

## **1.GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN**

Uno de los problemas más difíciles que afrontan los gobiernos locales, regionales o nacional en el caso de Bolivia, es la falta de información y falta de bancos de información o sistemas integrados de gestión de recursos hídricos los cuales proporcionen datos sobre la hidrología y caudales en todo el país, es así que, la predicción de precipitaciones y caudales se han vuelto fundamentales, ya que por las enormes cuencas hidrográficas aportantes que existen, los excesos de lluvia producen transporte de sedimentos provocando desprendimientos de masas sólidas, lo cual se traduce en pérdidas de infraestructura, áreas de cultivo, de vidas humanas y animales, motivo por el cual la hidrología y la estimación de caudales tiene gran importancia en el país. En los últimos años se desarrolló metodologías para la modelación hidrológica, con el fin de predecir y simular caudales, para poder pronosticar acontecimientos futuros con el periodo de diseño establecido, que servirán para el diseño óptimo de las obras hidráulicas.

Debido a la falta de modelos de simulación diaria en nuestro medio que sean aceptables, se estudiara el software RS-Minerve, el modelo al ser comparado con datos de caudales observados y posteriormente calibrados de forma automática o manual, ajustan sus parámetros, obteniéndose indicadores estadísticos los cuales pueden ser evaluados por medio de una función objetivo que valida la calidad del modelo empleado y de esta manera la caracterización de la cuenca, logrando con esto estudiar y evaluar el comportamiento de los flujos superficiales presentes en la zona de estudio.

Es así que el presente estudio se realizara en la Cuenca del río San Juan del Oro, perteneciente a la Cuenca del río Pilcomayo y que se conecta con los departamentos de Tarija, Chuquisaca y Potosí de nuestro país Bolivia, y con la provincia de Jujuy con el país de Argentina. Entre las estaciones Hidrométricas dentro de la cuenca del río San Juan del Oro se encuentra la del municipio de El Puente (Tarija) y otra incorporada recientemente en el municipio de Chuquiago (Potosí), de las cuales la estación hidrométrica de El Puente nos servirá para hacer la delimitación y modelación hidrológica de este proyecto.

## **1.2. ANTECEDENTES**

El software a emplear es el RS-Minerve (Routing System Minerve) desarrollado en conjunto por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) y la oficina de ingeniería HydroCosmos SA junto con la colaboración de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), creado y distribuido desde el año 2011, es un programa para la simulación de la formación y propagación de la escorrentía superficial, capaz de modelar redes hidráulicas e hidrológicas complejas de acuerdo a un esquema conceptual semidistribuido, el cual ya ha sido utilizado para diferentes estudios en varios países.

El sub modelo a emplear para el modelamiento hidrológico en el RS MINERVE será el modelo GR4J de cuatro parámetros, y para el tránsito de avenidas se modelará mediante el Lag Time “tiempo de retardo”. Además, con el modelo de flujo diario "GR4J" nos permitirá realizar simulaciones de flujo en el paso de tiempo diario. La versión utilizada será la presentada por Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003), los cuales mejoran de un modelo parsimonioso para la simulación de flujo continuo.

<sup>1</sup> (Journal of Hydrology, 279 (1-4); 275-289). En Bolivia aún no se aplicó este software y el modelo hidrológico GR4J, por lo que no se cuenta con ningún antecedente en nuestro país, que pueda servir de apoyo en la investigación.

## **1.3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

### **1.3.1 Planteamiento del problema**

En la actualidad en Bolivia las épocas de lluvia y crecida presentan grandes desafíos, para resolver las crecientes demandas de desarrollo hidrológico nacional y regional mediante modelos hidrológicos, considerando que uno de los problemas es la disposición de un modelo que represente el ciclo hidrológico, simulando caudales con fines de prevención contra inundaciones y sequías, en cuencas de territorio nacional, aun en la actualidad se emplean algunos modelos en cuencas que datan de los años 80, de las cuales se tienen muy poco

---

<sup>1</sup> (Journal of Hydrology, 279 (1-4); 275-289) / Fecha de consulta: 08/03/2018 pág. <http://www.plataformaurbana>

conocimiento, los cuales se pone en duda su eficacia; como también la falta de modelos en las principales cuencas del país.

Para tal efecto es necesario implementar e investigar nuevos programas de modelación hidrológica que sean de resultados más confiables, de fácil uso y accesibilidad para la modelación hidrológica de cuencas para prevenir acontecimientos en donde se generen desastres naturales, y así establecer un adecuado modelo para poder determinar caudales medios diarios, en base a la calidad de los indicadores estadísticos a partir de la función objetivo, para simulaciones de periodos cortos y periodos largos.

### **1.3.2 Formulación del problema**

Debido a los continuos y notables aumentos del cambio climático y la incertidumbre de información en nuestra zona de estudio la cuenca del río San Juan del Oro, los modelos hidrológicos aplicados son de una baja confiabilidad debido a que no se toman en cuenta días en donde no hay precipitaciones y solo existen evapotranspiraciones haciendo variar los parámetros de los modelos, lo que obviamente implica una considerable variación de caudales medios mensuales en épocas de lluvias y épocas de periodos secos, debido a que no existen datos de escala diaria, por consiguiente sería bueno usar un software que modele con datos diarios y así evaluar los indicadores estadísticos del modelo para disminuir la incertidumbre existente en otros modelos realizados en los cuales no han sido validados en nuestro medio con datos diarios.

### **1.3.3 Sistematización del problema**

¿Con que valor de los indicadores estadísticos para la función objetivo en los modelos hidrológicos son aceptables para los poder validar y porque se emplearía este modelo hidrológico?

¿Al aplicar y realizar la calibración del modelo por medio del software siguiendo lo que se dice la metodología se podría obtener resultados con los cuales se podrían disminuir la incertidumbre que existen en los modelos hidrológicos?

¿La metodología utilizada para el análisis de los recursos hídricos en la cuenca es adecuada para obtener indicadores estadísticos con una función objetivo adecuada para la modelar la cuenca del río San Juan del Oro en el software RS-Minerve con el modelo GR4J?

¿Cuáles serían los resultados finales obtenidos del balance hídrico del modelo GR4J para la escala de tiempo seleccionada con los indicadores estadísticos y la función objetivo encontrada en la cuenca de estudio?

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. General**

Comparar y evaluar los indicadores estadísticos con la función objetivo, para la modelación hidrológica a nivel diario de la cuenca del río San Juan del Oro, a la altura de la estación hidrométrica de El Puente, mediante la utilización del software RS-Minerve con el modelo de cuatro parámetros GR4J, para que con esta modelación se pueda hacer una mejor representación de los procesos hídricos de la cuenca a nivel diario.

### **1.4.2. Específicos**

- Encontrar los parámetros morfológicos necesarios de la cuenca de estudio.
- Analizar las variaciones climáticas en la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial en la zona de estudio.
- Obtención de caudales indirectos por el método de curva de gastos, en periodos secos y húmedos correspondientes a los años 2004 y 2010, con los caudales directos instantáneos disponibles y los registros de escalas diarias de la estación hidrométrica de El Puente.
- Utilizar el modulo precipitación escorrentía (GR4J) para la caracterización y parametrización de la cuenca del río San Juan del Oro).
- Calibrar automáticamente mediante el algoritmo de calibración SCE-UA, el modelo hidrológico GR4J, buscando representar de forma correcta los distintos procesos que dominan la escorrentía en la cuenca en estudio.
- Analizar el grado de correlación existente entre los caudales medios diarios generados con el modelo de flujo diario GR4J con el programa RS-MINERVE, comparándolos con los caudales de referencia, mediante los indicadores estadísticos para obtener una función objetivo que valide la calidad del modelo.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA**

### **1.5.1. Justificación teórica**

La modelación hidrológica es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias (Dueñas 1997).

### **1.5.2. Justificación metodológica**

Un modelo hidrológico es pues una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica.

En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente representamos es la '**cuenca hidrográfica**' y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático nos ayudará a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas (inputs) al sistema y salidas (outputs) a partir del sistema, para verificar si el modelo es representativo del prototipo.

La salida de los modelos hidrológicos varía - dependiendo de las metas, objetivos del modelo y de sus parámetros e indicadores. Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escorrentía, totales diarios de escorrentía, mientras que otros están diseñados para ver a las tormentas individuales. El resultado más común es el hidrograma o hidrograma de escurrimiento en donde se compare el modelo y con ello se evalué la función objetivo, comprobando el grado de aceptación del mismo.

### **1.5.3. Justificación práctica.**

La disponibilidad de datos de entrada en estudios Hidrológicos puede ser limitada debido a la falta de accesibilidad, baja fiabilidad o insuficiencia de los esfuerzos de monitoreo.

Los datos fundamentales necesarios en la modelación hidrológica incluyen series de datos meteorológicos, datos de suelo y cobertura de suelo e información sobre la hidrografía de la cuenca. La magnitud de los problemas con la disponibilidad de los datos que deben ser abordados varía entre países y regiones, y depende del tipo de datos requeridos por un modelo específico y el objetivo que se busca al aplicarlo.

La información a nivel global puede ser útil para realizar modelaciones hidrológicas en regiones donde escasean datos. No siempre está claro si el bajo rendimiento de los modelos se debe a limitaciones en los datos de entrada o a la representación de los procesos hidrológicos en el modelo, o una combinación de ambos. Por ende, se necesitan más estudios para distinguir entre las fuentes específicas de los errores y las posibilidades de mejoras de ambos, bases de datos y modelos más eficientes.

El interés de aplicar el modelo determinístico-empírico GR4J ("Génie Rural à 4 paramètres Journalier"), desarrollado en Francia (Perrin et al., 2003). Realiza la representación de descargas medias diarias con 4 parámetros y requiere de información de precipitación y evapotranspiración media diaria para generar series de caudales, se basa en varias razones justificadas:

- En primera medida contribuir con investigaciones científicas enfocadas al uso de modelos hidrológicos y aportar a las diferentes cuestiones que se plantean al aplicar los en un área de estudio, principalmente al análisis de la respuesta hidrológica de las cuencas ante eventos de precipitación.
- En segundo lugar, analizar la respuesta hidrológica de las cuencas en estudio aprovechando información de precipitación y evapotranspiración distribuida en el espacio, contrastando sus resultados con datos hidrológicos en donde se empleen datos puntuales.
- En tercer lugar, analizar el comportamiento del modelo al evaluar los indicadores estadísticos que nos da el programa RS-Minerve por medio de calibraciones automáticas, obteniendo con estos valores una función objetivo que indique la calidad del modelo.

## **1.6. Marco de referencia**

### **1.6.1 Marco Teórico**

La modelación hidrológica es una rama fundamental de la hidrología, que nos permite tener un mejor conocimiento de las propiedades, características y comportamientos más habituales de las cuencas hidrográficas debido a las particularidades, patrones y combinaciones de los factores hidroclimáticos, así como ayudan a ganar una mejor comprensión de los fenómenos hidrológicos que generan éstas y como sus cambios pueden afectar estos fenómenos, mediante la simulación de la representación simplificada de un sistema real, y así poder estimar, predecir y analizar futuros eventos que se puedan producir en las cuencas, para utilizar los resultados obtenidos en diferentes tipos de estudios futuros, ya sea de predicción y/o control de avenidas, análisis de infraestructuras existentes, análisis y gestión de recursos hídricos, estudios de los impactos de cambios del uso de suelo, control de la calidad de las aguas, estudios de cambio climático, gestión de aguas subterráneas, ordenación del territorio, estudios hidráulicos, de suelos, de carreteras, entre otros.

Sin embargo, los modelos hidrológicos resultan muy complejos para aplicarlos en la mayoría de las cuencas de montaña, muchas de ellas carentes de la información necesaria para alimentarlos y a posteriori para calibrarlos. Dado que los caudales ordinarios de los cursos de montaña presentan cada día mayor interés, tanto como base hidrológica para interpretar los caudales ecológicos, como para servir de referencia en la instalación de mini centrales en las áreas de montaña, obras hidráulicas o prevención de desastres entre otros usos posibles; se debe cubrir la necesidad de estimarlos con una aproximación razonable.

Ante la frecuencia de eventos torrenciales (precipitaciones o fusiones del manto de nieve) que inciden en las áreas de montaña, el conocimiento de los caudales máximos de crecida que corresponden a la escorrentía superficial presenta especial relevancia, pero también resulta importante estimar los caudales ordinarios asociados a la escorrentía sub-superficial o subterránea que son más estables y uniformes en el tiempo y es definitiva suponen mayores aportaciones de agua.

### **Fundamentos del método propuesto**

El método propuesto para el cálculo del caudal medio diario, se fundamenta en un modelo integrado al software RS-Minerve el cual es denominado GR4J, desarrollado por Perrin (2003) en Francia, El modelo GR4J cuenta con dos reservorios que se encargan de almacenar la precipitación neta y donde se producen los fenómenos de percolación e infiltración. Los



Donde:

$Qd'$ : salida complementaria unitaria [L / T].

Finalmente, las salidas de modelo se calculan como se presentan en las ecuaciones (1.2) e (1.3) y el flujo total en la salida,  $Qtot$ , como se presenta en la ecuación (1.4):

$$Qr = Qr' \cdot A$$

Ec. (1.2)

$$Qd = Qd' \cdot A$$

Ec. (1.3)

$$Qtot = Qr + Qd$$

Ec. (1.4)

Donde:

$Qr$ : salida del depósito de distribución [ $L^3 / T$ ]

$A$ : superficie de la cuenca [ $L^2$ ]

$Qd$ : flujo de salida complementario [ $L^3 / T$ ]

$Qtot$ : salida total [ $L^3 / T$ ].

### Fundamento de los indicadores estadísticos del modelo.

Los Indicadores estadísticos permiten mejorar el conocimiento de los resultados finales de modelación y la evolución de los parámetros para calibrar, como así gestionar un grupo de modelación que ayude a evaluar la viabilidad y verificación de los valores de caudales simulados por los modelos y los caudales de referencia, la función objetivo necesita los siguientes indicadores estadísticos del modelo calibrado y validado:

- **Coefficiente Nash: [Nash]**, Los criterios de Nash-Sutcliffe se utilizan para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos y otros.
- **Coefficiente de Nash para valores de logaritmo: [Nash-ln]**, El coeficiente de Nash-Sutcliffe para valores de flujo logaritmo (Nash-ln) se utiliza para evaluar el rendimiento de modelos hidrológicos para flujos bajos.
- **Coefficiente de correlación de Pearson: [Pearson]**, El coeficiente de correlación de Pearson muestra la covariabilidad de las descargas simuladas y observadas sin penalizar el sesgo.
- **Puntuación de Parcialidad: [BS]**, es una estimación simétrica del emparejamiento entre la simulación promedio y la observación promedio.

**Función objetivo [BS]**, es utilizada para evaluar los resultados de las simulaciones hidrológicas por medio de índices de eficiencia o indicadores estadísticos, Es decir que sería mejor combinar los índices de eficiencia utilizando una optimización multiobjetivo para calibrar el modelo hidrológico, ya que no se sabe a ciencia cierta que índice sea el más apropiado para nuestro estudio y una sola medida de bondad de ajuste puede ser inapropiado (Legates y McCabe, 1999).

### 1.6.2 Marco Conceptual

- **Modelo hidrológico:** Es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica. En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente representamos es la cuenca hidrográfica y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático nos ayudara a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas inputs al sistema y salidas outputs a partir del sistema, para verificar si el modelo es representativo del prototipo.

- **Variables de entrada (Inputs):** Series de datos a partir de las cuales las ecuaciones del modelo realizan los cálculos pertinentes. Precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc.
- **Parámetros:** Son las características del sistema que en general permanecen constantes en el tiempo. Velocidad de infiltración, coeficientes de descarga, capacidad de campo, etc.
- **Variables de estado:** Definen el estado del sistema en cada momento. Humedad del suelo, almacenamiento en los tanques, etc.
- **Ecuaciones:** Expresiones matemáticas que reflejan la simplificación del sistema.
- **Salidas (outputs):** Flujos de salida y/o variables de interés de la cuenca. Flujos intermedios, flujo final, infiltración, etc.

Los modelos hidrológicos son entonces representaciones simplificadas de los sistemas hidrológicos reales, en otras palabras, un modelo hidrológico es una simplificación de la realidad, a partir del cual podemos estudiar la relación causa-efecto de una cuenca a través

de los datos de entrada y salida, con los cuales se logra un mejor entendimiento de los procesos físicos hidrológicos que tienen lugar dentro de la cuenca (ven te chow,1994).

**-Balance Hídrico:** se deriva del concepto de balance de la materia, es decir, que es el equilibrio entre todos los recursos hídricos que ingresa al sistema y los que salen del mismo  $i$ , en un intervalo de tiempo determinado. Sintéticamente puede expresarse por la fórmula:

$$Estado_{(t+1)} = Estado_t \sum_{i=1}^N Entradas_i - \sum_{j=1}^N Salidas_j$$

**-Modelo Hidrológico de flujo diario GR4J (Modelos empíricos):** Los modelos empíricos o también llamados de caja negra, son la representación de un sistema real con explicaciones matemáticas utilizando datos experimentales sin realmente tratar de explicarlo mediante leyes físicas generales. Se basan en relaciones de entrada-salida y no se preocupan por describir los procesos y comportamientos internos del sistema. Este tipo de modelo es desarrollado mediante investigación y experimentación, contiene pocos parámetros que pueden tener poco sentido físico.

**-Software RS-Minerve:** es un programa para la simulación de la formación y propagación de la escorrentía superficial. Este modela redes hidráulicas e hidrológicas complejas de acuerdo a un esquema conceptual semidistribuido. Tiene en cuenta procesos hidrológicos comunes tales como fusión de nieve, fusión glaciaria, escorrentía superficial y subterránea, así como elementos de control hidráulicos como lo son compuertas, reservorios, aliviaderos, desviaciones, uniones, turbinas, bombas e hidroeléctricas. El programa también lleva incorporado indicadores y módulos de calibración automática, como el SCE-UA.

**-Calibración:** La calibración es el proceso de ajustar los valores de los parámetros para así optimizar el desempeño del modelo de acuerdo a un conjunto de criterios predefinidos. Cada modelo utiliza uno o más grupos de parámetros que son usados para determinar el comportamiento básico del sistema modelado .<sup>2</sup> En esta etapa se intenta lograr la mejor concordancia entre las predicciones del modelo y las observaciones de respuesta actual de la

---

<sup>2</sup> Señalo Wilby, 1997, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

cuenca, al identificar los parámetros efectivos con los cuales la diferencia entre estas predicciones y observaciones sea menor posible.

**-Calibración automática SCE-UA:** La calibración automática, optimiza los parámetros del modelo utilizando técnicas numéricas de optimización, es un método más eficaz y conciso, aunque el tiempo que se tarda en arrojar los resultados depende del modelo, de la cantidad de parámetros y la escala temporal. El algoritmo de calibración SCE-UA es un método de optimización global desarrollado en la Universidad de Arizona en 1992 (Duan et al., 1992, 1993, 1994) robusto, flexible y eficiente para la calibración de modelos precipitación-escorrentía. Fue diseñado específicamente para lidiar con las peculiaridades encontradas en la calibración de modelos conceptuales de cuencas y puede ser utilizado para manejar problemas de optimización no lineal con elevados parámetros. El objetivo es encontrar el mejor conjunto de parámetros para la función objetivo en el espacio factible, iniciando con una muestra aleatoria de puntos distribuidos por todo ese espacio y evoluciona continuamente la población hacia mejores soluciones en el espacio de búsqueda, renunciando progresivamente a la ocupación de regiones con una menor probabilidad.

**-Escorrentía superficial:** La escorrentía superficial está constituida por aquella parte de la precipitación que escurre superficialmente sobre el cauce principal de la cuenca durante el aguacero. Antes de que esta parte de la precipitación se incorpore a un cauce natural, la lámina de agua que escurre superficialmente se denomina anualmente flujo superficial. Esta es medida directamente de los ríos a través de estaciones hidrométricas las cuales miden el caudal de agua que pasa por un punto determinado.

La escorrentía superficial depende de la respuesta hídrica de la cuenca a la precipitación, y viene condicionando por el área de la cuenca, el tipo de cobertura vegetal y uso de suelo, tipo de suelos y pendiente del terreno.

### **1.6.3 Marco Espacial**

El área de estudio donde se realizará la modelación hidrológica con el programa RS-Minerve, con el modelo de flujo diario GR4J, es el área de aporte que abarca desde la cota más alejada delimitada hasta la estación hidrométrica de El Puente, es decir de la estación hidrométrica

de El Puente aguas arriba, sin tomar en cuenta el aporte indirecto de otras cuencas pertenecientes a la cuenca del río San Juan del Oro.

#### 1.6.4 Marco temporal

Para determinar los indicadores estadísticos del modelo hidrológico de flujo diario GR4J, usando el programa RS-Minerve con su calibración y validación, se partirá a través de datos de precipitaciones y evapotranspiraciones potenciales de las estaciones cercanas a la cuenca San Juan del Oro, que en este caso en específico las estaciones a usar serán las de Villazón, Mojo y Tupiza, y la estación hidrométrica a usar para modelar es la de El Puente, las cuales cuentan con suficientes escalas diarias en el periodo 2004 hasta el 2010, los datos serán introducidos al programa para su calibración y validación de los indicadores estadísticos del modelo, ya que con el transcurrir del tiempo aumenta la controversia y el interés respecto a las ventajas de la modelación.

#### 1.7 Hipótesis del trabajo

El modelo GR4J con el programa RS-Minerve al ser evaluados en periodos hidrológicos distintos en la cuenca de estudio, al aplicarse la función objetivo presenta valores iguales o mayores al mínimo siguientes:

Para periodos hidrológicos (2004-2005) a (2009-2010):

**Figura 1.3.** Función objetivo para periodos largos.

Función Objetivo	Calibración	Validación	Valoración
$FO = (Nash * 0,25) + (Nashln * 0,25)$ $+ (Pearson * 0,25) + (BS * 0,25)$	0,50	0,40	Acceptable

Fuente: Elaboración propia

## **2. ESTADO DEL ARTE DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA**

Un modelo hidrológico a nivel de cuenca es un conjunto de descripciones matemáticas de componentes del ciclo hidrológico que utilizan principios físicos básicos colectivamente con datos experimentales, los cuales surgen como respuesta a la necesidad de disponer de herramientas de gestión de los recursos hídricos, y buscan establecer una caracterización precisa de los procesos hidrológicos.

