulica utilizando escenarios de precipitaciones máximas, para analizar el impacto de estos extremos en las comunidades locales.
- ✓ Analizar los resultados de la modelación hidráulica, para identificar las zonas que requieran presencia de obras de protección.
- ✓ Diseñar, para las zonas identificadas, obras de protección fluvial como alternativa de control y mitigación a estos eventos hidrometeorológicos extremos.

## **1.4. Justificación**

### **1.4.1. Justificación teórica**

El presente proyecto contribuirá al conocimiento en el campo de la hidráulica fluvial y la gestión de riesgo abordando el comportamiento dinámico del río San Juan del Oro mediante modelos de simulación numérica. Los caudales interactuados con las zonas ms vulnerables de la zona se estudia desde un enfoque técnico donde se busca analizar y predecir el riesgo de inundación y desborde del río.

Por otro lado, el aporte teórico consiste en aplicar y validar principios de modelación hidráulica en 2D como una herramienta de diagnóstico territorial para generar conocimientos transferibles a contextos similares.

comprender y predecir el riesgo de inundación en zonas rurales sin infraestructura de protección.

### **1.4.2. Justificación metodológica**

El estudio integra modelos hidrológicos y modelos hidráulicos como el HEC-HMS e IBER 2D, que permiten simular con precisión la esorrentía y el comportamiento del flujo en canales naturales, esta combinación facilita el análisis detallado de la relación entre precipitación, escurrimiento e inundación.

La representación de escenarios de crecida y mapas de riesgo mejora la capacidad de análisis para planificar futuros estudios o intervenciones en la zona de evaluación.

### **1.4.3. Justificación práctica**

Este proyecto responde a la urgencia de controlar y disminuir los efectos causados por las inundaciones en el Distrito VI de Tupiza, donde las pérdidas agrícolas y de infraestructura son recurrentes. Mediante la modelación hidráulica se identificarán las zonas de riesgo y se establecerán criterios técnicos y económicos para el diseño de obras de protección.

Los resultados ofrecerán insumos confiables para la toma de decisiones por parte de autoridades locales y permitirán mejorar la gestión del riesgo hídrico. Así, se contribuirá directamente a la prevención de desastres y a la seguridad de las comunidades afectadas.

### **1.5. Hipótesis**

La modelación hidráulica con software Iber, permitirá representar las variables hidráulicas fluviales en la zona de riesgo y propensas a inundaciones en el río San Juan del Oro en el distrito rural VI del municipio de Tupiza.

### **1.6. Alcance**

El objetivo del presente proyecto es hacer una modelación hidráulica mediante el uso del software Iber 2.5.2, con el propósito de analizar el comportamiento del flujo del río San Juan del Oro y definir cuáles son las áreas más vulnerables a inundaciones en las comunidades de Chuquiago y Tomatas, localizadas en el Distrito Rural VI del municipio Tupiza, del departamento Potosí. Dichas comunidades son de vocación agrícola y, como tales, inundaciones implican riesgo bastante significativo para sus infraestructuras y su economía.

El software Iber, software de simulación hidráulica bidimensional, permite simular el flujo en lámina libre en cursos naturales y definir áreas de riesgo de inundación. Durante este proyecto, se usará para detectar vulnerabilidades por simulación con presencia de eventos extremos tomando en cuenta variables hidráulicas como el tirante del agua, velocidad del flujo y el caudal, en relación con la geomorfología del curso y con crecidas por lluvia intensa.

Anterior a la modelación hidráulica, se recopilarán información básica como precipitaciones históricas, topografía, uso del terreno, clasificación del suelo e infraestructura existente de protección. También se creará una modelación hidrológica mediante el software HEC-HMS, lo que permitirá calcular el caudal máximo para distintos periodos de retorno. A continuación, estos caudales se conectarán en Iber para producir diferentes escenarios de inundación, lo que permitirá anticipar la magnitud y el alcance de crecientes, así como el diseño de mapas de inundación en detalle. Por último, en el marco de lo anterior, se hará una valoración de la vulnerabilidad de las comunidades afectadas y se procederá a diseñar una obra de protección fluvial tipo dirigida a mitigar, controlar y minimizar el impacto negativo producido por las crecientes del río. El diseño se centrará en brindar una opción viable a la protección de terreno agrícola e infraestructuras comunitarias, minimizando el riesgo frente a futuros episodios extremos.

## 1.7. Delimitación del Estudio

### 1.7.1. Área geográfica de estudio

El estudio se enfocará en un tramo crítico del río San Juan del Oro, comprendido entre las comunidades de Chuquiago y tomatas, donde se ha reportado mayor impacto por inundaciones.

Se aplicará la modelación hidráulica en un tramo de 2000 metros del río San Juan del Oro tomando como referencia de inicio o entrada del tramo a 320 metros aguas arriba del puente de la comunidad de Chuquiago y punto de salida a 1680 metros aguas abajo del puente.

La zona de estudio cuenta con un área de terreno de 72 ha. con datos topográficos disponibles para realizar la modelación, esta área se subdivide de acuerdo al detalle de la (Tabla 1-1).

*Tabla 1-1. Identificación de terrenos en el área de estudio.*

| Descripción                | Área (Ha) | Descripción de terreno |
|----------------------------|-----------|------------------------|
| <b>Comunidad Chuquiago</b> | 16        | Cultivo                |
| <b>Comunidad Tomatas</b>   | 8.5       | Cultivo                |
| <b>Río</b>                 | 38        | Lecho del rio          |
| <b>Ladera del cerro</b>    | 9.5       | Cerro                  |
| <b>Área de total =</b>     | 72        |                        |

*Fuente: Elaboración propia*

### 1.7.2. Alcances técnicos y temporales

El presente estudio considera la realización de simulaciones hidráulicas, detalladas en función al comportamiento del flujo en condición extrema, para lo cual se programarán distintos escenarios de caudales máximos determinados en función de periodos de retorno de 2, 10, 25, 50, 75, 100 y 200 años. La elección de los periodos de retorno descritos se debió al interés de abarcar un espectro amplio que permita extender la solicitud de probabilidad en que podría suceder.

La modelación se desarrollará mediante herramientas computacionales especializada en fluidos en movimiento que integran parámetros topográficos, hidrológicos y meteorológicos actuales. De la misma manera se emplearán criterios de validación con base en registros históricos observados y medidos.

El tiempo previsto para la ejecución de este proyecto es de tres meses calendario contemplando todas las etapas de la metodología general.

### **1.7.3.Limitaciones del estudio**

Este estudio enfrenta algunas limitaciones que no influyen de gran manera la exactitud de los resultados:

- Calidad de los datos topográficos

Una de las principales limitaciones de este proyecto es la precisión del modelo de terreno modelado (MDT) utilizado para la modelización hidrológica. Si bien existen tecnologías avanzadas, como el levantamiento topográfico con sensores LiDAR, que permiten crear modelos de alta resolución con gran detalle geométrico, su adopción supone una inversión económica que excede el presupuesto de este proyecto.

En este proyecto, el levantamiento topográfico se realizó con estación total a lo largo de un tramo de 2 km del cauce principal del río San Juan del Oro, correspondiente al área de estudio. Se ejecutaron 60 secciones transversales y se levantaron aproximadamente 1,800 puntos topográficos, distribuidos cuidadosamente para capturar con detalle las características del terreno. Esta densidad de puntos permite una representación precisa y confiable del modelo del terreno, adecuada para los requerimientos técnicos de estudios de modelación hidráulica en cauces naturales.

- Escenario de estudio estático

Al centrarnos únicamente en condiciones del río San Juan del Oro en el momento actual, no se incluyen potenciales futuras modificaciones (encauzamientos, crecimiento urbano o afectaciones por el cambio climático).

- Falta de datos geotécnicos específicos

No tenemos disponibles trabajos de mecánica del terreno en la región, lo que restringe una evaluación estructural pormenorizada de las instalaciones de protección (por ejemplo, muros de gaviones). La estabilidad del tipo de estructuras es en buena medida una función de factores locales como la capacidad portante, cohesión y ángulo de fricción; no teniendo disponibles estos, haremos uso de valor de referencia bibliográficas, lo único que da valor preliminar a la investigación.

- Suposiciones y simplificaciones del modelo

Toda matematización tiene aproximaciones inherentes para hacerla computacionalmente factible. A pesar de los intentos de representar fielmente el sistema fluvial, siempre habrá un margen inherente para el error reflejado en las hipótesis adoptadas.

Estas limitaciones no impiden llevar a cabo el estudio, pero es fundamental reconocerlas para interpretar los resultados con la cautela adecuada y planificar obras de control y mitigación eficiente para estos casos.

# **CAPÍTULO II**

## **MARCO DE**

## **REFERENCIA**

## **2. Marco de referencia**

### **2.1. Marco teórico**

#### **2.1.1. Introducción a la modelación hidráulica**

La modelación hidráulica es una herramienta que permite representar y entender cómo se comporta el agua en ríos, canales, alcantarillas o incluso en zonas que se pueden inundar, es como crear una maqueta digital o matemática de un río para saber cómo se mueve el agua, qué velocidad tiene y hasta dónde puede llegar cuando llueve mucho. Gracias a esta técnica, los ingenieros pueden planear mejor la construcción de puentes, proteger a las personas de inundaciones y cuidar el medio ambiente. Existen programas de computadora que hacen estos cálculos de forma muy precisa, y así se pueden tomar decisiones importantes antes de que ocurra un desastre.

#### **2.1.2. Importancia en el análisis y gestión de sistemas fluviales**

##### **1) Comprender el comportamiento del flujo de agua**

La modelación hidráulica permite simular cómo se mueve el agua en ríos, canales y otras estructuras hidráulicas. Mediante el uso de ecuaciones matemáticas (como las de Saint-Venant), se puede representar el comportamiento del flujo en distintas condiciones: ya sea con lluvias intensas, crecidas repentinas o sequías. Esto ayuda a predecir cómo cambiarán los niveles del agua y a entender fenómenos como la erosión de cauces o el desbordamiento en zonas críticas. (Chaudhry, 2008)

##### **2) Prevención y gestión de inundaciones**

Uno de los usos más valiosos de la modelación hidráulica es la prevención de inundaciones. Gracias a las simulaciones, es posible identificar las zonas vulnerables y diseñar obras como diques, canales de alivio o embalses. Además, permite evaluar escenarios futuros considerando el cambio climático o el crecimiento urbano, anticipándose así a posibles desastres y salvando vidas humanas y pérdidas materiales. (Maidment, 1993)

##### **3) Apoyo en el diseño de infraestructuras hidráulicas**

Los ingenieros hidráulicos utilizan modelos para diseñar infraestructuras fluviales como puentes, alcantarillas, presas y compuertas. Estas estructuras deben adaptarse al caudal del río y a su comportamiento durante eventos extremos. Si no se tiene en cuenta

una modelación adecuada, el diseño puede fallar, provocando daños costosos o peligrosos. (Novak, Moffat, Nalluri, & Nayaran, 2007)

#### **4) Protección ambiental y restauración de ríos**

La modelación hidráulica también es fundamental en proyectos de restauración fluvial y en la gestión ambiental. Sirve para evaluar el impacto de obras sobre el ecosistema acuático, planificar caudales ecológicos y mantener el equilibrio entre el desarrollo humano y la naturaleza. Así se asegura que los hábitats naturales no se vean afectados negativamente.

#### **5) Toma de decisiones informadas y planificación territorial**

Gobiernos y organismos de gestión del agua utilizan estos modelos como herramientas clave para la planificación territorial. A través de la modelación se pueden definir zonas de riesgo, delimitar franjas de protección y regular el uso del suelo cerca de los ríos. Esto garantiza un desarrollo más seguro, ordenado y sostenible a largo plazo. (Moramarco, Saltalippi, & Tarpanelli, 2019)

### **2.1.3. Aplicaciones comunes en ingeniería civil**

#### **1) Diseño y evaluación de obras hidráulicas**

Una de las aplicaciones más esenciales de la modelación hidráulica es el diseño de estructuras como canales, presas, vertederos, alcantarillas y obras de captación. Estas simulaciones permiten calcular con precisión el caudal, la velocidad del flujo y las presiones involucradas, lo que garantiza que las infraestructuras funcionen de manera segura y eficiente bajo diversas condiciones hidráulicas. (Novak, Moffat, Nalluri, & Nayaran, 2007)

#### **2) Gestión y prevención de inundaciones**

Los modelos hidráulicos ayudan a simular eventos extremos como lluvias intensas y crecidas de ríos. Gracias a esto, se pueden elaborar mapas de riesgo de inundación, diseñar obras de defensa (diques, canales de derivación) y desarrollar sistemas de alerta temprana. Esto es crucial para proteger vidas humanas y reducir pérdidas económicas en zonas urbanas y rurales. (Chow, Maidment, & Mays, 1988)

#### **3) Restauración y gestión de ríos**

Otra aplicación relevante es en la restauración fluvial. La modelación permite entender cómo afectan las intervenciones humanas (como encauzamientos o extracciones) al

equilibrio del ecosistema. Con esta herramienta se pueden planificar proyectos que mejoren la calidad ecológica de los ríos, restablezcan meandros o garanticen caudales ecológicos sostenibles. (Petts & Calow, 1996)

#### **4) Diseño de sistemas de drenaje urbano**

En zonas urbanas, la modelación hidráulica se aplica al diseño y análisis de redes de alcantarillado pluvial. Permite estimar la capacidad de tuberías y canales durante tormentas, detectar puntos críticos de acumulación de agua y proponer soluciones como tanques de retención o sistemas de infiltración. Esto resulta vital para evitar anegamientos y daños en infraestructura urbana. (Butler & Davies, 2011)

#### **5) Evaluación del impacto de infraestructuras**

Antes de construir una carretera, puente o represa, es necesario estudiar cómo afectará la obra al flujo natural del agua. La modelación hidráulica sirve para prever alteraciones en la velocidad del flujo, cambios en los niveles del agua y zonas de posible erosión o sedimentación. Esta evaluación es parte esencial de los estudios de impacto ambiental. (Moramarco, Saltalippi, & Tarpanelli, 2019)

##### **2.1.4. Fundamentos de hidráulica fluvial**

###### **2.1.4.1. Tipos de flujo: subcrítico, supercrítico y crítico**

Según (Chow V. T., 1959) en hidráulica fluvial, se analiza el comportamiento del flujo mediante el número de Froude (Fr), que compara la velocidad del flujo con la velocidad de propagación de ondas superficiales. Este número permite clasificar el flujo:

- Flujo subcrítico ( $Fr < 1$ ): el flujo es lento y las perturbaciones pueden moverse aguas arriba.
- Flujo crítico ( $Fr = 1$ ): la velocidad del flujo es igual a la velocidad de onda.
- Flujo supercrítico ( $Fr > 1$ ): el flujo es rápido y ninguna perturbación puede moverse en contra de la corriente.

Fórmula del número de Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * D_h}} \quad (Ec. 1)$$

Donde:

V: velocidad media del flujo (m/s)

g: aceleración gravitacional (9,81 m/s<sup>2</sup>)

D<sub>h</sub>: profundidad hidráulica (A/T) (área / ancho superficial)

#### 2.1.4.2. Clasificación de flujos

En hidráulica de canales abiertos, la clasificación del flujo en permanente y no permanente es fundamental para entender y analizar el comportamiento del agua en ríos y canales bajo diferentes condiciones.

- **Flujo permanente (o estacionario)** se define como aquel en el que las variables hidráulicas principales (profundidad, velocidad, sección transversal del flujo) en cualquier punto del canal no varían con el tiempo. Matemáticamente, esto significa que la derivada temporal de cualquier variable del flujo es igual a cero, es decir:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

donde  $Q$  es el caudal y  $y$  la profundidad del flujo.

Este tipo de flujo se asume cuando las condiciones de entrada y salida permanecen constantes durante un periodo de tiempo suficiente. Los modelos hidráulicos para flujo permanente suelen ser menos complejos, ya que no requieren el análisis de cambios con el tiempo, y utilizan ecuaciones simplificadas como el método del paso estándar o la ecuación de Manning para condiciones uniformes.

- Por el contrario, el flujo no permanente (o no estacionario, transitorio) ocurre cuando al menos una de las variables del flujo cambia con el tiempo en un punto dado del canal. Esto suele presentarse en situaciones como crecidas rápidas, apertura o cierre de compuertas, lluvias intensas o liberaciones de agua desde embalses. Matemáticamente, la derivada temporal de una o más variables es diferente de cero:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \neq 0, \quad \frac{\partial y}{\partial t} \neq 0 \quad (\text{Ec. 3})$$

El análisis del flujo no permanente es considerablemente más complejo, ya que implica resolver las ecuaciones completas de Saint-Venant (ecuaciones de continuidad y

cantidad de movimiento dependientes del tiempo). Este tipo de modelación es imprescindible para estudiar fenómenos de ondas de crecida, propagación de frentes de inundación y el diseño de sistemas de alerta temprana. (Chaudhry, 2008)

#### **2.1.4.3. Régimen de flujo**

En la hidráulica de canales abiertos, el régimen de flujo se refiere a la naturaleza y comportamiento del movimiento del agua en un canal o río. Esta naturaleza se clasifica principalmente en dos tipos: flujo laminar y flujo turbulento, los cuales se distinguen a través del número de Reynolds, un parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales y viscosas del flujo.

El flujo laminar ocurre cuando el agua se mueve en capas paralelas, con trayectorias suaves y ordenadas; en este caso, el movimiento de las moléculas de agua es regular y predecible, y existe poca o ninguna mezcla transversal entre las capas de flujo. Este tipo de régimen se presenta generalmente cuando el número de Reynolds es bajo, específicamente cuando  $Re < 500$  en canales abiertos. En estas condiciones, las fuerzas viscosas predominan sobre las fuerzas inerciales, y la pérdida de energía por fricción es relativamente baja.

Por otro lado, el flujo turbulento es aquel en el que el agua experimenta movimientos caóticos, formándose remolinos, vórtices y trayectorias irregulares. En el régimen turbulento, las partículas de agua se mezclan vigorosamente en todas las direcciones, lo que produce una transferencia de cantidad de movimiento mucho mayor y una disipación de energía más significativa que en el flujo laminar. En canales abiertos, el flujo se considera turbulento cuando el número de Reynolds supera los 2.000 ( $Re > 2000$ ), aunque en la mayoría de los ríos y canales naturales el número de Reynolds es mucho mayor que este valor, por lo que el flujo es predominantemente turbulento.

La transición entre flujo laminar y turbulento se da en el rango de  $500 < Re < 2000$ , donde el flujo puede presentar características mixtas o inestables. Es importante mencionar que, en la práctica, casi todos los cauces naturales y obras hidráulicas importantes operan bajo condiciones de flujo turbulento, debido a las grandes profundidades, altas velocidades y escalas involucradas. (Henderson, 1966)

El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{V * D_h}{\nu} \quad (Ec. 4)$$

Donde:

$V$ : velocidad media del flujo (m/s)

$D_h$ : profundidad hidráulica (m)

$\nu$ : viscosidad cinemática del agua (aproximadamente  $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  a temperatura ambiente)

#### 2.1.5. Ecuaciones básicas para la modelación hidráulica

##### 1) Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad es uno de los principios fundamentales en la hidráulica de canales abiertos. Expresa la conservación de la masa dentro de un volumen de control, indicando que el cambio de almacenamiento de agua en un tramo de canal es igual a la diferencia entre el caudal entrante y el caudal saliente.

- **Forma general para flujo permanente**

Para el caso más sencillo, flujo permanente y uniforme en un canal abierto, la ecuación se expresa como:

$$Q = A * V \quad (Ec. 5)$$

Donde:

$Q$ : Caudal volumétrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A$ : Área de la sección transversal de flujo ( $\text{m}^2$ )

$V$ : Velocidad media del flujo (m/s)

Esto significa que, para cualquier sección transversal del canal, el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo es igual al producto del área y la velocidad promedio del flujo.

- **Forma diferencial para flujo no permanente (Ecuación de Saint-Venant)**

Cuando el flujo varía en el tiempo y/o en el espacio (flujo no permanente y no uniforme), se utiliza la forma diferencial, también llamada ecuación de continuidad de Saint-Venant:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$\partial A/\partial t$ : cambio temporal del área de la sección transversal

$\partial Q/\partial x$ : variación espacial del caudal

$x$ : eje longitudinal del canal

$t$ : tiempo

Esta ecuación indica que cualquier cambio en el área mojada del canal (almacenamiento) es causado por la diferencia entre el caudal que entra y sale del segmento considerado. (Chow V. T., 1959)

- **Importancia**

La ecuación de continuidad es la base para la mayoría de los modelos hidráulicos, tanto para el análisis manual como para la simulación computacional (como HEC-RAS, Iber, MIKE 11, etc.). Permite analizar situaciones tan variadas como ondas de crecida, vaciado de canales, y balance de agua en sistemas complejos de riego o drenaje. (Chow V. T., 1959)

## 2) Ecuación del movimiento (Cantidad de Movimiento / Saint-Venant)

La ecuación de movimiento de Saint-Venant representa la conservación de la cantidad de movimiento (o momento lineal) en un tramo de canal abierto. Esta ecuación considera el equilibrio de fuerzas que actúan sobre un elemento de agua en movimiento, incluyendo fuerzas de presión, gravedad y fricción, así como efectos inerciales (aceleraciones). (Chaudhry, 2008)

### Forma diferencial general de la ecuación de Saint-Venant para 1D

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde:

$Q$ : Caudal volumétrico ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A$ : Área de la sección transversal ( $\text{m}^2$ )

$y$ : Tirante o profundidad del flujo (m)

$S_f$ : Pendiente de fricción (sin unidades)

$S_0$ : Pendiente del fondo del canal (sin unidades)

$g$ : Aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$x$ : Distancia a lo largo del canal (m)

$t$ : Tiempo (s)

- **Significado de cada término**

$\partial Q / \partial t$ : Término de aceleración local – cambio del caudal respecto al tiempo.

$\partial / \partial x (Q^2 / A)$ : Término de aceleración convectiva – cambio del momento con la distancia.

$gA(\partial y / \partial x)$ : Gradiente de presión – refleja el efecto del cambio de profundidad en el flujo.

$gA(S_f - S_0)$ : Diferencia de fuerzas de fricción y pendiente – incluye la resistencia debida al canal y la fuerza motriz por gravedad.

- **Importancia en la modelación hidráulica**

Esta ecuación, junto con la ecuación de continuidad, constituye el conjunto de Ecuaciones de Saint-Venant, base fundamental para la modelación dinámica de caudales no permanentes, ondas de crecida, tránsito de avenidas, y eventos de propagación de frentes de inundación en canales y ríos naturales.

En la práctica, la resolución de estas ecuaciones permite simular cómo las variaciones de caudal y nivel de agua evolucionan con el tiempo y espacio bajo diferentes condiciones, facilitando la toma de decisiones en ingeniería civil, diseño de infraestructuras hidráulicas y gestión de riesgos. (Chaudhry, 2008)

### 3) Ecuación de Manning para velocidad en canales

La ecuación de Manning es una de las fórmulas empíricas más utilizadas en la hidráulica para calcular la velocidad media del flujo en canales abiertos, tanto naturales (ríos, arroyos) como artificiales (canales de riego, drenajes). Fue desarrollada originalmente por el ingeniero irlandés Robert Manning en 1889 y, desde entonces, ha demostrado una notable aplicabilidad práctica, sobre todo para flujo uniforme en canales.

- **Forma general de la ecuación de Manning**

$$V = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (Ec. 8)$$

Donde:

$V$ : Velocidad media del flujo (m/s)

$n$ : Coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional), depende del material y forma del canal.

$R$ : Radio hidráulico (m), que es el cociente entre el área mojada ( $A$ ) y el perímetro mojado ( $P$ ).

$S$ : Pendiente del canal (sin unidades), definida como la caída del fondo por unidad de longitud

Según (Henderson, 1966), la ecuación de Manning se emplea para el cálculo de velocidades y caudales bajo condiciones de flujo uniforme, es decir, cuando la profundidad, velocidad y sección transversal del canal no varían a lo largo del tramo analizado. El libro destaca que esta ecuación se fundamenta en datos experimentales y en la correlación de resultados prácticos, no en una deducción física estricta.

El coeficiente de rugosidad de Manning ( $n$ ) es un parámetro esencial que representa la resistencia al flujo debida a la rugosidad de las paredes y fondo del canal. Henderson enfatiza la importancia de elegir correctamente este valor según tablas y experiencia de campo, ya que depende del material (tierra, hormigón, césped, grava, etc.), vegetación y estado superficial del canal.

La ecuación también se utiliza, al reorganizarla, para determinar el caudal ( $Q$ ) de un canal:

$$Q = V * A = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (Ec. 9)$$

Donde  $A$  es el área mojada.

#### **4) Ecuación de energía específica**

La energía específica es un concepto fundamental en la hidráulica de canales abiertos y describe la energía total por unidad de peso del agua, medida en relación con el fondo del canal, para una sección transversal determinada.

- **Definición y fórmula**

Según (Sturm, 2001), la energía específica ( $E$ ) en una sección transversal de un canal es la suma de dos componentes principales:

Energía de posición o altura del agua sobre el fondo del canal ( $y$ )

Energía cinética debida al movimiento del agua ( $V^2/2g$ )

Por lo tanto, la fórmula es:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ec. } 10)$$

Donde:

$E$ : Energía específica (metros)

$y$ : Profundidad del agua sobre el fondo del canal (metros)

$V$ : Velocidad media del flujo (m/s)

$g$ : Aceleración de la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)

#### **2.1.5.1. Ecuación de Saint-Venant en 1D y 2D**

Las ecuaciones de Saint-Venant son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que describen el flujo de agua no permanente (es decir, variable en el tiempo y el espacio) en canales abiertos, ríos y sistemas hidráulicos. Son la base matemática de la modelación hidráulica para simular fenómenos como crecidas, inundaciones y tránsito de ondas de caudal. (Chaudhry, 2008)

##### **• Ecuación de Saint-Venant en 1D**

Las ecuaciones de Saint-Venant en una dimensión (1D) son un sistema de dos ecuaciones diferenciales parciales (conservación de masa y cantidad de movimiento) que describen el flujo no permanente y no uniforme en canales abiertos. Sus principales hipótesis son: el flujo es esencialmente unidimensional, el perfil de velocidades es relativamente uniforme, la presión es hidrostática, y el canal es prismático o los cambios son graduales. (Chow V. T., 1959).

1) Ecuación de continuidad (conservación de masa):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = ql \quad (\text{Ec. } 11)$$

Donde:

$A$ : Área mojada de la sección transversal (m<sup>2</sup>)

$Q$ : Caudal volumétrico (m<sup>3</sup>/s)

$x$ : Distancia a lo largo del canal (m)

$t$ : Tiempo (s)

$ql$ : Aporte lateral de caudal por unidad de longitud (m<sup>2</sup>/s) (Chow V. T., 1959).

2) Ecuación de cantidad de movimiento (conservación de momento):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f - S_0) = 0 \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde:

$y$ : Tirante o profundidad del agua (m)

$S_0$ : Pendiente del fondo del canal (m/m)

$S_f$ : Pendiente de fricción (m/m), generalmente calculada con la ecuación de Manning o Chezy

$g$ : Gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>)

$\partial Q/\partial t$ : Aceleración local

$\partial/\partial x(Q^2/A)$ : Aceleración convectiva (Chow V. T., 1959).

Estas dos ecuaciones juntas conforman las ecuaciones de Saint-Venant 1D, y son la base para la mayoría de los modelos de simulación de ríos y canales (Chow V. T., 1959)

- **Ecuaciones de Saint-Venant 2D (dos dimensiones)**

Cuando las variaciones transversales del flujo son significativas, como en grandes ríos, zonas inundadas o llanuras aluviales, se utilizan las ecuaciones de Saint-Venant en dos dimensiones (2D), también conocidas como shallow water equations. (Cunge, Holly, & Verwey, 1980).

1) Ecuación de continuidad (2D):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q_h \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde:

$h$ : Altura de la lámina de agua (m)

$u$ : Componente de velocidad en dirección  $x$  (m/s)

$v$ : Componente de velocidad en dirección  $y$  (m/s)

$q_h$ : Aporte lateral de agua por unidad de superficie (Cunge, Holly, & Verwey, 1980)

2) Ecuaciones de cantidad de movimiento (2D):

- **En dirección  $x$ :**

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = - \frac{gh\partial z}{\partial x} - \tau_{bx}/\rho \quad (\text{Ec. 14})$$

- **En dirección  $y$ :**

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2 + \frac{1}{2}g h^2) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = -\frac{gh\partial z}{\partial y} - \tau_{by}/\rho \quad (Ec. 15)$$

Donde:

$z$ : Elevación del fondo (m)

$\tau_{bx}, \tau_{by}$ : Componentes de la tensión de fricción de fondo en  $x$  y  $y$  (N/m<sup>2</sup>)

$\rho$ : Densidad del agua (kg/m<sup>3</sup>) (Cunge, Holly, & Verwey, 1980)

Estas ecuaciones permiten modelar el flujo en ambas direcciones horizontales, siendo fundamentales para la simulación de inundaciones y propagación de frentes de agua en grandes extensiones. (Cunge, Holly, & Verwey, 1980)

- **Las ecuaciones de Saint-Venant se usan para:**

- Simular crecidas e inundaciones: Permiten modelar cómo viajan las ondas de crecida a lo largo de un río o canal.
- Diseñar infraestructuras hidráulicas: Ayudan a analizar el efecto de presas, vertederos, compuertas, etc.
- Gestión del riesgo de inundaciones: Modelan escenarios de desbordes y establecen zonas de riesgo.
- Restauración y manejo de ríos: Permiten evaluar soluciones de ingeniería y restauración ambiental.