La estructura del modelo y la arquitectura del mismo son determinadas dependiendo del objetivo por el cual el modelo es desarrollado. Por ejemplo, un modelo hidrológico es diferente si es tratado para control de avenidas, generación hidroeléctrica, operación de embalses, gestión de recursos hídricos o ecológicos, etc. Dependiendo del tipo de modelo la información que se requiera puede cambiar siendo los más representativos los datos hidrometeorológicos, geomorfológicos, agrícolas, pedológicos, geológicos e hidrológicos.

Los hidrometeorológicos se refieren a la lluvia, nieve, temperatura, humedad, velocidad de viento y evaporación. Los datos geomorfológicos incluyen mapas topográficos, redes fluviales, áreas y longitudes de drenaje, pendientes y áreas de cuenca; Los agrícolas contienen coberturas vegetales y usos de suelo; en cuanto a los pedológicos se tienen en cuenta el tipo, textura, estructura y condición del suelo, así como tamaño de sus partículas, diámetro, porosidad y contenido de humedad; los geológicos representan la estratigrafía y litología; Finalmente los datos hidrológicos son aquellos tales como profundidad del flujo, caudal de descarga, flujo base, interflujo, interacciones corriente-acuífero y niveles freáticos.<sup>1</sup> Cabe destacar que debido a la gran variedad de modelos no todos ellos requieren la totalidad de los anteriores datos, cada uno de éstos pueden requerir parte de los datos mencionados dependiendo de los objetivos de la modelación y su grado de simplificación.

### **2.1 Generalidades**

La modelación hidrológica es una rama fundamental de la hidrología, que nos permite tener

---

1

*Dr. Felipe I. Arreguín Cortés, D. M. (Edición 2001). Manual para el control de inundaciones. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <https://es.scribd.com/doc/108620075/Manual-Para-El-Control-de-Inundaciones>.*

un mejor conocimiento de las propiedades, características y comportamientos más habituales de las cuencas hidrográficas debido a las particularidades, patrones y combinaciones de los factores hidroclimáticos, así como ayudan a ganar una mejor comprensión de los fenómenos hidrológicos que generan éstas y como sus cambios pueden afectar estos fenómenos, mediante la simulación de la representación simplificada de un sistema real, y así poder estimar, predecir y analizar futuros eventos que se puedan producir en las cuencas, para utilizar los resultados obtenidos en diferentes tipos de estudios futuros, ya sea de predicción y/o control de avenidas, análisis de infraestructuras existentes, análisis y gestión de recursos hídricos, estudios de los impactos de cambios del uso de suelo, control de la calidad de las aguas, estudios de cambio climático, gestión de aguas subterráneas, ordenación del territorio, estudios hidráulicos, de suelos, de carreteras, entre otros.

Desde la década de los sesenta del siglo pasado se han venido desarrollando cantidad de modelos hidrológicos debido a la necesidad de representar los procesos y comportamientos hidrológicos que se dan en las cuencas hidrográficas y en el medio en general.

Han tenido una evolución gradual con el paso del tiempo teniendo desde modelos agregados considerando la cuenca como un todo hasta los distribuidos haciendo una gran discretización espacial, así como desde los de tipo caja negra en donde sólo se era consciente de las entradas al sistema y de sus salidas, mas no de los procesos que se producían dentro. Siguiendo a esto se desarrollaron los denominados de caja gris donde se conoce con cierto grado de simplificación todos los procesos y comportamientos internos del sistema y evolucionar posteriormente a los llamados caja blanca para los cuales se saben casi a ciencia cierta y con buena claridad estos procesos y comportamientos dentro del modelo utilizado desde el inicio en la precipitación hasta la descarga final del sistema.

A medida que los avances tecnológicos se iban acrecentando y con la aparición y desarrollo de los computadores aproximadamente hace tres décadas, muchos más modelos han venido surgiendo, tanto nuevos como actualizaciones y modificaciones de los previamente existentes, haciendo posible que se puedan representar los sistemas de una forma más real y completa, realizando simulaciones hidrológicas complejas, incluyendo una mayor cantidad de parámetros, variables y ecuaciones.

En general los modelos hidrológicos presentan los siguientes elementos:

- Variables de entrada (Inputs): Series de datos a partir de las cuales las ecuaciones del modelo realizan los cálculos pertinentes. Precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc.
- Parámetros: Son las características del sistema que en general permanecen constantes en el tiempo. Velocidad de infiltración, coeficientes de descarga, capacidad de campo, etc.
- Variables de estado: Definen el estado del sistema en cada momento. Humedad del suelo, almacenamiento en los tanques, etc.
- Ecuaciones: Expresiones matemáticas que reflejan la simplificación del sistema.
- Salidas (outputs): Flujos de salida y/o variables de interés de la cuenca. Flujos intermedios, flujo final, infiltración, etc.

## **2.2 Clasificación**

Existe una gran variedad de clasificación de los modelos hidrológicos, sin embargo se pueden resumir en cuatro principales categorías, las cuales son naturaleza de los algoritmos empleados, técnicas involucradas en el proceso de modelamiento, representación espacial y escala temporal.<sup>2</sup>

### **2.2.1 Naturaleza de los algoritmos empleados**

#### **2.2.1.1 Modelos empíricos**

Los modelos empíricos o también llamados de caja negra, son la representación de un sistema real con explicaciones matemáticas utilizando datos experimentales sin realmente tratar de explicarlo mediante leyes físicas generales. Se basan en relaciones de entrada-salida y no se preocupan por describir los procesos y comportamientos internos del sistema. Este tipo de modelo es desarrollado mediante investigación y experimentación, contiene parámetros que pueden tener poco sentido físico. El método racional, el número de curva del Soil Conservation Service (SCS), GR4J y modelos estocásticos de series de tiempo son ejemplos

---

<sup>2</sup> Tellez Rojas Andrés Felipe (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

de esta clase.

### **2.2.1.2 Modelos de base física**

En los modelos de base física o también llamados de caja blanca o teóricos, se conocen todos los procesos y comportamientos internos del sistema. Las leyes que rigen el sistema son totalmente conocidas, utilizan las ecuaciones físicas básicas tales como conservación de la masa, momento y energía para describir éstos procesos hidrológicos. Pueden permitir diferentes predicciones de un sistema bajo cualquier condición, se asume que la recolección de datos requeridos es posible. Sin embargo estos modelos son difíciles de desarrollar ya que sólo pueden ser utilizados en sistemas físicos limitados o para investigaciones específicas. Ejemplos de estos modelos son SHE y TOPMODEL.

### **2.2.1.3 Modelos conceptuales**

Los modelos conceptuales o también llamados de caja gris, se encuentran en un intermedio entre los empíricos y los de base física. Generalmente consideran leyes físicas, pero con una gran simplificación, utilizan técnicas matemáticas y utilizan almacenamientos o tanques para representar los balances de agua. Ejemplos de estos modelos son el HBV, SAC-SMA y SOCONT.

## **2.2.2 Técnicas involucradas en el proceso de modelamiento**

### **2.2.2.1 Modelos determinísticos**

Son modelos matemáticos en los que los resultados son obtenidos mediante relaciones conocidas entre estados y eventos, no dan aleatoriedad, permiten una sola salida de una simulación con un conjunto de valores de entrada y de parámetros. Aplican ecuaciones diferenciales parciales no lineales para cada parámetro dadas ciertas condiciones con las que describen el proceso hidrológico y presentan el interior de los procesos lo cual permite un mejor entendimiento del sistema hidrológico.<sup>3</sup>

### **2.2.2.2 Modelos estocásticos**

---

<sup>3</sup>Señalo Jajarmizadeh, 2012. Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politecnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

Este tipo de modelos carece de bases físicas y tienen la mayoría de sus datos de entrada y/o parámetros representados por distribuciones estadísticas y probabilísticas las cuales determinan un rango de resultados los cuales tienen cierto grado de aleatoriedad e incertidumbre. Como los modelos de regresión lineal, autoregresivos y ARIMA.

### **2.2.3 Representación espacial**

#### **2.2.3.1 Modelos agregados**

Una de las principales limitaciones en la modelación de cuencas es el desconocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos subsuperficiales y subterráneos. Esta limitación es superada si se asume que la cuenca es homogénea, tanto en sus procesos superficiales, subsuperficiales y subterráneos, afirmación que es válida para cuencas pequeñas.<sup>4</sup>

Los modelos agregados consideran la cuenca como un todo, donde los parámetros y variables son constantes en el espacio. La ventaja de estos modelos es que no necesitan de la calibración de muchos parámetros y tienen unas expresiones matemáticas sencillas, sin embargo, no muestran la variabilidad interna del sistema, sino que sus resultados son la representación de su situación media. El modelo de precipitación-escorrentía de Témex es un claro ejemplo de modelo agregado.<sup>5</sup>

#### **2.2.3.2 Modelos distribuidos**

Con el fin de tener una mayor representatividad de la cuenca, los modelos distribuidos la discretizan en un gran número de elementos pequeños regulares e irregulares, grillas o mallas donde el flujo de agua va pasando de un punto o nodo hacia el siguiente y así el agua drena por toda la cuenca, teniendo variabilidad espacial de parámetros, variables y resultados, permitiendo así interacción entre los diferentes procesos en cada una de las celdas generadas. Este tipo de modelos representa de muy buena manera la heterogeneidad de la cuenca capaz de obtener resultados en cada celda, sin embargo, requiere de una gran cantidad de datos que

---

<sup>4</sup> Señalo Cabrera, 2012 en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

<sup>5</sup> Señalo HEC-HMS y el Stanford Watershed Model, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

puede que no existan o se encuentren incompletos, mayor cantidad de parámetros para calibrar, mucho tiempo para ajustarlos y recursos computacionales considerables. Ejemplos de este tipo de modelos son TETIS, SHE y TOPMODEL.

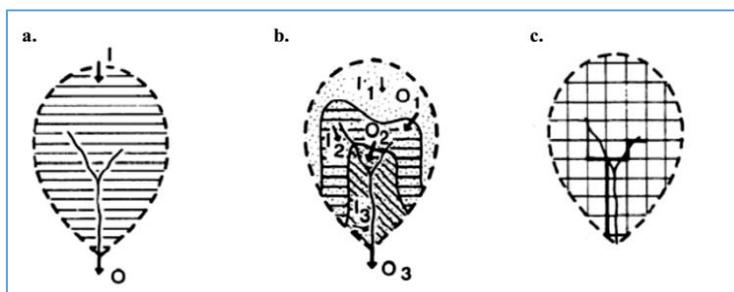
### 2.2.3.3 Modelos semi-distribuidos

Cuando las cuencas ya no son pequeñas, muchas características de ella no se pueden asumir como homogéneas en toda su superficie con lo que se pueden discriminar zonas de similar comportamiento hidrológico y analizar cada una de forma independiente para posteriormente combinar sus efectos.

Para evitar las dificultades de los modelos distribuidos, se desarrollaron los modelos semi-distribuidos los cuales son un término medio entre los agregados y los distribuidos, en la que la cuenca es dividida en diferentes subcuencas o unidades de mayor tamaño que las grillas de los modelos distribuidos, que a su vez son tratadas como una sola unidad al juntarse. Su estructura tiene una mejor base física que los modelos agregados y requiere menor cantidad de datos de entrada que los distribuidos. Ejemplos de modelos semi-distribuidos son el HBV y el HYPE. En la Figura 2.1 se pueden apreciar los 3 tipos de modelos según su representación espacial.

**Figura 2.1** Modelos hidrológicos según su distribución espacial. a) Modelo agregado.

b) Modelo Semidistribuido. c) Modelo Distribuido.



Fuente: Chong-yu Xu, (2002).

## 2.2.4 Escala temporal

### 2.2.4.1 Basado en eventos

Los modelos basados en eventos simulan el sistema para un sólo evento específico en un

pequeño intervalo de tiempo que puede ser desde una hora o menos hasta muchos días.<sup>6</sup>

#### **2.2.4.2 Proceso continuo**

Los modelos de proceso continuo realizan simulaciones para uno o varios eventos en grandes intervalos de tiempo que pueden ser bastantes años. Una de las grandes ventajas de este tipo de modelos es que pueden tener más éxito para cuencas no aforadas y para el estudio de las características a largo plazo de un sistema.

### **2.3 Calentamiento, calibración y validación**

#### **2.3.1 Calentamiento**

El período de calentamiento es la etapa en la cual se realiza la simulación en un pequeño intervalo de tiempo previo a la calibración, en donde se busca inicializar el modelo para neutralizar el efecto y/o reducir la influencia de las condiciones iniciales que son desconocidas, para así al final del calentamiento obtener unos valores que serán utilizados como condiciones iniciales para la calibración, pueden ser tales como humedad inicial, altura de nieve, altura de lámina de agua, etc.

#### **2.3.2 Calibración**

La calibración es el proceso de ajustar los valores de los parámetros para así optimizar el desempeño del modelo de acuerdo a un conjunto de criterios predefinidos. Cada modelo utiliza uno o más grupos de parámetros que son usados para determinar el comportamiento básico del sistema modelado.<sup>7</sup> En esta etapa se intenta lograr la mejor concordancia entre las predicciones del modelo y las observaciones de respuesta actual de la cuenca, al identificar los parámetros efectivos con los cuales la diferencia entre estas predicciones y observaciones sea menor posible.

Para poder hallar estos parámetros se puede realizar de dos maneras, la primera mediante calibración manual o también llamada prueba y error, en donde se realiza un ajuste manual a criterio propio, suele ser un proceso lento y en algunos casos no muy efectivo; la segunda es

---

<sup>6</sup> Señalo Jajarmizadeh M., 2012; 249-261, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

<sup>7</sup> Señalo Wilby, 1997, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

mediante la calibración automática en la que se optimiza utilizando técnicas numéricas de optimización, es un método más eficaz y conciso, aunque el tiempo que se tarda en arrojar los resultados depende del modelo, de la cantidad de parámetros y la escala temporal.

Para evaluar las diferencias entre los resultados de la simulación se hace uso de índices de eficiencia y función objetivo los cuales son explicados más adelante.

### **2.3.3 Validación**

Una vez que el modelo esté calibrado éste debe ser verificado para identificar su precisión, se realiza la simulación utilizando un período diferente al del paso anterior para evaluar que tan correctos son los parámetros arrojados en el proceso de calibración y comprobar si el modelo es estable. Si el modelo se encuentra bien calibrado, éste debe arrojar buenos resultados en cuanto a índices de eficiencia y función objetivo, ya que estos representan la bondad del ajuste del modelo en cuanto a los datos simulados y los observados. Existen tres tipos de validación siendo en el tiempo, en el espacio y en el espacio-tiempo, en donde las dos últimas son exclusivas de los modelos distribuido.

## **2.4 Metodología y herramientas**

La metodología a efectuar se basa en considerar la superficie de la cuenca del río San Juan del Oro y realizar una modelación hidrológica a escala diaria de toda esta zona, para lo cual se utilizará la delimitación previamente establecidas por la Dirección Ejecutiva de la comisión Trinacional para el desarrollo de la cuenca río Pilcomayo, a la cual se le realizará una modelación hidrológica teniendo en cuenta los datos representativos mensuales para el centroide de cada una de ellas de temperatura, precipitación y evapotranspiración.

El software que será utilizado es el desarrollado en conjunto por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) y la oficina de ingeniería HydroCosmos SA en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL) denominado RS-Minerve (Routing System Minerve). Es un software libre, creado y distribuido desde 2011, siendo capaz de modelar redes hidráulicas e hidrológicas complejas siguiendo un planteamiento semi-distribuido conceptual y diseñado principalmente para la simulación de la formación y propagación de la escorrentía superficial, en la actualidad a pesar de no ser muy antiguo ya más de 10 países lo han utilizado en

diferentes tipos proyectos.

Se aplicará la metodología indicada en la Figura 2.2. Primeramente se delimitara el área de la cuenca hidrológica mediante el uso de imágenes satelitales DEM, encontrándose sus diferentes características para realizar la modelación hidrológica de ésta, teniendo en cuenta los datos meteorológicos e hidrológicos históricos durante los años 2004-2010 de las estaciones con suficiente información, con las cuales se obtuvieron mediante regresión altura-precipitación una representación diaria de la lluvia en la cuenca como también se obtuvieron evapotranspiraciones de las mismas (información proporcionada por el SENAMHI).

**Figura 2.2** Esquema de la metodología a utilizar.



Fuente: Elaboración Propia

Se obtendrán los caudales diarios indirectos que serán de referencia para el modelo, mediante los datos registrados en la estación hidrométrica de El Puente (que son los caudales directos instantáneos), por el método de curva de gastos, la misma consiste en calcular caudales en época de estiaje y época húmeda, generando así un modelo de curva de gasto en función de escalas diarias en diferentes periodos.

Luego para poder identificar y ajustar el modelo hidrológico GR4J efectuado se realizarán las calibraciones del mismo en donde se deben ir variando y estimando los valores de los parámetros respectivos automáticamente para que los resultados generados del modelo entregados por RS-Minerve si se acoplen a la realidad mediante la comparación de la simulación con los registros reales de datos observados, éstos últimos son los encontrados con curvas de gastos  $Q$  vs  $H$ , de la estación hidrométrica de El Puente. Cuando el modelo ya se encuentre calibrado el siguiente paso a efectuar es la validación del mismo, para lo cual se deberá realizar la función objetivo con los indicadores estadísticos del modelo.

Cabe destacar que la calibración automática se realizará mediante el algoritmo SCE- UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) el cual es un método de optimización global que encuentra el mejor conjunto de parámetros según una función objetivo determinada, la cual utiliza índices de eficiencia para estimar la efectividad de la calibración.

## **2.5 Software RS-Minerve**

El software a utilizar es el RS-Minerve (Routing System Minerve) desarrollado en conjunto por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) y la oficina de ingeniería HydroCosmos SA junto con la colaboración de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), creado y distribuido desde 2011, ha sido utilizado para diferentes estudios en varios países como Perú, España, Francia, Suiza, Uganda, Corea del Sur, Inglaterra, Brasil, Túnez y Nepal, y está basado en el mismo concepto que el Routing System II, el cual es un modelo previo también desarrollado por la EPFL (Dubois et al., 2000, García Hernández et al., 2007).

El RS-Minerve es un programa para la simulación de la formación y propagación de la escorrentía superficial. Este modela redes hidráulicas e hidrológicas complejas de acuerdo a un esquema conceptual semidistribuido. Tiene en cuenta procesos hidrológicos comunes tales como fusión de nieve, fusión glaciaria, escorrentía superficial y subterránea, así como

elementos de control hidráulicos como lo son compuertas, reservorios, aliviaderos, desviaciones, uniones, turbinas, bombas e hidroeléctricas.

Contiene variedad de diferentes modelos hidrológicos de simulación precipitación-escorrentía tales como GSM (Glacier and Snowmelt), SOCONT (Soil Contribution), SAC-SMA (Sacramento-Soil Moisture Account), GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journalier) y HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning). Así como otras herramientas útiles donde se destacan **el elemento de estación meteorológica** en donde se ingresan datos como precipitación, temperatura, evapotranspiración, etc, **el consuntivo** donde se pueden definir ciertas demandas de agua específicas comunes como industriales, urbanas, agrarias, **el hidroeléctrico** donde se computa la altura de agua neta y las pérdidas de presión generando resultados de producción energético y la ganancia total teniendo en cuenta un precio de energía a establecer, **el de eficiencia estructural** en el que se calculan las pérdidas de carga en canales, tuberías, etc al considerar un coeficiente de eficiencia y por último **el elemento fuente** en donde se ingresan los datos de valores considerados reales y medidos para tomar como referencia que en este estudio serán los caudales de las estaciones de aforo.

Este software posee una sección avanzada llamada RS-Expert creada especialmente para investigación o estudios complejos, permitiendo una evaluación en profundidad de los resultados hidrológicos e hidráulicos. Ésta sección se compone de 4 módulos:

-El **primer módulo** el cual es el utilizado en este trabajo, es el de calibración automática en el que se puede elegir entre tres tipos de algoritmos los cuales calculan el mejor grupo de parámetros hidrológicos dependiendo de la función objetivo definida. El primero es el SCE-UA a describir en el numeral 2.9 ya que es el más usado para modelos hidrológicos.

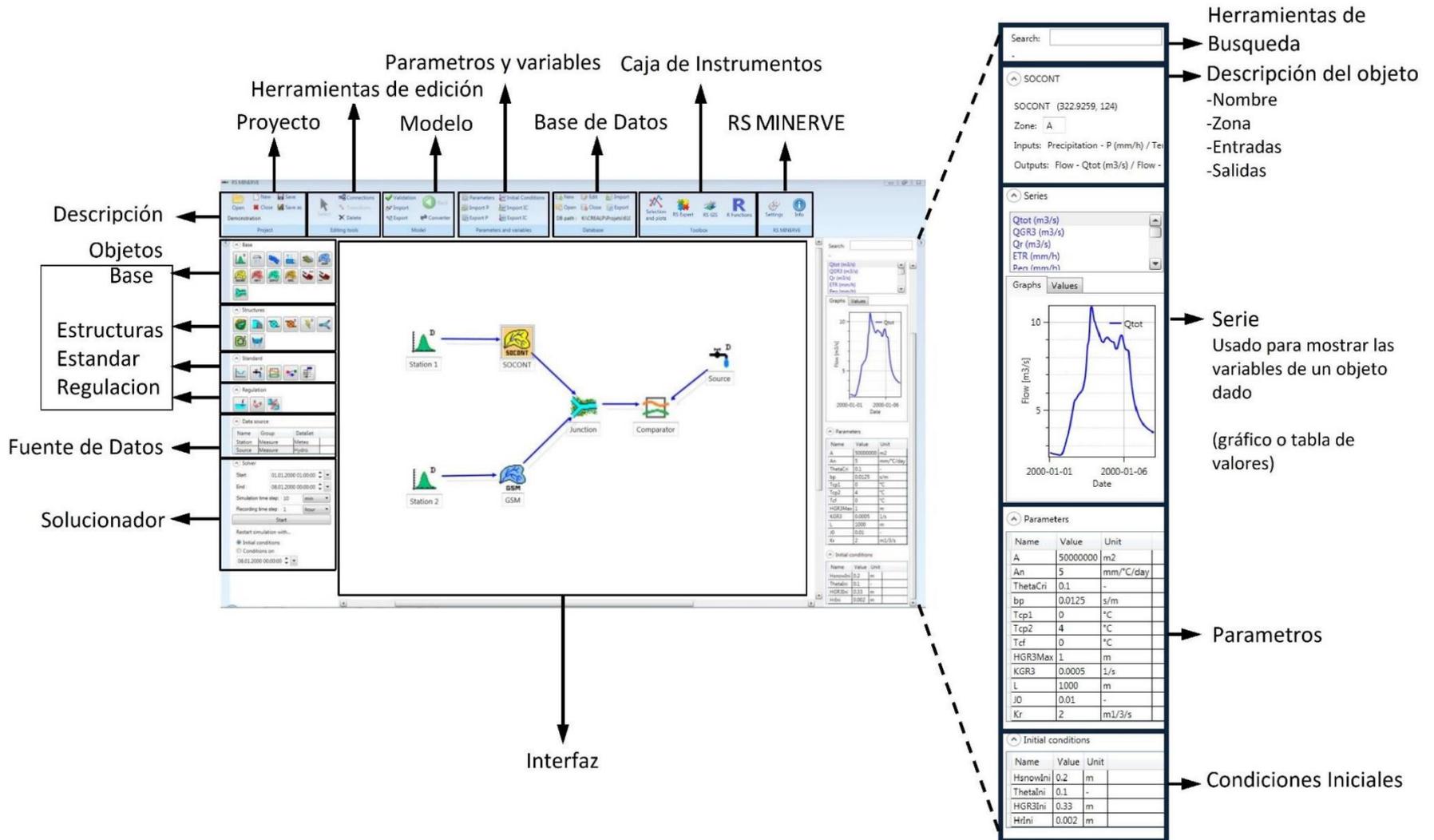
-El **segundo módulo** es el de simulación de escenarios en el que se presenta la posibilidad de simular múltiples escenarios climáticos o varios grupos de parámetros y condiciones iniciales para estudiar la variabilidad y sensibilidad de los resultados del modelo.

-El **tercer módulo** es el de simulación en intervalos de tiempo el cual facilita el análisis de grandes grupos de datos sin sobrecargar la memoria del computador, en donde en vez de utilizar toda la serie histórica de datos solo se utiliza una parte de ella la cual se considere más importante.

-El **cuarto módulo** es la simulación estocástica que es capaz de generar un grupo de

simulaciones basadas en diferentes parámetros o condiciones iniciales con valores ubicados en intervalos aleatorios que deben ser definidos.

**Figura 2.3** Interfaz RS-Minerve y un ejemplo de esquema a utilizar.



Fuente: Elaboración propia con Manual traducido RS-MINERVE

Además, presenta un elemento denominado **comparador** el cual contrasta los resultados de la simulación realizada con los datos reales ingresados en el elemento fuente, mediante 7 tipos de índices de eficiencia los cuales son el coeficiente de Nash, coeficiente de Nash para valores logarítmicos, coeficiente de correlación de Pearson, bias score, raíz relativa del error cuadrático medio (RRMSE), volumen relativo bias y el error pico normalizado (NPE), se describirá mejor en el apartado **2.7** cada uno de esos índices de eficiencia para la modelación.

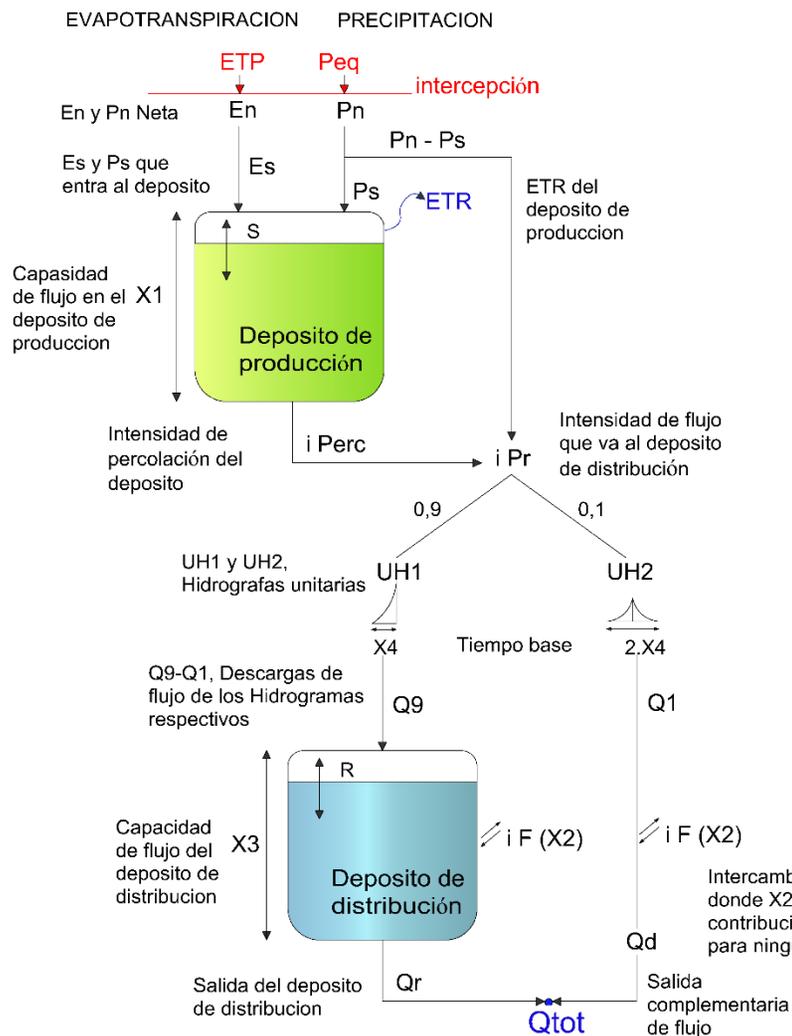
En la anterior Figura 2.3 se presenta la interfaz principal del software RS-Minerve, en donde se ha colocado un esquema simplificado de un ejemplo a utilizar en este estudio para una cuenca, en el cual se aprecian los 4 elementos básicos y fundamentales que se necesitan, siendo la estación meteorológica, la subcuenca tipo GR4J, GSM, SOCONT, SAC-SMA o HBV, la simulación del río 'Lag Time', la demanda, el comparador y la estación de aforo a usar como fuente de datos de referencia.

## **2.6 Modelo GR4J.**

El modelo GR4J cuenta con dos reservorios que se encargan de almacenar la precipitación neta y donde se producen los fenómenos de percolación e infiltración. Los procesos de precipitación sólida no se toman en cuenta en este modelo. Es un modelo hidrológico global con cuatro parámetros desarrollados por (Perrin, 2003). Es un modelo empírico (Figura 2.4), pero su estructura es similar a los modelos conceptuales. Tiene en cuenta la humedad y contiene dos depósitos (producción y distribución). Los hidrogramas unitarios también están asociados para el comportamiento hidrológico de la cuenca.

El modelo GR4J ("Génie Rural à 4 paramètres Journalier") es un modelo determinístico-empírico desarrollado en Francia (Perrin et al., 2003). Realiza la representación de descargas medias diarias con 4 parámetros (Tabla 2.1), y requiere de información de precipitación y evapotranspiración media diaria para generar series de caudales. Este modelo es una versión modificada del modelo GR3J, originalmente propuesto por Edijatno & Michel (1989), el cual más tarde fue mejorado por Nascimento (1995) y Edijatno et al. (1999).

**Figura 2.4** Esquema del Modelo hidrológico de flujo diario GR4J (Ingeniería Rural a 4 parámetros)



$$P_s = \frac{d}{dt} \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n \cdot dt}{X_1}\right)}{1 + \left(\frac{S}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n \cdot dt}{X_1}\right)} \quad \dots[1]$$

$$E_s = \frac{d}{dt} \frac{S \cdot \left(2 - \left(\frac{S}{X_1}\right)\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n \cdot dt}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{E_n \cdot dt}{X_1}\right)} \quad \dots[2]$$

$$iPerc = \frac{d}{dt} (S + (P_s - E_s) \cdot dt) \cdot \left(1 - \left(1 + \left(\frac{4}{9} \cdot \frac{(S + (P_s - E_s) \cdot dt)}{X_1}\right)^4\right)^{-\frac{1}{4}}\right) \quad \dots[3]$$

$$iPr = iPerc + (P_n - P_s) \quad \dots[4]$$

$$Q_9 = 0.9 \cdot \sum_{j=1}^l (UH1_j \cdot iPr_{k-j-l}) \quad \dots[5]$$

$$Q_1 = 0.1 \cdot \sum_{j=1}^m (UH2_j \cdot iPr_{k-j-l}) \quad \dots[6]$$

$$iF = \frac{d}{dt} X_2 \cdot \left(\frac{R}{X_3}\right)^{\frac{7}{2}} \quad \dots[7]$$

$$Qr' = \frac{d}{dt} (R + (Q_9 + iF) \cdot dt) \cdot \left(1 - \left(1 + \left(\frac{R + (Q_9 + iF) \cdot dt}{X_3}\right)^4\right)^{-\frac{1}{4}}\right) \quad \dots[8]$$

$$Qd' = Q_1 + iF \quad \dots[9]$$

$$Qtot = Qr + Qd \quad \dots[10]$$

Fuente: Elaboración propia

### 2.6.1 Resumen del proceso de cálculo del modelo GR4J.

El modelo GR4J está conformado por dos reservorios (Figura 2.4): el primer reservorio relaciona la precipitación ( $P_n$ ) y la evapotranspiración neta ( $E_n$ ) que se origina en la cuenca con la altura del reservorio ( $X_1$ ), fijando la precipitación ( $P_s$ ) y evapotranspiración ( $E_s$ ) que ingresa al reservorio (Ec. 1-2). La respuesta del primer reservorio la constituye la intensidad de flujo generado ( $iPr$ ) dada por la (Ec.4), ella es conformada por la ( $iPerc$ ) y un porcentaje de precipitación que se transforma flujo directo, dado por la diferencia aritmética de la  $P_n$  y  $P_s$ . La  $iPr$  es dividida a razón de 0,9 y 0,1 e ingresadas a dos hidrogramas unitarios HU, siendo el tiempo base de los HU fijada por el parámetro  $X_4$ . El flujo  $Q_9$  del primer hidrograma  $HU_1$  (Ec.5-6) ingresa al segundo reservorio, cuya altura está det. por el parámetro  $X_3$ .

Los procesos de pérdida de escorrentía y aportes de otras cuencas al caudal base están contemplados en este reservorio por medio de la función de cambio  $iF$  (Ec. 7) la cual es controlada por el parámetro  $X_2$  y  $X_3$ . La  $iF$  es responsable de los procesos de infiltración y aporte de flujo a la cuenca. El flujo unitario proveniente del segundo reservorio  $Qr'$  (Ec. 8) más el flujo unitario  $Qd'$  (Ec. 9), originada por la salida del  $HU_2$  y la  $iF$ , conforman la descarga unitaria del modelo. El caudal total ( $Q_{tot}$ ) es posible al multiplicar el área de la cuenca por la descarga unitaria del modelo (Ec.10) <sup>1</sup>

**Tabla 2.1** Lista de parámetros y condiciones iniciales para el modelo GR4J.

Objeto	Nombre	Unid.	Descripción de unidades	Rango regular
GR4J	A	m <sup>2</sup>	Superficie de la cuenca	> 0
	X <sub>1</sub>	m	Capacidad máxima del depósito de producción	0,01-1,2
	X <sub>2</sub>	m	Coefficiente de intercambio de agua, positivo para las contribuciones, negativo para las pérdidas debidas a la infiltración o cero cuando no se produce intercambio	(-0,005-0,003)
	X <sub>3</sub>	m	Capacidad del depósito de distribución	0,01 a 0,5
	X <sub>4</sub>	días	Tiempo base del hidrograma unitario UH	0,5-1,5
	S <sub>Ini</sub>	m	Contenido inicial de agua en el depósito de producción	-
	R <sub>Ini</sub>	m	Nivel de agua inicial en el depósito de distribución	-

Fuente: Elaboración propia con manual RS-MINERVE

<sup>1</sup> Señalo Perrín, 2003, en Astorayme V. Miguel Angel, (Edición 2016), "DESCARGA TEMPORAL DE UN MODELO HIDROLÓGICO A PASO DIARIO ADECUADO EN LA CUENCA DEL RÍMAC, PERÚ", Lima, Perú, XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <https://www.researchgate.net/publication/312312648>

**El parámetro  $X_1$**  (máxima capacidad del depósito de producción). El depósito de producción no tiene un significado físico directo, por tal motivo es difícil interpretar estos resultados en términos físicos, si este parámetro es considerablemente alto, en investigaciones anteriores se ha encontrado que entre mayor sea la precipitación sobre la cuenca, mayor es la capacidad del depósito de producción, considerando la alta variabilidad temporal y espacial de la lluvia cuando se incrementa, el área de la cuenca a lo largo del eje del río y que el campo de la lluvia se aplica a toda la cuenca, hace que se obtengan valores altos del parámetro  $X_1$ , sus valores iniciales pueden encontrarse entre (0,01 a 1,20) en metros o en 5,9 milímetros en caso de trabajar con el caudal específico (litros/seg.km<sup>2</sup>).

**En el parámetro  $X_2$** , El valor positivo muestra aporte del flujo subterráneo al canal, caso contrario cuando es negativo indica que hay perdidas de flujo subterráneo, o cero cuando no hay intercambio de aguas subterráneas, sus valores iniciales pueden encontrarse entre (-0,005 a 0,003) en metros o como 0,0 milímetros en caso de trabajar con el caudal específico (litros/seg.km<sup>2</sup>).

**El parámetro  $X_3$** , que representa el almacenamiento hidráulico de distribución, es decir, en los canales, presenta dos tendencias. La primera es que cuanto mayor son los valores de este parámetro entonces corresponden a zonas altas de la cuenca en la cual no hay un alto efecto de urbanización. Comparativamente se observa una relación inversa con el parámetro  $X_1$ . Los valores bajos de  $X_1$  están acompañados de valores altos de  $X_3$  y viceversa. Se puede entender que en zonas urbanas el parámetro de almacenamiento hidráulico de distribución  $X_3$  es bajo y en zonas altas de la cuenca el río está menos intervenido, siendo mayor el valor de este, sus valores iniciales pueden encontrarse entre (0,01 a 0,5) en metros o como 4,5 milímetros en caso de trabajar con el caudal específico (litros/seg.km<sup>2</sup>).

**El parámetro  $X_4$**  que refleja el tiempo de respuesta de la cuenca en convertir la lluvia a caudal el cual presenta valores de 0,5 a 1,5 días. Es importante observar que prácticamente independiente del área de la cuenca el parámetro tiene valores muy similares, sus valores iniciales pueden encontrarse entre (0,5 a 1,5) en metros o como 0,2 días en caso de trabajar con el caudal específico (litros/seg.km<sup>2</sup>).<sup>2</sup>

## 2.6.2 Descripción detallada del proceso de cálculo del modelo GR4J.

---

<sup>2</sup> Señalo Perrín, 2003, en Roldán Ernesto, (Edición 2007), "CALIBRACIÓN DE MODELO LLUVIA-ESCORRENTÍA AGREGADO GR4J, APLICACIÓN: CUENCA DEL RÍO ABURRÁ", Medellín, Colombia, Revista DYNA, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/912/1346>

### A. Determinación de la precipitación y evapotranspiración potencial neta.

La primera operación consiste en restar la evapotranspiración potencial de la precipitación, con el fin de determinar una precipitación neta ( $P_n$ ) y una capacidad de evapotranspiración neta ( $E_n$ ) de acuerdo con las ecuaciones (1.1). En el modelo GR4J, esta operación es calculada como si la capacidad de intercepción fuera cero:

$$\begin{array}{ll} P_n = P - ETP & \text{si } P \geq ETP \\ E_n = 0 & \\ \\ P_n = 0 & \text{si } P < ETP \\ E_n = ETP - P & \end{array} \quad \text{Ec. (1.1)}$$

Donde:

P: precipitación [L / T].

$P_n$ : precipitación neta [L / T].

ETP: Evapotranspiración Potencial [L / T].

$E_n$ : Evapotranspiración neta [L / T].

### B. Almacenamiento de producción.

En el caso en que ( $P_n$ ) no es cero, una parte ( $P_s$ ) de  $P_n$  entra al depósito de producción ( $S$ ) tal como se presenta en la ecuación (1.2). ( $P_s$ ) es determinada como una función del nivel ( $S$ ) en el depósito, donde  $X_1$  (mm) es la máxima capacidad del depósito de producción.

$$P_s = \frac{d}{dt} \frac{X_1 \cdot \left(1 - \left(\frac{S}{X_1}\right)^2\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n \cdot dt}{X_1}\right)}{1 + \left(\frac{S}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{P_n \cdot dt}{X_1}\right)} \quad \text{Ec. (1.2)}$$

Donde:

$P_s$ : Intensidad de la lluvia que alimenta el depósito de producción [L / T].

$X_1$ : Capacidad máxima del depósito de producción [L].

$S$ : Contenido de agua en el depósito de producción [L].

$P_n$ : precipitación neta [L / T].

Del mismo modo, cuando ( $E_n$ ) no es cero, una tasa de evaporación ( $E_s$ ) es determinada como una función del nivel en el almacenamiento de producción con el fin de calcular ( $E_s$ ) de agua que se evaporara del depósito de producción, tal como se describe en la ecuación (1.3).

$$E_s = \frac{d}{dt} \frac{S \cdot \left(2 - \left(\frac{S}{X_1}\right)\right) \cdot \tanh\left(\frac{En \cdot dt}{X_1}\right)}{1 + \left(1 - \frac{S}{X_1}\right) \cdot \tanh\left(\frac{En \cdot dt}{X_1}\right)}$$

Ec. (1.3)

Donde:

Es: Tasa de evapotranspiración del depósito de producción [L / T].

X<sub>1</sub>: Capacidad máxima del depósito de producción [L].

S: Contenido de agua en el depósito de producción [L].

En: Evapotranspiración neta [L / T].

De esta forma el contenido de agua en el depósito de producción se actualiza como:

$$S = S - E_s + P_s$$

Es importante resaltar que S nunca puede exceder a X<sub>1</sub>. Una cantidad de la percolación (iPerc) fluye desde el depósito de producción, este valor se calcula de la siguiente manera:

$$iPerc = \frac{d}{dt} (S + (P_s - E_s) \cdot dt) \cdot \left(1 - \left(1 + \left(\frac{4}{9} \cdot \frac{(S + (P_s - E_s) \cdot dt)}{X_1}\right)^4\right)^{\frac{1}{4}}\right)$$

Ec. (1.4)

Donde:

iPerc: intensidad de percolación [L / T].

De la expresión anterior se concluye que la percolación no contribuye mucho al caudal, por esta razón es importante principalmente para la simulación de eventos mínimos. El valor de (iPerc) es siempre menor que (S). El nuevo nivel en el depósito de producción queda definido como la variación en el depósito de (S) según la Ec. (1.5):

$$\begin{aligned} dS/dt &= P_s - E_s - iPerc \\ S &\geq 0 \end{aligned}$$

Ec. (1.5)

### C. Distribución lineal (depósito de distribución) con hidrógrafas unitarias

La cantidad de agua (iPr) que va al depósito de distribución, se proporciona por la Ec. (1.6):

$$iPr = iPerc + (P_n - P_s)$$

Ec. (1.6)

Donde:

iPr: intensidad que fluye al depósito de distribución [L / T].

El valor de Pr se divide en dos componentes de flujo: el 90% de Pr se distribuye por medio de una hidrógrafa unitaria UH1 y luego por un depósito de distribución. El 10% restante de Pr es distribuido por medio de una hidrógrafa unitaria UH2. Con UH1 y UH2, se puede simular el tiempo de rezago entre el evento de lluvia y el caudal pico resultante. Las ordenadas de ambas hidrógrafas son usadas en el modelo para distribuir la lluvia efectiva sobre varios intervalos de tiempo sucesivos. UH1 y UH2 dependen del mismo parámetro  $X_4$  expresado en días, sin embargo, UH1 tiene un tiempo base de  $X_4$  días, mientras que UH2 tiene un tiempo base de  $2 \cdot X_4$  días. El parámetro  $X_4$  puede tomar valores reales y debe ser mayor de 0,5 días.

En su forma discreta, las hidrógrafas unitarias UH1 y UH2 tienen n y m ordenadas respectivamente, donde n y m son los enteros más pequeños que exceden  $X_4$  y  $2 \cdot X_4$  respectivamente. Las ordenadas de ambas hidrógrafas se derivan de las curvas-S correspondientes (proporción acumulada de la entrada con el tiempo) denotadas por SH1 y SH2 respectivamente. SH1 está definida a lo largo del intervalo de tiempo t de la siguiente forma:

$SH1_t = 0 \quad si \quad t \leq 0$ $SH1_t = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}} \quad si \quad 0 < t < X_4$ $SH1_t = 1 \quad si \quad t \geq X_4$	Ec. (1.7)
---	-----------

Donde:

SH1: hidrograma 1 de S [-]

t: paso de tiempo [T]

$X_4$ : tiempo base [T]

SH2 es definida similarmente:

$SH2_t = 0$ $SH2_t = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$ $SH2_t = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(2 - \frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$ $SH2_t = 1$	$si \quad t \leq 0$ $si \quad 0 < t < X_4$ $si \quad X_4 < t < 2 \cdot X_4$ $si \quad t \geq 2 \cdot X_4$	Ec. (1.8)
---	---	-----------

Donde:

SH2: hidrograma 2 de S [-]

t: paso de tiempo [T]

X<sub>4</sub>: tiempo base [T]

Finalmente, las ordenadas de UH1 y UH2 se calculan como:

$$UH1_j = SH1_j - SH1_{j-1}$$

Ec. (1.9)

$$UH2_j = SH2_j - SH2_{j-1}$$

Ec. (1.10)

Donde:

SH1: hidrograma 1 de S [-]

SH2: hidrograma 2 de S [-]

UH1: hidrograma de SH1 [-]

UH2: hidrograma de SH2 [-]

j: número entero [T]

Luego, en cada paso de tiempo k, los flujos de salida Q<sub>9</sub> y Q<sub>1</sub> de los dos hidrogramas corresponden a la convolución de las intensidades anteriores de acuerdo con la repartición proporcionada por el hidrograma discretizado y se calcula como se presenta en las ecuaciones (1.11) y (1.12).

$$Q_9 = 0.9 \cdot \sum_{j=1}^l (UH1_j \cdot iPr_{k-j-l})$$

Ec. (1.11)

$$Q_1 = 0.1 \cdot \sum_{j=1}^m (UH2_j \cdot iPr_{k-j-l})$$

Ec. (1.12)

Donde:

Q<sub>9</sub>: flujo unitario desde el hidrograma UH1 [L / T].