- **Principio y metodología que utilizan**

Las ecuaciones de Saint-Venant se derivan de la aplicación de las leyes de conservación de la masa (continuidad) y de la cantidad de movimiento (segunda ley de Newton) a un volumen de control de flujo en canales abiertos.

**Metodología:** Son deducidas suponiendo flujo unidimensional o bidimensional, presión hidrostática, y despreciando algunos términos (como fricción lateral en 1D). Se resuelven numéricamente en la mayoría de los casos, ya que rara vez existen soluciones analíticas. Los métodos numéricos comunes incluyen diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos. (Chaudhry, 2008)

### 2.1.5.2. Supuestos y simplificaciones

#### 1) Flujo unidimensional o bidimensional

En la mayoría de los modelos hidráulicos, se asume que el flujo es predominantemente en una dirección (1D) o, en casos más complejos, en dos dimensiones horizontales (2D). Esto implica suponer que la velocidad y otras variables relevantes no varían significativamente en la dirección transversal o vertical, simplificando así la complejidad del flujo real en ríos y canales naturales. (Chow V. T., 1959).

## **2) Presión hidrostática**

Un supuesto clave es que la distribución de presión a lo largo de la columna de agua es hidrostática, es decir, depende únicamente del peso del agua sobre un punto. Esto permite despreciar los efectos de aceleración vertical y facilita el uso de las ecuaciones de Saint-Venant y Manning. (Chaudhry, 2008).

## **3) Canal de sección prístina y fondo regular**

A menudo se considera que el canal es prístino o que la forma de la sección transversal y el fondo del cauce cambian gradualmente a lo largo de su longitud, lo que permite aplicar fórmulas de manera local sin considerar geometrías demasiado irregulares o abruptas. (Henderson, 1966).

## **4) Fluido incompresible y homogéneo**

El agua se modela como un fluido incompresible (su densidad no cambia con la presión) y homogéneo (con propiedades físicas constantes), permitiendo aplicar las ecuaciones clásicas de continuidad y cantidad de movimiento. (Sturm, 2001).

## **5) Despreciar efectos de viento, fuerzas de Coriolis y fuerzas laterales**

En la mayoría de los modelos para ríos y canales, se asume que el efecto del viento, la rotación terrestre (fuerzas de Coriolis) y las fuerzas laterales o secundarias son despreciables en comparación con las fuerzas gravitacionales y de fricción. (Cunge, Holly, & Verwey, 1980)

## **6) Rugosidad constante o conocida**

Se suele simplificar el cálculo suponiendo que el coeficiente de rugosidad (como el  $n$  de Manning) es constante o puede estimarse adecuadamente mediante tablas o experiencia de campo, aunque en la realidad puede variar por vegetación, sedimentos o cambios estacionales. (Novak, Moffat, Nalluri, & Nayaran, 2007).

Tabla 2-1 Valores recomendados de coeficiente de Manning para cauces naturales.

| Descripción de la corriente                                                                                                                                                       | Mínimo | Normal | Máximo |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| <b>A Cauces naturales</b>                                                                                                                                                         |        |        |        |
| <b>A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida &lt; 30m)</b>                                                                                                  |        |        |        |
| <b>A1.1 Cursos en planicies</b>                                                                                                                                                   |        |        |        |
| – Limpios, rectos, sin fallas ni pozos                                                                                                                                            | 0.025  | 0.030  | 0.033  |
| – Rectos con algunas piedras y pastos                                                                                                                                             | 0.030  | 0.035  | 0.040  |
| – Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos                                                                                                                                | 0.033  | 0.040  | 0.045  |
| – Meandros con algunas piedras y pastos                                                                                                                                           | 0.035  | 0.045  | 0.050  |
| – Meandros con muchas piedras                                                                                                                                                     | 0.045  | 0.050  | 0.060  |
| – Tramos sucios, con pastos y pozos profundos                                                                                                                                     | 0.500  | 0.070  | 0.080  |
| – Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral                                                                                        | 0.075  | 0.100  | 0.150  |
| <b>A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida</b> |        |        |        |
| – Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas                                                                                                                                  | 0.030  | 0.040  | 0.050  |
| – Cauce de cantos rodados con grandes rocas                                                                                                                                       | 0.040  | 0.050  | 0.070  |
| <b>A.2 Cursos con planicies inundadas</b>                                                                                                                                         |        |        |        |
| <b>A2.1 Zonas se pastos, sin arbustos</b>                                                                                                                                         |        |        |        |
| – Sin cultivo                                                                                                                                                                     | 0.020  | 0.030  | 0.030  |
| – Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica                                                                                                                      | 0.025  | 0.035  | 0.045  |
| – Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica                                                                                                                       | 0.030  | 0.040  | 0.050  |
| <b>A.2.3 Zonas arbustivas</b>                                                                                                                                                     |        |        |        |
| – Escasos arbustos y pasto abundante                                                                                                                                              | 0.035  | 0.050  | 0.070  |
| – Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)                                                                                                                       | 0.035  | 0.050  | 0.060  |
| – Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)                                                                                                                       | 0.040  | 0.060  | 0.080  |
| – Arbustos medianos a densos durante la parada invernal                                                                                                                           | 0.045  | 0.070  | 0.110  |
| – Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa                                                                                                                           | 0.070  | 0.100  | 0.160  |
| <b>A.2.4 Zonas arbóreas</b>                                                                                                                                                       |        |        |        |
| – Sauces densos, temporada invernal                                                                                                                                               | 0.110  | 0.150  | 0.200  |
| – Terreno claro con ramas sin brotes                                                                                                                                              | 0.030  | 0.040  | 0.050  |
| – Terreno claro con ramas son gran crecimiento de brotes                                                                                                                          | 0.050  | 0.060  | 0.080  |
| – Zonas de explotación madera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas                                               | 0.080  | 0.100  | 0.120  |

| Descripción de la corriente                                                                                                                                                   | Mínimo | Normal | Máximo |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|
| – Zonas de explotación madera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza las ramas                                             | 0.100  | 0.120  | 0.160  |
| <b>A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie en crecida &gt; 30m)</b>                                                                                                    |        |        |        |
| En este caso, los valores del coeficiente $n$ son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor. |        |        |        |
| – Sección rectangular sin rocas ni arbustos                                                                                                                                   | 0.025  |        | 0.060  |
| – Sección irregular y rugosa                                                                                                                                                  | 0.035  |        | 0.100  |

Tabla 2-1 (continuación)  
Fuente: (Chow V. T., 1959)

## 7) Ausencia de cambios bruscos (flujo gradualmente variado)

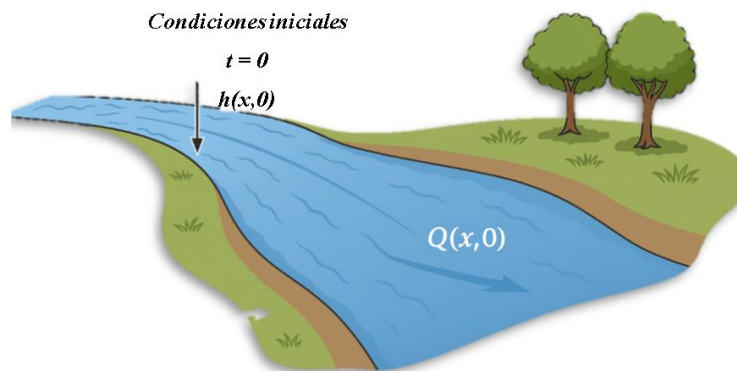
Muchos modelos suponen que el flujo es gradualmente variado, es decir, que los cambios de profundidad y velocidad ocurren lentamente a lo largo del cauce, evitando zonas de rápidos, saltos hidráulicos o desbordes súbitos que requerirían un tratamiento especial. (Chow V. T., 1959).

### 2.1.6. Condiciones iniciales y de contorno

- **Condiciones iniciales**

En la modelación hidráulica de ríos, las condiciones iniciales definen el estado completo del sistema al inicio del proceso de simulación numérica. Esto implica establecer la distribución espacial de variables como el caudal ( $Q$ ), la profundidad o altura de lámina de agua ( $h$ ), la velocidad ( $V$ ), o el área mojada ( $A$ ) en cada sección transversal del río para el tiempo inicial ( $t = 0$ ).

Figura. 2-1 Simulación realista de condiciones iniciales en la modelación hidráulica.



Fuente: Elaboración propia

Esta especificación es fundamental cuando se realiza una simulación de flujos no permanentes (transitorios), como crecidas o vaciados, porque el resultado de la simulación depende directamente de cómo estaba el sistema en ese instante inicial.

“La especificación de condiciones iniciales consiste en definir la distribución de variables hidráulicas como profundidad, caudal, o velocidad a lo largo del canal en el instante inicial del cálculo.” (Chow V. T., 1959)

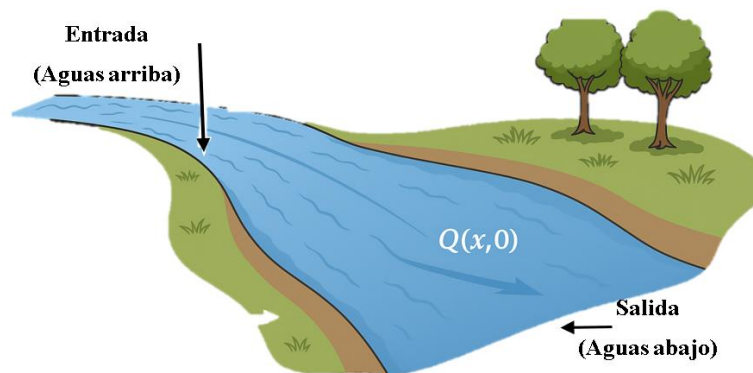
De manera práctica, una condición inicial típica en la modelación de un río sería asumir un perfil uniforme de nivel de agua y caudal en todo el dominio, aunque también se pueden usar datos observados o resultados de simulaciones previas para mayor realismo.

- **Condiciones de Contorno**

Las condiciones de contorno establecen cómo interactúa el sistema modelado con su entorno en los límites espaciales del dominio del río: aguas arriba (entrada), aguas abajo (salida), o incluso en afluentes laterales o estructuras internas. Pueden consistir en fijar valores conocidos o relaciones entre variables hidráulicas en esos bordes durante todo el tiempo de simulación. Estas condiciones permiten, por ejemplo, imponer un caudal entrante conocido aguas arriba ( $Q_{in}(t)$ ), un nivel de agua fijo aguas abajo ( $h_{out}(t)$ ), o una relación funcional entre caudal y tirante.

“Las condiciones de contorno son requeridas para determinar la solución en las fronteras del sistema, ya sea en el extremo aguas arriba, aguas abajo, o en puntos intermedios especiales.” (Cunge, Holly, & Verwey, 1980)

*Figura. 2-2 Condiciones de contorno en la modelación hidráulica.*



*Fuente: Elaboración propia*

### 2.1.7. Modelos hidráulicos en 1D y 2D

#### 2.1.7.1. Comparación entre modelos unidimensionales y bidimensionales

##### 1) Modelos hidráulicos 1D (unidimensionales)

Un modelo hidráulico en 1D (unidimensional) asume que las variables de flujo (profundidad, velocidad, caudal) solo varían a lo largo del eje principal del cauce (longitud del río o canal), es decir, la variación transversal (ancho) y vertical se simplifican o suponen constantes. (Chow V. T., 1959).

En la modelación unidimensional, las ecuaciones de Saint-Venant son resueltas considerando la variación del flujo únicamente a lo largo de la dirección principal del cauce. (Chow V. T., 1959).

##### 2) Modelos Hidráulicos en 2D (Bidimensionales)

Un modelo hidráulico en 2D (bidimensional) resuelve las ecuaciones de movimiento considerando la variación de las variables hidráulicas en dos direcciones espaciales (longitudinal y transversal al cauce). Permiten analizar cómo cambian la velocidad y la profundidad tanto a lo largo como a lo ancho del río o canal.

Los modelos 2D permiten una descripción mucho más realista de la distribución espacial de velocidades y profundidades, especialmente en áreas inundadas, planicies de desborde y bifurcaciones. (Knight & Shiono, 1996).

##### 3) Aplicaciones Típicas

###### 1D:

- Ríos y canales largos, estrechos y relativamente rectos.
- Modelación de ondas de crecida, tránsito de avenidas y manejo de presas.
- Sistemas de alcantarillado.

###### 2D:

- Planicies de inundación, deltas, zonas urbanas y bifurcaciones.
- Análisis de propagación lateral de inundaciones.
- Diseño de infraestructuras en zonas con topografía compleja.

*Tabla 2-2 Comparación modelo 1D vs 2D.*

| Característica     | Modelo 1D             | Modelo 2D                         |
|--------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Variación espacial | Solo longitudinal (x) | Longitudinal y transversal (x, y) |
| Complejidad        | Baja                  | Media/Alta                        |

|                                   |                      |                                         |
|-----------------------------------|----------------------|-----------------------------------------|
| <b>Requisitos computacionales</b> | Bajos                | Altos                                   |
| <b>Calibración</b>                | Sencilla             | Compleja                                |
| <b>Precisión espacial</b>         | Limitada             | Alta                                    |
| <b>Usos típicos</b>               | Ríos/canales simples | Planicies, zonas urbanas, bifurcaciones |
| <b>Ejemplo de software</b>        | HEC-RAS 1D, MIKE 11  | HEC-RAS 2D, Iber, TELEMAC, MIKE 21      |

*Fuente: (Chow V. T., 1959); (Knight & Shiono, 1996); (USACE, 2016); (HEC-RAS, 2021)*

### 2.1.7.2. Ventajas y limitaciones de cada enfoque

#### 1) Ventajas

##### Modelos 1D:

- Requieren menos datos y menor poder computacional.
- Más rápidos de calibrar y ejecutar.
- Suficientes para muchos ríos y canales con flujos predominantemente longitudinales.

##### Modelos 2D:

- Permiten analizar movimientos complejos y transversales del agua.
- Capturan la distribución espacial realista de velocidades y profundidades.
- Indispensables en zonas urbanas o con estructuras (puentes, islas, meandros).

Los modelos 2D permiten una descripción mucho más realista de la distribución espacial de velocidades y profundidades, especialmente en áreas inundadas, planicies de desborde y bifurcaciones. (Knight & Shiono, 1996).

#### 2) Limitaciones

##### Modelos 1D:

- No pueden simular correctamente flujos con variación lateral significativa.
- No representan con precisión la interacción entre el cauce y planicie de inundación.
- Menos apropiados para zonas con obstáculos o geometrías complejas.

##### Modelos 2D:

- Mayor demanda computacional y de datos (topografía detallada, coeficientes de rugosidad).
- Calibración y análisis más complejos.

- Tiempos de ejecución más largos.

Los modelos 2D, aunque más precisos en ciertas condiciones, requieren una cantidad considerable de recursos y calibración cuidadosa. (HEC-RAS, 2021).

### 2.1.7.3. Criterio de selección del modelo según el tipo de estudio

La selección de un modelo para la modelación hidráulica de ríos depende principalmente del tipo de selección de estudio a realizar, las condiciones del cauce, la disponibilidad de datos, la precisión requerida y el objetivo del proyecto. (como riesgo de inundación, diseño de obras hidráulicas, análisis morfológico, etc.).

En la tabla 4 se muestran modelos y sus criterios de selección más importante:

*Tabla 2-3 Modelos Hidráulicos recomendados según el tipo de estudio.*

| Tipo de Estudio                                                                                          | Modelo Recomendado                | Criterio Principal                                                                                                              | Referencia                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Zonas de Inundación<br>Diseño de obras Fluviales                                                         | HEC-RAS<br>(1D y 2D)              | Ajuste al detalle del terreno y capacidad para simular flujos complejos (2D) o longitudinales (1D) según necesidad del estudio. | (USACE, 2016)                   |
| Estudio de Inundación<br>Evaluación de obras hidráulicas<br>Transporte de sedimentos<br>Calidad del agua | Iber (2D)                         | Representación precisa de la propagación lateral del agua en planicies de inundación. (Simulación del flujo superficial).       | (Bladé, y otros, 2014)          |
| Transporte de sedimentos                                                                                 | MIKE 11 (1D)<br>/ MIKE 21<br>(2D) | Para MIKE 11: eficiencia en grandes tramos de ríos. Para MIKE 21: simulación de propagación y extensión de inundaciones         | (DHI, (Danish Hydraulic), 2017) |
| Diseño de redes pluviales                                                                                | TUFLOW<br>(2D)                    | Precisión en dinámica de flujo en áreas urbanas y costeras, integración con GIS                                                 | (Syme, 2022)                    |
| Modelación de inundaciones fluviales<br>Análisis hidráulico urbano                                       | ISIS (1D/2D)                      | Selección según escala: ISIS 1D para grandes ríos, ISIS 2D para análisis detallado en zonas de inundación                       | (Halcrow, 1999)                 |

*Tabla 2-3 (continuación)*

*Fuente: Elaboración propia*

En este proyecto de graduación, donde está dado el tema en la modelización hidráulica en un tramo del río San Juan del Oro, el software Iber 2D es la herramienta de simulación elegida como la principal sobre el tema. La justificación en esta elección es la capacidad del programa para colocar y simbolizar cuidadosamente el comportamiento del flujo en superficie en cursos naturales mediante análisis del régimen libre en dos dimensiones (2D); una mayoría necesaria en el estudio de inundación y en el diseño hidráulico.

Se destaca por ser versátil y aplicable en diversas ocasiones, como simulaciones de crecida, investigación sobre transporte de sedimentos, evaluación de calidad del agua e interacción del flujo con estructuras hidráulicas. También permite modelar la geomorfología del terreno con exactitud mediante modelos digitales del terreno (MDT), y esto permite el análisis del comportamiento hidráulico bajo distintos supuestos.

Otro aspecto relevante en la elección de Iber es su facilidad de uso y acceso gratuito, lo cual representa una gran ventaja en el ámbito académico y profesional. Estas características, junto con su capacidad para generar resultados de alta calidad, hacen de Iber una opción idónea para este trabajo de investigación.

#### 2.1.8. Parámetros necesarios para la modelación

*Tabla 2-4. Parámetros de entrada para modelación hidráulica con Iber 2D.*

| Parámetro                                   | Descripción                                                           | Método de obtención                                                 |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>Modelo Digital del Terreno (MDT)</b>     | Representación del relieve en 2D que define la topografía             | LIDAR, drones, fotogrametría, estaciones totales, MDT proporcionado |
| <b>Dominio de simulación</b>                | Área del cauce y posibles zonas con riesgo de inundación              | Delimitación en SIG o dentro del entorno                            |
| <b>Malla de cálculo</b>                     | División del dominio en celdas para realizar los cálculos hidráulicos | Generada en Iber según resolución deseada                           |
| <b>Coefficiente de Manning (n)</b>          | Representa la rugosidad del cauce y llanura                           | Tablas empíricas                                                    |
| <b>Condiciones de contorno aguas arriba</b> | Entrada de caudal al cauce                                            | Medición en estación                                                |
| <b>Uso del suelo / Cobertura</b>            | Afecta                                                                | Cartografía temática, imágenes                                      |
| <b>Estructuras hidráulicas</b>              | Elementos como puentes, compuertas, etc.                              | Planos de diseño                                                    |
| <b>Precipitación (opcional)</b>             | Entrada directa de lluvia sobre la superficie para escorrentía        | Datos históricos de estaciones meteorológicas                       |
| <b>Hidrograma de entrada</b>                | Variación temporal del caudal                                         | Generado por modelos hidrológicos                                   |
| <b>Tiempo total de simulación</b>           | Duración total                                                        | Según la duración del hidrograma o evento de simulación             |
| <b>Paso de tiempo</b>                       | Intervalo temporal                                                    | Definido por el usuario; Iber recomienda seleccionar el automático  |

*Tabla 2-4 (continuación)  
Fuente: (Bladé, y otros, 2014)*

### **2.1.9. Inundación**

Las inundaciones ocurren cuando el agua se desborda de los límites normales de un arroyo, río u otro cuerpo de agua o se acumula en un área que generalmente está seca. Hay dos tipos principales de inundaciones: las inundaciones lentas, que se desarrollan durante horas o días, mientras que las inundaciones repentinas ocurren de golpe, a menudo sin previo aviso, generalmente debido a las fuertes lluvias. Aunque las inundaciones anuales son un fenómeno natural en muchas partes del mundo, las prácticas de uso de la tierra y de construcción han provocado un aumento en la frecuencia y magnitud de las inundaciones. También se prevé que las inundaciones serán aún más frecuentes y graves en el futuro debido al cambio climático.

### **2.1.10. Consecuencias de las inundaciones**

- Económicas: las inundaciones provocan la pérdida de grandes cantidades de bienes materiales, a la que hay que sumarle el coste de reconstruir las infraestructuras. Además, que pueden hacer que las personas se queden sin hogar, por destrucción de sus viviendas.
- Medio ambientales: daños a tierras agrícolas, daños a cultivos y a la producción de alimentos. Además, las inundaciones también propagan la contaminación, dañando a los animales y a los seres humanos.
- Salud: las inundaciones aumentan el riesgo de enfermedades de transmisión fecal-oral. Las personas también pueden sufrir lesiones como consecuencia de árboles caídos, líneas eléctricas u otros desechos.

### **2.1.11. Obras de defensa fluvial**

Una obra de defensa fluvial es una estructura de ingeniería hidráulica construida a lo largo de ríos o cauces con el propósito de proteger zonas vulnerables contra inundaciones, erosión de márgenes y otros daños causados por el agua, especialmente en áreas urbanas, agrícolas o con infraestructura crítica. Estas obras buscan regular el comportamiento del río, contener su caudal durante crecidas y estabilizar sus riberas, contribuyendo así a la seguridad de las personas y bienes ubicados cerca del cauce. ((MINAGRI), 2016)

**2.1.11.1. Tipos de obras de defensa fluvial**

Existen varios tipos de obras de defensa fluvial, y cada una cumple una función específica según las características del río y la zona a proteger. A continuación, se describen algunos de los principales tipos con definiciones claras de cada uno de ellos:

- 1) Espigones: Son estructuras transversales o inclinadas al cauce del río que se construyen desde la orilla hacia el interior del lecho. Sirven para reducir la velocidad del agua cerca de la ribera, proteger las márgenes contra la erosión y canalizar el flujo hacia el centro del cauce.
- 2) Enrocados: Consisten en la colocación de piedras o bloques grandes en las riberas del río. Se utilizan para reforzar las orillas, absorber la energía del agua y prevenir la erosión lateral. También son útiles en zonas donde hay riesgo de socavación.
- 3) Muros de contención o muros de encauzamiento: Son estructuras verticales o inclinadas de concreto u otros materiales resistentes que se ubican a lo largo del río. Tienen como objetivo contener el caudal y evitar el desborde en áreas urbanas o muy vulnerables.
- 4) Diques de encauzamiento (o bordos): Son terraplenes o muros bajos contruidos paralelos al cauce del río. Sirven para confinar el flujo dentro de un canal determinado y evitar que el agua inunde terrenos adyacentes durante crecidas.
- 5) Defensas vegetales (bioingeniería): Consisten en la plantación de especies vegetales resistentes en las riberas. Ayudan a estabilizar los suelos y reducir la erosión mediante las raíces, ofreciendo una solución ecológica y sostenible. ((MINAGRI), 2016)

**2.1.12. Periodo de diseño para el diseño de obras de defensa fluvial**

*Tabla 2-5. Periodo de diseño de acuerdo al uso de las obras de protección fluvial en Bolivia.*

| Periodo de retorno (años) | Tipo de Obra              | Uso en Defensa Fluvial en Bolivia                       | Justificación                                                                                         | Referencia Bibliográfica          |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 10                        | Defensa fluvial artesanal | Cultivos mixtos o diversificados aislados sin población | Reducción de pérdidas frecuentes; ideal para sistemas de bajo costo (defensas vegetativas, gaviones). | (Ramirez Rodriguez, 2024) (MMAyA) |

|          |                                                                 |                                                                |                                                                                                                                                    |                                                              |
|----------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 25       | Defensa rural formal                                            | Zonas agrícolas consolidadas                                   | Inversión media en infraestructura agrícola que requiere protección frecuente.                                                                     | (Programa Cuencas Sostenibles, 2016)                         |
| 25 - 50  | Defensa agrícola estratégica                                    | Zonas agrícolas con poco poblado.                              | Zonas estratégicas de producción alimentaria nacional y regional.                                                                                  | (Ramirez Rodriguez, 2024) (MMAyA)                            |
| 50 – 100 | Protección de estructuras viales (puentes, caminos principales) | Obras de defensa fluvial para carreteras y puentes principales | Necesario para garantizar continuidad de servicios estratégicos (transporte, comercio). Se exige alta seguridad frente a crecidas extraordinarias. | (Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), 2018) (MOPSV) |

*Fuente: Elaboración propia*

En el diseño de obras de protección fluvial en el río San Juan del Oro debe considerarse no solo la protección de terrenos agrícolas sino también de las infraestructuras existentes en la zona como el puente que es la única conexión de las comunidades además de los sistemas de riegos que sostiene la actividad agrícola del lugar. Teniendo en cuenta estos criterios el nivel seguridad hidráulica frente a eventos de crecidas de caudal extremo debe ser elevado.

Según las recomendaciones de la (Administradora Boliviana de Carreteras (ABC), 2018) en Bolivia, para la protección de estructuras viales principales (puentes, caminos troncales) se requiere considerar periodos de retorno entre 50 y 100 años, dependiendo de la importancia estratégica de las infraestructuras.

Adicionalmente, documentos técnicos del (Ramirez Rodriguez, 2024) (MMAyA) establecen que, para proteger zonas agrícolas con poco poblado, como los que se encuentran en esta zona, también se recomiendan periodos de retorno de al menos 25 a 50 años.

Como el área en análisis cuenta con usos agrícolas intensivos, infraestructuras hidráulicas y una vía estructural fundamental (el puente), el uso de un plazo de retorno en diseño de 75 años se justifica está en consonancia con la protección de bienes, vías y áreas agrícolas, pero sin sobredimensionar innecesariamente la obra. Durante este punto, se puede esperar ocurrencia de fenómenos hidrológicos con bastante grandeza, los cuales pueden originar socavación extrema, erosión lateral, u obstáculos en conectividad vial, originando graves afectaciones a la economía local y la seguridad de la población.

Por lo tanto, la elección de un evento de diseño de 75 años asegura una defensa equilibrada, sólida y técnica según el entorno y las normativas nacionales existentes para esta clase de trabajos.

## **2.2. Marco conceptual**

### **2.2.1. Modelo bidimensional (2D)**

Es la representación computacional del flujo de agua considerando dos dimensiones espaciales (x, y). este modelo permite simular la propagación del flujo en superficies extensas, incluyendo variaciones de velocidad y profundidad en diferentes direcciones. Es más detallado que los modelos unidimensionales (1D), ideal para análisis de inundación en ríos y llanuras.

### **2.2.2. Zonas de amortiguamiento**

Son las áreas adyacentes al cauce diseñadas o preservadas para absorber o reducir la energía del flujo en caso de crecidas. Su delimitación se apoya en resultados de modelación para reducir el riesgo de erosión, socavación o inundación aguas abajo.

### **2.2.3. Dominio de simulación:**

El dominio de simulación representa el área física o espacial sobre la cual se lleva a cabo la modelación hidráulica. Este dominio abarca no solo el cauce principal del río, sino también todas las zonas adyacentes que sean susceptibles de inundación, incluyendo llanuras aluviales, áreas urbanas próximas y cualquier otra área donde el agua pueda extenderse durante eventos de crecida. La definición precisa y exhaustiva del dominio es crucial para garantizar un análisis realista del comportamiento del flujo, permitiendo evaluar con precisión los efectos del agua en áreas críticas y vulnerables. Un dominio bien definido considera la topografía detallada, las estructuras hidráulicas existentes (puentes, presas, etc.) y las características del suelo, lo que contribuye a una simulación más precisa y confiable.

### **2.2.4. Restauración fluvial**

Es el proceso de recuperar la estructura, función y dinámica natural de los ríos que han sido alterados por actividades humanas. La modelación hidráulica se usa para planificar intervenciones que mejoren la conectividad ecológica, el transporte de sedimentos y el régimen hidrológico.

### **2.2.5. Malla de cálculo**

La malla de cálculo es la discretización del dominio de simulación en elementos más pequeños, conocidos como celdas, que pueden ser triangulares o cuadrangulares. Sobre estas celdas, el modelo numérico resuelve las ecuaciones hidráulicas que describen el flujo del agua. La calidad y la resolución de la malla son determinantes clave de la precisión espacial del modelo. En áreas con variaciones topográficas significativas, estructuras hidráulicas complejas o cambios abruptos en la geometría del cauce, se requiere una malla más fina para capturar adecuadamente los detalles del flujo. Una malla bien diseñada equilibra la precisión con la eficiencia computacional, optimizando el tamaño y la forma de las celdas para representar fielmente la geometría y la física del problema.

### **2.2.6. Paso de tiempo (time step)**

El paso de tiempo es el intervalo temporal discreto en el que se realizan los cálculos iterativos del modelo numérico. La elección del tamaño del paso de tiempo tiene un impacto significativo en la estabilidad y la precisión numérica de la simulación. Iber permite establecer el paso de tiempo de forma manual, proporcionando control directo al usuario, o en modo automático, donde el modelo ajusta dinámicamente el paso de tiempo en función de las condiciones del flujo y los criterios de estabilidad. Un paso de tiempo demasiado grande puede conducir a inestabilidades numéricas, oscilaciones o resultados no convergentes, mientras que un paso de tiempo excesivamente pequeño aumenta el tiempo de procesamiento y los recursos computacionales requeridos. La selección óptima del paso de tiempo implica un equilibrio entre la precisión deseada y la eficiencia computacional.

### **2.2.7. Modelo digital del terreno (MDT)**

El Modelo Digital del Terreno (MDT) es una representación tridimensional de la topografía del área de estudio, generalmente almacenada en formato ráster o TIN (Triangulated Irregular Network). El MDT constituye la base fundamental para la generación de la malla de cálculo y la definición del relieve sobre el cual se simula el flujo del agua. La precisión del MDT es un factor crítico que determina la calidad y la fiabilidad de los resultados de la simulación. Los MDT se obtienen mediante diversas técnicas de levantamiento topográfico, como LIDAR (Light Detection and Ranging),

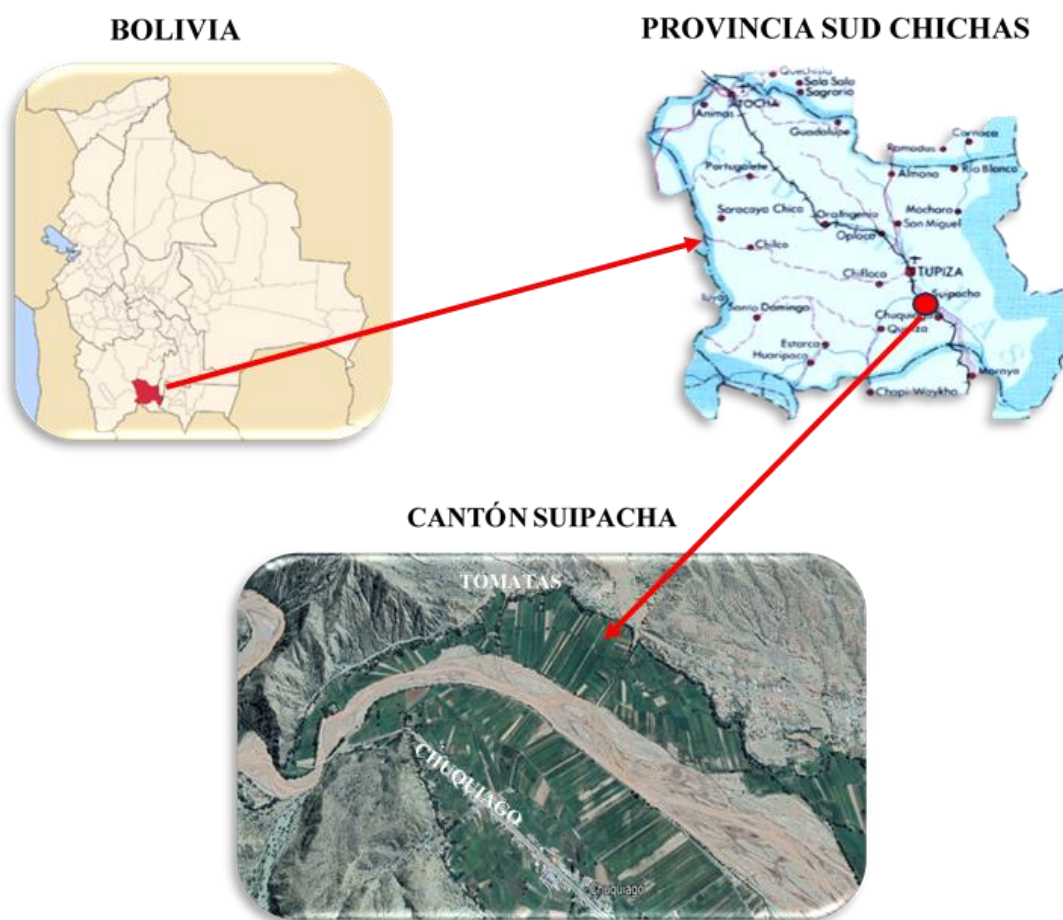
drones equipados con cámaras de alta resolución, fotogrametría aérea o terrestre, y estaciones totales. La elección de la técnica de adquisición del MDT depende de la precisión requerida, el tamaño del área de estudio y los recursos disponibles. (HEC-RAS, 2021)

## 2.3. Marco espacial

### 2.3.1. Ubicación

La zona de estudio comprende parte de las comunidades de Tomatas y Chuquiago (cantón Suipacha) distrito rural VI del municipio de Tupiza primera sección de la provincia Sud Chichas del departamento de Potosí.

*Figura. 2-3. Ubicación gráfica de la zona de estudio.*



*Fuente: Elaboración propia*

## **2.4. Marco temporal**

### **2.4.1. Periodo de estudio**

Para el desarrollo de este proyecto, resulta fundamental considerar antecedentes históricos, especialmente en lo que respecta al análisis hidrológico y la estimación de caudales máximos. En este sentido, se cuenta con información proveniente de seis estaciones meteorológicas y una estación hidrológica cuatro estaciones ubicadas dentro del área de estudio y dos cerca de la cuenca, cuyos datos son proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) Bolivia.

Con el fin de garantizar la confiabilidad y representatividad de los resultados, se ha optado por utilizar registros de precipitación comprendidos entre los años 1990 y 2023. Este periodo abarca más de tres décadas de información continua, lo que permite captar una amplia variabilidad climática, incluyendo eventos extremos de lluvias intensas. Esta amplitud temporal fortalece el análisis de tendencias y la calibración de modelos hidrológicos.

Para la estimación de caudales máximos, se ha decidido emplear el modelo hidrológico HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System), ampliamente utilizado a nivel internacional. Este modelo recomienda, como criterio técnico, trabajar con al menos 10 años de datos históricos para lograr una simulación hidrológica robusta. Al considerar un periodo de más de 30 años para las precipitaciones y registros hidrométricos de los últimos 20 años, se asegura no solo el cumplimiento de este criterio, sino también una mayor precisión en la generación de escenarios extremos.

Los registros hidrométricos de los últimos 20 años permiten representar adecuadamente las condiciones actuales del comportamiento de caudales en la cuenca, considerando los cambios potenciales en el uso del suelo y el clima. En conjunto, esta base de datos garantiza una caracterización hidrológica confiable y detallada de la cuenca de estudio.

**CAPÍTULO III**  
**DIAGNÓSTICO DE LA**  
**ZONA DE ESTUDIO**

### 3. Diagnóstico de la zona de estudio

El diagnóstico constituye una etapa fundamental en la elaboración de un proyecto de grado en ingeniería civil, particularmente en estudios relacionados con la gestión del riesgo de desastres. Este proceso permite identificar, caracterizar y comprender las condiciones actuales de la zona de estudio en relación con eventos extremos como las inundaciones. El presente diagnóstico se enfoca en las comunidades de Tomatas y Chuquiago del distrito VI del municipio de Tupiza, con énfasis en los impactos históricos y actuales ocasionados por las crecidas del río San Juan del Oro, buscando establecer una base técnica y social para el diseño de obras de protección y mitigación.

#### 3.1. Ubicación geográfica y características generales de la zona

La zona de estudio se encuentra ubicada en las comunidades de Tomatas y Chuquiago, correspondientes al Distrito VI del municipio de Tupiza, en el departamento de Potosí, Bolivia, como se muestra en la (Figura 1-3).

Estas comunidades se emplazan en un valle fértil influenciado por el cauce del río San Juan del Oro, un afluente de comportamiento estacional, cuya cuenca presenta pendientes variables, zonas de acumulación y tramos con alta energía hidráulica en época de lluvias.

*Tabla 3-1. Datos climatológicos de la zona evaluada.*

| Datos climatológicos               |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Estación Chuquiago                 | Ene   | Feb   | Mar   | Abr   | May   | Jun   | Jul   | Ago   | Sep   | Oct   | Nov   | Dic   | Anual |
| Precipitación media mensual (mm)   | 8.83  | 8.89  | 4.85  | 3.19  | 1.74  | 0.28  | 0.00  | 0.00  | 1.72  | 2.86  | 5.58  | 8.37  | 45.83 |
| Temperatura media mensual (°C)     | 17.96 | 18.02 | 17.13 | 14.82 | 10.98 | 9.13  | 8.91  | 11.15 | 14.50 | 17.14 | 18.76 | 18.91 | 14.77 |
| Humedad relativa media mensual (%) | 54.73 | 73.20 | 67.55 | 56.45 | 52.10 | 48.50 | 47.95 | 45.50 | 49.70 | 43.75 | 47.73 | 41.45 | 59.80 |

*Fuente: SENAMHI Bolivia*

El área posee un clima templado, con una marcada estacionalidad que favorece la actividad agrícola, considerada como el principal sustento económico y medio de vida de los habitantes de ambas comunidades. Los principales cultivos incluyen hortalizas, maíz, papa, y otros productos de consumo local, cuya producción depende directamente de la disponibilidad de tierras fértiles en las riberas del río. Sin embargo,

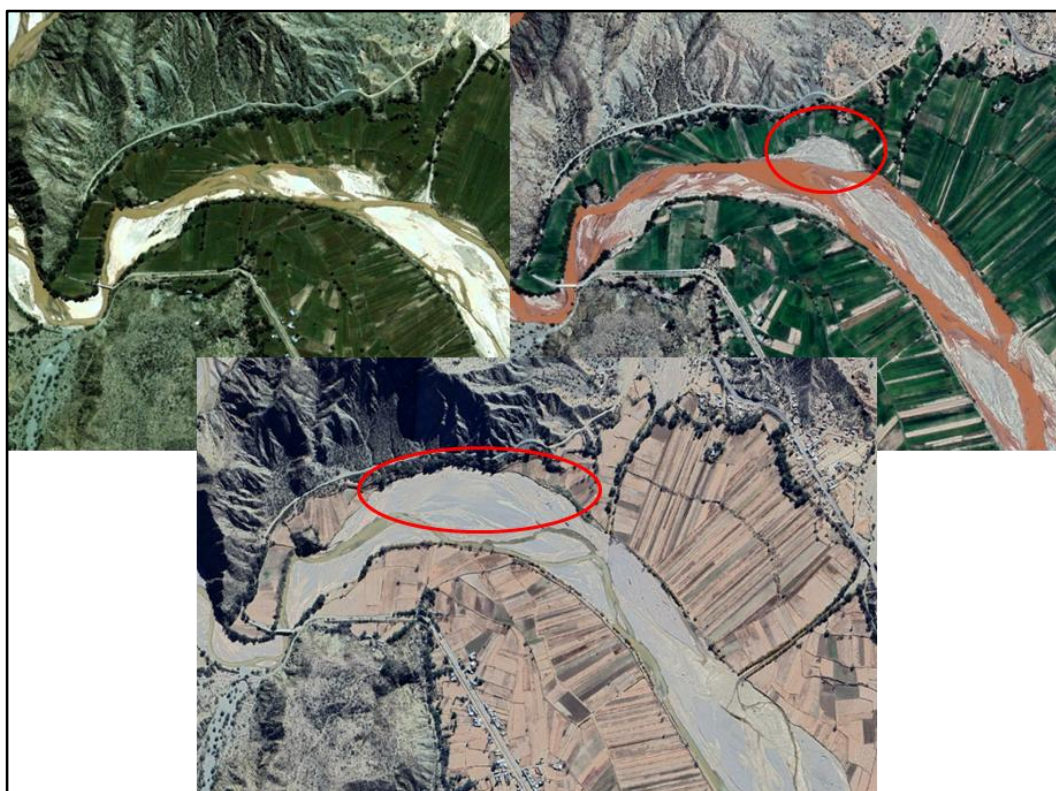
esta proximidad al cauce representa un alto riesgo durante eventos hidrometeorológicos extremos.

### 3.2. Antecedentes históricos de inundaciones y vulnerabilidad de la zona

Históricamente, comunidades como Chuquiago y Tomatas han sido reiterativamente afectadas por crecientemente del río San Juan del Oro, y sobre todo en la época de lluvias (entre noviembre y marzo). Durante los últimos 20 años han tenido lugar por lo menos cuatro grandes inundaciones, destacándose en el año 2007, 2011, 2018 y 2023, según se reúnen en este informe reportes comunal, entrevistas con líderes comunal y análisis de imágenes satelitales.

El más reciente en 2023 tuvo el devastador efecto: el río creció repentinamente y empezó a erosionar lateralmente sus márgenes fértiles, llegando a devastar más de 6 hectáreas de tierras de cultivo. Las figuras a continuación muestran la secuencia de la pérdida de tierras de cultivo según los años de los crecientes máximos.

*Figura. 3-1. Secuencia de imágenes satelitales de la zona de estudio 2006, 2011, 2023.*



*Fuente: Google Earth*

Este evento se produjo por la combinación de lluvias intensas aguas arriba y la ausencia de obras de protección adecuadas que pudieran contener el cauce o disipar su energía hidráulica. Las imágenes satelitales y recorridos de campo evidencian la pérdida progresiva de franjas agrícolas, transformadas ahora en cauces abandonados o zonas de depósito.

Asimismo, durante la crecida de 2011, según el testimonio del corregidor de Chuquiago, el río arrasó con el puente carretero que conecta la comunidad con las otras poblaciones, además, rebasó incluso las barreras rusticas construidas artesanalmente por los propios comunarios con materiales locales como palos, llantas y piedras. Estas estructuras no tienen capacidad técnica para resistir caudales importantes, lo que incrementa la vulnerabilidad de la zona y demuestra la falta de intervención efectiva por parte de las autoridades municipales, departamentales o nacionales.

*Figura. 3-2. Destrucción del puente de Chuquiago año 2011.*



*Fuente: Google Earth*

### 3.3. Causas principales de las inundaciones

En zonas rurales como Tomatas y Chuquiago, donde el desarrollo urbano es mínimo y la infraestructura es escasa, las causas de las inundaciones no están relacionadas con el crecimiento descontrolado de viviendas o la impermeabilización del suelo por construcciones, como ocurre en entornos urbanos. Por el contrario, los factores que provocan estas inundaciones en áreas agrícolas responden principalmente a procesos naturales y a la falta de obras de control adecuadas. A continuación, se detallan las causas más relevantes:

- Causas naturales
  - Incremento repentino de caudales durante las lluvias intensas.
  - Erosionan lentamente los bordes del cauce.
  - La socavación progresiva reduce la estabilidad del terreno cultivable, provocando la pérdida de hectáreas agrícolas incluso sin que se produzca un desborde evidente.
  - Formación de bancos de arena que desvían el flujo hacia las márgenes agrícolas.
  - En muchos tramos, el río ha modificado su curso de manera natural debido a procesos geomorfológicos.

*Figura. 3-3. crecida del río destruye puente vehicular e inunda cultivos.*



*Fuente: Clemente Mamani (lecturador de la estación hidrométrica de Chuquiago)*

- Causas antrópicas
  - La carencia de infraestructura hidráulica como muros de contención, gaviones o diques de encauzamiento hace que las comunidades estén completamente expuestas a los efectos destructivos de los eventos extremos.

- Pese a los antecedentes históricos de eventos extremos, no se ha dado una respuesta técnica y oportuna por parte de las autoridades. Esto agrava la vulnerabilidad de la zona y prolonga el estado de riesgo para las comunidades agrícolas.

*Figura. 3-4. Ausencia de obras de protección en la zona estudiada (Tomatas).*



*Fuente: Elaboración propia (comunidad Tomatas)*

Esto complementa el diagnóstico general y refuerza la necesidad de implementar soluciones de ingeniería civil adaptadas a contextos rurales, donde las causas de las inundaciones se relacionan más con la acción natural del río y la falta de infraestructura que con el impacto urbano.

### **3.4. Consecuencias sociales y económicas**

Las consecuencias de estas crecidas han sido profundas y persistentes:

- Pérdida directa de terrenos agrícolas: Se estima que en cada evento se pierden entre 1 a 7 ha de tierras de cultivo, lo que representa una reducción drástica de la capacidad productiva local.
- Pérdidas económicas cuantiosas: La pérdida de cultivos en etapa madura, daños a sistemas de riego y a infraestructura agrícola (canales, cercas) implica un alto costo económico que los comunarios no pueden cubrir sin apoyo externo.
- Migración forzada: Muchos habitantes han optado por abandonar sus tierras, migrando hacia ciudades intermedias o incluso hacia países vecinos como Argentina o Chile, en búsqueda de estabilidad económica.

- Desconfianza hacia las autoridades: La ausencia de respuesta técnica o presupuestaria de las autoridades municipales o departamentales ha generado una creciente sensación de abandono e impotencia en las comunidades.

### **3.5. Propósito del diagnóstico**

Este diagnóstico tiene como finalidad:

- ✓ Determinar con evidencia las zonas más afectadas.
- ✓ Establecer la necesidad de obras de mitigación.
- ✓ Justificar el uso de herramientas de modelación como HEC-HMS e IBER.
- ✓ Proporcionar una base para la toma de decisiones técnicas y de gestión del riesgo.

### **3.6. Limitaciones y contratiempos comunes**

- ✓ Dificultad en el acceso a datos geotécnicos y pluviométricos precisos.
- ✓ Costos elevados de levantamiento topográfico.
- ✓ Falta de apoyo institucional y presupuesto asignado.
- ✓ Escasa cultura de prevención del riesgo en gestión municipal.

A manera de conclusión se puede exponer que la situación de Tomatas y Chuquiago revela la urgencia de realizar intervenciones estructurales y no estructurales para la mitigación de inundaciones. El diagnóstico presentado sustenta técnicamente la necesidad de obras como muros de gaviones, y propone herramientas modernas de modelación y análisis como instrumentos clave para reducir el riesgo, mejorar la seguridad de los cultivos y evitar la migración forzada de la población afectada.

**CAPÍTULO IV**  
**ESTUDIO**  
**HIDROLÓGICO**

#### 4. Estudio hidrológico

##### 4.1.1. Ubicación geográfica de la cuenca, río San Juan del Oro

La cuenca del río san juan del oro se encuentra ubicada geográficamente en la parte sud de Bolivia entre los 21°34'17.76" y 22°41'51.89" de Latitud Sur y los 65°38'13.77" y 67° 5'11.51" Longitud Oeste, con una elevación que varía entre 2873 y 5968 m.s.n.m. tomando como referencia la estación hidrométrica del puente de Chuquiago ubicado a 21°33'40.08" de Latitud Sur y 65°38'52.61" de Longitud Oeste.

Dentro de esta cuenca en la parte boliviana se encuentran 8 municipios y 116 comunidades todos pertenecientes al departamento de Potosí como se muestra en la (Tabla 4-1), tomando como referencia el punto más bajo la estación hidrométrica de la comunidad de Chuquiago.

Tabla 4-1. Distribución de municipio y comunidades dentro la cuenca en la parte boliviana.

| Unidad hidrográfica                    | Departamento | Municipio               | Comunidades |
|----------------------------------------|--------------|-------------------------|-------------|
| <b>Cuenca del río San Juan del Oro</b> | Potosí       | Tupiza                  | 87          |
|                                        |              | Atocha                  | 7           |
|                                        |              | Villazón                | 12          |
|                                        |              | San Antonio de Esmoruco | 6           |
|                                        |              | San Pablo de Lipez      | 1           |
|                                        |              | Mojinete                | 3           |

Fuente: Elaboración propia

Por la parte de Argentina la distribución se muestra en la (Tabla 4.2).

Tabla 4-2. Distribución de provincias y departamentos en el lado argentino.

| Unidad hidrográfica                    | Provincia | Departamentos  |
|----------------------------------------|-----------|----------------|
| <b>Cuenca del río San Juan del Oro</b> | Jujuy     | Santa Catalina |
|                                        |           | Yavi           |
|                                        |           | Rinconada      |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.2. Delimitación de la cuenca

Para la delimitación de la cuenca se tomó como punto de desembocadura el puente de la comunidad de Chuquiago donde se cuenta con una estación hidrométrica, además, de ser la zona de estudio del proyecto. La delimitación de la cuenca se hizo el uso del software ArcMap 10.4.1 utilizando un Modelo de Elevación Digital (DEM) con una resolución de 12.5m x 12.5m Alos Palsar que se descargó de la página (ASF Data Search Vertex, s.f.).

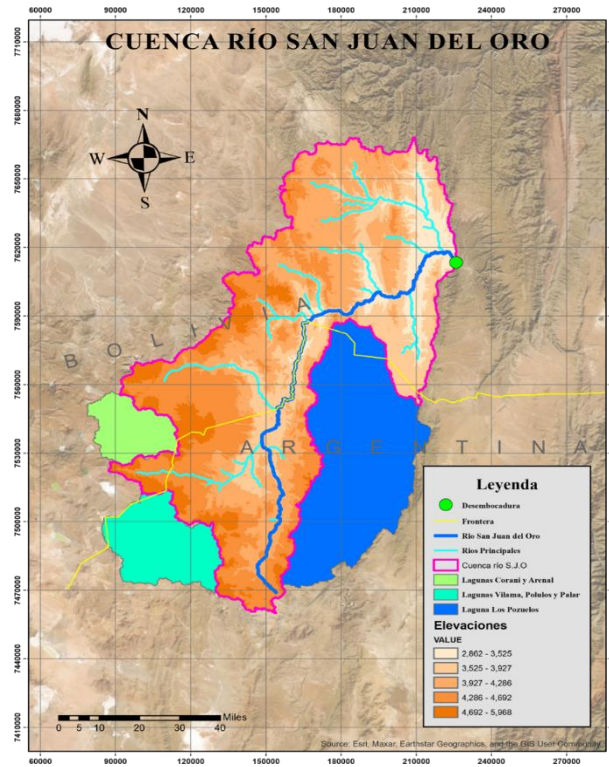
Una vez obtenida la información se procedió a delimitar la cuenca con el software ArcGIS para obtener los resultados más precisos. En la (Tabla 4-3), se muestra los resultados de la magnitud de la cuenca y como se sub dividió para el cálculo y en la (Figura 4-1), se muestra la cuenca del río San Juan del Oro. En el (**Anexo A**), se muestra algunos detalles de determinación de estos parámetros de la cuenca.

*Tabla 4-3. Unidades hidrográficas dentro la cuenca del río San Juan del Oro*

| Unidad hidrográfica                    | Tipo de unidad hidrográfica | Área Km <sup>2</sup> |
|----------------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| <b>Cuenca del río San Juan del Oro</b> | Exorreica                   | 12363.94             |
| <b>Laguna Los Pozuelos</b>             | Endorreica                  | 3907.55              |
| <b>Lagunas Vilama, Polulos y Palar</b> | Endorreica                  | 1376.94              |
| <b>Lagunas Corani y Arenal</b>         | Endorreica                  | 755.94               |
| <b>Total, Área de toda la cuenca</b>   |                             | <b>18404.37</b>      |

*Fuente: Elaboración propia*

Figura. 4-1. Cuenca del río San Juan del Oro



Fuente: Elaboración propia ArcMap

#### 4.1.3. Determinación de parámetros morfológicos de la cuenca

- **Área de drenaje (A)**

Para la determinación del área y perímetro de la cuenca se utilizó el software ArcGIS una vez delimitada solo tomando como punto más bajo o de desembocadura la estación hidrométrica de Chuquiago dando como resultado el siguiente valor:

$$A = 12363.94 \text{ Km}^2$$

- **Perímetro de la cuenca (P)**

$$P = 1239.73 \text{ Km}$$

- **Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad, (Kc)**

$$Kc = 3.14$$

Teniendo como referencia en valor de (Kc) se puede definir la cuenca como una cuenca de forma muy alargada con forma irregular ya que su  $Kc > 3$

- **Factor de forma (Kf)**

$$K_f = 0.41$$

Como el valor de  $K_f < 0.5$  la cuenca del río San Juan del Oro se clasifica como muy poco compacta y alargada con un escurrimiento más lento, menor riesgo de crecidas abruptas, pero posible duración prolongada.

- **Longitud del cauce principal (Lc)**

Para el cálculo de la longitud del cauce principal del río San Juan del Oro se lo hizo con el ArcGIS con el siguiente resultado:

$$L_c = 258.88 \text{ Km}$$

- **Pendiente del cauce principal de la cuenca (S)**

El cálculo de la pendiente del cauce principal utilizando la siguiente fórmula:

$$S = \frac{h_{max} - h_{min}}{L_c} \quad (Ec. 16)$$

Para determinar las cotas o alturas máxima y mínima de la cuenca se extrajo de la Figura 9 donde están las elevaciones de la cuenca con los siguientes valores:

$$H_{max} = 5968 \text{ m.s.n.m.}$$

$$H_{min} = 2873 \text{ m.s.n.m.}$$

$$S = 0.0107 = 1.07\%$$

La pendiente del cauce principal de la Cuenca del río San Juan del Oro es de 1.07% hasta la estación hidrométrica del puente de Chuquiago, esto nos indica que es probable que la cuenca tenga una flujo moderado y eficiente durante lluvias. Sin embargo, en condiciones de lluvias muy intensas o eventos extremos, podría haber problemas de **inundaciones** en áreas de baja elevación o zonas con drenaje inadecuado.

#### 4.1.4. Parámetros Hidrológicos de la cuenca

- **Tiempo de concentración (tc)**

*Tabla 4-4. Datos necesarios para determinar el tiempo de concentración.*

| Datos generales de la cuenca                |         |          |                 |
|---------------------------------------------|---------|----------|-----------------|
| Perímetro                                   | P =     | 1239.73  | km              |
| Área de la Cuenca                           | A =     | 12363.94 | Km <sup>2</sup> |
| Longitud del río o curso principal          | L =     | 258.88   | Km              |
| Cota máxima                                 | Hmax =  | 5968.00  | m.s.n.m.        |
| Cota mínima                                 | H min = | 2873.00  | m.s.n.m.        |
| Desnivel máximo del curso de agua más largo | H =     | 3095.00  | m               |
| Pendiente del cauce principal               | S =     | 0.011    | m/m             |

Fuente: Elaboración propia

En el (**Anexo A**), se muestra el procedimiento de la determinación del tiempo de concentración de la cuenca con fórmulas de diferentes autores.