Q<sub>1</sub>: flujo unitario desde el hidrograma UH2 [L / T].

j: día (entero) [T].

l = valor entero de X<sub>4</sub> + 1 [T].

m = valor número entero de 2 \* X<sub>4</sub> + 1 [T].

iPr: intensidad que fluye al depósito de enrutamiento [L / T].

#### D. Intercambio de agua en la cuenca.

Posteriormente, se calcula un término ( $iF$ ) que actúa en ambas componentes de flujo, que junto con el exterior no atmosférico produce un intercambio de agua subterránea de acuerdo con (1.13), (la interpretación física de esta función no es directa).

$$iF = \frac{d}{dt} X_2 \cdot \left( \frac{R}{X_3} \right)^{\frac{7}{2}}$$

Ec. (1.13)

Donde:

$iF$ : función de intercambio [L / T]

$X_2$ : coeficiente de intercambio de agua, positivo para las contribuciones, negativo para las pérdidas debidas a la infiltración o cero cuando no se produce intercambio [L]

$R$ : nivel de agua en el depósito de distribución [L]

$X_3$ : capacidad del depósito de distribución [L]

$R$  es el nivel en el tanque de distribución,  $X_3$  es la capacidad de referencia y  $X_2$  es el coeficiente de intercambio. El parámetro  $X_2$  puede ser positivo en el caso en que se importa agua, negativo en el caso en que hay pérdidas, o cero cuando no hay intercambio de agua. Entre mas alto el nivel en el tanque de distribución mayor es el intercambio. En valor absoluto,  $F$  no puede ser mayor que  $X_2$ , puesto que el coeficiente de intercambio representa la máxima cantidad de agua que puede ser adicionada (o liberada) a (de) cada componente de flujo, cuando el nivel en el tanque de distribución es igual a  $X_3$ .

#### E. Almacenamiento de distribución no lineal.

Luego, el depósito de enrutamiento ( $R$ ) se vacía mediante una descarga de enrutamiento ( $Qr'$ ) como se describe en la ecuación (1.14). Donde ( $Qr'$ ) siempre es menor que ( $R$ ).

$$Qr' = \frac{d}{dt} (R + (Q9 + iF) \cdot dt) \cdot \left( 1 - \left( 1 + \left( \frac{R + (Q9 + iF) \cdot dt}{X_3} \right)^4 \right)^{-\frac{1}{4}} \right)$$

Ec. (1.14)

$Qr'$ : caudal de salida del depósito de distribución [L / T].

$iF$ : función de intercambio [L / T]

$R$ : nivel de agua en el depósito de distribución [L]

$X_3$ : capacidad de referencia del depósito de distribución [L]

$Q9$ : flujo unitario desde el hidrograma UH1 [L / T].

Aunque al comienzo de un intervalo de tiempo el tanque puede recibir una cantidad de agua mayor que el déficit de saturación  $X_3 - R$ , el nivel en el tanque nunca puede exceder la capacidad  $X_3$  al final del intervalo de tiempo. Por esta razón, la capacidad  $X_3$  es llamada la capacidad máxima diaria. Este tanque de distribución está en la capacidad de simular recesiones cuando sea necesario.

La variación del nivel de agua en el depósito de distribución se deduce:

$$\begin{aligned} dR/dt &= Q_9 - iF - Q_r \\ R &\geq 0 \end{aligned} \quad \text{Ec. (1.15)}$$

### F. Caudal Total.

La salida  $Q_1$  proveniente del hidrograma UH2, también está sujeta al intercambio de agua  $iF$ , de esta forma la componente  $Q_d'$  queda definida de la siguiente forma:

$$Q_d' = Q_1 + iF \quad \text{Ec. (1.16)}$$

Donde:

$Q_d'$ : salida complementaria unitaria [L / T].

Finalmente, las salidas de modelo se calculan como se presentan en las ecuaciones (1.17) e (1.18) y el flujo total en la salida,  $Q_{tot}$ , como se presenta en la ecuación (1.19):

$$Q_r = Q_{r'} \cdot A \quad \text{Ec. (1.17)}$$

$$Q_d = Q_d' \cdot A \quad \text{Ec. (1.18)}$$

$$Q_{tot} = Q_r + Q_d \quad \text{Ec. (1.19)}$$

Donde:

$Q_r$ : salida del depósito de enrutamiento

$A$ : superficie de la cuenca [ $L^2$ ]

$Q_d$ : flujo de salida complementario [ $L^3 / T$ ]

$Q_{tot}$ : salida total [ $L^3 / T$ ].

Las variables asociadas a este modelo son SIni y RIni. Los parámetros a ajustar son X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub>, X<sub>3</sub> y X<sub>4</sub>. El parámetro A se supone que es constante después de su cálculo. Las entradas del modelo son la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP). La salida es la descarga total en la salida del modelo (Qtot).<sup>3</sup>

## 2.7 OBJETO COMPARADOR – FUNCIONAMIENTO DE INDICADORES.

El objeto Comparador  proporciona siete valores de indicadores, que se presentan a continuación.

### Indicador 1. Coeficiente Nash

Los criterios de Nash-Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) se utilizan para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos (Ajami et al., 2004; Schaefli y otros, 2005; Jordan, 2007; Viviroli et al., 2009; García Hernández et al. al., 2011).<sup>4</sup> Se define como se presenta:

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2} \quad \text{Ec. (1.20)}$$

Donde:

Nash: Nash-Sutcliffe coeficiente de eficiencia de modelo [-]

Q<sub>sim t</sub>: descarga simulada en el tiempo [L<sup>3</sup> / T]

Q<sub>ref, t</sub>: descarga observada en el tiempo t [L<sup>3</sup> / T]

$\bar{Q}_{ref}$ : descarga observada promedio para el período considerado [L<sup>3</sup>/ T]

Varía de -∞ a 1, donde 1 representa el mejor rendimiento del modelo y cero el mismo rendimiento que asumir el promedio de todas las observaciones en cada paso de tiempo.

### Indicador 2. Coeficiente de Nash para valores de logaritmo

El coeficiente de Nash-Sutcliffe para valores de flujo logaritmo (Nash-ln) se utiliza para evaluar el rendimiento de modelos hidrológicos para flujos bajos (Krause et al., 2005;

<sup>3</sup> García J., Paredes J., Foehn A. and B. Roquier, (2015), "RS MINERVE – Technical manual v.2.1", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://www.hydro10.org/tools/>

<sup>4</sup> Señalo Nash y Sutcliffe, 1970, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

Nóbrega et al., 2011). Se define como se presenta:

$$Nash-ln = 1 - \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{sim,t}) - \ln(Q_{ref,t}))^2}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (\ln(Q_{ref,t}) - \ln(\bar{Q}_{ref}))^2} \quad \text{Ec. (1.21)}$$

Donde:

Nash-ln : coeficiente Nash-Sutcliffe para valores log [-].

Varía de  $-\infty$  a 1, donde 1 representa el mejor rendimiento del modelo.

### Indicador 3. Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson muestra la covariabilidad de las descargas simuladas y observadas sin penalizar el sesgo .<sup>5</sup> Se define como se presenta:

$$Pearson = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim}) \cdot (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})}{\sqrt{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - \bar{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t} - \bar{Q}_{ref})^2}} \quad \text{Ec. (1.22)}$$

Con:

Pearson: coeficiente de correlación de Pearson [-]

$\bar{Q}_{sim}$ : descarga promedio simulada para el período considerado [ $L^3/T$ ]

Varía de -1 a 1, y 1 representa el mejor rendimiento del modelo.

### Indicador 4. Coeficiente de Eficiencia Kling-Gupta

El coeficiente de Kling-Gupta (Gupta et al., 2009) proporciona un indicador que facilita el análisis global basado en diferentes componentes (correlación, sesgo y variabilidad) para problemas de modelación hidrológica. Kling et al. (2012) presentaron una versión revisada de este indicador, para garantizar que las razones de sesgo y variabilidad no tengan correlación cruzada. Esta actualización se propone como indicador en RS MINERVE.

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad \text{Ec. (1.23)}$$

Donde:

<sup>5</sup> Señalo AghaKouchak y Habib, 2010; Wang et al., 2011, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

KGE': estadística KGE modificada

r: coeficiente de correlación entre valores simulados y de referencia

$\beta$ : relación entre la media de los valores simulados y la media de los valores de referencia

$\gamma$ : relación de variabilidad, es decir, relación entre el coeficiente de variación de los valores simulados y el coeficiente de variación de los de referencia.

Varía de 0 a 1, y 1 representa el mejor rendimiento.

### Indicador 5. Puntuación de Parcialidad

El Bias Score (BS) es una estimación simétrica del emparejamiento entre la simulación promedio y la observación promedio.<sup>6</sup> Se define como se presenta:

$$BS = 1 - \left[ \max\left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{ref}}, \frac{\bar{Q}_{ref}}{\bar{Q}_{sim}}\right) - 1 \right]^2 \quad \text{Ec. (1.24)}$$

Donde:

BS: puntaje de parcialidad [-].

Varía de 0 a 1, y 1 representa el mejor rendimiento del modelo.

### Indicador 6. Error cuadrático medio de raíz relativa

El Error cuadrático medio de raíz relativa (RRMSE) se define como el RMSE normalizado a la media de los valores observados (Feyen et al., 2000; El-Nasr et al., 2005; Heppner et al., 2006) y se presenta:

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})^2}{n}}}{\bar{Q}_{ref}} \quad \text{Ec. (1.25)}$$

Donde:

RRMSE: RMSE relativo [-]

n: número de valores [-].

<sup>6</sup> Señalo Wang et al., 2011, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

Varía de 0 a  $+\infty$ . Cuanto menor sea el RRMSE, mejor será el rendimiento del modelo.

### Indicador 7. Volumen relativo de Parcialidad

El sesgo de volumen relativo (RVB, a veces denominado de manera diferente, corresponde en este caso al error relativo entre los volúmenes simulados y observados durante el período estudiado (Ajami y otros, 2004; Schaepli y otros, 2005; Moriasi et al., 2007; AghaKouchak y Habib, 2010).

$$RVB = \frac{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{sim,t} - Q_{ref,t})}{\sum_{t=t_i}^{t_f} (Q_{ref,t})} \quad \text{Ec. (1.26)}$$

Donde:

RVB: sesgo de volumen relativo entre pronóstico y observación para el período considerado.

El RVB varía de -1 a  $+\infty$ . Un índice cercano a cero indica un buen rendimiento de la simulación. Los valores negativos se devuelven cuando la descarga es simulada, en promedio, menor que el promedio de la descarga observada (modelo de déficit), mientras que los valores positivos significan lo contrario (modelo de excedente).<sup>7</sup>

### Indicador 8. Error pico normalizado

El Error máximo normalizado (NPE) indica el error relativo entre los flujos picos simulados y observados (Masmoudi y Habaieb, 1993; Sun y al, 2000; Ajami y al, 2004; Gabellani y otros, 2007). Se calcula de acuerdo las ecuaciones:

$$NPE = \frac{S_{\max} - R_{\max}}{R_{\max}}$$

$$S_{\max} = \bigvee_{t=t_i}^{t_f} Q_{sim,t}$$

$$R_{\max} = \bigvee_{t=t_i}^{t_f} Q_{ref,t}$$

Ec. (1.27)

Donde:

NPE: error relativo entre la descarga máxima simulada y la observada [-]

S max : descarga máxima simulada para el período estudiado [ $L^3 / T$ ]

<sup>7</sup> García J., Paredes J., Foehn A. and B. Roquier, (2015), "RS MINERVE – User's manual v.2.1", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://www.hydro10.org/tools/>

R max : descarga máxima observada para el período estudiado [ $L^3 / T$ ]

El NPE varía de -1 a  $+\infty$ . Los valores negativos se devuelven cuando la descarga máxima simulada es inferior a la observada, mientras que los valores positivos significan lo contrario. Los valores cercanos a cero indican un buen rendimiento de los picos simulados con respecto a los observados.

En la Tabla 2.2 se puede observar los valores de los indicadores para la comparación de los caudales de referencia y simulados.

**Tabla 2.2** Valores ideales para los indicadores estadísticos

Indicador	Peso	Rango de valores	Valor ideal
Nash	w 1	$-\infty$ a 1	1
Nash-In	w 2	$-\infty$ a 1	1
Coefficiente de correlación de Pearson	w 3	-1 a 1	1
Eficiencia de Kling-Gupta (KGE)	w 4	$-\infty$ a 1	1
Puntuación de sesgo (BS)	w 5	0 a 1	1
Error cuadrático medio relativo de raíz (RRMSE)	w 6	0 a $+\infty$	0
Parcial Volume Bias (RVB)	w 7	$-\infty$ a $+\infty$	0
Error máximo normalizado (NPE)	w 8	$-\infty$ a $+\infty$	0

Fuente: Manual traducido- RS Minerve

## 2.8 Función objetivo.

La función objetivo es utilizada para evaluar los resultados de las simulaciones hidrológicas por medio de índices de eficiencia.

Muchos hidrólogos llegan a la misma conclusión en la que la función objetivo debe depender del objetivo de la modelación, ya que muchos índices de eficiencia están a favor de diferentes comportamientos y componentes hidrológicos (Cheng, 2015).

Es decir que sería mejor combinar los índices de eficiencia utilizando una optimización multiobjetivo para calibrar el modelo hidrológico, ya que no se sabe a ciencia cierta que índice sea el más apropiado para nuestro estudio y una sola medida de bondad de ajuste puede ser inapropiado (Legates y McCabe, 1999).

Con lo cual para este trabajo se utilizará la combinación de 4 índices de eficiencia (los cuales se explicarán posteriormente), para así garantizar un mejor ajuste y no asignarle una mayor o menor importancia a algunos comportamientos como los flujos altos, bajos, linealidad de series, etc, asignándoles el mismo peso a cada índice es decir un 25% para lograr una media ponderada de la siguiente manera:

$$FO = (Nash * 0,25) + (Nashln * 0,25) + (Pearson * 0,25) + (BS * 0,25) \quad \text{Ec. (1.28)}$$

Siendo:

FO: Función objetivo

Nash: Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe

Nash-ln: Coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe para valores logarítmicos

Pearson: Coeficiente de correlación de Pearson

BS: Bias Score

Para clasificar y decidir si una calibración y/o validación es buena o no, tiende a ser muy subjetivo y se definen por ciertos rangos de evaluación, diferentes autores plantean numerosas clasificaciones siendo muy diversas, pero en sí parecidas unas de otras, se tuvo en cuenta varias de ellas provenientes de Van Dijk et al (2008) y Moriasi et al (2007) para dar lugar a la Tabla 2.3 tanto para la función objetivo como para cada índice de eficiencia individual:

**Tabla 2.3** Rangos de evaluación para calibración y validación.

Calibración	Validación	Resultado
0,00-0,29	0,00-0,19	Malo
0,30-0,49	0,20-0,39	Regular
0,50-0,69	0,40-0,59	Aceptable
0,70-0,90	0,60-0,80	Bueno
0,91-0,95	0,81-0,90	Muy Bueno
0,96-1,00	0,90-1,00	Excelente

Fuente: Van Dijk – Moriasi (2007)

La evaluación del comportamiento y desempeño de un modelo hidrológico es comúnmente realizada a través de comparaciones entre los flujos simulados y observados, mediante índices de eficiencia los cuales son comúnmente utilizados para establecer una evaluación objetiva de su cercanía.

Los índices de eficiencia son medidas matemáticas de lo bien que una simulación del modelo se ajusta a las observaciones disponibles (Beven, 2001), para así evaluar la precisión de la simulación por el medio de las diferencias entre lo predicho y los valores observados.

Existen varias razones para las cuales se necesita evaluar el rendimiento del modelo como lo son proporcionar un estimado cuantitativo de la habilidad el modelo para reproducir los comportamientos de la cuenca históricos y futuros, así como comparar el modelo actual con otros resultados de estudios anteriores.

Así como lo anterior, Krause et al (2005) enuncia que el enfoque más fundamental para evaluar el rendimiento del modelo en términos de comportamiento es por medio de la inspección visual de los hidrogramas observados y los simulados, sin embargo, para una evaluación más objetiva y eficaz, generalmente se requiere el uso de estimados matemáticos del error entre las series.

## **2.9 Algoritmo de calibración SCE-UA "Evolución Complejo Combinado - Universidad de Arizona"**

Los algoritmos de calibración son métodos que ayudan a mejorar y perfeccionar los parámetros de los modelos, mediante el uso de diferentes metodologías de búsqueda como directa, por gradiente, aleatoria, algoritmos de inicio múltiple o mezcla de grupos, ejemplos de ellos lo son el algoritmo de Hookes & Jeeves, Rosenbrock, Simplex y uno de los más completos y conocidos el SCE-UA aquí tratado.

El algoritmo de calibración SCE-UA (Shuffled Complex Evolution-University of Arizona) es un método de optimización global desarrollado en la Universidad de Arizona en 1992 (Duan et al., 1992, 1993, 1994) robusto, flexible y eficiente para la calibración de modelos precipitación-escorrentía. Fue diseñado específicamente para lidiar con las peculiaridades encontradas en la calibración de modelos conceptuales de cuencas y puede ser utilizado para manejar problemas de optimización no lineal con elevados parámetros. El objetivo es encontrar el mejor conjunto de parámetros para la función objetivo en el espacio factible, iniciando con una muestra aleatoria de puntos distribuidos por todo ese espacio y usa una adaptación del esquema de búsqueda del Simplex Downhill (Nelder y Mead, 1965) llamado CCE (Competitive Complex Evolution) para evolucionar continuamente la población hacia

mejores soluciones en el espacio de búsqueda, renunciando progresivamente a la ocupación de regiones con una menor probabilidad.<sup>8</sup>

Parte de diferentes puntos de búsqueda (individuos) que se organizan por equipos (complex). De esta manera, la búsqueda de la solución global óptima se plantea como un proceso evolutivo (evolution) basado en tres pasos, la reflexión, contracción y mutación, existiendo además mezcla de equipos (shuffled).<sup>9</sup>. Una descripción general del método se presentará más adelante en la Figura 2.5

### **2.9.1 Pasos a seguir para la calibración automática por el algoritmo SCE-UA.**

#### **P1. Generar una muestra**

Se genera una población de muestra con NPT (número de puntos en la población de la muestra) puntos en el espacio de parámetros factibles y se calcula la función objetivo en cada punto.

#### **P2. Clasificación de los puntos**

Se ordenan los puntos NPT crecientemente con el fin de aumentar la función objetivo, con lo que el primer punto tiene la menor función objetivo y el último la mayor.

#### **P3. División en grupos**

Se dividen los puntos NPT en NGS (número de grupos en una muestra de población) grupos, donde cada uno contiene NPG (número de puntos en cada grupo) puntos. Los grupos se dividen de tal manera de que el primer grupo contiene los puntos que se encuentran las posiciones  $NGS^* (k-1) + 1$ , el segundo grupo contiene todos los que se encuentran en  $NGS^* (k-1) + 2$ , y así sucesivamente, donde  $k = 1, 2, \dots, NPG$ .

#### **P4. Evolución de cada grupo**

Cada grupo evoluciona de forma independiente tomando NSPL (número de etapas de

---

<sup>8</sup> Señalo Mariani y dos Santos Coelho., 2011, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

<sup>9</sup> Señalo Lerma, 2013, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politécnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

evolución permitido para cada grupo) etapas de evolución, de acuerdo al algoritmo CCE (Competitive Complex Evolution) basándose en la reflexión, contracción y mutación<sup>10</sup>:

- a) Construir un subgrupo de forma aleatoria, seleccionando NPS puntos de una distribución de probabilidad trapezoidal. El mejor punto (con el mayor valor de la función objetivo) tiene la mayor oportunidad de ser elegido para formar un subgrupo y el peor punto tiene una probabilidad menor.
- b) Identificar el peor punto del subgrupo y calcular el centroide del subgrupo sin incluir el punto peor
- c) Reflexión: Intentar reflejar el peor punto a través del centroide. Si el nuevo punto generado está dentro del espacio factible, ir al paso d), de lo contrario ir al paso f).
- d) Si el nuevo punto generado es mejor que el peor punto, reemplazar el peor punto con nuevo punto e ir al paso g), de lo contrario ir al paso e).
- e) Contracción: Intentar un paso de contracción calculando un punto a medio camino entre el centroide y el peor punto. Si el punto de contracción es mejor que el peor punto, reemplazar el peor punto por el de contracción e ir al paso g), de lo contrario ir al paso f).
- f) Mutación: Generar aleatoriamente un punto dentro del espacio factible. Reemplazar el peor punto por el punto aleatoriamente generado.
- g) Repita los pasos b)-f)  $\alpha$  veces, donde  $\alpha \geq 1$  es el número de descendientes o nuevos puntos generados por el mismo subgrupo.
- h) Repita los pasos a)-g) NSPL veces, donde  $NSPL \geq 1$ .