Tabla 4-5. Resultados del tiempo de concentración.

|                      |             |              |           |
|----------------------|-------------|--------------|-----------|
| Formula Californiana | tc =        | 26.17        | hr        |
| Formula de Chereque  | tc =        | 26.31        | hr        |
| Formula de Kirpich   | tc =        | 26.31        | hr        |
| <b>Promedio</b>      | <b>tc =</b> | <b>26.26</b> | <b>hr</b> |

Fuente: Elaboración propia

- **Tiempo de retardo (tr)**

El tiempo de retardo (tr) está relacionado con el tiempo de concentración (**tc**) y puede estimarse a partir de diferentes fórmulas empíricas. Una de las más utilizadas es la ecuación de Kirpich:

$$tr = 0.6 * tc \quad (Ec. 17)$$

Entonces el tiempo de retardo será:

$$tr = 15.76 \text{ hrs} = \mathbf{945.36 \text{ min}}$$

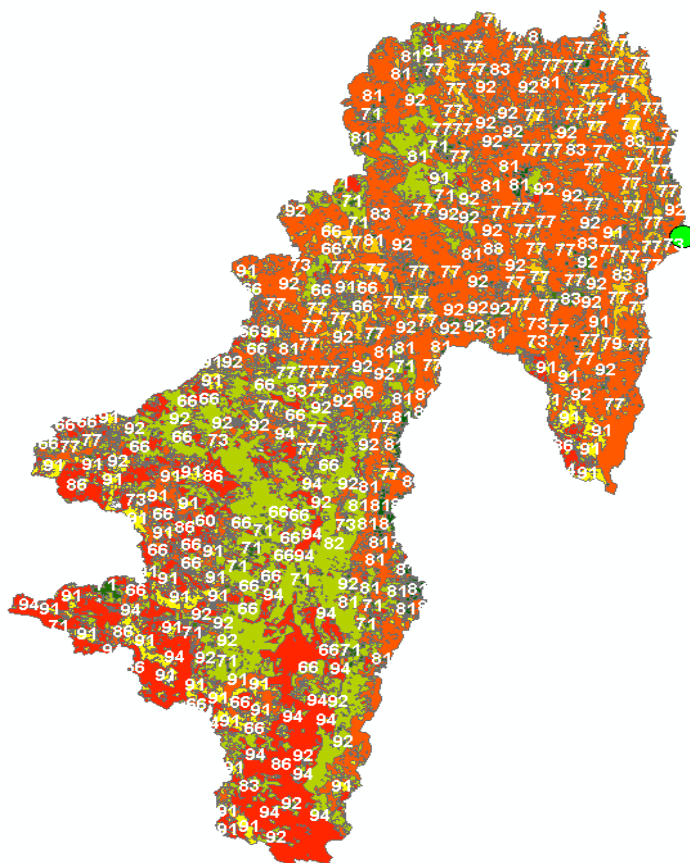
- **Número de curva (CN)**

Dado que la cuenca objeto de estudio se encuentra compartida entre dos países (Argentina y Bolivia), la obtención precisa del número de curva (CN) presenta ciertas dificultades, especialmente por la necesidad de contar con información homogénea y detallada sobre el uso del suelo y la cobertura vegetal en ambos territorios. Para superar esta limitación, y garantizar una base de datos coherente y de cobertura global, se recurrió al uso del conjunto de datos denominado GCN250, el cual ofrece mapas de número de curva a escala global con una resolución de 250 metros, adecuados para modelación hidrológica. Este recurso fue obtenido desde la plataforma Figshare, donde se encuentra publicado como un insumo libremente accesible para estudios científicos y técnicos.

Se descargo el ráster del número de curva de la cuenca y mediante un procesamiento con el ArcMap que se muestra en el (**Anexo A**), se determinó el número de curva de la cuenca obteniendo el siguiente valor:

$$CN = \mathbf{85}$$

Figura. 4-2. Numero de curva de acuerdo al tipo de suelo y cobertura vegetal de la cuenca



Fuente: Elaboración propia ArcMap

## 4.2. Información meteorológica

Para la recolección de información se ubicó las estaciones meteorológicas que están cerca de la cuenca.

Tabla 4-6. Estaciones meteorológicas más cercanas a la cuenca del río S.J.O.

| Estación       | Depart. | Provincia      | Municipio | Latitud  | Longitud  | Altitud | Serie     |
|----------------|---------|----------------|-----------|----------|-----------|---------|-----------|
| <b>Ramadas</b> | Potosí  | Nor<br>Chichas | Cotagaita | -21.0833 | -65.6333  | 3220    | 1977-2020 |
| <b>Atocha</b>  | Potosí  | Sud<br>Chichas | Atocha    | -20.9300 | -66.21890 | 3700    | 1984-2019 |
| <b>Salo</b>    | Potosí  | Sud<br>Chichas | Tupiza    | -21.2333 | -65.76670 | 3245    | 2008-2016 |
| <b>Tupiza</b>  | Potosí  | Sud<br>Chichas | Tupiza    | -21.4383 | -65.71530 | 2923    | 1942-2023 |

|                               |        |                |                    |          |           |      |           |
|-------------------------------|--------|----------------|--------------------|----------|-----------|------|-----------|
| <b>Chuquiago</b>              | Potosí | Sud Chichas    | Tupiza             | -21.5614 | -656.4110 | 2841 | 2005-2023 |
| <b>S. J. de Pampa Grande</b>  | Potosí | Sud Chichas    | Tupiza             | -21.6833 | -65.81670 | 3000 | 1943-2020 |
| <b>Charaja</b>                | Potosí | Sud Chichas    | Tupiza             | -21.5833 | -65.60000 | 3420 | 1980-1993 |
| <b>Talina</b>                 | Potosí | Sud            | Tupiza             | -21.7463 | -65.82530 | 3093 | 1980-2019 |
| <b>Arenales</b>               | Potosí | Modesto Omiste | Villazón           | -21.6833 | -65.53330 | 3443 | 1980-1993 |
| <b>S. Antonio de Esmoruco</b> | Potosí | Sud López      | S. Antonio de Esm. | -21.9517 | -66.51940 | 3701 | 1980-2021 |
| <b>S. Pablo de Lipez</b>      | Potosí | Sud López      | S. Pablo de Lipez  | -21.6831 | -66.61390 | 4256 | 1977-2023 |

Fuente: SENAMHI Bolivia

Para seleccionar las estaciones con las cuales se va a trabajar, se hizo un análisis detallado de calidad y continuidad de sus datos. Este proceso, descrito en el (**Anexo B**), considero principalmente la cantidad de años con registro continuo y la presencia de datos faltantes. Bajo estos criterios se seleccionaron únicamente aquellas estaciones que cumplían con los requisitos mínimos de confiabilidad, las cuales se presentan en la (Tabla 4-7). Y su ubicación se presentan en la (Figura 4-3).

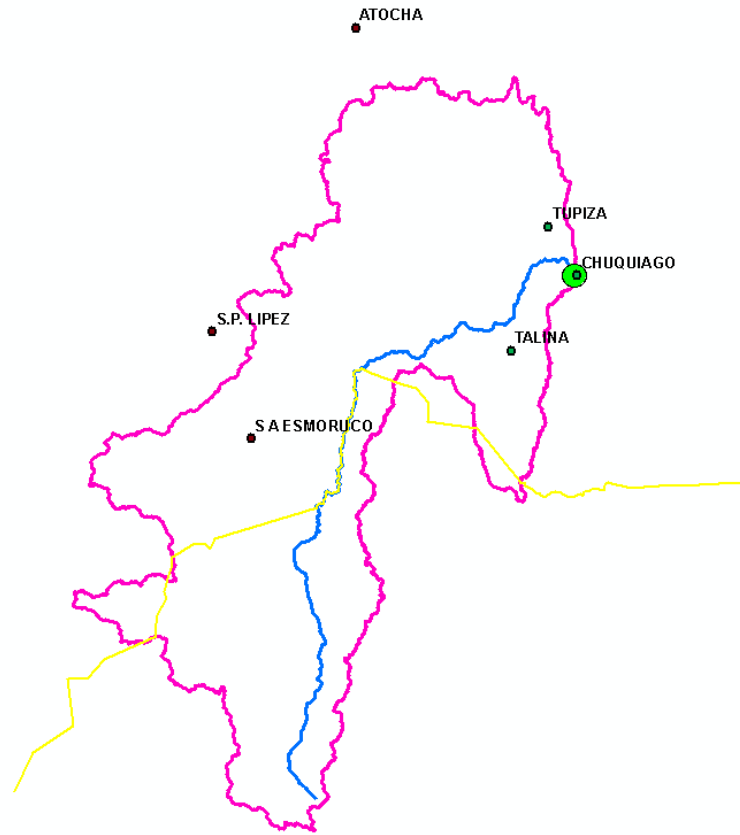
Tabla 4-7. Estaciones meteorológicas más representativas en la cuenca del R.S.J.O.

| <b>Estación</b>               | <b>Depart.</b> | <b>Provincia</b> | <b>Municipio</b>   | <b>Latitud</b> | <b>Longitud</b> | <b>Altura m.s.n.m.</b> | <b>Cant. de Datos</b> |
|-------------------------------|----------------|------------------|--------------------|----------------|-----------------|------------------------|-----------------------|
| <b>S. Pablo de Lipez</b>      | Potosí         | Sud López        | S. Pablo de Lipez  | -21.6831       | -66.61390       | 4256                   | 34                    |
| <b>Chuquiago</b>              | Potosí         | Sud Chichas      | Tupiza             | -21.5614       | -656.41100      | 2841                   | 19                    |
| <b>Atocha</b>                 | Potosí         | Sud Chichas      | Atocha             | -20.9300       | -66.21890       | 3700                   | 15                    |
| <b>S. Antonio de Esmoruco</b> | Potosí         | Sud López        | S. Antonio de Esm. | -21.9517       | -66.51940       | 3701                   | 17                    |
| <b>Tupiza</b>                 | Potosí         | Sud Chichas      | Tupiza             | -21.4383       | -65.71530       | 2923                   | 34                    |
| <b>Talina</b>                 | Potosí         | Sud Chichas      | Tupiza             | -21.7522       | -65.82530       | 3093                   | 15                    |

Tabla 4-7 (continuación)

Fuente: SENAMHI Bolivia

Figura. 4-3. Ubicación de las estaciones seleccionadas en la cuenca río S.J.O.



Fuente: Elaboración propia

- **Precipitación máxima en 24 horas de cada estación**

Una vez seleccionada las estaciones más representativas para la cuenca se hizo el proceso de verificación de datos y eliminando datos inconsistentes o dudosos, para después determinar las precipitaciones máximas en 24 horas de cada año hidrológico, en la (Tabla 4-8), se muestran los resultados.

Tabla 4-8. Precipitaciones máximas en 24 horas de las estaciones seleccionadas.

| Año  | Estación (Pmax 24 hrs (mm)) |               |        |                  |        |           |
|------|-----------------------------|---------------|--------|------------------|--------|-----------|
|      | Tupiza                      | S.P. de Lipez | Atocha | S.A. de Esmoruco | Talina | Chuquiago |
| 1990 | 18.5                        | 30            |        |                  |        |           |
| 1991 | 20.1                        | 24.6          |        |                  |        |           |
| 1992 | 28.4                        | 20            |        |                  |        |           |

| Año  | Estación (Pmax 24 hrs (mm)) |               |        |                  |        |           |
|------|-----------------------------|---------------|--------|------------------|--------|-----------|
|      | Tupiza                      | S.P. de Lipez | Atocha | S.A. de Esmoruco | Talina | Chuquiago |
| 1993 | 38.5                        | 23.3          |        |                  |        |           |
| 1994 | 25.9                        | 23.3          |        |                  |        |           |
| 1995 | 29.0                        | 23.3          |        |                  |        |           |
| 1996 | 20.5                        | 18.2          |        |                  |        |           |
| 1997 | 22.5                        | 27.9          |        |                  |        |           |
| 1998 | 20.0                        | 19            |        |                  |        |           |
| 1999 | 21.4                        | 22            |        |                  |        |           |
| 2000 | 36.8                        | 48.5          |        |                  |        |           |
| 2001 | 24.6                        | 35            |        |                  |        |           |
| 2002 | 19.5                        | 15.9          |        |                  |        |           |
| 2003 | 27.5                        | 30.8          |        |                  |        |           |
| 2004 | 20.0                        | 15.6          |        |                  |        |           |
| 2005 | 26.2                        | 30            | 46.50  | 31.1             | 19.9   | 46        |
| 2006 | 24.2                        | 20.4          | 22.70  | 32               | 8.3    | 35        |
| 2007 | 44.0                        | 18            | 30.50  | 30.2             | 16.3   | 26        |
| 2008 | 58.0                        | 20.3          | 26.50  | 25               | 20.3   | 34        |
| 2009 | 30.0                        | 20            | 50.50  | 31.1             | 8.1    | 32        |
| 2010 | 49.5                        | 11.6          | 45.50  | 39.5             | 9      | 30.1      |
| 2011 | 25.2                        | 24            | 26.50  | 16               | 10.2   | 30        |
| 2012 | 54.8                        | 9.8           | 24.60  | 31.1             | 12.5   | 28.5      |
| 2013 | 48.0                        | 18.5          | 35.50  | 51               | 20.2   | 38        |
| 2014 | 48.0                        | 15            | 30.60  | 25.6             | 11.8   | 26        |
| 2015 | 28.4                        | 15.1          | 30.50  | 20               | 10.2   | 48.5      |
| 2016 | 24.2                        | 12            | 28.70  | 20               | 7.9    | 29        |
| 2017 | 20.5                        | 16            | 22.80  | 31.1             | 17.9   | 20.7      |
| 2018 | 21.0                        | 10            | 26.50  | 28.2             | 14.5   | 34        |
| 2019 | 22.0                        | 10            | 26.50  | 44.8             | 4.9    | 15.2      |
| 2020 | 20.5                        | 19            |        |                  | 10.2   | 27.5      |
| 2021 | 43.4                        | 24.3          |        |                  | 15.7   | 31        |
| 2022 | 19.0                        | 17            |        |                  |        | 29        |
| 2023 | 53.4                        | 24            |        |                  |        | 58        |

Tabla 4-8 (continuación)  
Fuente: Elaboración propia

- **Determinación de las alturas de precipitaciones máximas en 24 hrs para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 75, 100 y 200 años para cada estación**

Para determinar las precipitaciones máximas y analizar su ajuste a diferentes distribuciones de probabilidad se siguió los siguientes pasos descritos.

### 1) Análisis estadístico preliminar

Se determinó los parámetros de distribución estadística de cada estación como la media, moda, desviación estándar, numero de datos.

### 2) Ajuste de distribución de probabilidad

Se probó con diferentes distribuciones de probabilidad, las más comunes en hidrología como: Distribución normal, Distribución Log Normal, Distribución Gumbel, Distribución Gamma de 2 Parámetros y Distribución Log Pearson Tipo III.

### 3) Prueba de bondad de ajuste

Para determinar que distribución es la que más se ajusta o la que representaba mejor los datos se aplicó la prueba estadística de Kolmogorov-Smirnov. Tras aplicar esta prueba la distribución que mejor se ajustó a los datos fue la de la distribución Gumbel.

### 4) Determinación de precipitaciones máximas

Se utilizo la fórmula de Distribución de Gumbel para estimar valores de precipitación máxima asociados a diferentes periodos de retorno.

El proceso de estimación de precipitaciones máximas en 24 hrs se encuentra a detalle en el (**Anexo B**), se hizo el análisis para cada estación llegando a obtener los resultados que muestra la (Tabla 4-9).

*Tabla 4-9. Precipitaciones máximas en 24hr para diferentes (T).*

| Periodo de Retorno (T)<br>Años | ESTACIONES Pmax 24hrs (mm) |            |        |               |        |           |
|--------------------------------|----------------------------|------------|--------|---------------|--------|-----------|
|                                | Tupiza                     | S.P. Lipez | Atocha | S.A. Esmoruco | Talina | Chuquiago |
| 2                              | 28.4                       | 19.7       | 30.2   | 12.0          | 28.9   | 30.9      |
| 5                              | 39.1                       | 26.6       | 38.0   | 16.3          | 37.1   | 39.6      |
| 10                             | 46.2                       | 31.2       | 43.2   | 19.1          | 42.5   | 45.4      |
| 25                             | 55.1                       | 37.1       | 49.8   | 22.7          | 49.4   | 52.6      |
| 50                             | 61.8                       | 41.4       | 54.7   | 25.4          | 54.4   | 58.0      |
| 75                             | 65.7                       | 43.9       | 57.6   | 26.9          | 57.4   | 61.1      |

| <b>Periodo de Retorno (T) Años</b> | <b>ESTACIONES Pmax 24hrs (mm)</b> |                   |               |                      |               |                  |
|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------|----------------------|---------------|------------------|
|                                    | <b>Tupiza</b>                     | <b>S.P. Lipez</b> | <b>Atocha</b> | <b>S.A. Esmoruco</b> | <b>Talina</b> | <b>Chuquiago</b> |
| <b>100</b>                         | 68.4                              | 45.7              | 59.5          | 28.0                 | 59.5          | 63.3             |
| <b>200</b>                         | 74.9                              | 50.0              | 64.4          | 30.6                 | 64.5          | 68.6             |

*Tabla 4-9 (continuación)*  
*Fuente: Elaboración propia*

### 5) Estimación de precipitación máxima de la cuenca

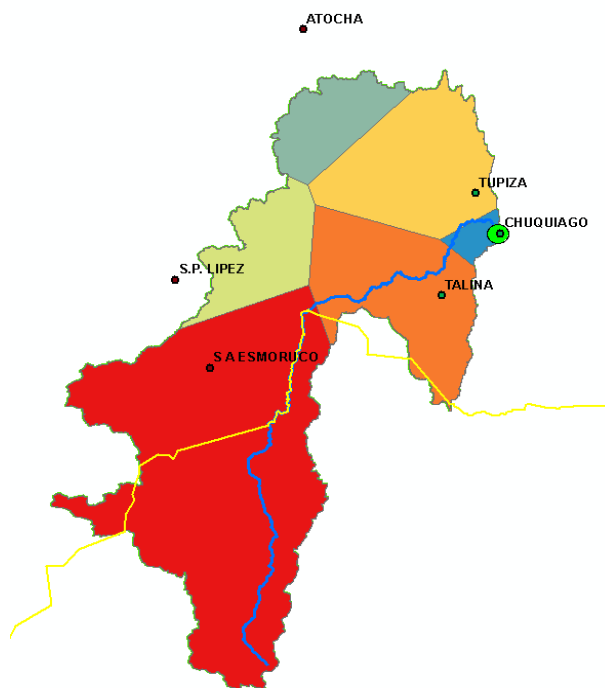
Para estimar la precipitación máxima media de la cuenca se utilizó el software ArcGIS aplicando el método de polígonos de Thiessen. Este método permitió delimitar de manera precisa el área de influencia de que corresponde a cada estación dentro de la cuenca, asignando un peso proporcional a cada una en función de su ubicación y cobertura espacial. Una vez definido estas áreas se calculó la precipitación media máxima de la cuenca para cada periodo de retorno que se considera en el estudio, este cálculo se lo realizó como un promedio ponderado de las precipitaciones máximas registradas en las estaciones seleccionadas utilizando como factor de ponderación las áreas delimitadas por los polígonos de Thiessen. Los resultados obtenidos se muestran en la (Tabla 4-10) y la (Figura 4-4), muestra el área de influencia de cada estación en la cuenca delimitada por los polígonos.

*Tabla 4-10. Precipitaciones máximas en 24 hrs de la cuenca.*

| <b>Periodo de Retorno (T) Años</b> | <b>Pmax (24hr) (mm)</b> |
|------------------------------------|-------------------------|
| <b>2</b>                           | 19.72                   |
| <b>5</b>                           | 25.90                   |
| <b>10</b>                          | 30.16                   |
| <b>25</b>                          | 35.55                   |
| <b>50</b>                          | 39.55                   |
| <b>75</b>                          | 41.89                   |
| <b>100</b>                         | 42.81                   |
| <b>200</b>                         | 47.47                   |

*Fuente: Elaboración propia*

Figura. 4-4. Polígonos de Thiessen.



Fuente: Elaboración propia ArcMap

### 4.3. Precipitaciones de diseño

Como no se cuenta con datos de precipitaciones horarias se lo trabajo con los datos de precipitaciones diarias aplicando el método de Dick y Peschke que es una técnica que se usa para generar los hietogramas de diseño a partir de datos de precipitación diaria. La lluvia total de diseño, originalmente definida con una duración de 26 horas, igual al tiempo de concentración de la cuenca y fue desagregada utilizando modelo de Dick y Peschke (establecido para 24 horas), y se concentró el volumen completo en ese intervalo. Esta adaptación se realizó con el objetivo de representar un escenario de diseño más crítico, permitiendo obtener caudales picos máximos con márgenes de seguridad adicionales en las obras de protección fluvial.

Cuando se modelan lluvias con períodos de retorno altos (25, 50, 100 años), se requiere un escenario crítico, por lo que esta aproximación no solo es aceptable, sino recomendable.

Después de descomponer la lluvia a lo largo del día, se construyeron los hietogramas de diseño, es decir, representaciones de cómo cae la lluvia en el tiempo para diferentes periodos de retorno. Se utilizó el método de bloques alternos, una técnica que organiza

los momentos más intensos de la lluvia de forma simétrica alrededor del centro del evento, lo que ayuda a representar de manera más realista una tormenta intensa típica. El desarrollo a detalle de este proceso se muestra en el **(Anexo C)**.

*Tabla 4-11. Precipitación en 24 horas desagregada cada hora.*

| <b>Duración<br/>(Minutos)</b> | <b>Precipitación en 24 horas (mm)</b> |              |              |              |              |              |              |              |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                               | 19.72                                 | 25.90        | 30.16        | 35.55        | 39.55        | 41.89        | 42.81        | 47.47        |
|                               | Periodo de Retorno (Años)             |              |              |              |              |              |              |              |
|                               | 2                                     | 5            | 10           | 25           | 50           | 75           | 100          | 200          |
|                               | Precipitación (mm)                    |              |              |              |              |              |              |              |
| <b>60</b>                     | 8.91                                  | 11.70        | 13.63        | 16.06        | 17.87        | 18.93        | 19.34        | 21.45        |
| <b>120</b>                    | 10.60                                 | 13.91        | 16.21        | 19.10        | 21.25        | 22.51        | 23.00        | 25.51        |
| <b>180</b>                    | 11.73                                 | 15.40        | 17.93        | 21.14        | 23.52        | 24.91        | 25.46        | 28.23        |
| <b>240</b>                    | 12.60                                 | 16.55        | 19.27        | 22.72        | 25.27        | 26.77        | 27.36        | 30.33        |
| <b>300</b>                    | 13.33                                 | 17.50        | 20.38        | 24.02        | 26.72        | 28.30        | 28.92        | 32.07        |
| <b>360</b>                    | 13.95                                 | 18.31        | 21.33        | 25.14        | 27.97        | 29.62        | 30.27        | 33.57        |
| <b>420</b>                    | 14.50                                 | 19.03        | 22.17        | 26.13        | 29.07        | 30.78        | 31.46        | 34.89        |
| <b>480</b>                    | 14.99                                 | 19.68        | 22.92        | 27.01        | 30.05        | 31.83        | 32.53        | 36.07        |
| <b>540</b>                    | 15.44                                 | 20.27        | 23.60        | 27.82        | 30.95        | 32.78        | 33.50        | 37.15        |
| <b>600</b>                    | 15.85                                 | 20.81        | 24.23        | 28.56        | 31.78        | 33.66        | 34.40        | 38.14        |
| <b>660</b>                    | 16.23                                 | 21.31        | 24.82        | 29.25        | 32.54        | 34.47        | 35.23        | 39.06        |
| <b>720</b>                    | 16.59                                 | 21.78        | 25.36        | 29.90        | 33.26        | 35.22        | 36.00        | 39.92        |
| <b>780</b>                    | 16.92                                 | 22.22        | 25.88        | 30.50        | 33.93        | 35.94        | 36.73        | 40.73        |
| <b>840</b>                    | 17.24                                 | 22.63        | 26.36        | 31.07        | 34.56        | 36.61        | 37.42        | 41.49        |
| <b>900</b>                    | 17.54                                 | 23.03        | 26.82        | 31.61        | 35.17        | 37.25        | 38.07        | 42.21        |
| <b>960</b>                    | 17.82                                 | 23.40        | 27.26        | 32.13        | 35.74        | 37.85        | 38.69        | 42.90        |
| <b>1020</b>                   | 18.10                                 | 23.76        | 27.67        | 32.62        | 36.28        | 38.43        | 39.28        | 43.55        |
| <b>1080</b>                   | 18.36                                 | 24.10        | 28.07        | 33.09        | 36.81        | 38.98        | 39.84        | 44.18        |
| <b>1140</b>                   | 18.61                                 | 24.43        | 28.45        | 33.54        | 37.31        | 39.51        | 40.38        | 44.78        |
| <b>1200</b>                   | 18.85                                 | 24.74        | 28.82        | 33.97        | 37.79        | 40.02        | 40.91        | 45.36        |
| <b>1260</b>                   | 19.08                                 | 25.05        | 29.17        | 34.39        | 38.25        | 40.51        | 41.41        | 45.92        |
| <b>1320</b>                   | 19.30                                 | 25.34        | 29.51        | 34.79        | 38.70        | 40.99        | 41.89        | 46.45        |
| <b>1380</b>                   | 19.52                                 | 25.62        | 29.84        | 35.18        | 39.13        | 41.45        | 42.36        | 46.97        |
| <b>1440</b>                   | <b>19.72</b>                          | <b>25.90</b> | <b>30.16</b> | <b>35.55</b> | <b>39.55</b> | <b>41.89</b> | <b>42.81</b> | <b>47.47</b> |

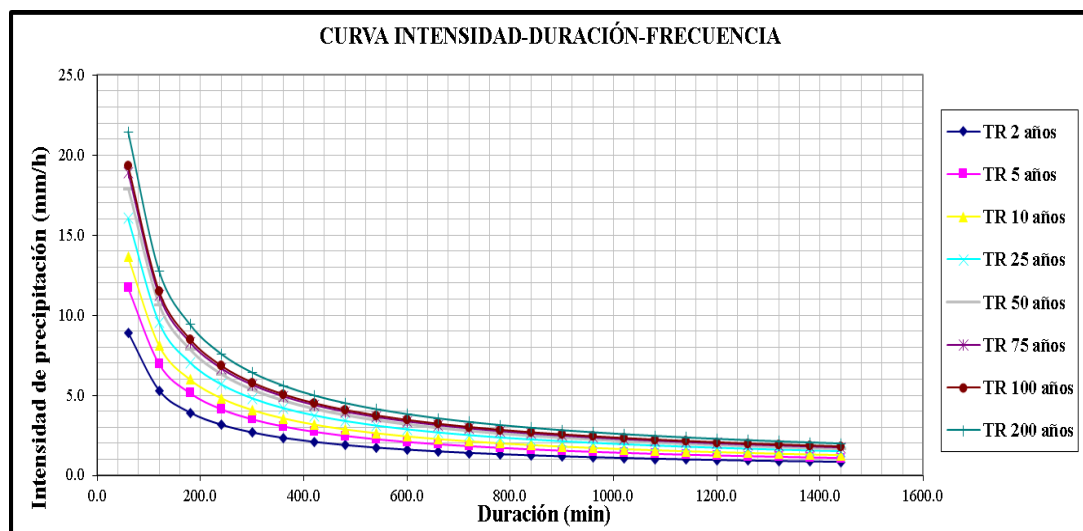
*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 4-12. Intensidad de precipitación por cada hora.

| Duración<br>(Horas) | Duración<br>(min) | Periodo de retorno (Años) |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|-------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     |                   | 2                         | 5     | 10    | 25    | 50    | 75    | 100   | 200   |
|                     |                   | Intensidad (mm/hr)        |       |       |       |       |       |       |       |
| 1,00                | 60                | 8,91                      | 11,70 | 13,63 | 16,06 | 17,87 | 18,93 | 19,34 | 21,45 |
| 2,00                | 120               | 5,30                      | 6,96  | 8,10  | 9,55  | 10,63 | 11,25 | 11,50 | 12,75 |
| 3,00                | 180               | 3,91                      | 5,13  | 5,98  | 7,05  | 7,84  | 8,30  | 8,49  | 9,41  |
| 4,00                | 240               | 3,15                      | 4,14  | 4,82  | 5,68  | 6,32  | 6,69  | 6,84  | 7,58  |
| 5,00                | 300               | 2,67                      | 3,50  | 4,08  | 4,80  | 5,34  | 5,66  | 5,78  | 6,41  |
| 6,00                | 360               | 2,32                      | 3,05  | 3,55  | 4,19  | 4,66  | 4,94  | 5,05  | 5,59  |
| 7,00                | 420               | 2,07                      | 2,72  | 3,17  | 3,73  | 4,15  | 4,40  | 4,49  | 4,98  |
| 8,00                | 480               | 1,87                      | 2,46  | 2,86  | 3,38  | 3,76  | 3,98  | 4,07  | 4,51  |
| 9,00                | 540               | 1,72                      | 2,25  | 2,62  | 3,09  | 3,44  | 3,64  | 3,72  | 4,13  |
| 10,00               | 600               | 1,58                      | 2,08  | 2,42  | 2,86  | 3,18  | 3,37  | 3,44  | 3,81  |
| 11,00               | 660               | 1,48                      | 1,94  | 2,26  | 2,66  | 2,96  | 3,13  | 3,20  | 3,55  |
| 12,00               | 720               | 1,38                      | 1,81  | 2,11  | 2,49  | 2,77  | 2,94  | 3,00  | 3,33  |
| 13,00               | 780               | 1,30                      | 1,71  | 1,99  | 2,35  | 2,61  | 2,76  | 2,83  | 3,13  |
| 14,00               | 840               | 1,23                      | 1,62  | 1,88  | 2,22  | 2,47  | 2,61  | 2,67  | 2,96  |
| 15,00               | 900               | 1,17                      | 1,54  | 1,79  | 2,11  | 2,34  | 2,48  | 2,54  | 2,81  |
| 16,00               | 960               | 1,11                      | 1,46  | 1,70  | 2,01  | 2,23  | 2,37  | 2,42  | 2,68  |
| 17,00               | 1020              | 1,06                      | 1,40  | 1,63  | 1,92  | 2,13  | 2,26  | 2,31  | 2,56  |
| 18,00               | 1080              | 1,02                      | 1,34  | 1,56  | 1,84  | 2,04  | 2,17  | 2,21  | 2,45  |
| 19,00               | 1140              | 0,98                      | 1,29  | 1,50  | 1,77  | 1,96  | 2,08  | 2,13  | 2,36  |
| 20,00               | 1200              | 0,94                      | 1,24  | 1,44  | 1,70  | 1,89  | 2,00  | 2,05  | 2,27  |
| 21,00               | 1260              | 0,91                      | 1,19  | 1,39  | 1,64  | 1,82  | 1,93  | 1,97  | 2,19  |
| 22,00               | 1320              | 0,88                      | 1,15  | 1,34  | 1,58  | 1,76  | 1,86  | 1,90  | 2,11  |
| 23,00               | 1380              | 0,85                      | 1,11  | 1,30  | 1,53  | 1,70  | 1,80  | 1,84  | 2,04  |
| 24,00               | 1440              | 0,82                      | 1,08  | 1,26  | 1,48  | 1,65  | 1,75  | 1,78  | 1,98  |

Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-5. Curvas IDF para diferentes periodos de retorno.



Fuente: Elaboración propia

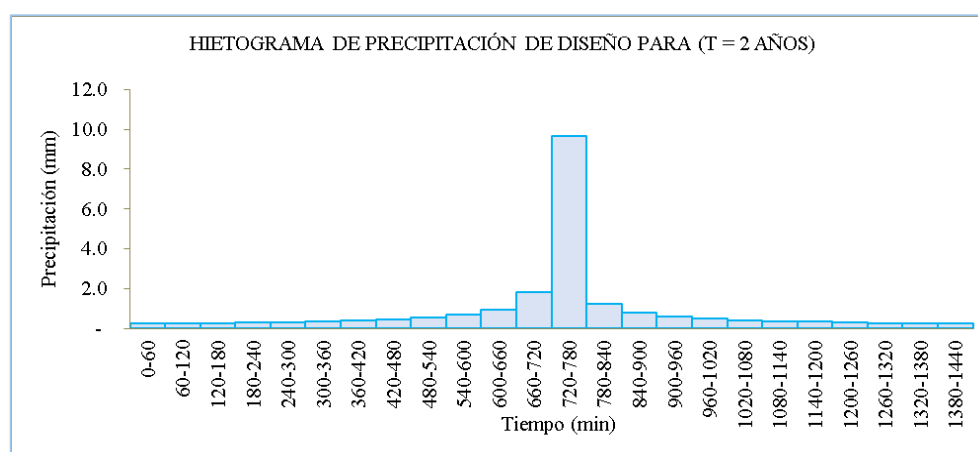
Tabla 4-13. Hietograma de diseño método bloques alternos.

| Hietogramas – método bloques alternos |             |             |              |              |              |              |               |               |
|---------------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Duración (min)                        | Tr = 2 años | Tr = 5 años | Tr = 10 años | Tr = 25 años | Tr = 50 años | Tr = 75 años | Tr = 100 años | Tr = 200 años |
| 60                                    | 0.23        | 0.27        | 0.30         | 0.36         | 0.41         | 0.44         | 0.46          | 0.53          |
| 120                                   | 0.24        | 0.29        | 0.32         | 0.38         | 0.44         | 0.47         | 0.50          | 0.56          |
| 180                                   | 0.26        | 0.31        | 0.35         | 0.41         | 0.47         | 0.51         | 0.53          | 0.61          |
| 240                                   | 0.28        | 0.33        | 0.38         | 0.45         | 0.51         | 0.55         | 0.58          | 0.66          |
| 300                                   | 0.31        | 0.37        | 0.41         | 0.49         | 0.56         | 0.60         | 0.63          | 0.72          |
| 360                                   | 0.34        | 0.41        | 0.46         | 0.55         | 0.62         | 0.67         | 0.70          | 0.80          |
| 420                                   | 0.39        | 0.46        | 0.52         | 0.61         | 0.70         | 0.75         | 0.79          | 0.90          |
| 480                                   | 0.45        | 0.53        | 0.60         | 0.71         | 0.81         | 0.87         | 0.92          | 1.04          |
| 540                                   | 0.53        | 0.63        | 0.72         | 0.85         | 0.96         | 1.04         | 1.09          | 1.24          |
| 600                                   | 0.67        | 0.80        | 0.90         | 1.07         | 1.22         | 1.31         | 1.38          | 1.57          |
| 660                                   | 0.95        | 1.12        | 1.27         | 1.51         | 1.71         | 1.84         | 1.95          | 2.21          |
| 720                                   | 1.82        | 2.16        | 2.45         | 2.90         | 3.30         | 3.56         | 3.75          | 4.26          |
| 780                                   | 9.64        | 11.41       | 12.96        | 15.35        | 17.44        | 18.80        | 19.82         | 22.52         |
| 840                                   | 1.22        | 1.45        | 1.64         | 1.95         | 2.21         | 2.38         | 2.51          | 2.86          |
| 900                                   | 0.78        | 0.93        | 1.05         | 1.25         | 1.42         | 1.53         | 1.61          | 1.83          |
| 960                                   | 0.59        | 0.70        | 0.80         | 0.94         | 1.07         | 1.16         | 1.22          | 1.38          |
| 1020                                  | 0.48        | 0.57        | 0.65         | 0.77         | 0.88         | 0.94         | 1.00          | 1.13          |
| 1080                                  | 0.41        | 0.49        | 0.56         | 0.66         | 0.75         | 0.81         | 0.85          | 0.97          |
| 1140                                  | 0.36        | 0.43        | 0.49         | 0.58         | 0.66         | 0.71         | 0.75          | 0.85          |
| 1200                                  | 0.32        | 0.38        | 0.44         | 0.52         | 0.59         | 0.63         | 0.67          | 0.76          |
| 1260                                  | 0.29        | 0.35        | 0.40         | 0.47         | 0.53         | 0.57         | 0.61          | 0.69          |
| 1320                                  | 0.27        | 0.32        | 0.36         | 0.43         | 0.49         | 0.53         | 0.56          | 0.63          |
| 1380                                  | 0.25        | 0.30        | 0.34         | 0.40         | 0.45         | 0.49         | 0.51          | 0.58          |
| 1440                                  | 0.23        | 0.28        | 0.31         | 0.37         | 0.42         | 0.45         | 0.48          | 0.55          |

Fuente: Elaboración propia

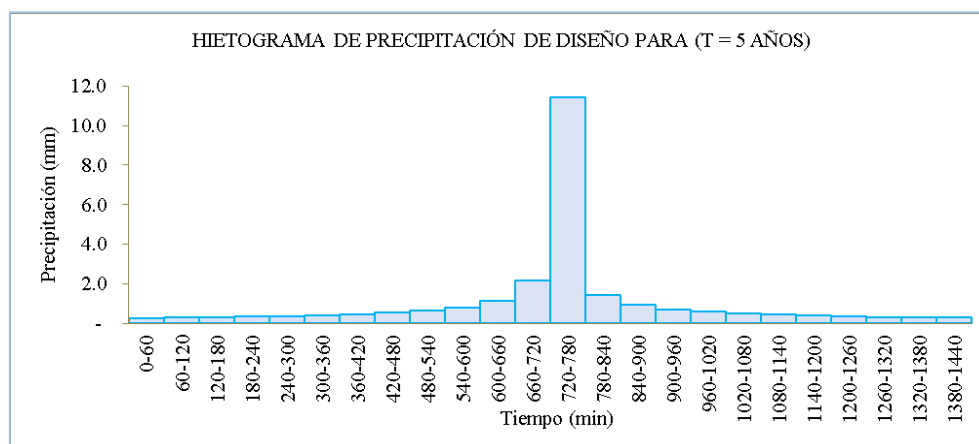
- Representación gráfica de la lluvia a lo largo del tiempo

Figura. 4-6. Hietograma de diseño para 2 años de retorno.



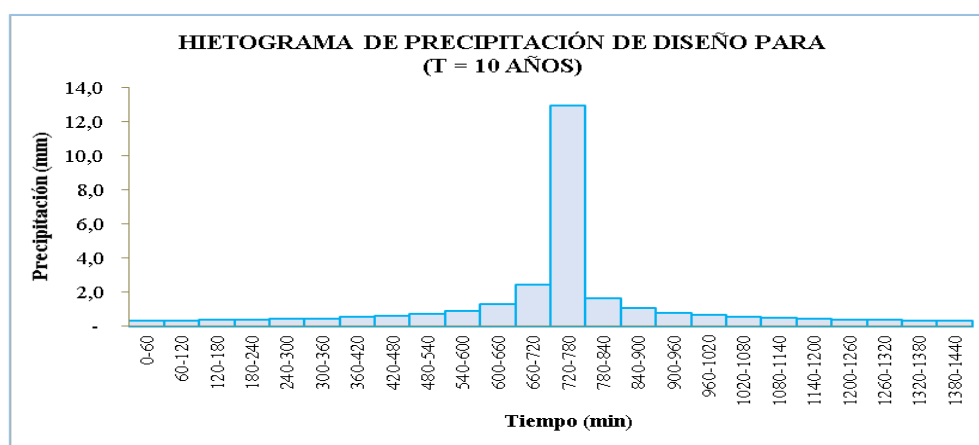
Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-7. Hietograma de diseño para 5 años de retorno.



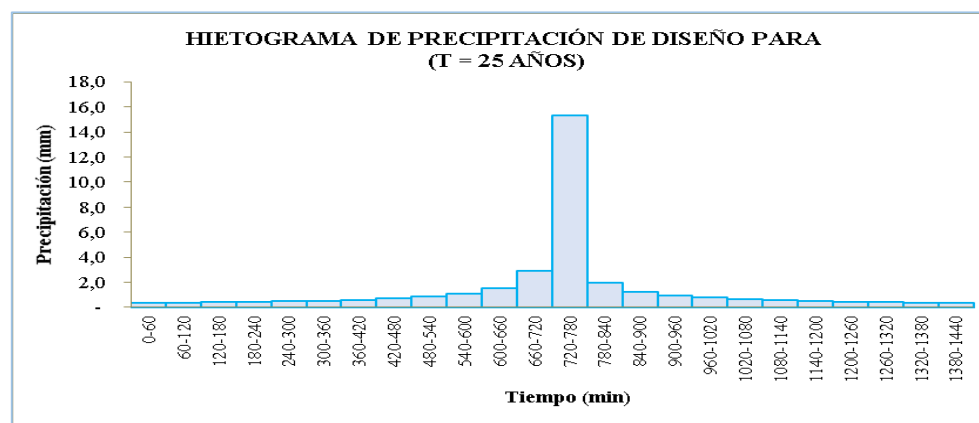
Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-8. Hietograma de diseño para 10 años de retorno.



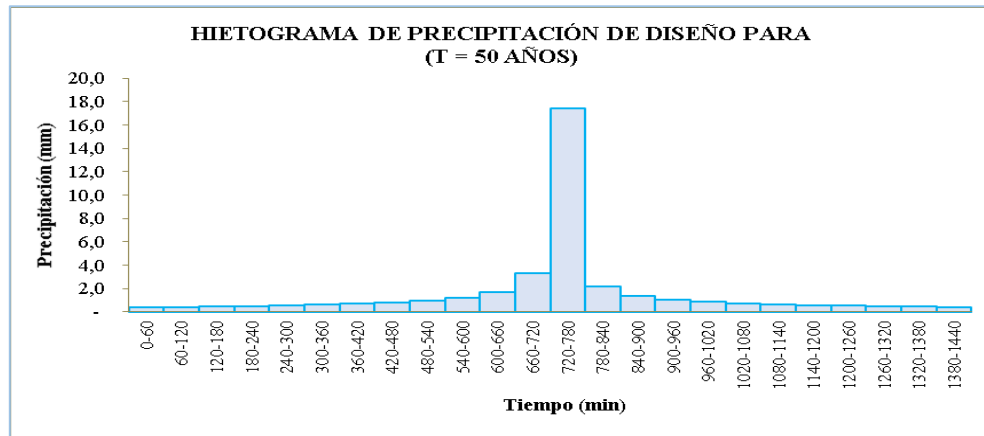
Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-9. Hietograma de diseño para 25 años de retorno.



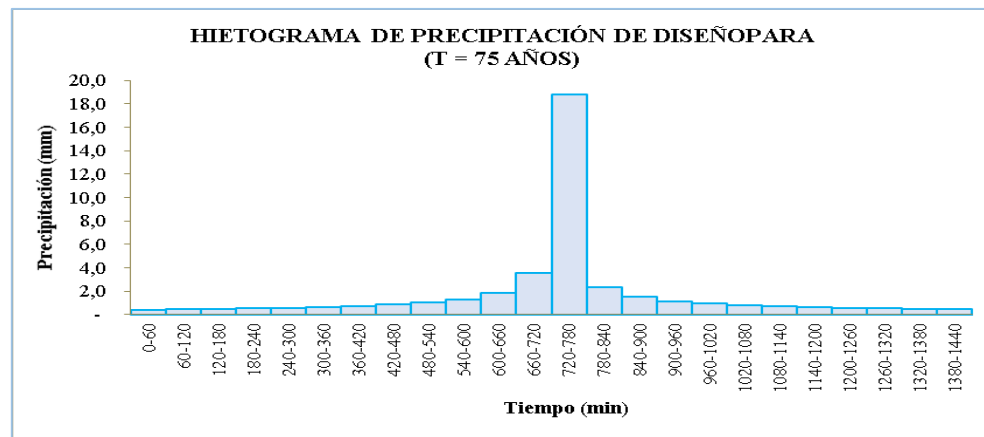
Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-10. Hietograma de diseño para 50 años de retorno.



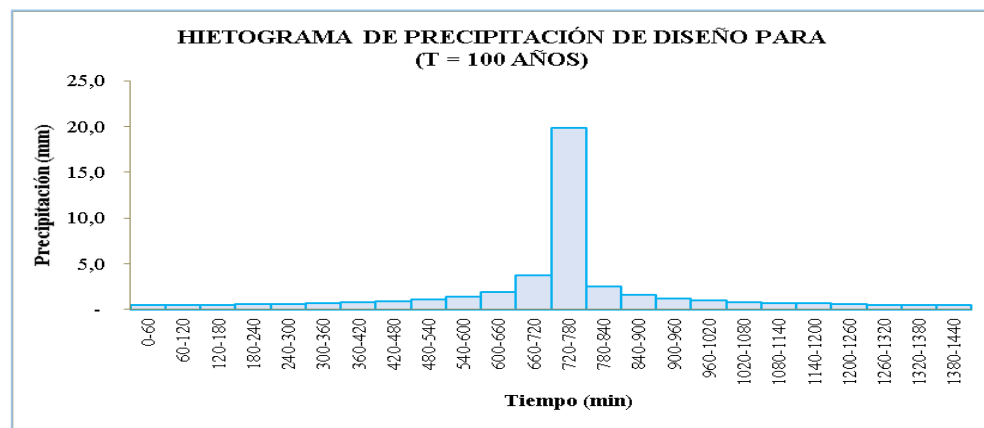
Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-11. Hietograma de diseño para 75 años de retorno.



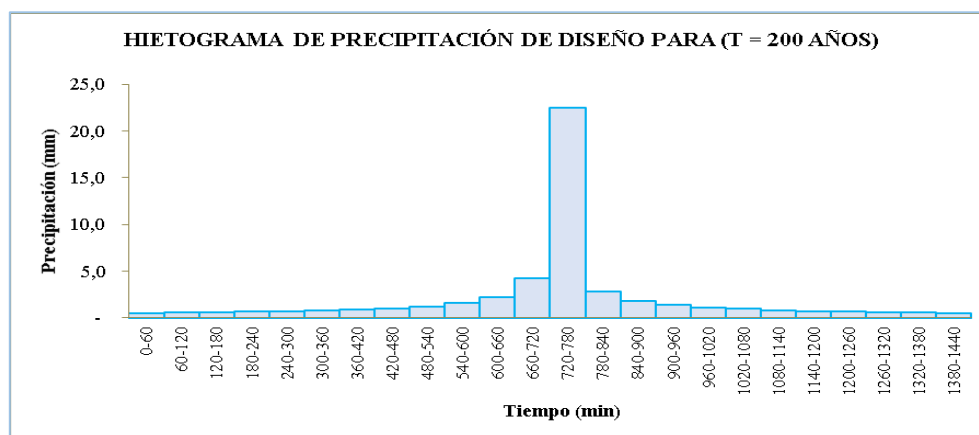
Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-12. Hietograma de diseño para 100 años de retorno.



Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-13. Hietograma de diseño para 200 años de retorno.



Fuente: Elaboración propia

#### 4.4. Estimación de caudales máximos de diseño con el modelo Hec-Hms

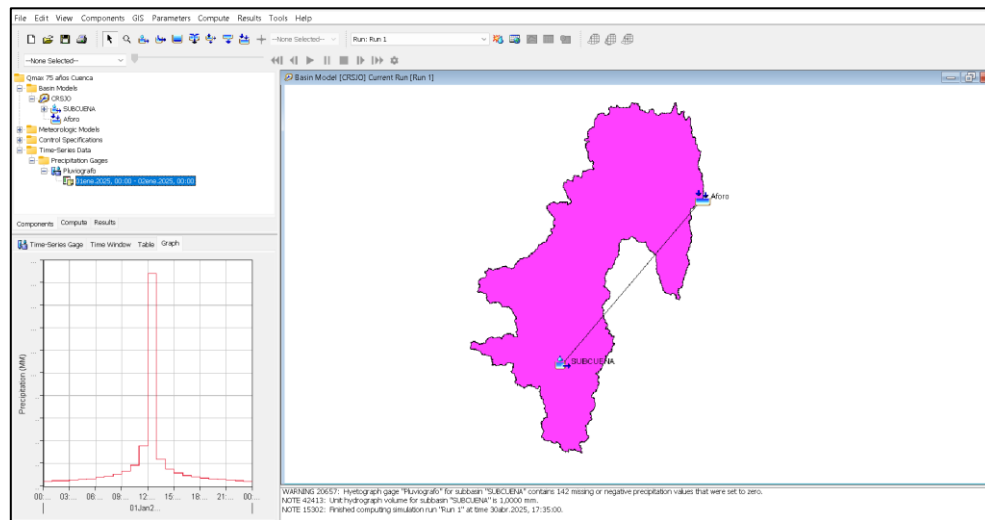
El modelo HEC-HMS está desarrollado para simular los procesos hidrológicos complejos para la cuenca como; la lluvia escorrentía, el flujo base y la evolución del caudal en los ríos, también incluye varios criterios de análisis hidrológicos tradicional como infiltración, tránsito de crecidas, hidrogramas unitarios y otros. Con ayuda de este modelo se hizo la estimación de los caudales e hidrogramas de crecida para la cuenca de estudio. Estos caudales se los estima con el método de Soil Coservation Service, que tiene como base el número de curva de la cuenca (CN).

##### 4.4.1. Caudales máximos para diferentes periodos de retorno

Con los hietogramas generados anteriormente (ver Tabla 4-13), y con el software Hec-Hms se determinó los caudales máximos e hidrogramas de crecidas para los periodos de diseño 2, 5, 10, 25, 50, 75, 100, y 200 años. Este proceso se muestra con más detalles en el (Anexo D).

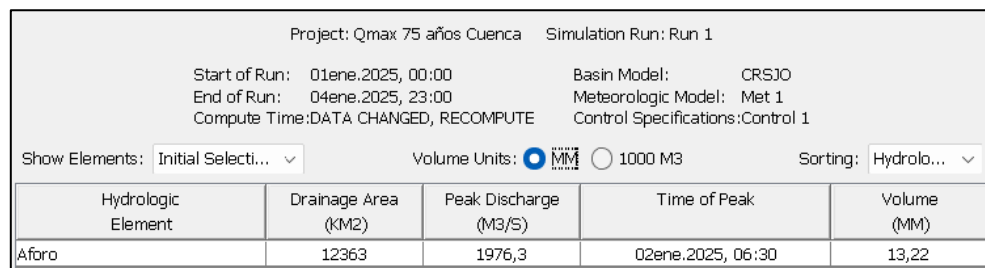
En las siguientes figuras se muestran una secuencia de la determinación del caudal máximo para un periodo de retorno de 75 años en el modelo Hec-Hms.

Figura. 4-14. Ingreso del hietograma de diseño al modelo Hec-Hms.



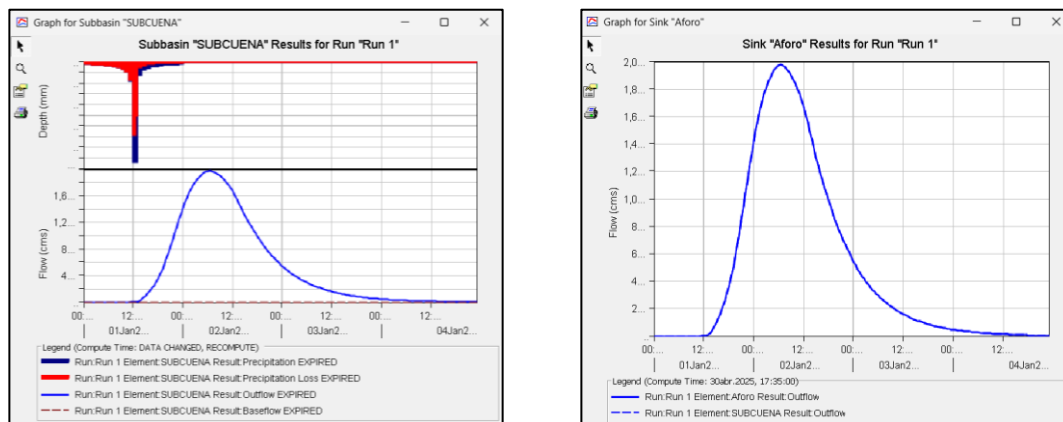
Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-15. Caudal máximo determinado por el modelo Hec-Hms



Fuente: Elaboración propia.

Figura. 4-16. Hietograma de precipitación, infiltración e Hidrograma de salida.



Fuente: Elaboración propia

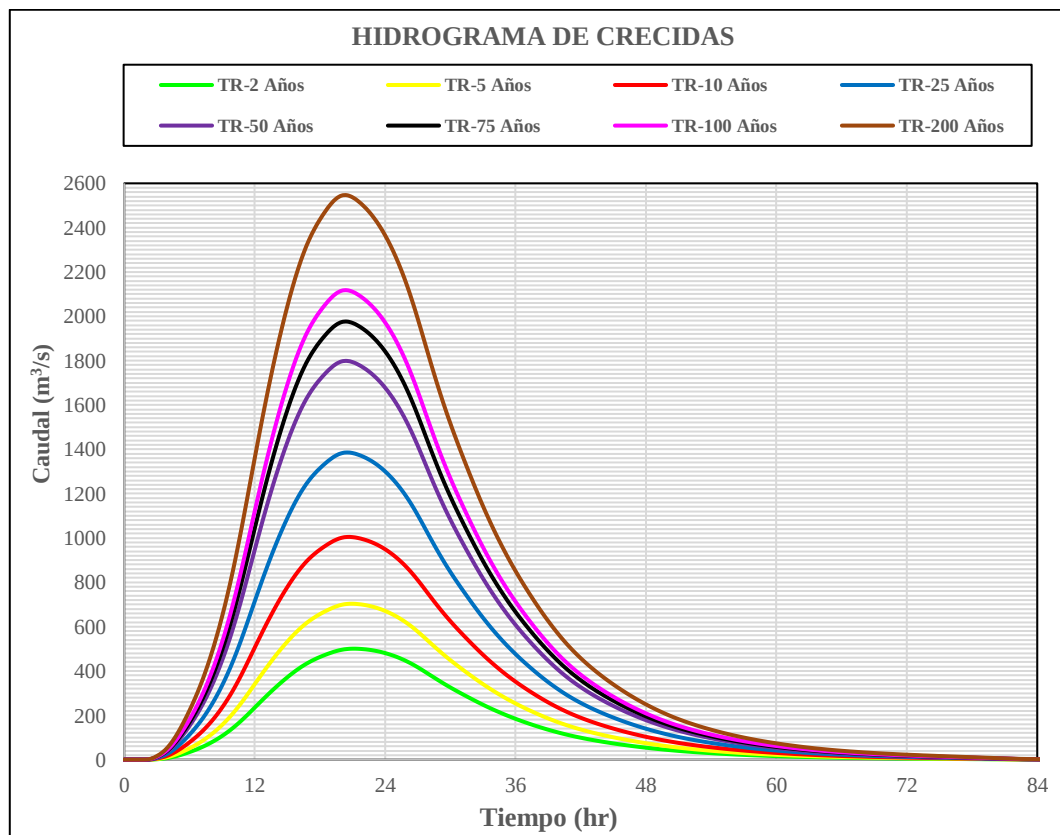
A continuación, en la (Tabla 4-14), se muestra los caudales máximos determinados en el modelo Hec-Hms para los diferentes periodos de retorno.

Tabla 4-14. Caudales máximos del río San Juan del Oro para diferentes periodos de retorno.

| Periodo de retorno<br>T (Años) | Caudal máximo<br>Q (m <sup>3</sup> /s) |
|--------------------------------|----------------------------------------|
| 2                              | 500.2                                  |
| 5                              | 703.3                                  |
| 10                             | 1004.6                                 |
| 25                             | 1385.9                                 |
| 50                             | 1798.3                                 |
| 75                             | 1976.3                                 |
| 100                            | 2117.7                                 |
| 200                            | 2546.3                                 |

Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-17. Hidrogramas de crecidas para diferentes periodos de retorno.



Fuente: Elaboración propia

#### 4.5. Caudales instantáneos registrados en la estación hidrométrica Chuquiago

A partir de los datos hidrométricos proporcionados por la Oficina Técnica Nacional de los ríos Pilcomayo y Bermejo (OTN), correspondientes a la estación de Chuquiago más su ecuación de la curva de descarga, se procedió a calcular los caudales máximos para cada altura máxima de agua de cada año (Tabla 4-15).

Tabla 4-15. Caudales máximos instantáneos en la estación Chuquiago.

| Q = 28.698 |       | H <sup>^</sup> | 2.5337                |
|------------|-------|----------------|-----------------------|
| Fecha      | Hora  | H (m)          | Q (m <sup>3</sup> /s) |
| 27/12/2005 | 8:00  | 2.0            | 166                   |
| 1/2/2006   | 12:00 | 3.2            | 547                   |
| 7/1/2007   | 12:00 | 4.1            | 1024                  |
| 25/1/2008  | 18:00 | 3.6            | 737                   |
| 17/12/2009 | 12:00 | 2.3            | 237                   |
| 25/2/2010  | 8:00  | 4.0            | 962                   |
| 11/2/2011  | 12:00 | 3.0            | 464                   |
| 14/12/2012 | 8:00  | 1.8            | 127                   |
| 21/1/2013  | 6:00  | 4.8            | 1527                  |
| 27/1/2014  | 8:00  | 3.4            | 637                   |
| 20/1/2015  | 8:00  | 2.6            | 308                   |
| 13/1/2016  | 8:00  | 2.9            | 408                   |
| 24/1/2017  | 6:00  | 2.4            | 269                   |
| 31/1/2018  | 10:00 | 5.0            | 1694                  |
| 5/1/2019   | 8:00  | 3.9            | 914                   |
| 22/1/2020  | 8:00  | 2.7            | 362                   |
| 25/1/2021  | 6:00  | 3.1            | 504                   |
| 10/1/2022  | 8:00  | 3.5            | 686                   |
| 30/12/2023 | 8:00  | 3.2            | 547                   |
| 15/3/2024  | 8:00  | 3.0            | 445                   |

Fuente: Elaboración propia (Oficina Técnica Nacional de los ríos Pilcomayo y Bermejo (OTN))

##### 4.5.1. Caudales instantáneos para diferentes periodos de retorno

Para la determinación de caudales para diferentes periodos de retorno se utilizó la función Gumbel que es la que mejor se ajusta para este tipo de datos, el proceso detallado se encuentra en el (Anexo D)

Tabla 4-16. Caudales máximos instantáneos para diferentes periodos de retorno.

| T (Años) | F(z)  | z     | Q (m <sup>3</sup> /s) |
|----------|-------|-------|-----------------------|
| 2        | 0,500 | 0,350 | 553,75                |

| T (Años) | F(z)  | z     | Q (m³/s) |
|----------|-------|-------|----------|
| 5        | 0,800 | 1,380 | 891,81   |
| 10       | 0,900 | 2,100 | 1128,13  |
| 25       | 0,960 | 3,090 | 1453,07  |
| 50       | 0,980 | 4,000 | 1751,75  |
| 75       | 0,987 | 4,500 | 1915,86  |
| 100      | 0,990 | 5,000 | 2079,97  |
| 200      | 0,995 | 5,500 | 2244,08  |

Tabla 4-16 (continuación)  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.6. Validación de caudales estimados con el modelo HEC-HMS y la estación Chuquiago.