### **P5. Mezcla de grupos**

Se combinan los puntos de los grupos evolucionados en una sola muestra de población, ordenar la población en orden creciente según la función objetivo y volver a hacer la mezcla en grupos NGS de acuerdo al procedimiento del paso 3.

### **P6. Comprobación de la convergencia**

Si se satisfacen los criterios previamente establecidos de convergencia se puede parar, de lo contrario seguir.

- Existen tres criterios de convergencia:

---

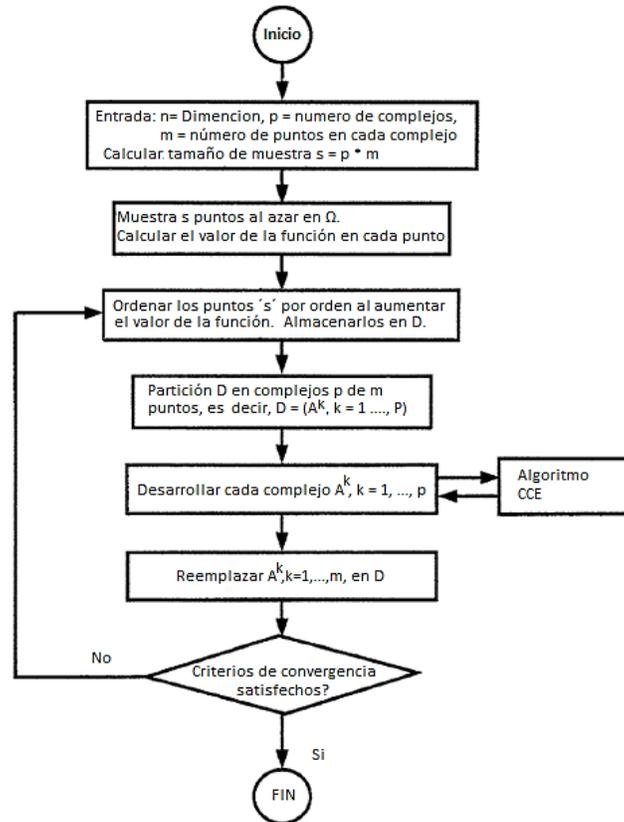
<sup>10</sup> Señalo Duan ,1994, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), " MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politecnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

- El máximo número de iteraciones definidas, MAXM.
- El número de bucles de mezcla KSTOP en el cual la función objetivo debe cambiar en un cierto porcentaje PCENTE antes de que la optimización termine.
- El valor de la función objetivo se estanque y no mejore en un cierto porcentaje.
- El parámetro PEPS el cual proporciona un indicador si la convergencia del parámetro es alcanzada, comparando el valor de PEPS con la media geométrica normalizada del rango de los parámetros

### P7. Comprobación de la reducción del número de grupos

Si MINGS (número mínimo requerido de grupos) es menor que NGS, se elimina el grupo con el rango más bajo en sus puntos, se establece  $NGS = NGS - 1$  y  $NPT = NGS * NPG$ , y se regresa al paso 4. Si  $MINGS = NGS$ , se regresa al paso 4.

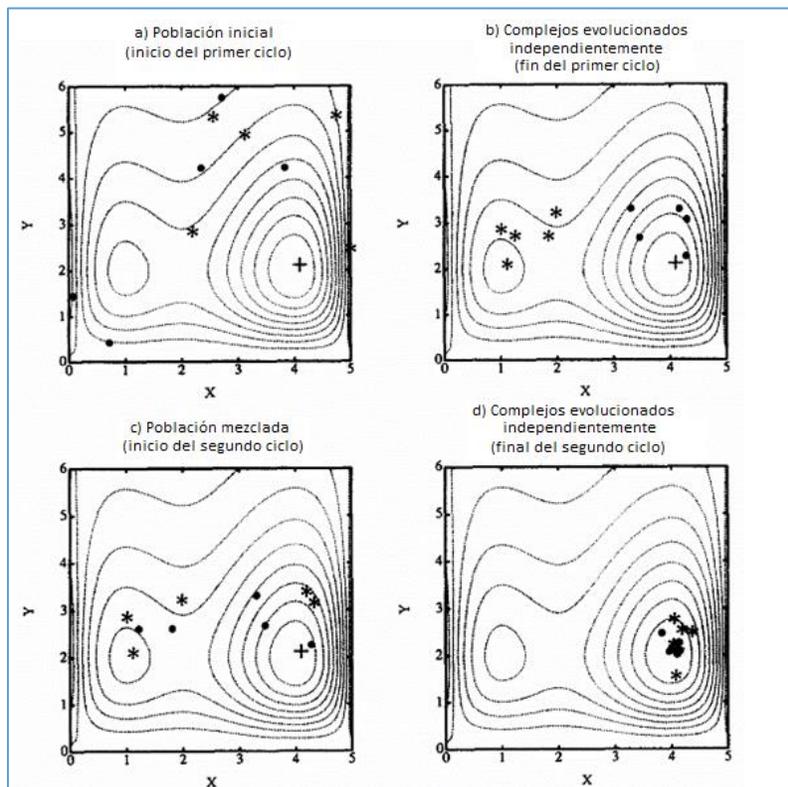
**Figura 2.5** Descripción del método SCE-UA. Con  $V=n$ ,  $NGS=p$ ,  $NPG=m$  y  $NPT=s$



Fuente: Duan et al., (1993) y García Hernández, (2015).

En la Figura 2.6 se muestra gráficamente un ejemplo del proceso del método SCE-UA. Se tiene una población de muestra, conteniendo  $NPT=10$  puntos, divididos en  $NGS=2$  grupos, cada grupo contiene  $NPG=5$  puntos que están marcados por  $(\bullet)$  y  $(*)$  respectivamente

presentados en la Figura 2.6a. Cada grupo lleva un proceso independiente de evolución mostrado en la Figura 2.6b. de acuerdo al algoritmo CCE donde el grupo marcado con (\*) converge hacia el óptimo local ubicado en (1,2) y el grupo marcado con (•) converge hacia el óptimo global ubicado en (4,2). Posteriormente se mezclan los puntos en dos nuevos grupos (•) y (\*) y quedan como en la Figura 2.6c, para luego volver a evolucionar cada grupo independientemente y finalizar como se muestra en la Figura 2.6d en donde ambos han convergido hacia el óptimo global ubicado en (4,2).



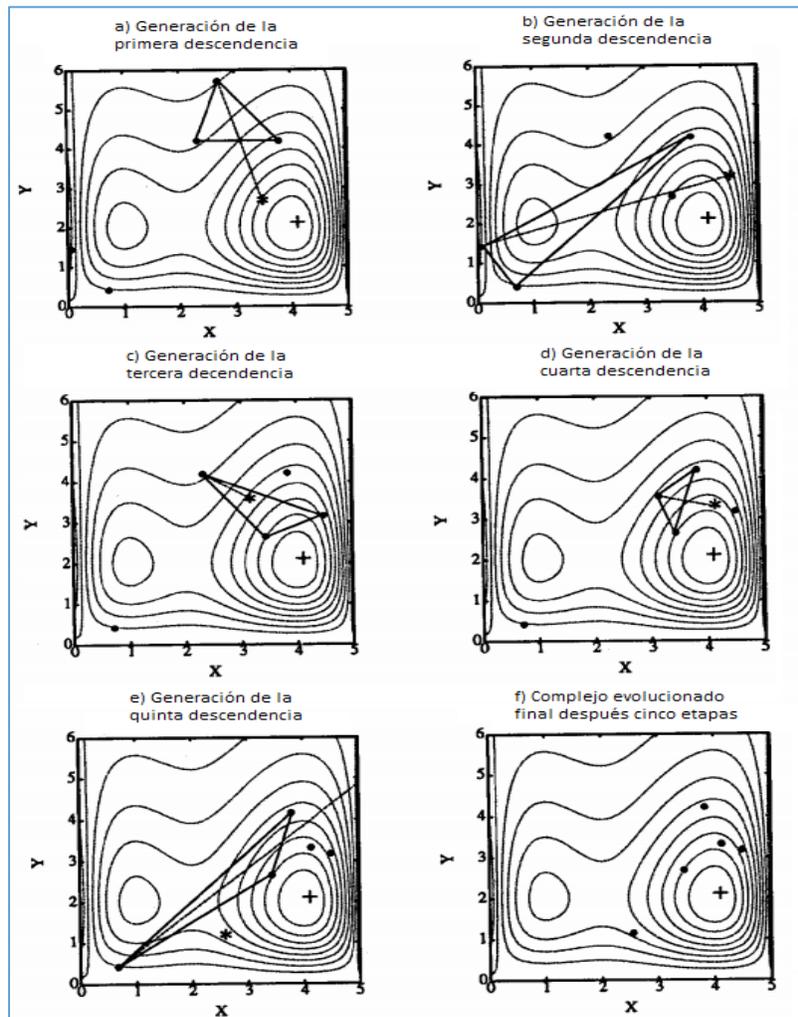
**Figura 2.6.** Ejemplo gráfico método SCE-UA.

Fuente: Duan et al., (1994).

En la Figura 2.7a se muestra gráficamente el algoritmo SCE de evolución individual para un grupo. En donde se presenta parte de la evolución del grupo identificado con (•) de la Figura 2.7b. anterior teniendo subgrupos con NPS=3 puntos y  $\alpha=1$  descendiente o nuevo punto generado identificado con (\*). Hay tres etapas de evolución las cuales son: reflexión, contracción y mutación.

Las Figura 2.7a, b y d se ilustran la etapa de reflexión, en las que se refleja el peor punto del subgrupo a través del centroide de los otros puntos. Si el punto reflejado es mejor que el peor

punto, el peor punto se descarta y se reemplaza por el nuevo punto. En la Figura 2.7c. el nuevo punto es generado por la etapa de contracción (el nuevo punto se encuentra a medio camino entre el peor punto y el centroide de los otros puntos), después de rechazar una etapa de reflexión por no mejorar la función objetivo. En la Figura 2.7e se genera la mutación, eligiendo aleatoriamente un punto dentro del espacio factible para reemplazar el peor punto del subgrupo. Esto se hace después de una etapa de reflexión, en la que el punto generado está fuera del espacio factible. La Figura 2.7f. muestra el grupo final después de NSPL=5 etapas de evolución.



**Figura 2.7.** Ejemplo gráfico de evolución para un grupo. Algoritmo SCE.

Fuente: Duan et al., (1994).

Según Duan los componentes del modelo recomiendan los siguientes valores<sup>11</sup>:

- $NPG = 2n+1$ , siendo n el número de parámetros a optimizar.
- $NPS \approx n+1$
- $\alpha = 1$
- $NSPL = NPG$
- $MINGS = NGS$
- $NPT = NGS * NPG$

Diferentes parámetros deben ser introducidos (Tabla 2.3), mientras que otros son calculados directamente por el proceso mismo. <sup>12</sup>

**Tabla 2.4** Parámetros del algoritmo de calibración SCE-UA.

Objeto	Nombre	Unidades	Descripción	Valor por defecto
SCE-UA	MAXM	-	Número máximo de iteraciones	10000
	NGS	-	Cantidad de complejos	3
	KSTOP	-	Número de bucles de mezcla	10
	PCENTO	-	Valor de criterio en bucles de mezcla	0.1
	PEPS	-	Parámetro de convergencia	0.001
	SEMILLA	-	Valor de semilla	Aleatorio

Fuente: Manual traducido RS-Minerve

<sup>11</sup> Señalo Duan ,1994, en Andrés Felipe Téllez Rojas (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN GÁLLEGO-CINCA DE LA CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO MEDIANTE EL MODELO DE PRECIPITACIÓN-ESCORRENTÍA HBV", España: Universidad Politecnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hdl.handle.net/10251/63382>

<sup>12</sup> García J., Paredes J.,Foehn A. and B. Roquier, (2015), "RS MINERVE – User’s manual v.2.1", España: Universidad Politecnica de Valencia. / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://www.hydro10.org/tools/>

### 3. CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS CALCULADAS

#### 3.1 Zona de estudio

##### 3.1.1 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  $-20^{\circ} 46'$  y  $-22^{\circ} 50'$  de Latitud Sur y los  $-64^{\circ} 16'$  y  $-67^{\circ} 22'$  de Longitud Oeste, con una altitud que varía entre los 5920 y 2320 metros sobre el nivel del mar, tomando como referencia la estación hidrométrica El Puente ubicada entre Latitud  $-21. 24^{\circ}$  y Longitud  $-65. 21^{\circ}$ .

Dentro de esta Cuenca en la parte de nuestro país Bolivia, se encuentran 9 municipios y 253 comunidades pertenecientes a los 3 departamentos, distribuidos como se muestra en la siguiente Tabla 3.1.

**Tabla 3.1** Distribución de Municipios y Comunidades en Bolivia.

UNIDAD HIDROGRÁFICA	DEPARTAMENTOS (Bolivia)	MUNICIPIO	COMUNIDADES
Cuenca del Río San Juan del Oro	Chuquisaca	– Las Carreteras – Villa Abecia	25
	Tarija	– Tomayapo (El Puente) – Yunchara	82
	Potosí	– Villazón – Tupiza – Atocha – Mojinete – San Antonio de Esmoraca	154

Fuente: Elaboración Propia

Y por parte del vecino país Argentina, se encuentra 1 provincia y 3 departamentos (la distribución de territorio es diferente) distribuidos como se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2** Distribución de Provincias y Departamentos en Argentina.

UNIDAD HIDROGRÁFICA	PROVINCIA (Argentina)	DEPARTAMENTOS
Cuenca del Río San Juan del Oro	Jujuy	– Santa Catalina – Yavi – Rinconada

Fuente: Elaboración Propia

### 3.1.2 Información disponible para la delimitación de la Cuenca.

Para la delimitación del área de la cuenca se hizo una observación siguiendo las líneas de del divortium acuarum (parte aguas) en planos, cartas geográficas de Bolivia del I.G.M. (proporcionadas de la página de internet <http://www.igmbolivia.gob.bo>) y con imágenes satelitales Aster DEM (proporcionadas de la página de internet <https://www.geo.gob.bo>) ,  
Tabla 3.3.

**Tabla 3.3** Cartas geográficas de Bolivia dentro de la cuenca de estudio

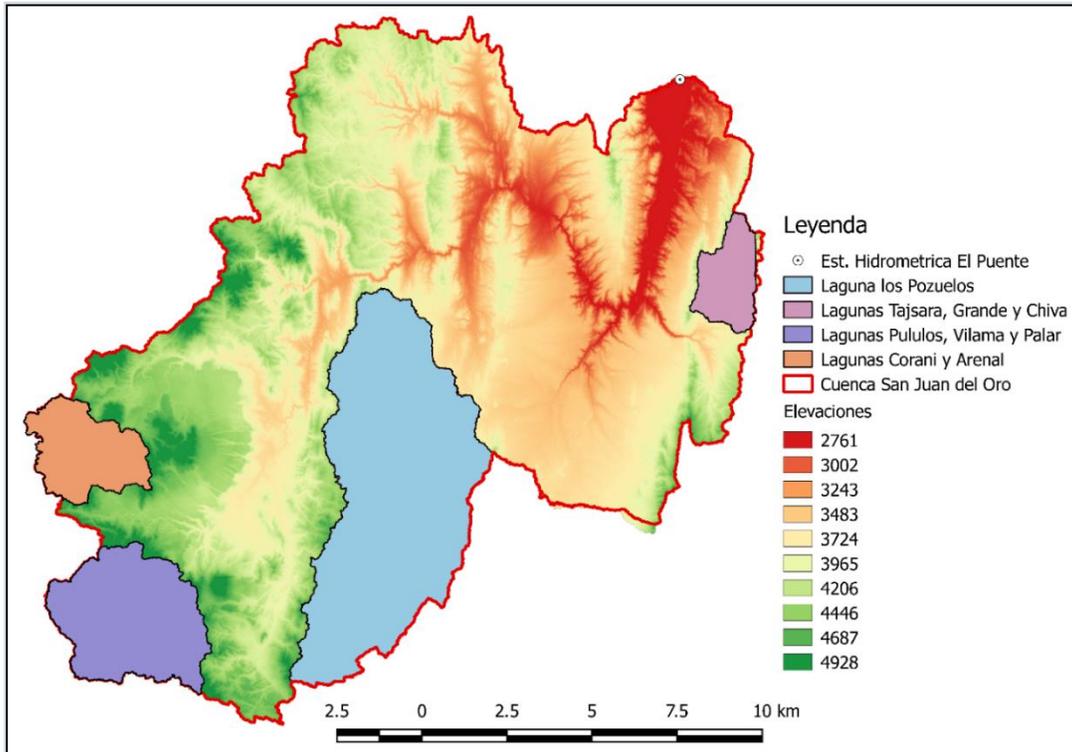
Carta geográfica	Número de carta geográfica
Esc. 1:250.000	SF-19-08, SF-19-12 SF-20-05, SF-20-09
Esc. 1:50.000	6226 IV 6227 I, 6227 II, 6227 III 6228 I, 6228 II, 6228 III 6229 II 6327 IV 6328 I, 6328 II, 6328 III, 6328 IV 6329 I, 6329 II, 6329 III, 6329 IV 6330 I, 6330 II, 6330 III 6427 I, 6427 IV 6428 I, 6428 II, 6428 III, 6428 IV 6429 I, 6429 II, 6429 III, 6429 IV 6430 III, 6430 IV 6520 I 6527-I, 6527 IV 6528 I, 6528 II, 6528 III, 6528 IV 6529 II, 6529 III, 6529 IV 6530 II, 6530 III
Aster DEM	S22W067, S22W066 S23W067, S23W066

Fuente: Elaboración Propia

Se delimito la cuenca del Río San Juan del Oro haciendo uso de las imágenes satelitales Aster Dem que cubren territorio boliviano y argentino, abarcando el área necesaria para delimitar la cuenca y poder así encontrar el área lo más precisa posible, para ello se usó el programa Q-GIS (Quantum-GIS) sacando como resultado lo mostrado en la Figura 3.1, el programa utiliza o trabaja con el complemento para procesamiento de imágenes satelitales GRASS

(acrónimo inglés de Geographic Resources Analysis Support System) el cual considera direcciones y acumulaciones de flujo de toda el área que drena la cuenca hasta un punto de control, en nuestro caso la estación hidrométrica El Puente.

**Figura 3.1** Proceso de delimitación de la cuenca río San Juan del Oro



Fuente: Elaboración Propia en Q-GIS–GRASS

Se logró notar que, en el inicio de la delimitación, el programa tomo a la cuenca con los lagos existentes en ambos territorios, los cuales no son incluidos en el flujo ni en la delimitación según Figura 1.1 del capítulo I por la Dir. Eje. de la comisión Trinacional para el desarrollo de la cuenca río Pilcomayo. Esos lagos son los enunciados en la Tabla 3.4 y Figura 3.2. los cuales no son tomados para hallar el área total de la cuenca, pero se darán a conocer por la existencia de los mismos y por la magnitud del área que estos ocupan.

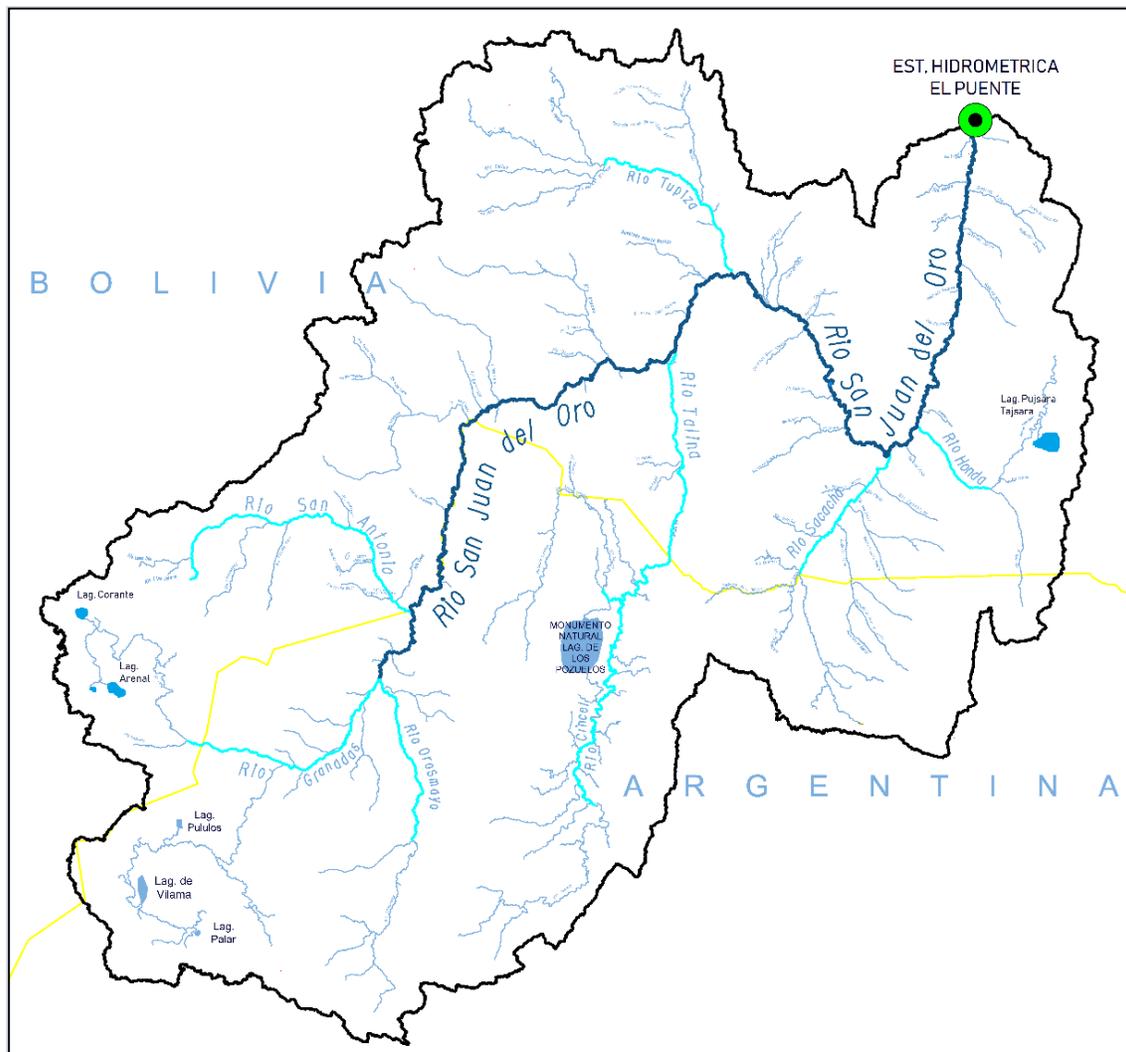
**Tabla 3.4.** Lagos que conforman la cuenca San Juan del Oro.