La validación de caudales es producto de una serie de mediciones que se realizan durante un periodo de tiempo creando una relación de caudal y nivel de agua en un tramo determinado del cauce.

Los datos proporcionados por la OTN servirán como base para comparar los caudales instantáneos con los modelados con el modelo Hec-Hms.

Para realizar este proceso se escogió 3 eventos más extremos de los caudales instantáneos los cuales se muestran en la (Tabla 4-17), mediante la distribución Gumbel se determinó un periodo de retorno para cada evento. Este proceso se detalla en el (Anexo D)

Tabla 4-17. Eventos de caudales instantáneos extremos en río San Juan del Oro.

| Fecha      | Evento | Hora  | H (m) | Q (m³/s) | Periodo de Retorno (Años) |
|------------|--------|-------|-------|----------|---------------------------|
| 07/01/2007 | 1      | 12:00 | 4,1   | 1024     | 7                         |
| 21/01/2013 | 2      | 6:00  | 4,8   | 1527     | 29                        |
| 31/01/2018 | 3      | 10:00 | 5,0   | 1694     | 47                        |

Fuente: Elaboración propia

Con la fecha de los eventos sucedidos se recopiló la información de precipitaciones en las estaciones seleccionadas para determinar una precipitación de diseño.

Tabla 4-18. Precipitaciones máximas observadas el día del evento.

| ESTACIÓN         | Precipitación Max 24 hr (mm) |            |            |
|------------------|------------------------------|------------|------------|
|                  | 07/01/2007                   | 21/01/2013 | 31/01/2018 |
| TUPIZA           | 44,0                         | 48,0       | 54,8       |
| S. P. de LIPEZ   | 18,0                         | 18,5       | 16,0       |
| ATOCHA           | 30,5                         | 35,5       | 26,5       |
| S.A. de ESMORUCO | 16,3                         | 20,2       | 17,9       |
| TALINA           | 30,2                         | 51,0       | 44,8       |
| CHUQUIAGO        | 26,0                         | 38,0       | 34,0       |

Fuente: Elaboración propia

Con la aplicación de polígonos de Thiessen se calculó la precipitación máxima de la cuenca para cada evento, el proceso se detalla en el (**Anexo D**), la (Tabla 4-19) nos muestra los resultados.

Tabla 4-19. Precipitaciones máximas en la cuenca el día de los eventos.

| Evento | Periodo de Retorno (T)<br>Años | Pmax (24hr)<br>(mm) |
|--------|--------------------------------|---------------------|
| 1      | 7                              | 24,11               |
| 2      | 29                             | 28,64               |
| 3      | 47                             | 30,65               |

Fuente: Elaboración propia

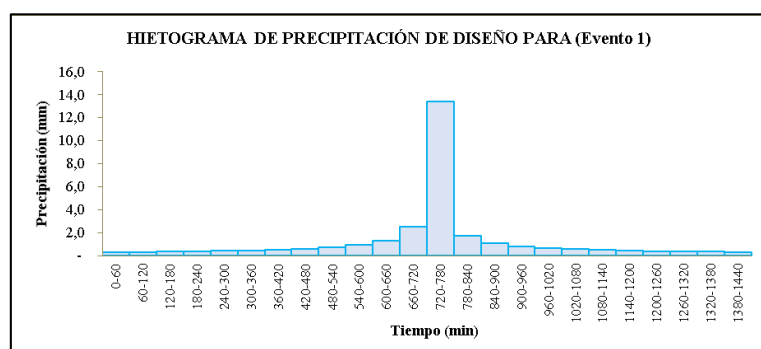
Con estas precipitaciones se generó los hietogramas de precipitación de diseño para realizar la modelación de caudales instantáneos en Hec-Hms.

Tabla 4-20. Hietogramas de precipitación de diseño para los 3 eventos.

| Hietogramas de precipitación de diseño |          |          |          |
|----------------------------------------|----------|----------|----------|
| Duración<br>(min)                      | Evento 1 | Evento 2 | Evento 3 |
| 60                                     | 0.31     | 0.37     | 0.39     |
| 120                                    | 0.34     | 0.40     | 0.42     |
| 180                                    | 0.36     | 0.43     | 0.45     |
| 240                                    | 0.39     | 0.46     | 0.49     |
| 300                                    | 0.43     | 0.51     | 0.54     |
| 360                                    | 0.48     | 0.56     | 0.59     |
| 420                                    | 0.54     | 0.63     | 0.67     |
| 480                                    | 0.62     | 0.73     | 0.77     |
| 540                                    | 0.74     | 0.87     | 0.93     |
| 600                                    | 0.93     | 1.10     | 1.17     |
| 660                                    | 1.32     | 1.55     | 1.64     |
| 720                                    | 2.54     | 3.00     | 3.17     |
| 780                                    | 13.40    | 15.83    | 16.76    |
| 840                                    | 1.70     | 2.01     | 2.13     |
| 900                                    | 1.09     | 1.28     | 1.36     |
| 960                                    | 0.82     | 0.97     | 1.03     |
| 1020                                   | 0.67     | 0.80     | 0.84     |
| 1080                                   | 0.57     | 0.68     | 0.72     |
| 1140                                   | 0.50     | 0.60     | 0.63     |
| 1200                                   | 0.45     | 0.53     | 0.56     |
| 1260                                   | 0.41     | 0.48     | 0.51     |
| 1320                                   | 0.38     | 0.44     | 0.47     |
| 1380                                   | 0.35     | 0.41     | 0.43     |
| 1440                                   | 0.32     | 0.38     | 0.41     |

Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-18. Hietograma de precipitación de diseño para el evento 1.



Fuente: Elaboración propia

Con los datos necesarios se hizo la modelación de caudales instantáneos en Hec-Hms para los tres eventos extremos instantáneos, estos resultados se muestran en la (Tabla 4-21).

Tabla 4-21. Caudales máximos modelados con precipitaciones del día que sucedieron los 3 eventos.

| Evento | Q (m <sup>3</sup> /s) |
|--------|-----------------------|
| 1      | 1004.5                |
| 2      | 1497.7                |
| 3      | 1618.8                |

Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.1. Comparación de caudales máximos instantáneos vs caudales estimados con modelo Hec-Hms

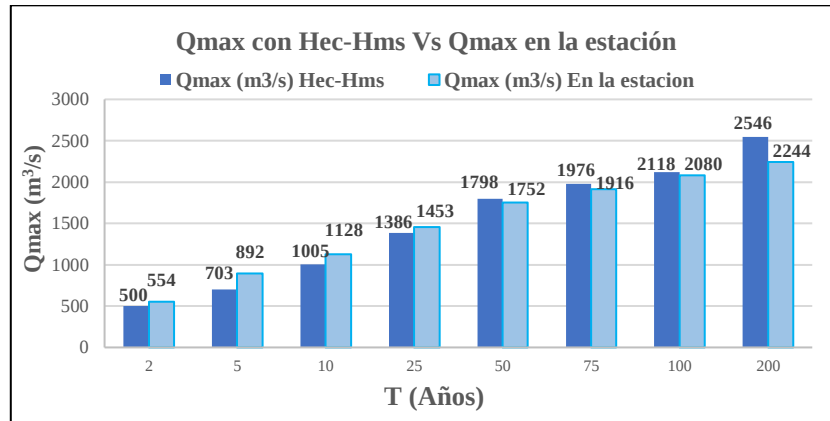
A continuación, en la (Tabla 4-22) y (Figura 4-19) se comparan los caudales máximos estimados con el modelo Hec-Hms con caudales registrados en la estación hidrométrica de Chuquiago proyectado para los periodos de retorno ya establecidos.

Tabla 4-22. Caudales máximos con modelo HEC-HMS vs caudales en la estación Chuquiago.

| T (Años) | Qmax (m <sup>3</sup> /s)<br>Estimado con<br>Hec-Hms | Qmax (m <sup>3</sup> /s)<br>En la estación<br>Chuquiago | Diferencia absoluta<br>(m <sup>3</sup> /s) | Error relativo<br>(%) |
|----------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------|
| 2        | 500.2                                               | 553.7                                                   | 54                                         | 9.67                  |
| 5        | 703.3                                               | 891.8                                                   | 189                                        | 21.14                 |
| 10       | 1004.6                                              | 1128.1                                                  | 124                                        | 10.95                 |
| 25       | 1385.9                                              | 1453.1                                                  | 67                                         | 4.62                  |
| 50       | 1798.3                                              | 1751.7                                                  | 47                                         | 2.59                  |
| 75       | 1976.3                                              | 1915.9                                                  | 60                                         | 3.06                  |
| 100      | 2117.7                                              | 2079.9                                                  | 38                                         | 1.78                  |
| 200      | 2546.3                                              | 2244.1                                                  | 302                                        | 11.87                 |

Fuente: Elaboración propia

Figura. 4-19. Gráfica de comparación de caudales estimados vs medidos.



Fuente: Elaboración propia

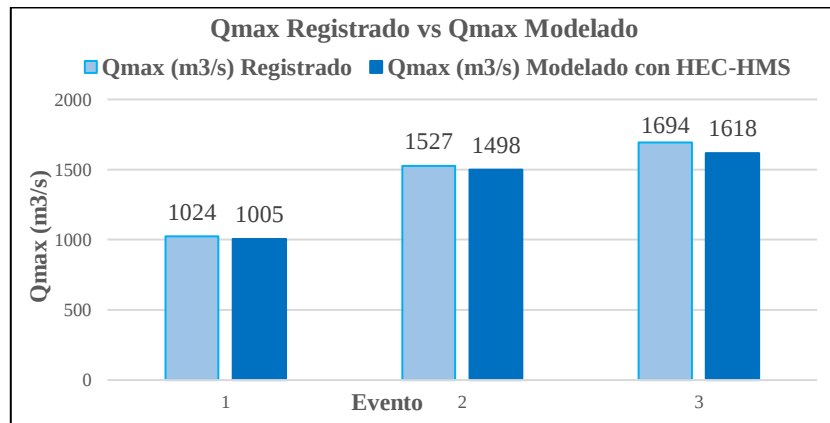
Como complemento de la evaluación de desempeño del modelo HEC-HMS, se realizó una comparación entre caudales máximos registrados de 3 eventos extremos en la estación Chuquiago y los caudales máximos simulados para estos eventos significativos. La siguiente tabla presenta un resumen de los valores considerados.

Tabla 4-23. Comparación de caudales máximos registrados en los 3 eventos vs los modelados con HEC-HMS para cada evento.

| Evento | Fecha      | Qmax (m3/s)<br>Registrado | Qmax (m3/s)<br>Modelado con HEC-<br>HMS | Diferencia<br>absoluta<br>(m3/s) | Error<br>relativo<br>(%) |
|--------|------------|---------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 1      | 07/01/2007 | 1024                      | 1005.0                                  | 19                               | 1.89                     |
| 2      | 21/01/2013 | 1527                      | 1498.0                                  | 29                               | 1.92                     |
| 3      | 31/01/2018 | 1694                      | 1618.0                                  | 76                               | 4.47                     |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-24. Caudales máximos registrados en los 3 eventos vs los modelados con HEC-HMS para cada evento.



Fuente: Elaboración propia

#### 4.6.2. Análisis comparativo de caudales observados vs caudales simulados

Analizando los resultados obtenidos de la (Tabla 4-22), se observa que, los caudales estimados con el modelo HEC-HMS se aproximan bastante a los caudales registrados en la estación de Chuquiago esto sobre todo en los periodos de retorno más altos de 50 a 200 años ya que la diferencia para estos valores es relativamente baja por debajo del 10% lo que significa que el modelo está bien calibrado para realizar este tipo de procesos y que representa el comportamiento de la cuenca frente a eventos extremos de manera adecuada.

Por otra parte, en los periodos de retorno más bajos de 2 a 10 años se observan deferencias más notables ya que los caudales estimados por el modelo están por debajo de los que se registraron en la estación Chuquiago.

Estas deferencias pueden tener varias razones:

- 1) Puede ser por la resolución de datos ya que se utilizó datos diarios, es probable que no se hayan captado las lluvias más intensas de corta duración lo cual afecta más a los eventos con periodos de retorno bajos.
- 2) Otro punto que se debe considerar es la curva de descarga usada en la estación para convertir niveles en caudales, esta curva puede tener algunos errores ya sea por cambios en el cauce y estar desactualizada.

En otra comparación si observamos la (Tabla 4-23), observamos que el modelo HEC-HMS logro un buen ajuste para los tres eventos extremos registrados reproduciendo con alta precisión los caudales máximos registros ya que en los 3 casos el error relativo se mantuvo por debajo del 5%, lo cual indica que es aceptable para este tipo de estudios hidrológicos, considerando la incertidumbre que se asocia a los datos de entrada como la precipitación como también la estimación de caudales mediante la curva de descarga.

Teniendo en cuenta todos estas similitudes y diferencias de resultados, se puede concluir que el modelo HEC-HMS muestra un buen ajuste para los caudales máximos para periodos de retorno altos, lo cual es muy útil para el diseño de obras de protección frente a estos eventos extremos. Las diferencias que presentan pueden explicarse por factores relacionados con los datos observados como con las limitaciones propias del modelo, pero no afectan de gran manera su utilidad.

# **CAPÍTULO V**

## **ESTUDIO HIDRÁULICO**

## 5. Estudio hidráulico

### 5.1. Información topográfica del río en la zona de estudio

Con el objetivo de contar con datos precisos de la topografía de la zona de estudio para la modelación hidráulica del río San Juan del Oro, se realizó el levantamiento topográfico de un tramo de aproximadamente 2 kilómetros de longitud, este trabajo se lo realizó con estación total.

Durante el trabajo de campo se realizaron 60 secciones transversales perpendiculares al río distribuidas de manera regular a lo largo del cauce, estas secciones lograron capturar tanto el lecho como los márgenes de terrenos de cultivo que permite representar de forma confiable la morfología de la zona de evaluación.

Cabe aclarar que no se realizó un levantamiento topográfico detallado de las estructuras existentes como el puente, el sistema de riego, ni detalles que están fuera del lecho del cauce, por lo que estos elementos no están incluidos en el modelo digital de terreno. Sin embargo, el modelo digital de terreno fue referenciado de forma general para ser utilizado con imágenes satelitales y sus resultados puedan ser interpretados de forma correcta.

*Figura. 5-1. Área de terreno con topografía.*



*Fuente: Elaboración propia*

## **5.2. Construcción del modelo digital de elevación**

Los datos de campo obtenidos con la estación total, fueron procesados en y organizados en el software Autodesk Civil 3D, con el propósito de construir el Modelo de Elevación Digital (MDE) que represente al terreno de estudio en el río San Juan del Oro, este archivo fue generado con un intervalo de curva de nivel de 0.5 m por tanto la resolución del MDE es de 0.5mx0.5m.

Una vez generado el MDE en Civil 3D, este archivo fue cargado al ArcGIS, donde se lo convirtió en un archivo en formato (.txt) ya que este tipo de formato es compatible con Iber 2.5.2.

## **5.3. Modelamiento hidráulico utilizando el Software Iber 2.5.2**

Como se mencionó en el capítulo 2 en la parte de criterios y selección del modelo, se seleccionó el modelo Iber para realizar la modelación hidráulica y por lo tanto hay que tener en cuenta el tipo de archivos que son compatible con este modelo para que el proceso sea más afectivo.

### **5.3.1. Formato de archivos compatible con Iber 2.5.2**

- El MDE debe estar en un formato tipo (.txt) ya que es compatible con el software Iber porque este formato almacena datos simples, coordenadas (x, y, z) que son usados con este modelo.
- El Uso de Suelos, de igual manera en formato (.txt) además, debe tener un archivo de enlace en formato (.csv) que contenga la misma información con las mismas características de letra y nombre que la del uso de suelo en (.txt)
- La imagen satelital debe estar georreferenciada en la proyección con la que se está trabajando en este caso WGS-84 Z20S, en formato (.jpg)
- Todos los archivos que serán utilizados para la modelación hidráulica en Iber 2.5.2 también tienen que tener su archivo de enlace de tipo (.prj) que es el archivo de proyección espacial para asegurar que los datos se ubiquen correctamente en el espacio geográfico requerido.

### **5.3.2. Datos de entrada al modelo Iber 2.5.2**

Para análisis hidráulico del río San Juan del Oro en Iber, se generaron los datos requeridos por el programa para realizar la simulación, estos se describen a continuación:

- Caudales: el modelo Iber tiene la capacidad de modelar tanto caudales totales como hidrogramas de crecidas, en este proyecto se realizó con los hidrogramas de crecida generados por el modelo hidrológico HEC-HMS para los diferentes periodos de diseño que muestra la (Tabla 4-17) y (Figura 4-14).
- Uso de suelo: en Iber se puede asignar el uso de suelo de manera automática previa generación del archivo compatible, para este caso el área con datos topográficos se lo dividió en 3 diferentes usos de suelo y se lo asigno una rugosidad de acuerdo a la descripción de la corriente mencionada en la (Tabla 2-1). La siguiente tabla muestra la descripción de uso de suelo y su rugosidad correspondiente:

*Tabla 5-1. Uso de suelo en la zona de estudio y asignación de rugosidades.*

| ID | Uso de Suelo    | Rugosidad de Manning (n) |
|----|-----------------|--------------------------|
| 1  | Lecho del río   | 0.028                    |
| 2  | Laderas rocosas | 0.060                    |
| 3  | Cultivos        | 0.050                    |

*Fuente: Elaboración propia*

*Figura. 5-2. Asignación de coeficientes de rugosidad a los suelos en la zona de estudio.*



*Fuente: Elaboración propia*

### 5.3.3. Simulación hidráulica en el río San Juan del Oro con Iber 2.5.2

Con el objetivo identificar zonas de posibles riesgo inundación y desbordes del río en la zona estudiada analizando las variables como nivel de agua, velocidad, y caudal, se realizó la modelación hidráulica con el software Iber 2.5.2. con la ayuda de este programa se pudo identificar las zonas de alto riesgo de desborde del río e inundación de terrenos de cultivo.

Como primer paso para realizar la modelación se creó el proyecto en el software, se importó la imagen satelital de la zona para tener una mejor visualización y se creó la malla como una Red Irregular de Triángulos Rectángulos (RTIN) con el MDE teniendo en cuenta la topografía de la zona dando una tolerancia de 0.20 m entre la topografía y la malla RTIN, los lados máximos del triángulo de 10 m y los mínimos de 0.5 m ya que el MDE (0.5 x 0.5) m de resolución. La (Figura 5-3) muestra la malla RTIN ya creada en el programa.

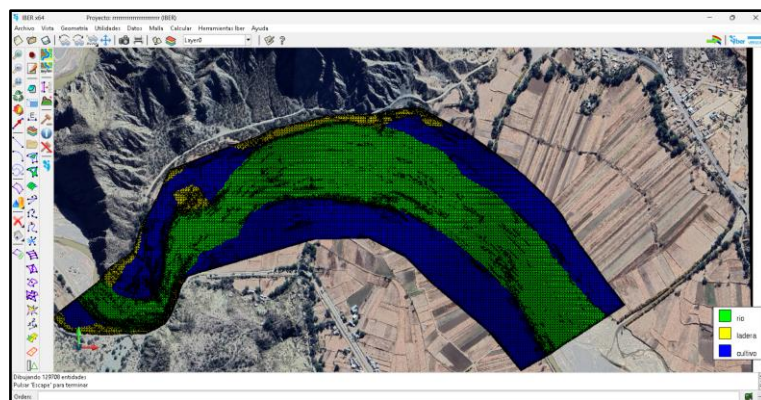
*Figura. 5-3. Visualización de la ventana de Iber con la malla de la superficie.*



*Fuente: Elaboración propia*

Una vez creada la malla se introdujo las rugosidades a los diferentes tipos de suelo con los valores ya mencionados en la (Tabla 5-1).

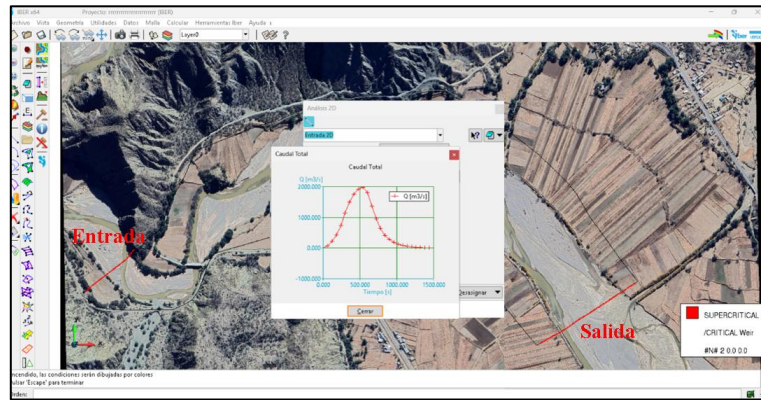
*Figura. 5-4. Visualización de rugosidades en los tipos de suelo en la zona estudiada.*



*Fuente: Elaboración propia*

Posteriormente de agregar las condiciones de contorno tanto de entrada como de salida como muestra la (Figura 5-5), también se añadió el hidrograma correspondiente para su respectiva modelación.

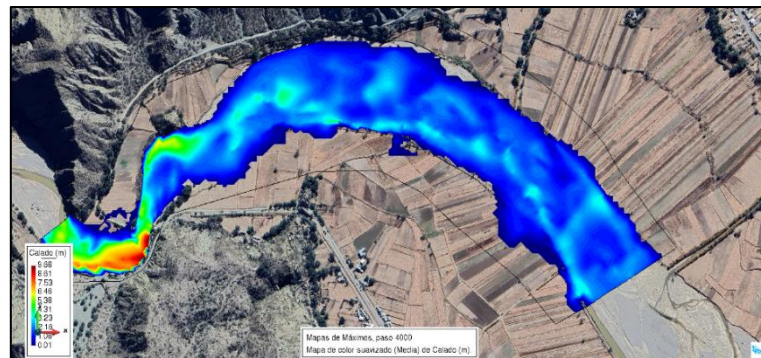
Figura. 5-5. Condiciones de contorno hidrodinámica para el tramo del río San Juan del Oro.



Fuente: Elaboración propia

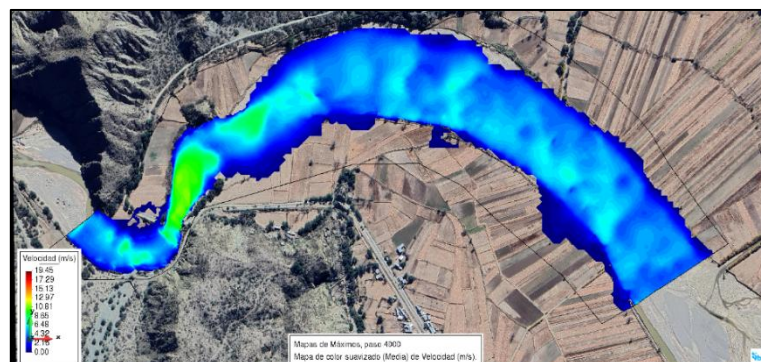
Después de introducir todos los datos del problema se empezó con el cálculo de la modelación hidráulica. Las siguientes figuras muestran el resultado de la modelación para un periodo de retorno de 75 años con las variables hidráulicas máximas para su posterior análisis e interpretación.

Figura. 5-6. Tirantes máximos para un  $T = 75$  años.



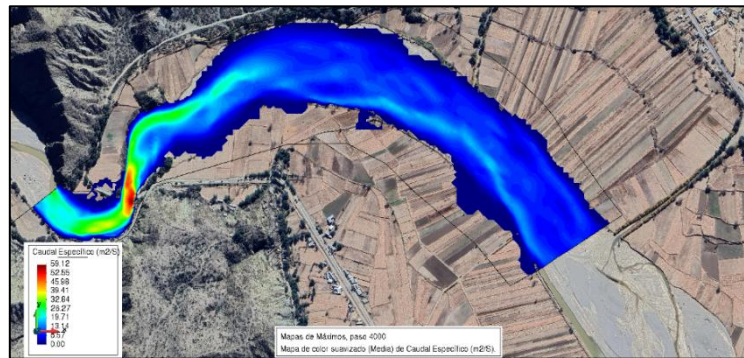
Fuente: Elaboración propia

Figura. 5-7. Velocidades máximas para un  $T = 75$  años.



Fuente: Elaboración propia

Figura. 5-8. Caudal específico ( $m^2/s.m$ ) para un  $T = 75$  años.



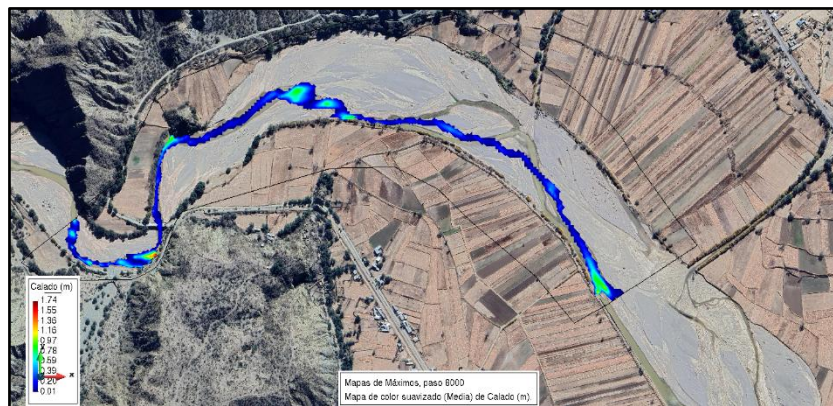
Fuente: Elaboración propia

#### 5.3.4. Validación del modelo Iber

Para validar el modelo hidráulico desarrollado en Iber 2.5.2, se utilizó como dato de entrada el caudal registrado el 10 de octubre de 2024 proporcionado por el SENAMHI Potosí ya que esa fecha es la más cercana al momento de realizar el levantamiento topográfico en campo lo que permite asegurar coherencia entre las condiciones reales del cauce y las representadas por el modelo.

Por otra parte, se utilizó la imagen satelital de la plataforma SAS Planet, que es de fecha 12 de diciembre de 2023 que es la más próxima al levantamiento, aunque se observaron algunas pequeñas variaciones en el trazado del cauce natural entre la imagen y la topografía debido posiblemente a causas y procesos naturales sedimentación o erosión, estas diferencias no son significativas y no afectan la validez del modelo. En la (Figura 5-9) se puede visualizar la simulación del caudal en el río San Juan del Oro.

Figura. 5-9. Validación del modelo Iber.



Fuente: Elaboración propia

Al analizar los resultados de la simulación, se puede observar que el flujo sigue de manera coherente el curso del cauce natural del río incluso considerando las pequeñas diferencias entre la imagen satelital y la topografía, aunque se identifica una ligera variación en el trasado del canal, el comportamiento general de agua se mantiene del cauce lo cual nos indica que el modelo representa la dinámica del fluido de una manera eficiente.

Esta correlación visual de la ruta del flujo simulado y el trazado del cauce observado refuerza la validez del modelo hidráulico, esto demuestra que el modelo Iber puede ser utilizado para el estudio de análisis de inundaciones, diseño de obras de protección y evolución del comportamiento hidráulico del tramo analizado en el río San Juan del Oro de manera confiable.

## 5.4. Resultados e interpretación

### 5.4.1. Resultados

La modelación hidráulica permitió obtener datos clave para evaluar el comportamiento del tramo de estudio del río San Juan del Oro ante distintos escenarios de caudales extremos asociados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 75, 100 y 200 años. Las variables evaluadas en este caso son el tirante máximo (h), la velocidad máxima del flujo (v) y caudal específico (q) dentro de las áreas inundadas y también la extensión total del área anegada expresada en hectáreas y metros cuadrados.

Tabla 5-2. Resumen de resultados de la modelación hidráulica río San Juan del Oro.

| Variables<br>máximas sobre<br>áreas inundadas | Áreas inundadas para diferentes periodos de retorno |        |         |         |         |         |          |          | Unidad              |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|---------------------|
|                                               | 2 años                                              | 5 años | 10 años | 25 años | 50 años | 75 años | 100 años | 200 años |                     |
|                                               | 2.36                                                | 2.85   | 3.03    | 3.18    | 3.58    | 5.37    | 5.58     | 8.71     | ha                  |
|                                               | 23,611                                              | 28,522 | 30,298  | 31,797  | 35,791  | 53,727  | 55,803   | 87,110   | m <sup>2</sup>      |
| <b>Tirante (h)</b>                            | 0.1                                                 | 0.18   | 0.22    | 0.4     | 0.6     | 0.95    | 1.2      | 1.8      | m                   |
| <b>Velocidad (V)</b>                          | 0.2                                                 | 0.42   | 0.69    | 0.76    | 0.9     | 1.1     | 1.5      | 2.1      | m/s                 |
| <b>Caudal específico (q)</b>                  | 0.1                                                 | 0.31   | 0.51    | 0.75    | 1.2     | 1.9     | 2.3      | 4.1      | m <sup>3</sup> /s*m |

Fuente: Elaboración propia

### 5.4.2. Interpretación de resultados

- **Periodo de 2 a 10 años:**

Durante estos eventos que son más frecuentes, las áreas inundadas son relativamente de poca magnitud que oscilan entre (2.36 a 3.03 ha) y los tirantes de

agua se mantienen bajos oscilando los 0.10 a 0.18 m, con velocidades menores a 0.5 m/s. esto nos indica que, si bien el río tiene la capacidad de transportar esa cantidad de caudal sin representar mucho riesgo y el agua logra desbordar ligeramente en sectores planos cercanos al cauce este no representa una amenaza severa para la infraestructura o terrenos agrícolas, sin embargo se deben considerar estos eventos como advertencia o alerta ya que incluso las crecidas moderadas reiteradas pueden provocar degradación progresiva de los márgenes y afectar los suelos productivos.

- **Periodo de 25 a 50 años:**

En este rango de recurrencia se puede evidenciar signos claros de incremento del riesgo de desbordes significativos que pueden afectar grandemente la infraestructura y terrenos productivos. Las áreas afectadas superan las 3.5 ha, con tirantes que sobrepasan el 1/2 m y velocidades bordeando los 1.00 m/s. estos niveles de agua comienza a tener capacidad de erosionar taludes ya que también la velocidad se consiga una velocidad erosiva y pueden afectar de gran manera las zonas productivas y las obras de riego existentes en la zona. La amenaza es grande y demanda la implementación de medidas de mitigación y control ante estos eventos.

- **Periodo de 75 años evento máximo de diseño:**

Para este proyecto este escenario es el definido como el evento crítico para el diseño de obras de protección, se registran áreas inundadas que pueden alcanzar las 6 ha, con tirantes de hasta 1.00 m, velocidades de flujo de 1.10 m/s y caudales específicos de 1.9 m<sup>3</sup>/s\*m, valores que generan una fuerte presión hidráulica sobre las zonas inundadas.

Estas condiciones de las variables hidráulicas superan ampliamente el umbral de erosión para la mayoría de suelos agrícolas afectando así la remoción de la capa fértil.

El volumen de agua y la velocidad indican que las zonas de cultivo cercanas al cauce están expuestas a pérdidas económicas significativas por inundación, destrucción de sembradíos, deterioro del suelo, obstrucción de canales de riego y pérdidas de terrenos cultivables por erosión.

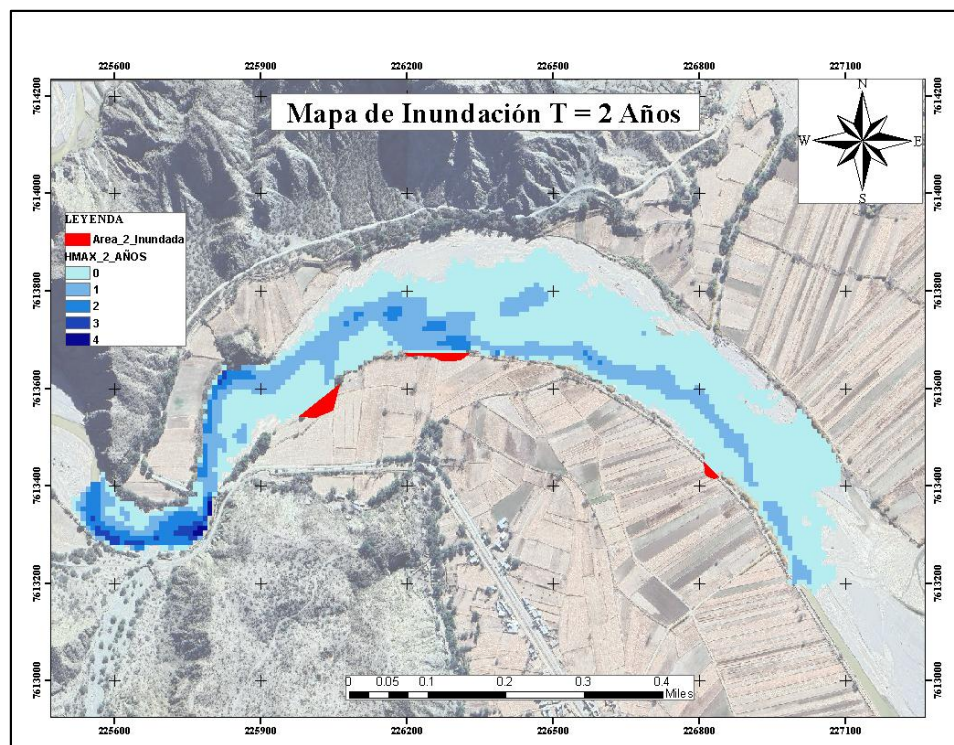
- **Periodo de 100 a 200 años:**

Estos escenarios representan eventos estadísticamente menos frecuentes, pero su análisis e interpretación son muy útiles para planes de contingencia. En el caso del periodo de 200 años las áreas afectadas superan las 8.7 ha, con tirantes de hasta 1.80 m y velocidades 2.1 m/s, que generan una situación de emergencia que supera la capacidad del cauce y exige planes de obras de protección de mayor requerimiento y mayor estructura por tal motivo no se consideró como el evento de diseño ya que el alto costo de construcción de gran magnitud sería una limitación.

### 5.5. Generación de mapas de inundación

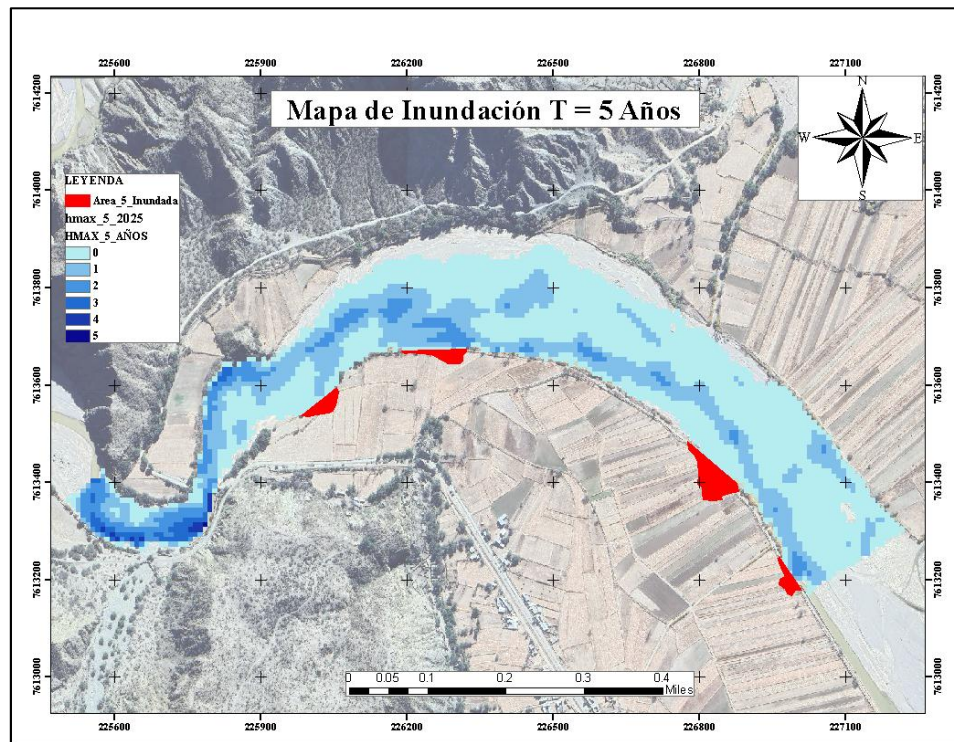
Una vez realizada la simulación hidráulica en el en el tramo del río San Juan del Oro se elaboración los mapas de inundación para los diferentes periodos de retorno evaluados los cuales se presentan a continuación:

*Figura. 5-10. Mapa de áreas de inundación para un  $T = 2$  años.*



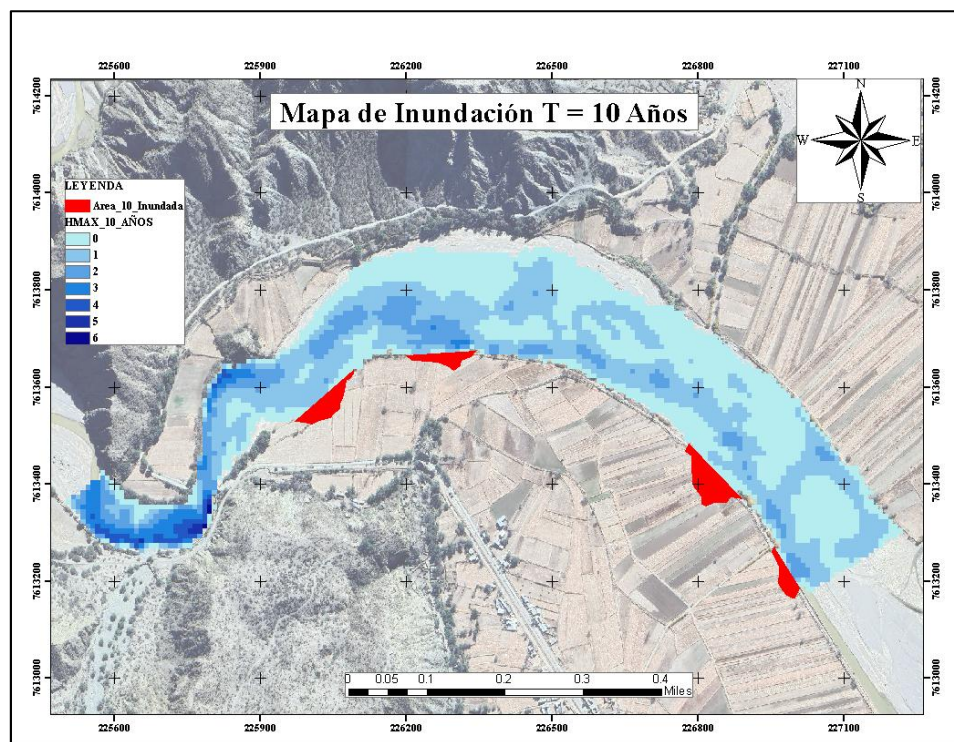
*Fuente: Elaboración propia*

Figura. 5-11. Mapa de áreas de inundación para un  $T = 5$  años.



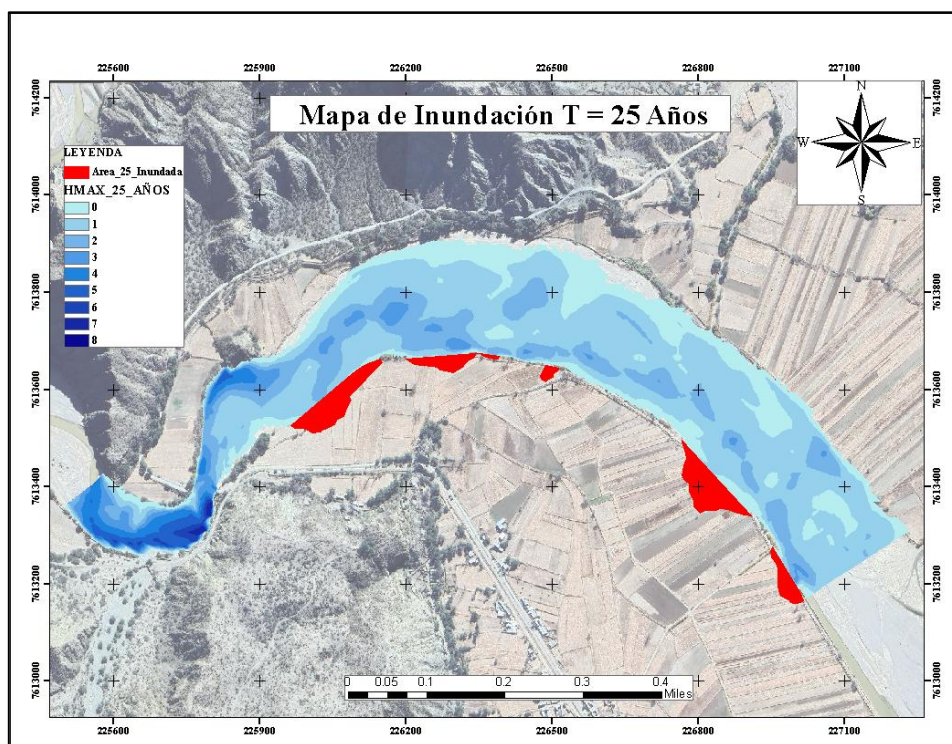
Fuente: Elaboración propia

Figura. 5-12. Mapa de áreas de inundación para un  $T = 10$  años.



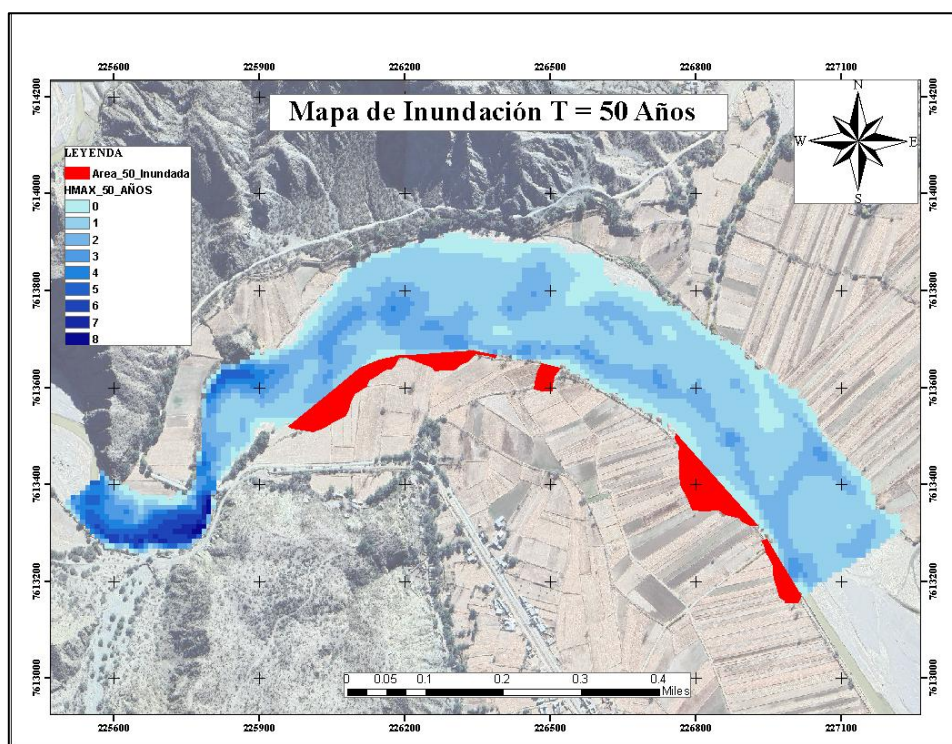
Fuente: Elaboración propia

Figura. 5-13. Mapa de áreas de inundación para un  $T = 25$  años.



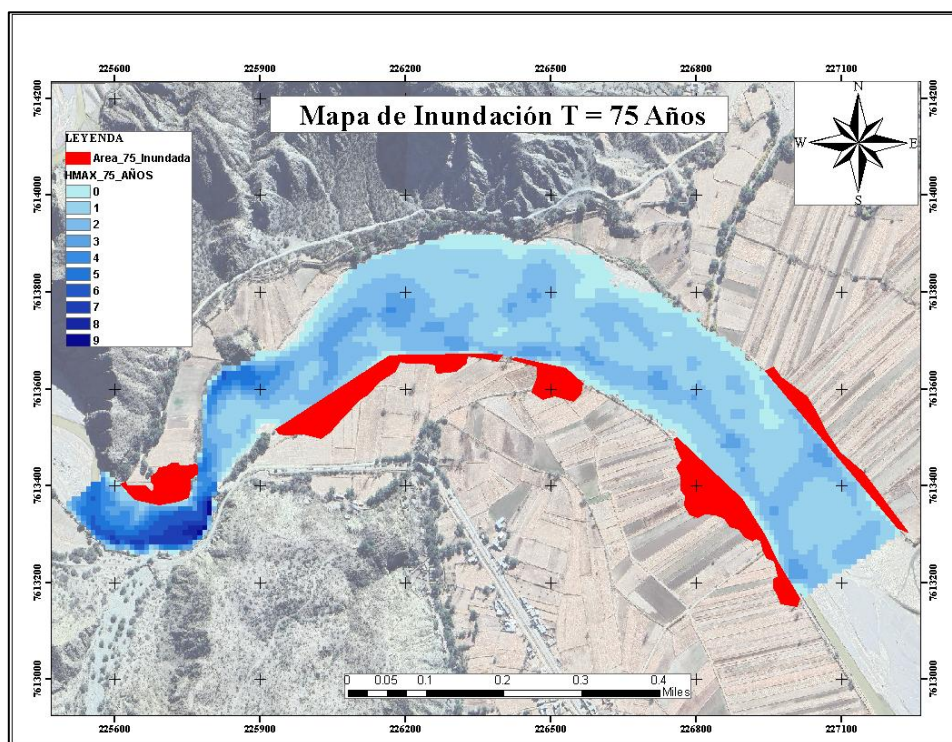
Fuente: Elaboración propia

Figura. 5-14. Mapa de áreas de inundación para un  $T = 50$  años.



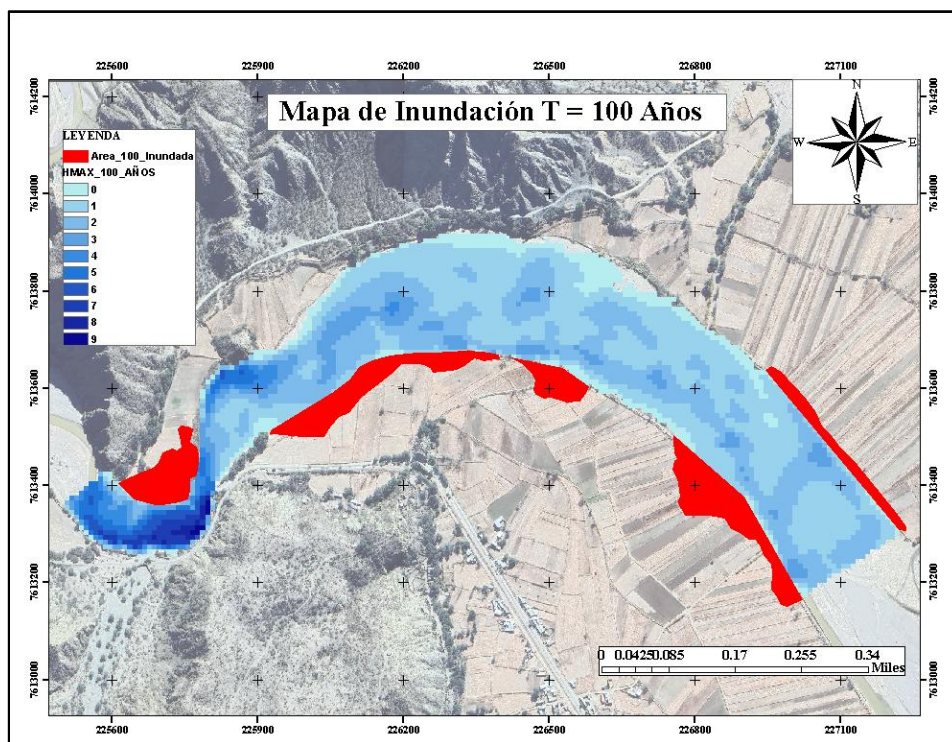
Fuente: Elaboración propia

Figura. 5-15. Mapa de áreas de inundación para un  $T = 75$  años.



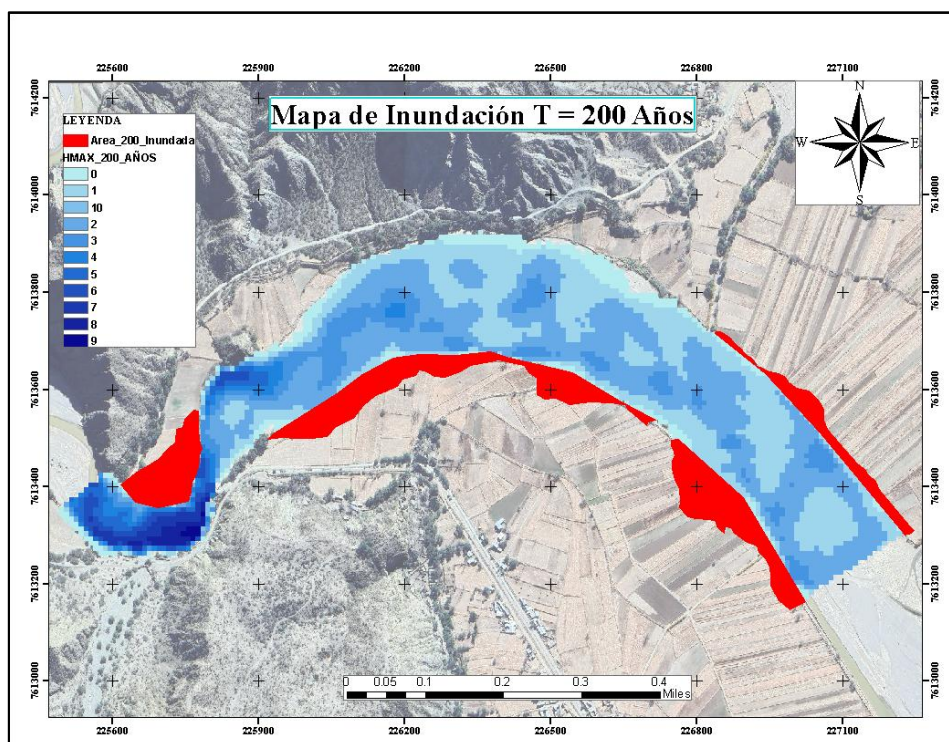
Fuente: Elaboración propia

Figura. 5-16. Mapa de áreas de inundación para un  $T = 100$  años.



Fuente: Elaboración propia

Figura. 5-17. Mapa de áreas de inundación para un  $T = 200$  años.



Fuente: Elaboración propia

## 5.6. Justificación de obras de protección para cultivos

Dado el análisis interpretación de resultados para el periodo 75 años que es el evento máximo de diseño se recomienda la implementación de obras de protección de defensa fluvial que puedan reducir, mitigar o controlar de alguna manera los desbordes del río San Juan del Oro en la zona evaluada. Entre las posibles obras a diseñar tenemos:

- Muros de contención o gaviones en los puntos críticos para estabilizar los márgenes y evitar la erosión lateral que anteriormente caso grandes pérdidas económicas y pérdidas de terrenos cultivables.
- Espigones o deflectores hidráulica para redireccionar el flujo y así proteger terrenos de cultivo.

Este tipo de obras permitirán proteger y preservar los suelos productivos y evitar así la degradación progresiva de los márgenes del río y garantizar continuidad en las actividades agrícolas. Lo cual representa una parte fundamental en la economía de las comunidades locales de la zona estudiada.

**CAPÍTULO VI**  
**PROPUESTA – DISEÑO**  
**DE MUROS DE**  
**PROTECCIÓN**

## 6. Propuesta diseño de obras de protección fluvial como alternativa de control de futuros eventos hidrológicos extremos

Para poder controlar y disminuir el desborde río y así también inundación de las zonas agrícolas identificadas en este proyecto se diseñará muros de contención (gaviones) en los puntos con potencial riesgo de inundación, este tipo de muro se eligió considerando lo siguiente:

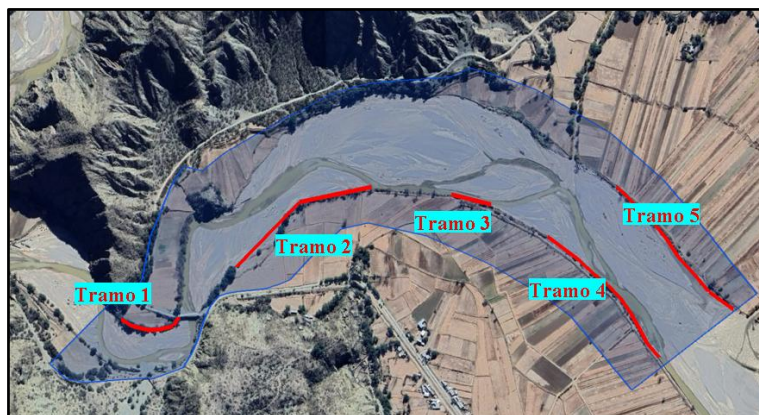
- Los gaviones presentan una buena resistencia ya que son totalmente permeables y alivian esfuerzos que se acumulan en las caras de los muros que no tienen esta ventaja.
- Su gran flexibilidad hace que soporten movimientos y asentamientos diferenciales sin perder su eficiencia.
- Son económicos y no necesita mano de obra calificada para su construcción.
- El material como la piedra, está disponible en lugares cercanos a la zona de estudio.

### 6.1. Diseño de muros de gaviones longitudinales

Una vez identificado las zonas y puntos críticos que están expuestos al desborde del río, se procedió a determinar la altura del muro de gavien que deberá ser útil para evitar estos eventos.

El modelo Iber cuenta con una herramienta de que ayuda a determina la altura del muro, con la función dique se puede editar la malla dando una altura de acuerdo al análisis de resultados, para este caso se establecieron 5 tramos de gaviones:

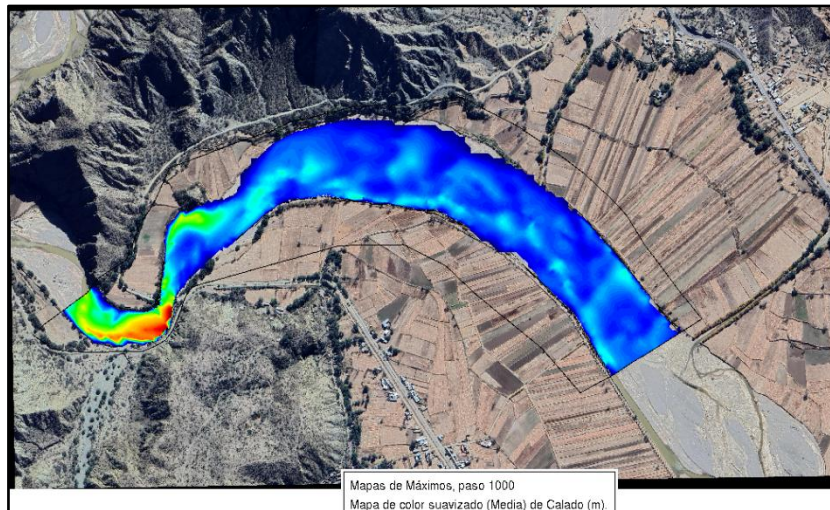
*Figura. 6-1. Ubicación de los gaviones de protección en el río San Juan del Oro.*



*Fuente: Elaboración propia*

Después de haber situado los muros de contención (gaviones) en el lecho del río, en el mallado Iber se le asignó alturas a los muros y para verificar que cumplen con la función de protección se lo hizo la simulación con el hidrograma para en evento de diseño que en este caso es de 75 años. El resultado de la simulación se muestra en la (Figura 6-2).

Figura. 6-2. resultado de la simulación para un  $T = 75$  años con obras de protección.