Territorio	Departamentos	Lagos	Área de la Cuenca cerrada (km <sup>2</sup> )
Argentina		Lago de los Pozuelos	3.963,233

	Rinconada y Santa catalina (Jujuy)	Lago Pululos Lago de Vilama Lago Palar	1.452,965
Bolivia	Potosí (Pampa Arenal)	Laguna Corani Laguna Arenal	753,514
	Tarija (Yunchara)	Laguna Pujsara Tajsara Lago Grande Lago Chica	471,645

Fuente: Elaboración propia

**Figura 3.2** Visualización de los espejos de agua que conforman la cuenca del río San Juan del Oro



Fuente: Elaboración propia en Q-GIS

### 3.1.3 Información de la Estación Hidrométrica de El Puente, Río San Juan del Oro

El informe técnico de la segunda campaña extensiva de monitoreo de calidad de aguas (aguas bajas) elaborado por el plan de monitoreo de la comisión trinacional del pilcomayo según los lineamientos aprobados por los talleres de los tres países (2006 – 2007), en cuanto a los parámetros a monitorear incluidos (metales disueltos y totales), lugares y frecuencias. Las mismas fueron realizadas en la alta cuenca por personal del SENAMHI bajo acuerdo interinstitucional suscrito por el SENAMHI con la comisión trinacional para el desarrollo de la cuenca del río Pilcomayo. A continuación, se presentan los resultados de dicho informe con la ubicación de dicho monitoreo de la estación aguas arriba y abajo, Figura 3.3.

- a. Identificación: “BEP-32”
- b. Lugar: El Puente – Tarija
- c. Coordenadas: S 21°14'21,7” W 65°12'31,2”
- d. Fecha: 28/10/13
- e. Hora: 9:40
- f. Presión = 769,6 mbar
- g. Parámetros medidos:
  - i. pH = 8,206    Temp = 19,4°C    E= - 84,9 mV
  - ii. Conductividad = 1476  $\mu$ S/cm    Temp = 19,3 °C    Salinidad = 0.7
  - iii. Turbiedad  $\geq$  1100 NTU

Aforo líquido a vadeo:

- a. Ancho = 22 m
- b. Escala = 0,85 m
- c. Velocidad media = 0,42 m/s
- d. Caudal = 4,3 m<sup>3</sup>/s

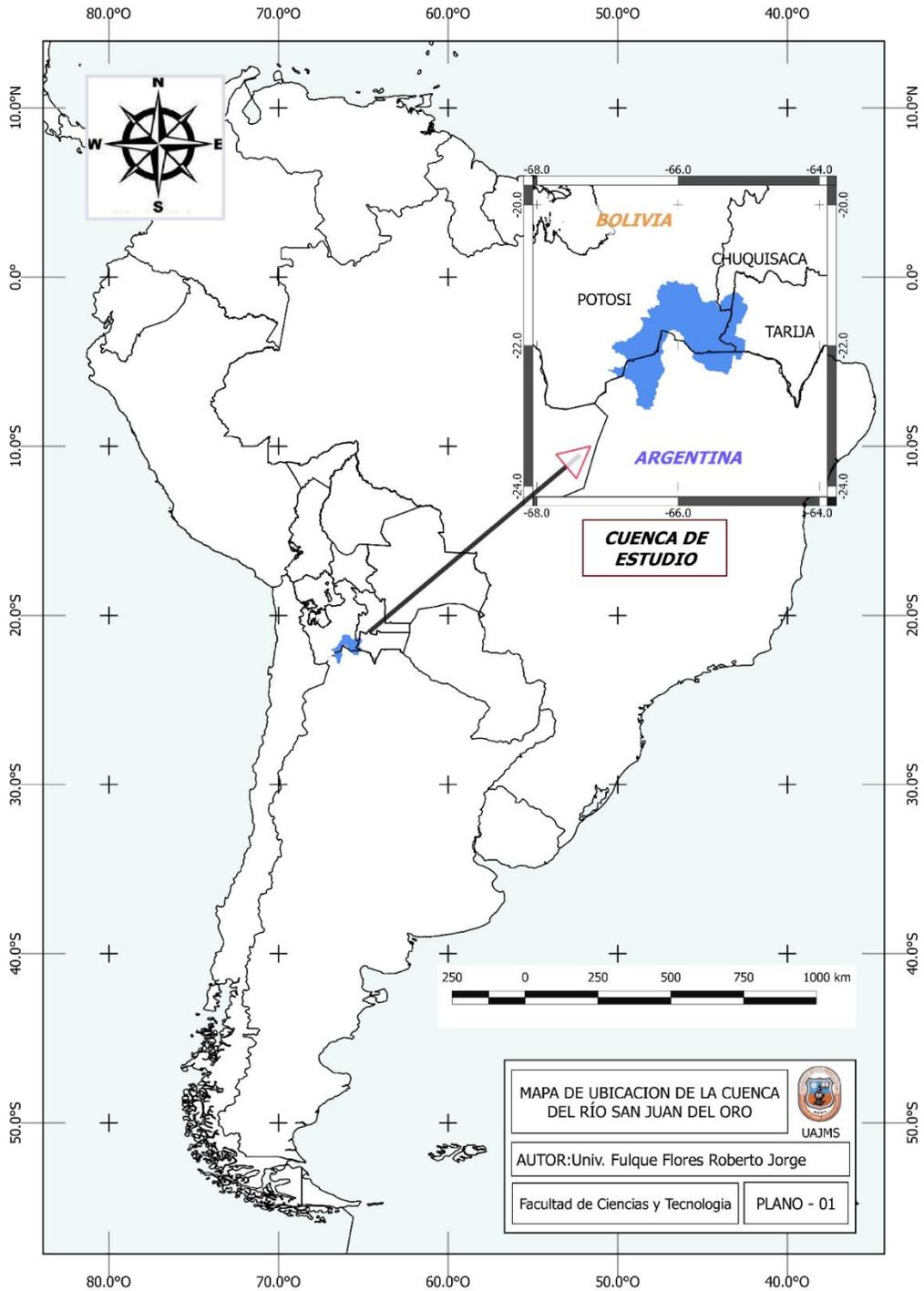
**Figura 3.3** Foto del Río San Juan del Oro (El Puente, Tarija) —Aguas arriba y aguas abajo



Fuente: Informe de la comisión Trinacional del Pilcomayo (2013)

### **3.1.4 Mapas elaborados para la modelación de la cuenca Río San Juan del Oro**

En la Figura 3.4 se muestra la ubicación de la Cuenca del río San Juan del Oro, tomando en cuenta las características descritas anteriormente en el punto 3.1.2.



**Figura 3.4** Ubicación de la Cuenca del río San Juan del Oro

Fuente: Elaboración propia, con Q-GIS

**- Precipitación media**

La precipitación media anual en la Cuenca del río San Juan del Oro varía de oeste a este aumentando las precipitaciones intensamente, hacia el oeste se tiene precipitaciones

menores a 200 mm, en cambio hacia el este las precipitaciones aumentan alcanzando los 700 mm por año. Las menores precipitaciones se encuentran en las poblaciones pertenecientes al departamento de Potosí y parte de Chuquisaca, mientras que hacia el departamento de Tarija se incrementan las lluvias.

#### - **Temperatura media**

La temperatura media anual en la Cuenca del río San Juan del Oro varía desde los 7 ° C hasta alcanzar los 20 ° C hacia el este, de la misma manera que la precipitación la variación se presenta de oeste a este, menores temperaturas entre 7° a 9° C en poblaciones que se encuentran en el departamento de Potosí, de 11° a 15° C en poblaciones que se encuentran dentro del departamento de Chuquisaca y finalmente de 15° a 20° C en poblaciones que se encuentran en el departamento de Tarija.

#### - **Fisiografía**

La Cuenca del río San Juan del Oro fisiográficamente tiene una variada conformación, presenta paisajes tales como: colinas, cuevas, llanuras aluviales, llanuras de pie de monte, montañas, serranías, planicies y superficies de erosión.

#### - **Piedemonte**

Han sido modelados por corrientes fluviales, constituyéndose en las formaciones más recientes, se encuentran en pequeños lugares por constituirse una zona de mayor relieve dentro la cordillera occidental, presentan erosión moderada.

#### - **Planicie**

Esta unidad comprende las superficies planas o relativamente planas por encima de los 3800 msnm. Dentro de esta unidad se tiene la llanura aluvial correspondiente a una superficie que se encuentra entre las cuevas y las superficies de erosión, puesto que esta llanura se llena por los ríos en época de lluvia.

#### - **Montaña**

Constituyen las formas de relieve de mayor elevación e irregularidad morfológica del área; que corresponde al emplazamiento y exposición del macizo occidental Andino. Su origen común de la mencionada cordillera obedece básicamente al levantamiento Andino occidental, que alcanza su fase final más activa en el terciario superior.

#### - **Serranía**

Las Serranías pertenecen a la Cordillera Oriental, presenta una elevación de más o

menos 3000 msnm, se encuentran dentro el departamento de Tarija, moderadamente disectadas, en cambio otras con mayor disección se encuentran dentro la cordillera occidental de origen volcánico, pertenecientes al departamento de Potosí.

- **Colina**

Gran parte de las colinas existentes en la Cuenca son de origen volcánico pertenecientes a la cordillera occidental, se encuentran en el departamento de Potosí, para su formación en este sector se muestra la presencia de tobas riolíticas y capas ignimbríticas de origen volcánico.

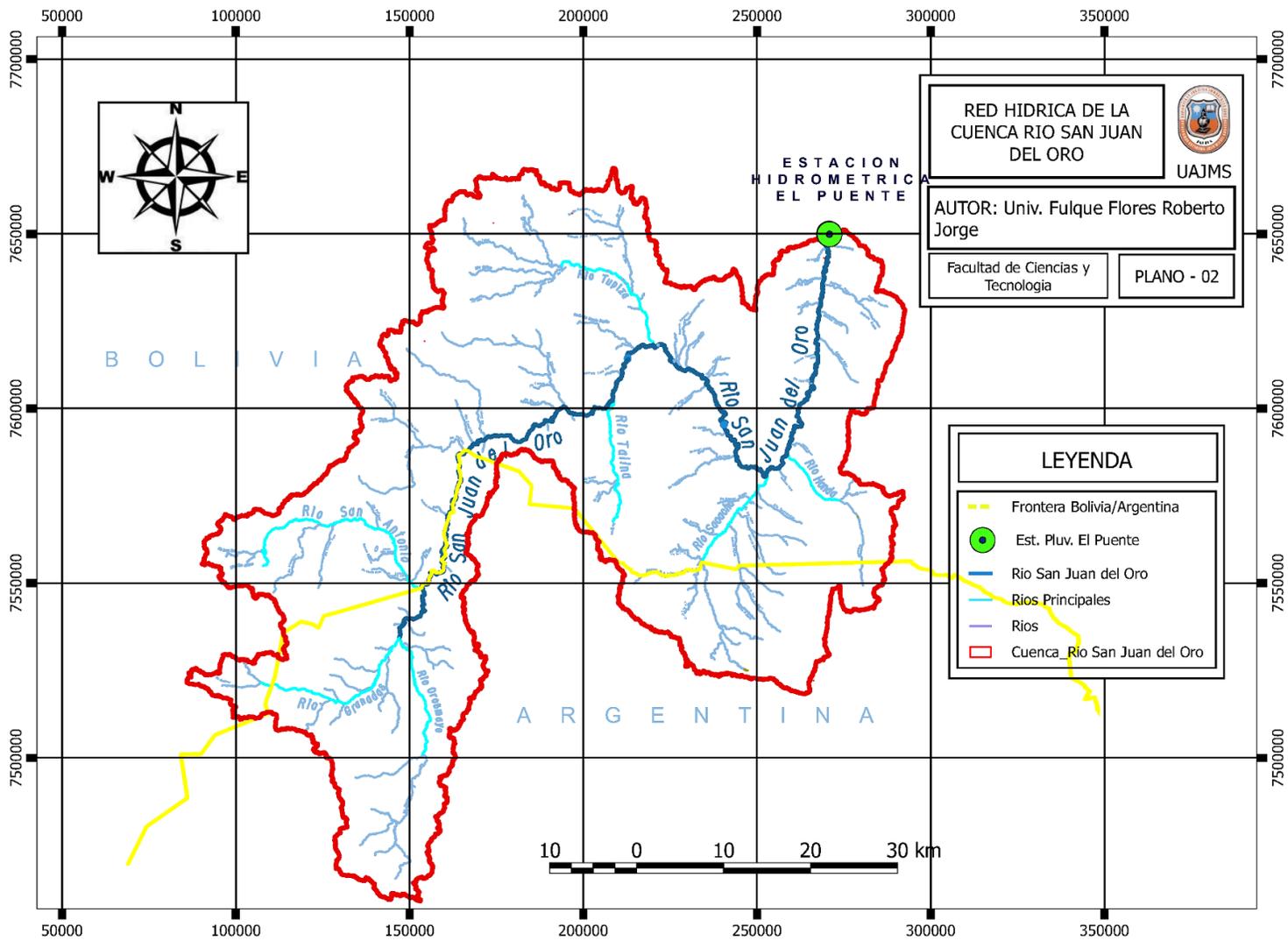
- **Sociodemografía**

La Cuenca San Juan de Oro tiene una población de 93.682 habitantes según el censo nacional de población y vivienda 2001, no se tienen datos de censo anteriores para ver su crecimiento poblacional de esta cuenca.

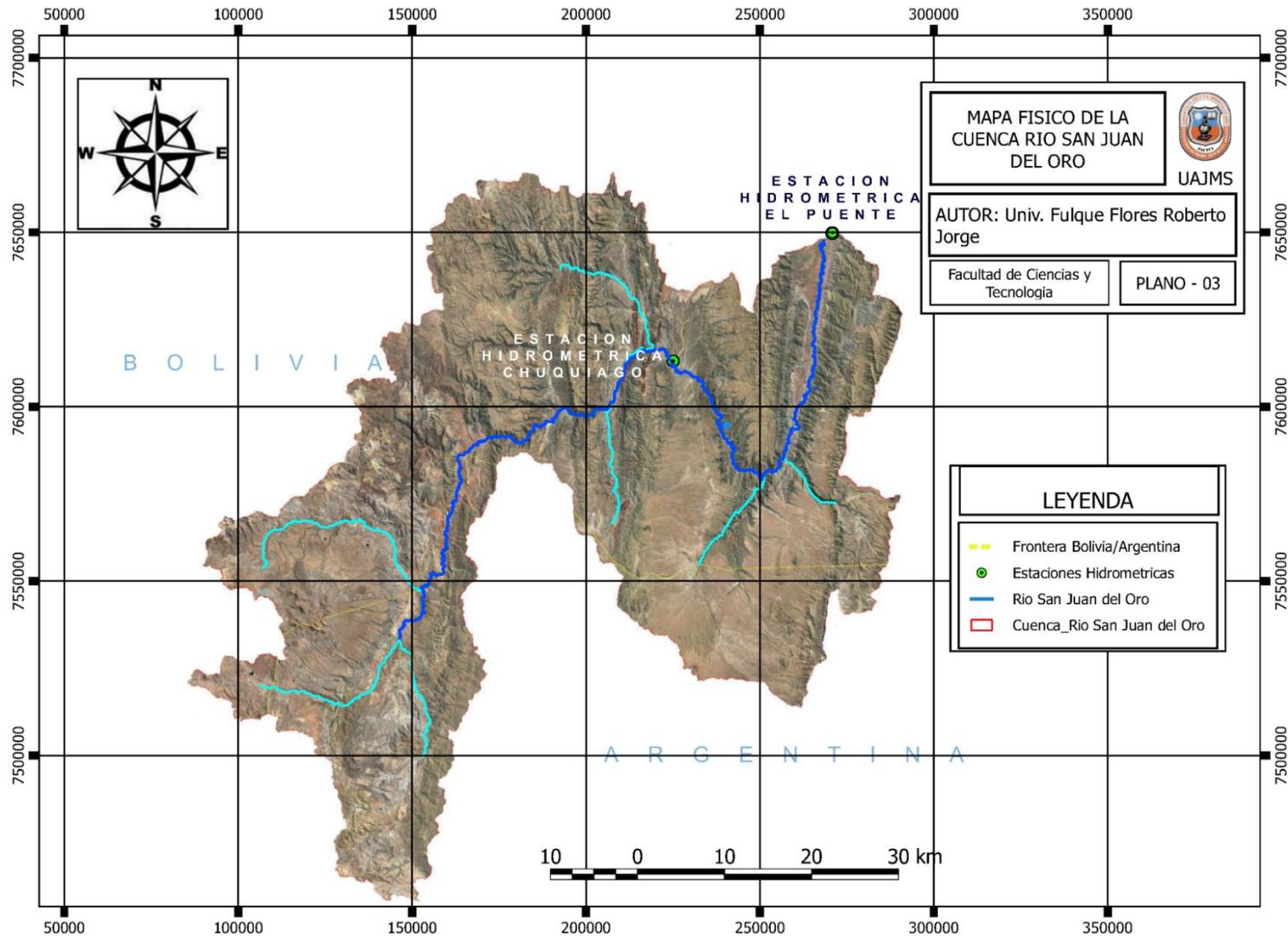
El número de viviendas es de 31.716 habitadas en toda la Cuenca, la población se encuentra mayormente situada en el departamento de Potosí, por ser más amplia el área de la Cuenca.

El río San Juan del Oro drena los escurrimientos de la cordillera de Chocoya, cuyas cumbres alcanzan los 5900 m. sobre el nivel del mar. Nace en la cordillera de Lipez con el nombre de San Antonio, corre en dirección Norte, recibiendo por su margen izquierda las aguas de los ríos: Santa Isabel, Viluyo, Tupiza, Papachaka y Tarcana y, por su margen derecha las aguas de los ríos Monoco, la Quiaca, Hondo y otros menores. A partir de la confluencia de los ríos Tumusla y San Juan del Oro, el río Pilaya se dirige hacia el Este, atravesando la cordillera de Taxara y Carrillos por medio de valles y cauces muy profundos, recibiendo los aportes de ríos pequeños como el Paichu, Cajas, Nogal, Pescado, San Josecito y Naranjos, por su margen derecha y; de los ríos Inca Huasi, Arenales y Manzanal por la margen izquierda.

En la Figura 3.5 se muestra la Cuenca del río San Juan del Oro, delimitada por sus divisorias de aguas con sus respectivos ríos.



**Figura 3.5** Delimitación de la Cuenca del río San Juan del Oro  
 Fuente: Elaboración Propia, con QGIS



**Figura 3.6** Mapa Físico de la Cuenca del río San Juan del Oro.  
Fuente :Elaboración propia, con QGIS

Así mismo se puede apreciar en la Figura 3.6 el mapa físico de la Cuenca del río San Juan del Oro, donde se aprecia los diferentes tipos de suelos y coberturas vegetales, así como nevados y lagunas existentes.

### 3.2 Cálculo de parámetros morfológicos de la Cuenca.

#### 3.2.1 Área de drenaje (A).

Denominada también área de drenaje, siendo el área comprendida dentro de la divisoria de aguas hasta el punto de estudio.

La Cuenca del río San Juan del Oro cuenta con un área de 19.807,23 km<sup>2</sup> delimitado hasta la estación hidrométrica de El Puente.

#### 3.2.2 Perímetro de la cuenca (P).

Es el contorno del área de la cuenca, es decir la longitud de la divisoria de aguas proyectada sobre un plano horizontal.

El perímetro de la Cuenca del río San Juan del Oro es de 1.438,92 km.

#### 3.2.3 Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad, (Ic).

La forma de una cuenca influye en el tiempo de concentración, y para determinarla se relaciona con formas geométricas, tal es el caso del coeficiente de compacidad con un círculo y el factor de forma con un rectángulo. <sup>1</sup> Mejía (2006: 47) señala que:

$$Kc = \frac{0,282 P}{A^{\frac{1}{2}}}$$

Ec. (2.1)

Donde:

Kc= Coeficiente de compacidad.

P= Perímetro de la cuenca (km).

A= Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

$$Kc = \frac{0,282 * 1.438,92 \text{ km}}{19.807,23^{\frac{1}{2}}}$$

$$Kc = 2,88$$

---

<sup>1</sup> Mejía M. J. Abel (Edición 2006) "Hidrología Aplicada" Lima, Perú.

Siendo el coeficiente de compacidad de la Cuenca  $K_c = 2,88$  y encontrándose este valor mayor al intervalo de  $> (1,5 - 1,75)$  se observa que la Cuenca del río San Juan del Oro presenta una forma alargada e irregular.

### 3.2.4 Factor de forma (Kf).

Mejía (2006: 47) señala que, el factor de forma  $K_f$  es la relación entre el ancho medio (B) y la longitud axial de la cuenca. La longitud axial de la cuenca (L) se mide siguiendo el curso del agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante de la cuenca.

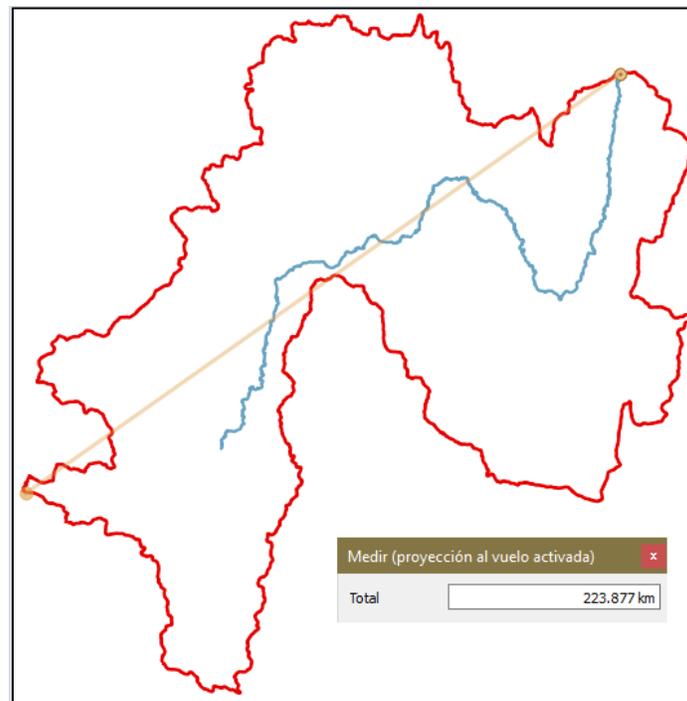
Ec. (2.2)

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

A: Área de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

L: Longitud de la cuenca (km)



**Figura 3.7** Medición del ancho de la cuenca para del factor de forma  
Fuente: Elaboración propia con QGIS.

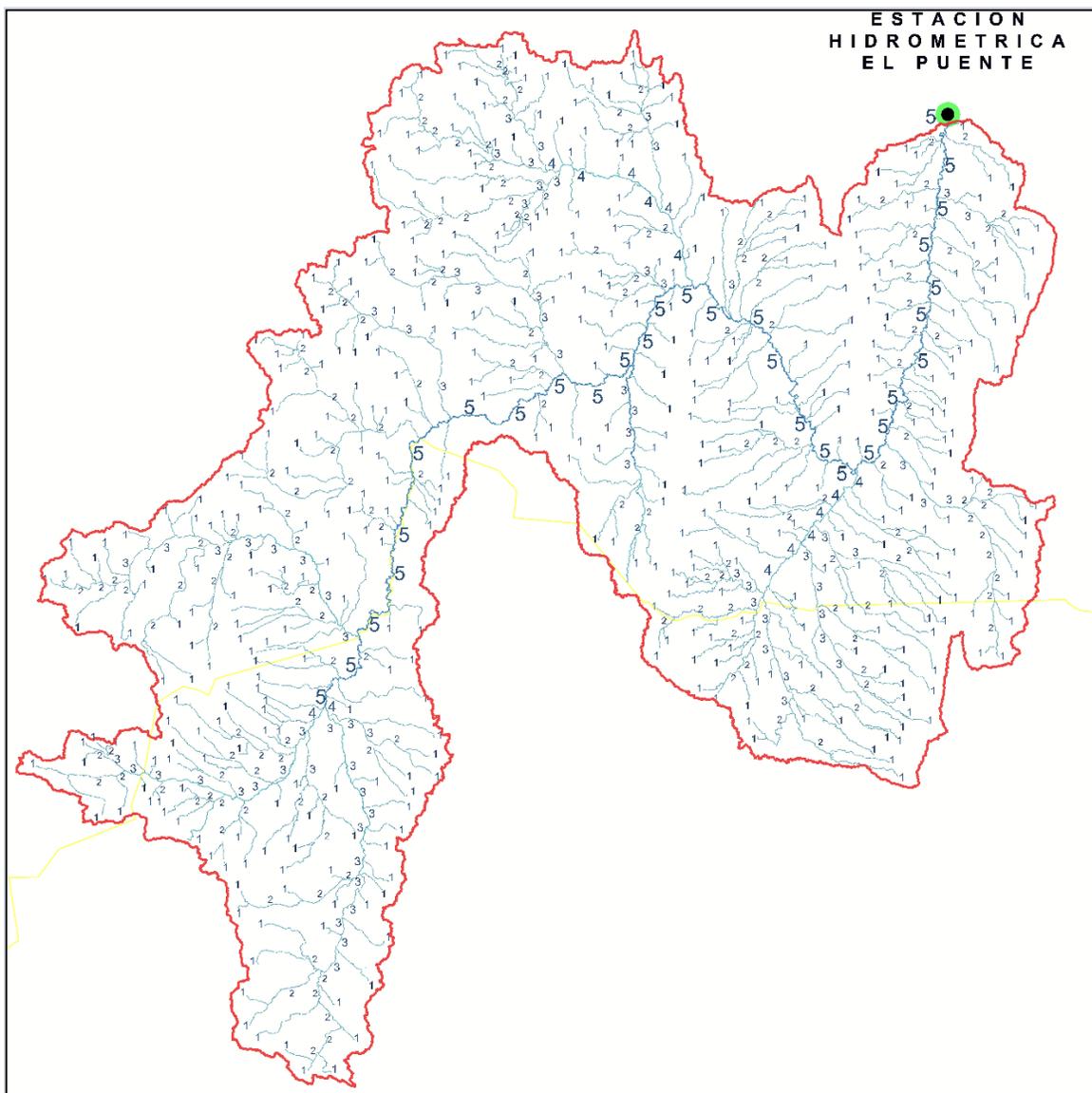
$$K_f = \frac{19.807,23 \text{ km}^2}{223,88 \text{ km}^2}$$

$$K_f = 0,395$$

El factor de forma es 0,395 encontrándose entre el rango de  $\langle 0,36-0,54 \rangle$  siendo moderadamente estrecha y larga. A Cuenca del río San Juan del Oro, tiende a presentar un flujo de agua mayor, con gastos picos mayores, provocando mayores daños por inundaciones en época de máximas crecientes.

### 3.2.5 Número de orden.

El número de orden muestra el grado de ramificación de los ríos de una cuenca. La Cuenca del río San Juan del oro hasta la estación de El Puente, es de número de orden  $N^\circ 5$ , indicando así que la cuenca presenta una red de drenaje bien desarrollada.



**Figura 3.8** Número de orden de la cuenca  
Fuente: Elaboración propia en AUTOCAD y QGIS.

### 3.2.6 Densidad de drenaje (Dd).

Mejía (2006: 49) menciona que la densidad de drenaje, se expresa como la longitud total de los ríos perennes o intermitentes por unidad de área.

Ec. (2.3)

$$Dd = \frac{\sum_{i=1}^n Li}{A} = \frac{LD}{A}$$

Donde:

A = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

LD = Longitud total de los cauces dentro de la cuenca (km).

LD = 7.610,79 km

A = 19.807,23 km<sup>2</sup>

$$Dd = \frac{6.383,66 \text{ km}}{19.807,23 \text{ km}^2}$$

$$Dd = 0,322 \text{ km/km}^2$$

La Cuenca del río San Juan del Oro hasta la estación El Puente, es una Cuenca con baja Densidad de Drenaje (0,322 km/km<sup>2</sup>) lo cual refleja un área pobremente drenada con respuesta hidrológica lenta.

### 3.2.7 Pendiente de la cuenca

#### a) Criterio de Alvord.

La pendiente de la cuenca mediante este criterio se calcula a partir de la siguiente expresión:

Ec. (2.4)

$$S = \frac{D(l_1 + l_2 + \dots + l_n)}{A}$$

Haciendo  $L = \sum l$  longitud total de las curvas de nivel de la cuenca se tiene:

$$Sc = \frac{D L}{A}$$

Donde:

Sc: Pendiente de la cuenca.

D: Desnivel entre curvas de nivel. (km)

L: Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca (km).

A: Área de la cuenca (km<sup>2</sup>).

Determinación de  $S_c$ :

$D = 200 \text{ m} = 0,20 \text{ (km)}$

$A = 19.807,23 \text{ (km}^2\text{)}$ .

L: Longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca (km).

Curva	Longitud (m)	Longitud (km)
2324	0,00	0,00
2400	77.899,60	77,90
2600	277.563,68	277,56
2800	612.961,80	612,96
3000	1.183.756,38	1.183,76
3200	1.637.110,04	1.637,11
3400	2.173.393,60	2.173,39
3600	2.812.454,60	2.812,45
3800	2.563.531,68	2.563,53
4000	3.491.243,07	3.491,24
4200	2.313.777,49	2.313,78
4400	2.022.335,26	2.022,34
4600	831.683,05	831,68
4800	564.188,17	564,19
5000	392.601,22	392,60
5200	183.647,59	183,65
5400	66.476,61	66,48
5600	35.038,35	35,04
5800	5.090,05	5,09
5918	0,00	0,00
	L=	21244,75

Longitud total de las curvas de nivel (L): 21.244,75 km.

$$S_c = \frac{D L}{A}$$

$$S_c = \frac{0,2 \text{ km (21.244,75 km)}}{19.807,23 \text{ km}^2}$$

$$S_c = 0,2145$$

$$S_c = 21,452 \%$$

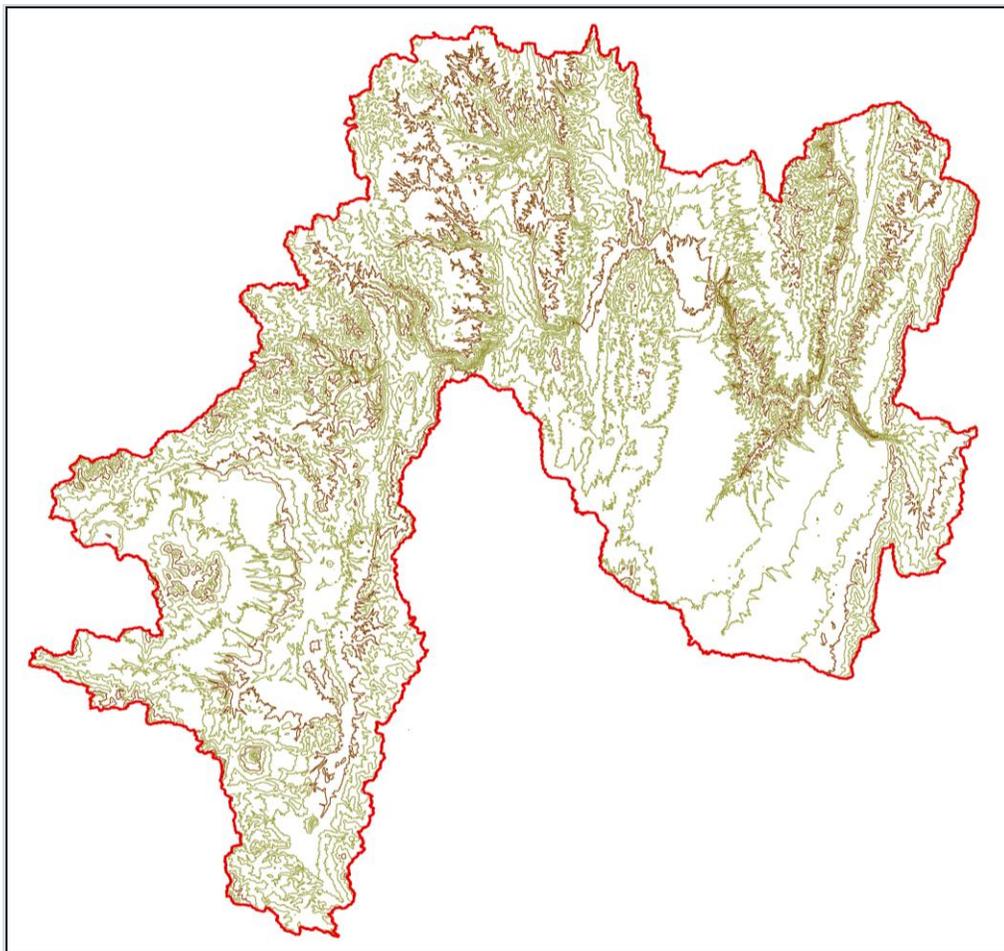
El valor de la pendiente de la Cuenca  $S_c = 21,452\%$  indica que la cuenca es un terreno con pendiente moderada, fuertemente ondulada.

### 3.2.8 Cota media de la Cuenca

Mejía (2006: 50) señala que la variación de la altitud y la elevación media de una cuenca son, también importantes por la influencia que ejercen sobre la precipitación, sobre las pérdidas de agua por evaporación y transpiración y, consecuentemente sobre el caudal medio. Variaciones grandes de altitud conllevan diferencias significativas en la precipitación y la temperatura media, la cual, a su vez, causan variaciones en la evapotranspiración.

Se determinó la cota media de la cuenca en la Tabla 3.5, para lo cual se obtuvo previamente las áreas entre curvas de nivel (áreas parciales) Figura 3.9.

**Figura 3.9** Curvas de nivel cada 250m de la cuenca río San Juan del Oro



Fuente: Elaboración propia

**Tabla 3.5** Cálculo de Cota Media.

Cota (msnm)		Cota media (m.s.n.m)	Área parcial (Km <sup>2</sup> )	Cota Media por Área (m*km <sup>2</sup> )
2324	2400	2362	27,96	66.043,65
2400	2600	2500	230,88	577.194,50
2600	2800	2700	303,16	818.536,46
2800	3000	2900	590,13	1.711.385,70
3000	3200	3100	913,62	2.832.217,04
3200	3400	3300	1.220,35	4.027.163,09
3400	3600	3500	3.026,22	10.591.782,43
3600	3800	3700	3.153,27	11.667.113,93
3800	4000	3900	2.864,65	11.172.148,55
4000	4200	4100	2.634,19	10.800.189,45
4200	4400	4300	1.917,68	8.246.039,58
4400	4600	4500	1.815,32	8.168.919,20
4600	4800	4700	772,45	3.630.537,60
4800	5000	4900	193,88	950.020,79
5000	5200	5100	87,96	448.571,83
5200	5400	5300	44,27	234.608,20
5400	5600	5500	10,36	56.992,37
5600	5800	5700	0,31	1.778,95
5800	5918	5859	0,57	3.354,28
TOTAL			19.807,23	76.004.597,58

Ec. (2.5)

$$E = \frac{\sum e, a}{A}$$

Donde:

A = Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

E = Elevación media entre dos curvas de nivel consecutivas

a = Área entre las curvas de nivel

$$E = \frac{76.004.597,58}{19.807,23 \text{ km}^2}$$

$$E = 3837,211 \text{ m.s.n.m}$$

La elevación media de la Cuenca del río San Juan del Oro hasta la estación El Puente es de 3837,211 m.s.n.m.

### 3.2.9 Curva hipsométrica

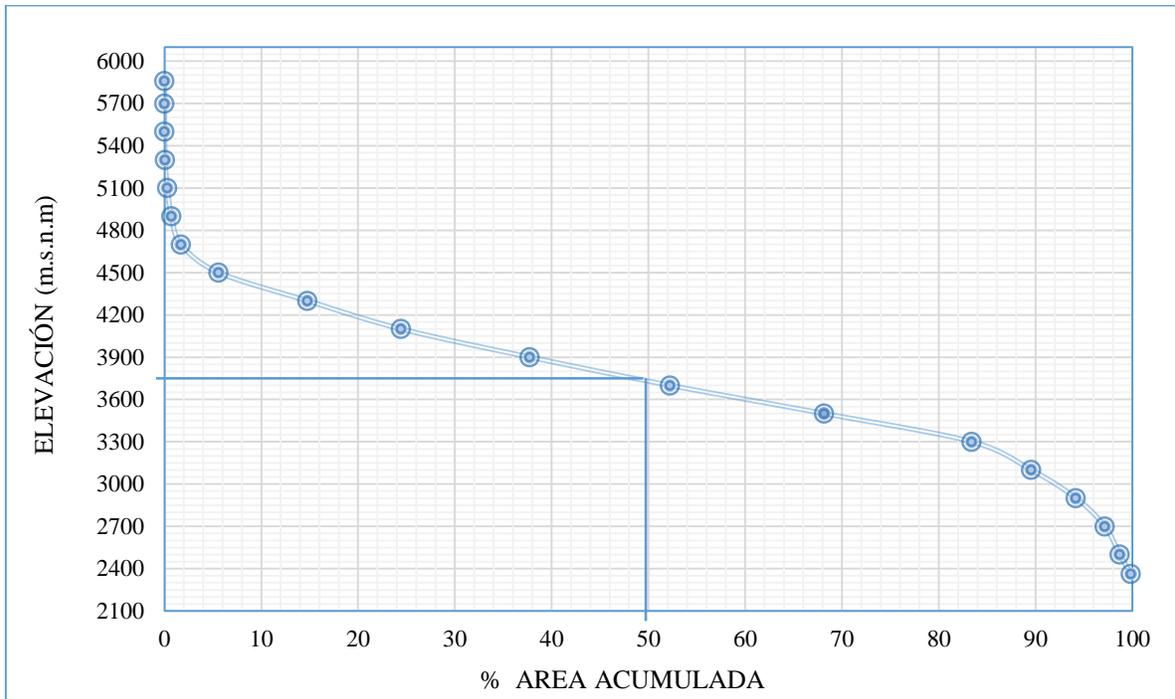
Es la representación gráfica del relieve medio de una cuenca, Representa el estudio de la variación de la elevación de las diferentes superficies de la cuenca con referencia al nivel medio del mar, Esta variación puede ser indicada por medio de un gráfico que muestra el porcentaje del área de drenaje que existe por encima o por debajo de las diferentes elevaciones o cotas, (Mejía, 2006: 50), En función a la tabla de áreas acumuladas se obtuvo la curva hipsométrica para la Cuenca del río San Juan del Oro,

**Tabla 3.6** Cálculo Curva hipsométrica

Cota (msnm)		P	Área parcial (Km2)	% del total	% acumulado	% Acumulado por encima
	2324				0,00	100,00
2324	2400	2362	27,96	0,14	0,14	99,86
2400	2600	2500	230,88	1,17	1,31	98,69
2600	2800	2700	303,16	1,53	2,84	97,16
2800	3000	2900	590,13	2,98	5,82	94,18
3000	3200	3100	913,62	4,61	10,43	89,57
3200	3400	3300	1.220,35	6,16	16,59	83,41
3400	3600	3500	3.026,22	15,28	31,87	68,13
3600	3800	3700	3.153,27	15,92	47,79	52,21
3800	4000	3900	2.864,65	14,46	62,25	37,75
4000	4200	4100	2.634,19	13,30	75,55	24,45
4200	4400	4300	1.917,68	9,68	85,23	14,77
4400	4600	4500	1.815,32	9,16	94,40	5,60
4600	4800	4700	772,45	3,90	98,30	1,70
4800	5000	4900	193,88	0,98	99,28	0,72
5000	5200	5100	87,96	0,44	99,720	0,280
5200	5400	5300	44,27	0,22	99,943	0,057
5400	5600	5500	10,36	0,05	99,996	0,004
5600	5800	5700	0,31	0,00	99,997	0,003
5800	5918	5859	0,57	0,00	100,00	0,00

TOTAL	19.807,25
-------	-----------

Fuente: Elaboración propia



**Figura 3.10** Curva hipsométrica Cuenca del río San Juan del Oro

A través de la gráfica de la curva hipsométrica podemos determinar que, la Cuenca del río San Juan del Oro hasta la estación El Puente, es una cuenca en equilibrio (fase de madurez), es decir que refleja tanto un potencial erosivo como también es algo sedimentaria,

### 3.2.10 Pendiente del cauce principal

#### Cálculo de la pendiente S3 (Método de Taylor y Schwartz):

“La pendiente del cauce, mediante este método se calcula dividiéndose el cauce en tramos”, (Mejía, 2006: 52).

Ec. (2.6)

$$S = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n Li}{\sum_{i=1}^n \frac{Li}{S_i^2}} \right]^2$$

Donde:

S: Pendiente media del cauce.

$L_i$ : Longitud del tramo i.

$S_i$ : Pendiente del tramo i.

**Tabla 3.7** Cálculo de la pendiente S3 – Método de Taylor y Schwartz

PROGRESIVA	COTA (m)	DESNIVEL (m)	LONGITUD L (m)	PENDIENTE (S)	$L/S^{1/2}$
0+000	2324,575				
34+335,38	2400	75,425	34.335,3835	0,00219671	732.580,23
105+797,00	2600	200	71.461,6204	0,00279871	1.350.810,08
177+336,63	2800	200	71.539,626	0,00279565	1.353.022,44
236+952,48	3000	200	59.615,8475	0,00335481	1.029.265,90
277+713,23	3200	200	40.760,7575	0,00490668	581.900,02
328+439,66	3400	200	50.726,4211	0,00394272	807.860,43
394+216,79	3600	200	65.777,1337	0,00304057	1.192.881,82
TOTAL			394.216,7897		7.048.320,92

$$S = \left[ \frac{394.216,7897}{7.048.320,92} \right]^2$$

$$S = 0,00313$$

$$S = 0,313 \%$$

La pendiente del cauce principal de la Cuenca del río San Juan del Oro hasta la estación El Puente, es de 0,313 % lo que nos indica de que el cauce presenta un relieve plano o casi a nivel.

### 3.2.11 Cálculo del Tiempo de Concentración y Tiempo de retardo.

Es un dato importante en cualquier análisis hidrológico, su única forma de calcularlo es mediante fórmulas empíricas, que se basan en las características de la cuenca para poder estimar su valor. Por eso planteamos tres métodos que se consideran ser las más adecuadas para cuencas grandes con área mayor a 3.000 km<sup>2</sup>. Los datos para calcular el tiempo de concentración se muestran en la Tabla 3.8.

**Tabla 3.8** Datos para el cálculo del Tiempo de concentración

DATOS para Tc	Descripción	Abreviatura	Unidades	Valor encontrado
	Área	A	km <sup>2</sup>	19.807,23
	Cota máxima	Hmax	m.s.n.m.	3800,000

Cota mínima	Hmin	m.s.n.m.	2324,575
Desnivel	H	m	1475,425
Pendiente	So	%	0,004
Longitud del río principal	Lp	km	328,44

Fuente: Elaboración Propia.