Fuente: Elaboración propia

Las alturas de los muros y longitudes de cada tramo que dieron un buen resultado para la protección de las zonas agrícolas se describen en las siguientes tablas:

Tabla 6-1. Ubicación y altura de gaviones de todos los tramos.

| Tramo 1   |             |         |              |                     |              |
|-----------|-------------|---------|--------------|---------------------|--------------|
| Tramo 1-A | Coordenadas |         | Cotas (msnm) | Altura del muro (m) | Longitud (m) |
|           | X           | Y       | terreno      |                     |              |
| Inicio    | 225596      | 7613410 | 2832.9       | 3                   | 90           |
| Fin       | 257440      | 7613360 | 2832.35      | 3                   |              |
| Tramo 1-B |             |         |              |                     |              |
| Inicio    | 257440      | 7613360 | 2832.35      | 4                   | 40           |
| Fin       | 225759      | 7613390 | 2831.8       | 4                   |              |
| Tramo 2   |             |         |              |                     |              |
| Tramo 2-A |             |         |              |                     |              |
| Inicio    | 225913      | 7613500 | 2826.53      | 3                   | 170          |
| Fin       | 226073      | 7613640 | 2823.88      | 3                   |              |
| Tramo 2-B |             |         |              |                     |              |
| Inicio    | 226073      | 7613640 | 2823.88      | 3                   | 110          |
| Fin       | 226288      | 7613690 | 2821.33      | 3                   |              |
| Tramo 3   |             |         |              |                     |              |
| Inicio    | 226513      | 7613650 | 2820.70      | 3                   | 76           |

|           |        |         |         |   |     |
|-----------|--------|---------|---------|---|-----|
| Fin       | 226633 | 7613600 | 2818.90 | 3 |     |
| Tramo 4   |        |         |         |   |     |
| Tramo 4-A |        |         |         |   |     |
| Inicio    | 226745 | 7613520 | 2818.20 | 3 | 120 |
| Fin       | 226873 | 7613400 | 2816.70 | 3 |     |
| Tramo 4-B |        |         |         |   |     |
| Inicio    | 226873 | 7613400 | 2816.70 | 3 | 90  |
| Fin       | 226929 | 7613340 | 2814.95 | 3 |     |
| Tramo 4-C |        |         |         |   |     |
| Inicio    | 226929 | 7613340 | 2814.95 | 3 | 110 |
| Fin       | 227013 | 7613190 | 2814.16 | 3 |     |
| Tramo 5   |        |         |         |   |     |
| Tramo 5-A |        |         |         |   |     |
| Inicio    | 226913 | 7613660 | 2819.50 | 2 | 150 |
| Fin       | 227061 | 7613480 | 2817.16 | 2 |     |
| Tramo 5-B |        |         |         |   |     |
| Inicio    | 227061 | 7613480 | 2817.16 | 2 | 140 |
| Fin       | 227213 | 7613300 | 2815.10 | 2 |     |

*Fuente: Elaboración propia*

#### 6.1.1. Estimación de la profundidad de socavación

Para conocer la profundidad de fundación de los gaviones primeramente se hizo la determinación de la profundidad de socavación.

En el (**Anexo E**), se encuentra en procedimiento para estimar la socavación general. La socavación se calculó según el método propuesto por Lischtvan-Levediev, como lo expresa Maza J. A. (1964).

$$y_s = \left( \frac{\alpha * y_0^{5/3}}{0.68 * D_m^{0.28} * \beta * \Psi} \right)^{\frac{1}{1+Z}} \quad (Ec. 18)$$

$$\alpha = \frac{Q_d}{H_m^{5/3} * B_e * \mu} \quad (Ec. 19)$$

$$V_e = 0.68 * \beta * D_m^{0.28} * h_s^Z \quad (Ec. 20)$$

Donde:

$y_s$ : Desnivel entre la superficie del agua, al pasar la avenida y el fondo erosionado.

$\alpha$ : Coeficiente que está en función del caudal, tirante medio de la sesión, ancho y  $\mu$ .

$V_e$ : Velocidad erosiva (m/s)

$y_s, y_0$ : Se miden en cada sección vertical donde se desea hacer el cálculo.

$H_m$ : Tirante medio medido entre la superficie del agua al pasar la avenida y el fondo original. Se obtiene de dividir el área hidráulica entre el ancho de la superficie libre  $B_e$ .

$B_e$ : Ancho libre de la superficie al presentarse la avenida

$Q_d$ : Gasto del diseño.

$D_m$ : Diámetro medio (mm); si el material del fondo es friccionante.

$Z$ : Exponentes en función de  $D_m$ .

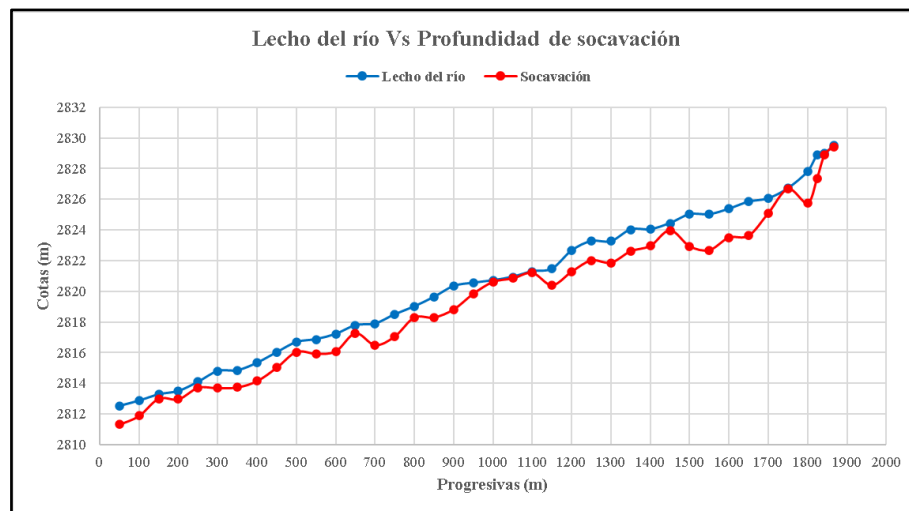
$\Psi$ : Coeficiente que depende de la concentración del material transportado en suspensión (Tabla 4.4). (**Anexo E**)

$\beta$ : Coeficiente, depende del periodo de retorno del gasto de diseño (Tabla 4.3). (**Anexo E**)

$\mu$ : Coeficiente que depende de la contracción del cauce (Tabla 4.1). (**Anexo E**)

Para conocer los tirantes de cada sección de empleo el software HEC-RAS, las secciones transversales se las hizo cada 50 m, mediante este programa se logró obtener los datos necesarios para la estimación de la socavación. El cálculo del diámetro medio de la partícula de la misma forma se encuentra en el (**Anexo E**).

*Figura. 6-3. Gráfico de la profundidad de socavación con respecto al lecho del río.*



*Fuente: Elaboración propia*

### 6.1.2. Determinación de la profundidad de fundación de los muros protección

De acuerdo a los resultados de la socavación, se identificó las secciones donde la inundación es inminente. Con este criterio se realizó una tabla para una mejorar la interpretación para la determinación la profundidad de fundación de los diferentes tramos de los muros de protección.

Tabla 6-2. Socavación en los tramos de inundación.

| <b>tramo 1</b>    |                                |                                |                                        |
|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Sub tramos</b> | <b>Socavación<br/>máx. (m)</b> | <b>Socavación<br/>min. (m)</b> | <b>velocidad<br/>erosiva<br/>(m/s)</b> |
| <b>Tramo 1-A</b>  | 2.06                           | 0.10                           | 1.65                                   |
| <b>Tramo 1-B</b>  | 2.22                           | 0.05                           | 1.69                                   |
| <b>tramo 2</b>    |                                |                                |                                        |
| <b>Tramo 2-A</b>  | 1.42                           | 1.08                           | 1.45                                   |
| <b>Tramo 2-B</b>  | 1.38                           | 1.07                           | 1.44                                   |
| <b>Tramo 3</b>    |                                |                                |                                        |
| <b>Tramo 3-A</b>  | 1.44                           | 1.40                           | 1.46                                   |
| <b>Tramo 4</b>    |                                |                                |                                        |
| <b>Tramo 4-A</b>  | 1.11                           | 0.38                           | 1.33                                   |
| <b>Tramo 4-B</b>  | 0.98                           | 0.27                           | 1.28                                   |
| <b>Tramo 4-C</b>  | 1.21                           | 0.27                           | 1.37                                   |
| <b>Tramo 5</b>    |                                |                                |                                        |
| <b>Tramo 5-A</b>  | 1.11                           | 0.38                           | 1.33                                   |
| <b>Tramo 5-B</b>  | 1.21                           | 0.27                           | 1.37                                   |

Fuente: Elaboración propia

#### 6.1.2.1. Análisis de resultados de socavación

En el diseño de muros de gaviones para protección fluvial en el río San Juan del Oro, es fundamental garantizar la estabilidad estructural frente a procesos de socavación y erosión.

- **Análisis técnico**

La profundidad de fundación de estos muros debe definirse cuidadosamente en función de las condiciones hidráulicas y geotécnicas de cada tramo.

Además, la colocación de colchonetas de gaviones ancladas al pie del muro, con una altura típica de 0.30 m, contribuye significativamente a disipar la energía del flujo, reduce la profundidad efectiva de socavación en 0.20 m a 0.50 m, ayuda a distribuir cargas y prevenir la socavación basal inmediata, lo que permite reducir ligeramente la profundidad de empotramiento sin comprometer la seguridad.

**Tramo 1:** este tramo es el que presenta las mayores profundidades de socavación, lo cual es coherente y esperable ya que se encuentra en la parte curva del cauce. En la parte cóncava actúan fuerzas centrífugas que generan mayor erosión y las velocidades erosivas también son elevadas. Sin embargo, en la parte convexa que es donde irán ubicados los muros de protección, hay una reducción de estas fuerzas del flujo que favorece a la deposición de sedimentos y disminuye la intensidad de socavación de gran manera comparado con la parte cóncava y como estos resultados provienen de un

modelo general es muy probable que estos valores de socavación para este tramo sean menores que los máximos estimados.

**Tramo 2, 3, 4 y 5:** son tramos de comportamiento estable en cuanto a socavación, con valores medios, pero aún en niveles importantes. La socavación mínima es variable, lo que podría implicar zonas puntuales de mayor erosión. Las velocidades de erosión de 1.3 m/s a 1.5 m/s poco menores que el primer tramo pero que aún representan un alto riesgo ya que sobrepasan el umbral de erosión para suelos no cohesivos (0.7 a 1.2 m/s) aproximadamente. Esto confirma la necesidad de estructuras de contención robustas, con fundación profunda y protección contra socavación basal.

Para este propósito, se adopta como criterio técnico una profundidad mínima de fundación igual a la socavación máxima estimada más un margen de seguridad de al menos 0.3 metros, lo que permite compensar variaciones hidrodinámicas no contempladas en el análisis.

$$Df = d_{s\max} + ms - ec \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde:

Df: profundidad de fundación del muro (m)

$D_{s\max}$ : socavación máxima del tramo (m)

Ms: margen de seguridad (m) (0.3) adoptado

ec: efecto de la colchoneta (m) (0.3) adoptado

Para el tramo 1 se utilizó la socavación media ya que el muro se ubica en la parte convexa del río y los demás tramos se utilizó el valor máximo.

*Tabla 6-3. Profundidad de fundación de los muros de protección.*

| <b>Tramo 1</b>    |                           |                                              |
|-------------------|---------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Sub tramos</b> | <b>Socavación max (m)</b> | <b>Profundidad de fundación del muro (m)</b> |
| <b>Tramo 1-A</b>  | 2.03                      | 1.02                                         |
| <b>Tramo 1-B</b>  | 2.19                      | 1.09                                         |
| <b>tramo 2</b>    |                           |                                              |
| <b>Tramo 2-A</b>  | 1.40                      | 1.40                                         |
| <b>Tramo 2-B</b>  | 1.36                      | 1.36                                         |
| <b>Tramo 3</b>    |                           |                                              |
| <b>Tramo 3-A</b>  | 1.42                      | 1.42                                         |
| <b>Tramo 4</b>    |                           |                                              |
| <b>Tramo 4-A</b>  | 1.09                      | 1.09                                         |
| <b>Tramo 4-B</b>  | 0.97                      | 0.97                                         |
| <b>Tramo 4-C</b>  | 1.19                      | 1.19                                         |

| Tramo 5   |      |      |
|-----------|------|------|
| Tramo 5-A | 1.09 | 1.09 |
| Tramo 5-B | 1.19 | 1.19 |
|           |      |      |

*Fuente: Elaboración propia*

Como los resultados dan un valor más o menos parecidos se estableció un valor de profundidad general de fundación de los muros de gaviones en todos los tramos de:

$$Df = 1.30 \text{ m}$$

Adoptar este valor representa una decisión técnica segura y económicamente eficiente, respaldada por los datos de socavación y mitigada por el uso de colchonetas protectoras.

Las colchonetas tendrán una altura de 0.3 m por 1.5 la altura del muro.

La base de fundación será de 0.75 la altura total del muro.

- **Análisis económico**

Fundar a profundidades mayores implica mayores costos por excavación, transporte y material de relleno.

El uso de colchonetas reduce las profundidades necesarias en (0.3 a 0.5m) significando un ahorro sin comprometer la estabilidad.

## 6.2. Dimensiones finales del muro de gavión

*Figura. 6-4. Dimensiones del muro de gavión tramo 1 (1-B).*



*Fuente: Elaboración propia*

Los muros diseñados con sus dimensiones se especifican en el (**Anexo F**)

### 6.3. Análisis de estabilidad de los muros

Para el análisis de estabilidad de los muros, se recurrió al uso de datos geotécnicos aproximados, debido a la ausencia de estudios específicos en la zona de intervención. Ante esta limitación, se optó por emplear valores de referencia obtenidos de literatura técnica y tablas, como se detalla en el (**Anexo F**). Estos datos fueron seleccionados en función de las características geomorfológicas observadas en el sitio, tales como el tipo de suelo superficial, la pendiente del terreno y el contexto geológico regional. La aproximación se realizó con el objetivo de representar de la forma más realista posible las condiciones del subsuelo, permitiendo así llevar a cabo una evaluación preliminar de la estabilidad estructural. Si bien estos valores no sustituyen estudios de campo, constituyen una base razonable y metodológicamente aceptable en etapas tempranas de diseño, hasta tanto se puedan desarrollar investigaciones geotécnicas detalladas.

*Tabla 6-4. Datos seleccionados en función de las características del suelo.*

| Parámetros                                 |     | Unidad             | Descripción del tipo de suelo             |
|--------------------------------------------|-----|--------------------|-------------------------------------------|
| Angulo de fricción interna ( $\phi$ )      | 38  | °                  | Arena con grava semicompacta              |
| Peso específico de la roca ( $\gamma_r$ )  | 2.9 | ton/m <sup>3</sup> | Canto rodado                              |
| Peso específico del suelo ( $\gamma_s$ )   | 1.8 | ton/m <sup>3</sup> | Arena con grava semicompacta              |
| Ancho de la base (B)                       | 3   | m                  |                                           |
| Capacidad admisible del suelo ( $\sigma$ ) | 2   | kg/cm <sup>2</sup> | Grava, arena limosa medianamente compacta |
| Cohesión (c)                               | 0   | ton/m <sup>2</sup> | Grava, arena limosa medianamente compacta |
| Altura total de muro (H)                   | 4.5 | m                  |                                           |

*Fuente: Elaboración propia*

Ecuaciones para el análisis de estabilidad de los muros:

$$E_a = \frac{1}{2} * (K_a * \gamma_s * H - 2\sqrt{K_a} * c) \left( H - \frac{2}{\gamma_s \sqrt{K_a}} \right) \quad (Ec. 22)$$

$$K_a = \tan^2 \left( 45 - \frac{\phi}{2} \right) \quad (Ec. 23)$$

$$F_d = \frac{(W + Ev) \tan(\phi)}{Eh} > 2 \quad (Ec. 24)$$

$$Fv = \frac{Mr}{Mv} > 2 \quad (\text{Ec. 25})$$

$$e = \frac{B}{2} - \left( \frac{Mr - Mv}{N} \right) < \frac{B}{6} \quad (\text{Ec. 26})$$

$$P_{1-2} = \frac{N}{B} * \left( 1 \pm \frac{6e}{B} \right) \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde:

Ea: empuje activo (ton/m)

$\gamma$ s: peso específico del suelo (ton/m<sup>3</sup>)

H: altura total del muro (m)

B: base del muro (m)

c: cohesión (ton/m<sup>2</sup>)

$\Phi$ : ángulo de fricción interno del suelo (°)

Fv: factor de seguridad al vuelco > 2

Fd: factor de seguridad al deslizamiento > 2

Ev: empuje vertical (ton/m)

Eh: empuje horizontal (ton/m)

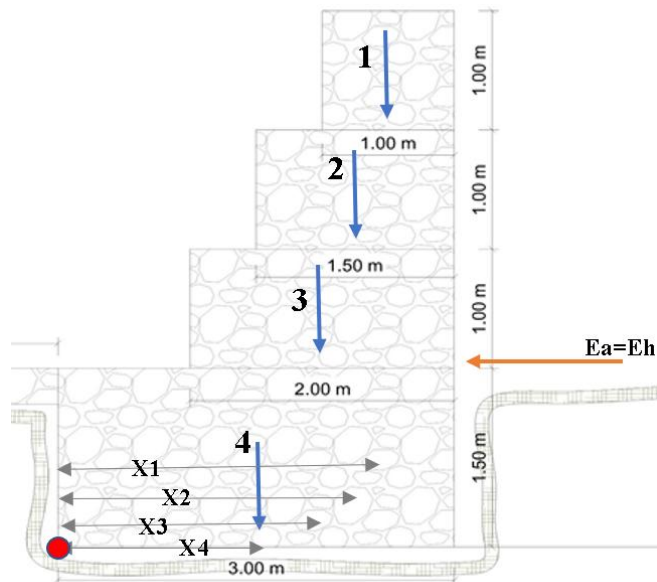
Mr: momentos resistentes que se opone al vuelco (ton\*m)

Mv: momento que favorece al vuelco (ton\*m)

E: excentricidad (adm)

P: esfuerzo ejercido en la fundación (ton/m<sup>2</sup>)

Figura. 6-5. Dimensiones del muro (tramo 2, 3 y 4)



Fuente: Elaboración propia

- Empuje activo = 4.34 ton/m por un coeficiente de seguridad de 1.5 = **6.50 ton/m**
- Factor de seguridad al deslizamiento:

Tabla 6-5. Peso total del muro ( $L = 1m$ )

| Área                   | Peso         | Centro de gravedad | Momento    |
|------------------------|--------------|--------------------|------------|
|                        | W (ton)      | Xi                 | Mr (ton/m) |
| 1                      | 2.32         | 2.5                | 5.8        |
| 2                      | 3.48         | 2.25               | 7.83       |
| 3                      | 4.64         | 2                  | 9.28       |
| 4                      | 10.44        | 1.5                | 15.66      |
| <b>W total (ton) =</b> | <b>20.88</b> |                    | 38.57      |

Fuente: Elaboración propia

$Fd = 2.51 > 1.5$  ;cumple!

- Factor de seguridad al vuelco:

$Fv = 3.95 > 2$  ;cumple!

- Verificación esfuerzos permisibles:

$P1 = 8.63 \text{ ton/m}^2 = 0.88 \text{ kg/cm}^2 < 2 \text{ kg/cm}^2$  ;cumple!

$P2 = 5.29 \text{ ton/m}^2 = 0.54 \text{ kg/cm}^2 < 2 \text{ kg/cm}^2$  ;cumple!

## 6.4. Presupuesto general de las obras de protección

Tabla 6-6. Cómputos métricos de los muros de protección.

| CÓMPUTOS MÉTRICOS |                                                                         |                |           |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------|-----------|
| ÍTEM              | DESCRIPCIÓN                                                             | UNID.          | CANTIDAD  |
| >                 | <b>M01 - M01 TRABAJOS PRELIMINARES</b>                                  |                |           |
| 1                 | INSTALACIÓN DE FAENAS                                                   | Glb            | 1.00      |
| 2                 | REPLANTEO Y TRAZADO DE SUPERFICIE                                       | m <sup>2</sup> | 4279.00   |
| >                 | <b>M02 - M02 CONSTRUCCIÓN MURO DE GAVIÓN EN EL RÍO SAN JUAN DEL ORO</b> |                |           |
| 3                 | EXCAVACIÓN COMÚN CON MAQUINARIA (RETROEXCADORA)                         | m <sup>3</sup> | 6,987.50  |
| 4                 | PROVISIÓN Y ARMADO MURO DE MALLA DE GAVIÓN                              | m <sup>3</sup> | 9,286.50  |
| 5                 | PROVISIÓN Y ARMADO DE COLCHONETA TIPO RENO                              | m <sup>3</sup> | 1,252.20  |
| 6                 | PROVISIÓN Y COLOCADO DE GEOTEXTIL                                       | m <sup>2</sup> | 11,302.60 |
| 7                 | RELLENO Y COMPACTADO DE TIERRA                                          | m <sup>3</sup> | 1,424.80  |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-7. Materiales y mano de obra.

| MATERIALES Y MANO DE OBRA     |                                      |                  |                      |
|-------------------------------|--------------------------------------|------------------|----------------------|
| <b>1. MATERIALES</b>          |                                      |                  |                      |
| Nº                            | DESCRIPCIÓN                          | UNIDAD           | PRECIO UNITARIO (bs) |
| 1                             | CEMENTO PORTLAND                     | Kg               | 1.04                 |
| 2                             | ARENA                                | m <sup>3</sup>   | 136.50               |
| 3                             | GRAVA                                | m <sup>3</sup>   | 80.00                |
| 4                             | ESTUCO                               | Kg               | 0.68                 |
| 5                             | MADERA DE CONSTRUCCIÓN               | pie <sup>2</sup> | 8.00                 |
| 6                             | MADERA MAPAJÓ                        | pie <sup>2</sup> | 7.50                 |
| 7                             | CALAMINA GALVANIZADA                 | m <sup>2</sup>   | 22.92                |
| 8                             | LADRILLO 6H                          | Pza.             | 0.90                 |
| 9                             | PINTURA LATEX                        | Gal              | 100                  |
| 10                            | CLAVOS                               | m <sup>3</sup>   | 12.50                |
| 11                            | ALAMBRE DE AMARRE                    | Kg               | 12.00                |
| 12                            | PIEDRA BRUTA                         | m <sup>3</sup>   | 80.00                |
| 13                            | GAVIÓN 2x1x1 C/D                     | Pza.             | 261.73               |
| 14                            | ALAMBRE GALVANIZADO Nº10             | Kg               | 15.00                |
| 15                            | COLCHONETA TIPO RENO 4x2x0.30 Galfan | Pza.             | 490.00               |
| 16                            | GEOTEXTIL 178 gr/m <sup>2</sup>      | m <sup>2</sup>   | 9.42                 |
| <b>2. MANO DE OBRA</b>        |                                      |                  |                      |
| Nº                            | DESCRIPCIÓN                          | UNIDAD           | PRECIO UNITARIO      |
| 1                             | ALBAÑIL                              | Hr               | 18                   |
| 2                             | AYUDANTE                             | Hr               | 14                   |
| 3                             | PEÓN                                 | Hr               | 12                   |
| 4                             | TOPÓGRAFO                            | Hr               | 22                   |
| 5                             | ALARIFE                              | Hr               | 12                   |
| 7                             | MAQUINISTA                           | Hr               | 17                   |
| 6                             | CHOFER                               | Hr               | 13                   |
| <b>3. MAQUINARIA Y EQUIPO</b> |                                      |                  |                      |
| Nº                            | DESCRIPCIÓN                          | UNIDAD           | PRECIO UNITARIO      |

|   |                                      |    |     |
|---|--------------------------------------|----|-----|
| 1 | CAMIONETA 4x4                        | Hr | 70  |
| 2 | CAMIÓN VOLQUETA >= 12 m <sup>3</sup> | Hr | 200 |
| 3 | RETROEXCAVADORA >= 100 HP            | Hr | 300 |

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 6-8. Presupuesto por ítems y general de la obra.*

| PRESUPUESTO POR ÍTEMS Y GENERAL DE LA OBRA (EN BOLIVIANOS) |                                                 |                |          |                           |                        |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------|----------|---------------------------|------------------------|
| ÍTEM                                                       | DESCRIPCIÓN                                     | UNIDAD         | CANTIDAD | PRECIO UNITARIO (NUMERAL) | PRECIO TOTAL (NUMERAL) |
| 1                                                          | INSTALACIÓN DE FAENAS                           | GLB            | 1.00     | 4,583.24                  | 4,583.24               |
| 2                                                          | REPLANTEO Y TRAZADO DE SUPERFICIE               | m <sup>2</sup> | 4,279.00 | 4.88                      | 20,889.82              |
| 3                                                          | EXCAVACIÓN COMÚN CON MAQUINARIA (RETROEXCADORA) | m <sup>3</sup> | 6,987.50 | 43.49                     | 303,880.01             |
| 4                                                          | PROVISIÓN Y ARMADO MURO DE MALLA DE GAVIÓN      | m <sup>3</sup> | 9,286.50 | 408.11                    | 3,789,936.67           |
| 5                                                          | PROVISIÓN Y ARMADO DE COLCHONETA TIPO RENO      | m <sup>3</sup> | 1,252.20 | 611.03                    | 765,126.32             |
| 6                                                          | PROVISIÓN Y COLOCADO DE GEOTEXTIL               | m <sup>2</sup> | 11,302.6 | 22.30                     | 252,069.73             |
| 7                                                          | RELLENO Y COMPACTADO DE TIERRA                  | m <sup>3</sup> | 1,424.80 | 77.57                     | 110,519.99             |
| <b>PRECIO TOTAL (NUMERAL)</b>                              |                                                 |                |          |                           | <b>5,247,005.79</b>    |

*Fuente: Elaboración propia*

La construcción de los muros de gaviones tendrá un costo total de cinco millones doscientos cuarenta y siete mil cinco bolivianos con setenta y nueve centavos aproximadamente.

## **7. Conclusiones y recomendaciones**

### **7.1. Conclusiones**

- ✓ Este proyecto de grado profesionalizado con el título “Modelación hidráulica con software IBER para identificar el riesgo de inundación de cultivos agrícolas para el diseño de obras de protección” cumplió con éxito detalles de cada objetivo planteado, verificando la aplicación utilizada como herramienta técnica efectiva para análisis de gestión de riesgo hídrico en tierras agrícolas sujetas a inundaciones.
- ✓ Primero se hizo la modelación hidrológica mediante el programa HEC-HMS con su correspondiente y adecuado proceso de calibración y validación de caudales generados con datos históricos de observaciones y eventos previos verificados a través de imágenes satelitales. Esto se hizo posible con el fin de obtener escenarios representativos de eventos de precipitación y de escorrentía extremos.
- ✓ La aplicación del modelo hidráulico en el programa IBER resultó ser una herramienta fuerte para simulación bidimensional de flujo en cauces naturales. Por sus capacidades de representación gráfica de velocidades y profundidades se consiguió precisamente identificar áreas agrícolas particularmente expuestas al riesgo de inundación. Se facilitó así la base sólida para análisis de vulnerabilidad e implementación de medidas de mitigación.
- ✓ Como recurso de control estructural se sugirió el tipo de obra de protección mediante muros de gaviones. La opción se escogió por su funcionalidad, construcción sencilla, adaptabilidad en el terreno y su potencia de acarreo de energía en alta intensidad. A pesar de ello, durante la fase de verificación estructural surgieron limitaciones importantes, particularmente por la falta de información geotécnica del terreno, lo cual impidió una evaluación integral de la estabilidad del sistema de contención. Asimismo, se identificó que el levantamiento topográfico de alta resolución representa una inversión considerable, lo que no afecta en el desarrollo y resultados para el cual fue utilizado en este proyecto.

- ✓ La aplicación de la metodología muestra que la fusión de HEC-HMS e IBER es posible con el fin de producir resultados realistas, confiables e interpretativos visualmente y constituye un instrumento útil tanto para organizaciones comunitarias como instituciones públicas y técnicos en el diseño y planificación de defensas hidráulicas.

## **7.2. Recomendaciones**

- ✓ Levantamiento topográfico de alta resolución: Se sugiere llevar a cabo próximas campañas topográficas con drones con sensores de tipo LiDAR o fotogrametría de alta precisión con el fin de incrementar la calidad del modelo digital del terreno (MDT), para futuras evaluaciones mucho más minuciosas.
- ✓ Continua validación de modelos: Es crucial recalibrar y validar tanto el modelo hidrológico (HEC-HMS) como el hidráulico (IBER) mediante eventos históricos, imágenes satelitales y registros hidrométricos con el objetivo de asegurar que el comportamiento simulado de caudales y niveles de agua capturen la realidad del sistema fluido.
- ✓ Monitoreo geotécnico: Es necesario establecer estudios geotécnicos pormenorizados de lecho y márgenes del río de propiedad del futuro diseño estructural más resistente, tal y como le permitirá adelantar la verificación de la capacidad portante del terreno y el comportamiento ante socavación, asentamientos y estabilidad de muros de protección.
- ✓ Aplicabilidad del IBER: Se aconseja favorecer su aplicación en instituciones técnicas y educativas por cuanto le permite visualizar con detalle los riesgos y facilitar la toma de decisiones y participación comunitaria en proyectos de gestión de riesgo hídrico.
- ✓ Educación y sensibilización: Por último, se recomienda llevar a cabo campañas de educación entre agricultores y comunidades locales acerca de áreas de riesgo, prevenciones y mantenimiento de infraestructuras de protección.