**Fórmula de U.S Soil Conservation Service**

Ec. (2.7)

$$t_c = 0,95 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

**Fórmula de Kirpich**

Ec. (2.8)

$$t_c = \left( 0,871 \frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$$

**Fórmula de Rowe**

Ec. (2.9)

$$t_c = \frac{0,87L^3}{H} 0,385$$

Donde:

Tc= Tiempo de concentración en (hrs)

L= Longitud del río principal en (km)

H=Desnivel del río principal en (m)

**Tabla 3.9** Resultados de (Tc)

Nº	Formula	tc (hrs)
1	Kirpich	46,07
2	U.S. Soil Conservation Service	46,15
3	Rowe	46,05
Tiempo de concentración asumido		46,09

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de concentración encontrado es de 46,09 hrs, este valor se debe deducir con el tiempo de duración de la lluvia, con los siguientes criterios:

Ec. (2.10)

$$t_c = D \quad \text{si la cuenca es pequeña } < 250 \text{ km}^2$$

$$D = 2 * \sqrt{t_c} \quad \text{si la cuenca es grande } > 250 \text{ km}^2$$

$$D = 2 * \sqrt{46,09}$$

$$D = 13,58 \text{ hrs}$$

El tiempo de retardo se considerará:

$$t_r = 0,6 t_c$$

$$t_r = 8,15 \text{ hrs} = 489 \text{ minutos}$$

El tiempo de retardo para la cuenca del río San Juan del Oro será de 489 min, el cual se utilizará más adelante para la modelación.

### 3.3 Pluviometría

#### 3.3.1 Registros de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas

Para la recolección de información se ubicó las estaciones meteorológicas e hidrológicas que están cerca de la cuenca, en la Tabla 3.10 se muestran las estaciones cercanas y en la Figura 3.11. se ubicó las estaciones que presentan más datos.

Estación	Depart.	Provincia	Municp.	Tipo	LAT	LONG	ALT	SERIE
San Antonio de Esmoruco	Potosí	Sud López	San Antonio de Esm.	CO	-21,9517	-66,5194	3701	1980-2016
San Pablo de López	Potosí	Sud López	San Pablo de López	TP	-21,6831	-66,6139	4256	1977-2016
Villazón	Potosí	Modesto Omiste	Villazón	TP	-22,0833	-65,600	3443	1942-2016
Talina	Potosí	Sud Chichas	Tupiza	P	-21,7522	-65,8253	3093	1980-2016
San Jose de Pampa Grande	Potosí	Sud Chichas	Tupiza	CO	-21,6833	-65,8167	3000	1943-2016
Tupiza	Potosí	Sud Chichas	Tupiza	CP	-21,4383	-65,7153	2923	1942-2016
Oploca	Potosí	Sud Chichas	Tupiza	CO	-21,3333	-65,8333	3121	1942-2016
Salo	Potosí	Sud Chichas	Tupiza	TP	-21,2333	-65,7667	3245	2008-2016
Atocha	Potosí	Sud Chichas	Atocha	CP	-20,9300	-66,2189	3700	1984-2016
Chuquiago	Potosí	Sud Chichas	Tupiza	TP	-21,5614	-65,6411	2841	2005-2016
Mojo	Potosí	Modesto Omiste	Villazón	CO	-21,8292	-65,5506	3422	1943-2016
Tojo	Tarija	Avilés	Yunchará	P	-21,8189	-65,3264	2643	1975-2016
Yunchará	Tarija	Avilés	Yunchará	P	-21,8258	-65,2286	3580	2005-2016
Carrizal	Tarija	Méndez	El Puente	P	-21,4386	-65,2394	2447	2005-2016
El Puente	Tarija	Méndez	El Puente	TP	-21,2381	-65,2061	2345	1945-2016
Campanario	Tarija	Méndez	El Puente	CO	-21,5125	-64,9756	3460	1990-2016
Tomayapo Pueblo	Tarija	Méndez	El Puente	P	-21,2683	-65,045	2734	1981-2016
Paicho Centro	Tarija	Méndez	El Puente	P	-21,1453	-64,9544	2570	2005-2016
Cañas	Tarija	Arce	Padcaya	CO	-21,9022	-64,8508	2078	1977-2016
Pinos Sud	Tarija	Cercado	Tarija	P	-21,7347	-64,8783	2118	1975-2016

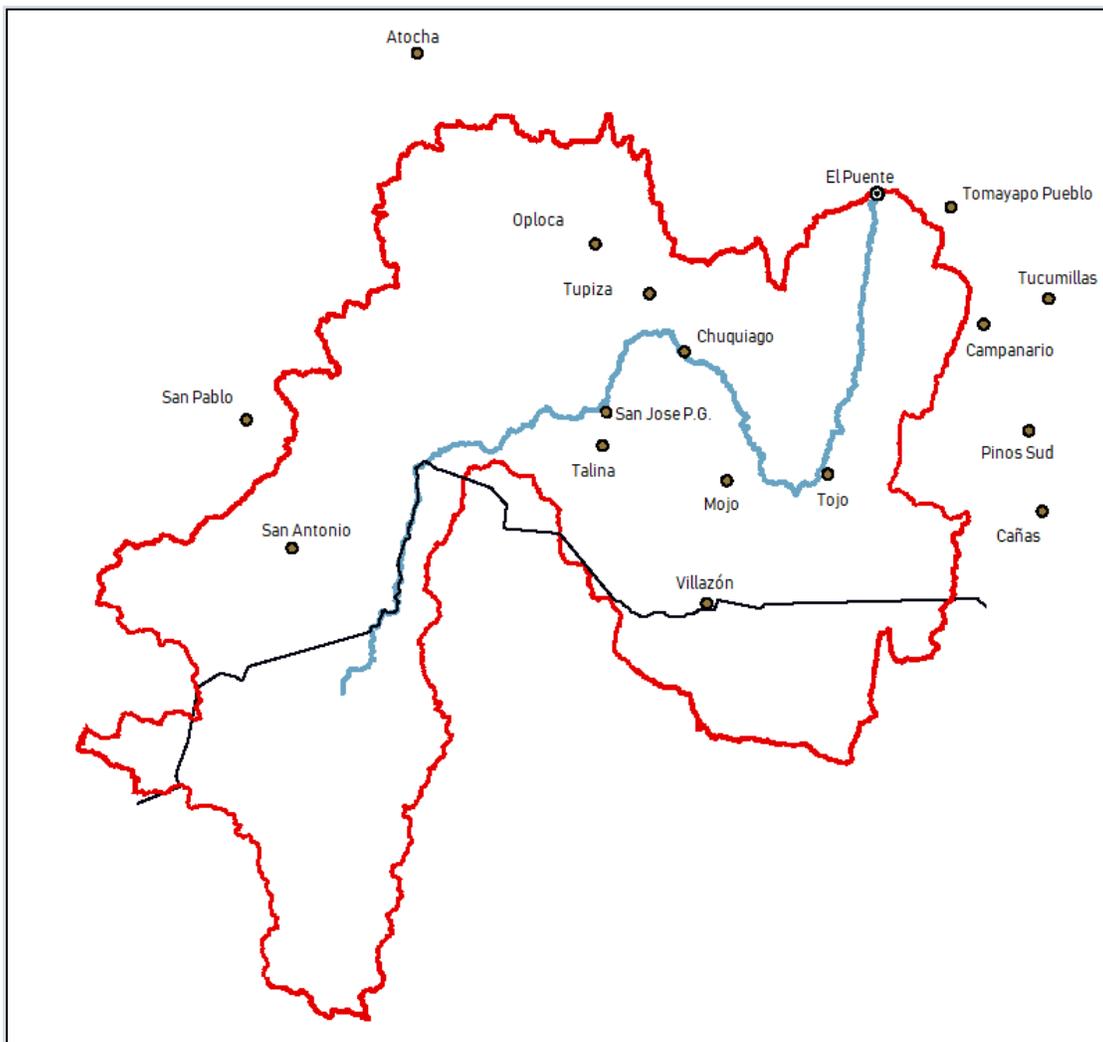
Tucumillas	Tarija	Méndez	Villa San Lorenzo	P	-21,4611	-64,8311	2557	1977-2016
------------	--------	--------	-------------------	---	----------	----------	------	-----------

**Tabla 3.10** Estaciones cercanas a la cuenca del río San Juan del Oro.

Fuente: Elaboración propia

Tipos de estaciones: CO (climatológicas ordinarias), TP (termo pluviométricos), P (pluviométricos) y CP (climatológicas principales).

**Figura 3.11** Ubicación de las estaciones más cercanas, con más registros de información en la cuenca de estudio.



Fuente: Elaboración propia

Las estaciones que se consideraron para el estudio de la modelación hidrológica fueron las que se indican en la Tabla 3.11.

**Tabla 3.11** Estaciones consideradas para la Modelación Hidrológica

Estación	Latitud	Longitud	Altura	Registros
Campanario	-21,5125	-64,9756	3460	1990-2017
Villazón	-22,0833	-65,600	3443	1942-2017
Mojo	-21,8292	-65,5506	3422	1943-2017
Tupiza	-21,4383	-65,7153	2923	1942-2017
San Pablo	-21,6831	-66,6139	4256	1977-2017

Fuente: Elaboración propia, con datos del SENAMHI

### 3.3.2 Resumen climatológico de las estaciones consideradas para hallar la Evapotranspiración de la cuenca

En las siguientes Tablas se mostrarán los resúmenes climatológicos de las estaciones cuya información esta disponibles en la página del SENAMHI, el periodo considerado será de (1990 – 2017) para poder encontrar los datos de evapotranspiración potencial mensual lo cual se verá más adelante.

**Tabla 3.12** Resumen climatológico — Est. Villazón

Índice	Und.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Temp. Max. Media	°C	23,9	23,5	24,3	23,7	21,8	20,2	20,0	22,1	23,7	24,0	26,4	25,8	23,3
Temp. Min. Media	°C	6,8	6,5	5,3	2,4	-2,8	-6,0	-6,2	-4,4	-1,8	2,2	4,8	6,5	1,1
Temp. Media	°C	15,4	15,0	14,8	13,1	9,5	7,1	6,9	8,8	10,9	13,1	15,6	16,1	12,2
Precipitación	mm	112,5	69,1	41,5	10,4	0,7	0,0	0,1	1,6	4,0	10,8	28,1	72,9	351,7
Humedad Relativa	(%)	65	66	64	54	52	50	46	47	47	49	56	62	54,8
Velocidad del viento	km/hr	8,9	7,5	6,3	7,9	11,0	14,6	11,4	12,1	9,6	9,4	7,0	7,9	9,5

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

**Tabla 3.13** Resumen climatológico — Est. Mojo

Índice	Und.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Temp, Max, Media	°C	20,50	19,91	20,21	20,13	18,35	17,24	16,65	18,62	20,06	21,30	21,95	21,81	19,7
Temp, Min, Media	°C	6,99	6,40	5,46	2,52	-2,75	-5,19	-5,26	-3,01	-0,51	2,92	4,92	6,45	1,6
Temp, Media	°C	13,7	13,2	12,8	11,3	7,8	6,0	5,7	7,8	9,8	12,1	13,4	14,1	10,7
Humed, Relativa	%	64,7	66,7	65,2	60,8	57,0	59,4	53,6	49,7	46,8	52,8	52,0	58,7	57,3
Insolación Media	Hrs	6,5	7,4	7,8	8,5	8,7	6,8	8,1	9,1	9,3	9,1	8,8	6,2	8,0
Precipitación	mm	103,3	73,68	46,25	9,94	0,75	0,03	0,00	0,83	4,74	11,65	26,64	69,49	347,4
Velocidad del viento	km/hr	7,60	7,69	8,16	7,93	8,84	9,37	10,66	11,36	11,98	11,08	10,91	9,15	9,6

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

**Tabla 3.14** Resumen climatológico — Est. Tupiza

Índice	Und	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Temp. Max. Media	°C	24,6	25,0	25,4	25,6	23,3	21,8	21,7	23,7	25,3	26,6	27,2	26,6	24,7

Temp. Min. Media	°C	9,8	9,9	8,8	5,6	0,6	-2,1	-2,2	0,2	3,7	7,2	9,1	10,1	5,1
Temp. Media	°C	17,2	17,4	17,1	15,6	12,0	9,8	9,7	12,0	14,5	16,9	18,1	18,3	14,9
Humed. Relativa	%	63,6	66,7	64,1	59,5	60,9	61,5	57,1	54,6	55,1	55,8	57,1	62,4	59,9
Insolación Media	Hrs	6,7	7,2	7,4	8,5	8,4	8,2	8,3	8,7	8,8	8,5	8,6	7,6	8,1
Precipitación	mm	92,31	69,43	39,98	6,29	0,81	0,06	0,11	0,83	3,89	6,27	15,03	62,60	297,62
Velocidad del viento	km/hr	7,86	7,54	6,62	6,52	6,65	6,86	9,69	9,71	11,17	12,22	12,21	9,41	8,9

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

**Tabla 3.15** Resumen climatológico — Est. San Pablo de Lípez

Índice	Und	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Temp, Max, Media	°C	16,65	16,11	16,52	15,07	12,11	10,85	10,94	12,14	13,44	15,34	17,03	17,43	14,5
Temp, Min, Media	°C	2,4	2,2	0,8	-2,4	-5,8	-8,1	-8,3	-7,3	-5,3	-3,3	-1,1	0,8	-2,9
Temp, Media	°C	9,5	9,1	8,6	6,3	3,1	1,3	1,3	2,3	4,0	6,0	7,9	9,0	5,7
Precipitación	mm	93,9	70,5	39,8	1,9	1,3	0,7	4,1	2,7	1,4	3,5	6,6	45,8	272,1
Velocidad del viento	km/hr	16,02	16,01	16,12	17,00	20,06	20,55	20,79	20,70	23,86	18,91	19,40	16,85	18,9

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

**Tabla 3.16** Resumen climatológico — Est. Campanario

Índice	Und	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Temp, Max, Media	°C	17,7	18,0	18,3	19,6	18,3	17,3	16,7	18,3	19,4	19,9	19,5	19,0	18,5
Temp, Min, Media	°C	4,5	4,3	3,7	1,5	-1,2	-1,9	-2,0	-0,8	0,7	3,0	3,5	4,3	1,6
Temp, Media	°C	11,1	11,1	11,0	10,6	8,6	7,7	7,3	8,8	10,0	11,4	11,5	11,7	10,1
Humed, Relativa	%	60,2	62,1	62,1	58,4	50,6	45,1	44,6	46,4	49,3	51,5	53,7	56,2	53
Insolación Media	Hrs	5,7	5,9	6,2	7,4	7,6	7,8	7,4	7,9	7,9	7,3	7,7	6,4	7,1
Evap, Media	mm/d	4,61	4,38	4,32	4,70	5,09	5,25	5,38	5,80	6,08	5,99	6,02	5,52	5,26
Precipitación	mm	99,6	84,2	51,9	11,7	2,1	0,4	0,0	1,9	4,8	18,5	20,0	60,7	355,8
Velocidad del viento	km/hr	6,4	6,2	6,9	8,4	10,7	13,0	13,2	12,0	11,5	8,9	8,5	7,6	9,4

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

### 3.3.3 Registro de Precipitación mensual

Se muestra a continuación los registros de datos de precipitación del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI, SISMET), de las estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca de estudio y adyacentes a ésta, Habiéndose recopilado así información de las estaciones: Villazón, Mojo, Campanario, Tupiza, San Pablo. (**Anexo 1.**)

**Tabla 3.17** Resumen de Precipitación Total Mensual (mm) — Est. Villazón.

Año		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
1990 - 2015	Prom	114,14	69,52	42,48	10,50	0,66	0,04	0,09	1,62	3,10	11,20	28,27	73,37	354,98
	Max	219,10	163,80	102,40	60,10	6,10	0,50	1,70	21,10	19,00	40,50	130,20	157,20	556,40
	Min	19,20	20,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40	15,00	198,30

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

**Tabla 3.18** Resumen de Precipitación Total Mensual (mm) — Est. Mojo

Año		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
1990 - 2015	Prom	104,63	73,05	47,92	9,37	0,75	0,03	0,00	0,83	3,28	11,64	27,13	70,31	348,95
	Max	364,00	124,50	122,40	39,00	10,60	0,80	0,00	12,00	36,60	48,00	92,20	172,50	666,70
	Min	29,40	26,70	3,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,80	184,60

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

**Tabla 3.19** Resumen de Precipitación Total Mensual (mm) — Est. Tupiza

Año		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
1990 - 2015	Prom	92,98	66,61	41,52	6,53	0,81	0,06	0,11	0,86	3,54	6,51	15,45	64,09	299,07
	Max	206,90	161,60	93,40	60,10	11,80	1,50	2,40	16,70	31,90	43,30	54,20	211,20	485,20
	Min	18,40	13,60	2,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,80	125,90

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

**Tabla 3.20** Resumen de Precipitación Total Mensual (mm) — Est. San Pablo

Año		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
1990 - 2015	Prom	96,86	71,84	40,80	1,82	1,27	0,67	3,99	2,64	1,50	3,53	6,86	46,64	278,42
	Max	213,30	221,80	169,50	11,00	15,00	10,40	72,30	32,80	10,00	28,30	33,50	150,30	556,70
	Min	0,50	9,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	122,20

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

**Tabla 3.21** Resumen de Precipitación Total Mensual (mm) — Est. Campanario

Año		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
1990 - 2015	Prom	100,00	86,92	53,82	11,54	2,15	0,44	0,01	1,74	4,60	18,53	21,24	62,70	363,68
	Max	167,40	172,70	97,00	46,50	13,30	8,50	0,20	10,90	32,80	80,20	49,00	161,60	466,40
	Min	28,30	36,80	6,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,30	250,90

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

### 3.4 Temperatura.

Se presenta la información de Temperatura media mensual de las estaciones: Campanario, Villazón, Mojo, Tupiza, San Pablo, registradas por el SENAMHI, información recopilada de las estaciones meteorológicas dentro de la cuenca del río San Juan del Oro, con un periodo considerad de 1990 a 2017.

**Tabla 3.22** Registro de Temperatura media mensual (° C).

ESTACIÓN	COTA msnm.	MES												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	MED
Campanario	3460	11,10	11,13	11,01	10,57	8,56	7,72	7,35	8,76	10,04	11,42	11,50	11,66	10,07
Villazón	3443	15,37	14,97	14,81	13,06	9,51	7,14	6,92	8,84	10,91	13,08	15,63	16,14	12,20
Mojo	3400	13,74	13,16	12,83	11,32	7,80	6,02	5,70	7,80	9,78	12,11	13,43	14,13	10,65
Tupiza	2952	17,20	17,44	17,09	15,61	11,96	9,84	9,71	11,97	14,50	16,90	18,12	18,33	14,89
San Pablo	4230	9,45	9,07	8,61	6,26	3,07	1,26	1,28	2,34	3,97	6,02	7,88	8,98	5,68

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI (SISMET)

### 3.5 Registros de Aforos

Los registros de aforo fueron extraídos de la estación Hidrométrica de El Puente, en donde se toman mediciones de las escalas diarias en el río a horas 7:00am, 18:00 pm y 12:00pm. Los datos de escala a usar son (ver Anexo). La Tabla 3.23 se muestran los caudales directos instantáneos medidos en la estación de aforo, en donde se muestra la información detallada en la fecha medida. Para medir el caudal diariamente o de un modo continuo en diversos puntos de una cuenca se utilizan los aforos indirectos, por eso también se los denomina continuos (F.Javier Sánchez-Dpto. Geología de Samanca 2013:1), posteriormente se usaran este método mediante la curva de gatos, para poder modelar la cuenca.

**Tabla 3.23** Registro de aforos de la estación hidrométrica de El Puente (2004-2010)

FECHA	Escala (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Área ( m <sup>2</sup> )	Vel. Med. (m/s)	Ancho (m)
30-11-04	0,26	0,002	0,02	0,193	0,55
04-12-04	0,32	0,035	0,91	0,065	13,00

## CALENTAMIENTO

21-12-04	0,49	2,889	6,22	0,607	25,60
08-01-05	0,49	2,428	5,29	0,499	26,90
26-01-05	1,05	34,660	28,80	1,028	34,00
10-02-05	1,34	74,880	43,77	1,611	40,50
25-02-05	1,76	129,600	66,18	1,353	50,00
12-03-05	1,08	41,680	30,11	1,296	38,60
29-03-05	0,94	30,900	26,86	1,135	38,50
26-04-05	0,45	5,370	8,62	0,866	22,50
12-05-05	0,44	5,535	8,82	0,909	22,10
FECHA	Escala (m)	Caudal (m3/s)	Área ( m2)	Vel, Med, (m/s)	Ancho (m)
21-06-05	0,42	4,814	8,50	0,799	22,20
13-07-05	0,43	5,035	8,49	0,820	22,50
20-07-05	0,41	4,735	8,40	0,817	21,75
02-08-05	0,37	4,041	8,29	0,699	22,00
19-08-05	0,39	3,626	8,31	0,618	22,00
04-09-05	0,36	2,690	6,78	0,555	21,00
30-09-05	0,27	1,134	3,57	0,445	17,50
12-10-05	0,10	0,449	2,01	0,325	13,00
25-10-05	0,07	0,231	1,43	0,232	12,00
03-11-05	0,05	0,108	0,86	0,174	10,70
11-11-05	0,20	1,456	4,03	0,492	18,50
17-11-05	0,27	1,482	3,81	0,554	19,00
30-11-05	0,01	0,020	0,21	0,129	5,20
08-12-05	0,57	5,185	8,27	0,810	20,60
14-12-05	0,46	4,541	8,00	0,834	20,10
26-12-05	0,42	3,653	7,27	0,725	20,55
13-01-06	0,41	3,224	6,63	0,711	22,80
22-02-06	1,28	54,680	36,66	1,538	39,00
09-03-06	0,79	9,793	12,33	0,922	27,80
22-03-06	0,98	16,380	18,03	1,236	30,00
17-04-06	0,73	9,486	10,58	1,262	24,50
26-04-06	0,71	8,148	11,97	0,956	26,70
11-05-06	0,70	7,452	10,27	0,942	26,60
25-05-06	0,65	6,780	10,26	0,851	26,30
09-06-06	0,65	5,841	10,19	0,900	25,60
20-06-06	0,63	5,727	11,05	0,763	26,60
13-07-06	0,60	5,233	10,60	0,693	26,00
17-08-06	0,51	3,483	8,78	0,510	26,00
31-08-06	0,48	2,746	7,47	0,504	24,80
14-09-06	0,43	2,287	6,32	0,511	18,50
21-09-06	0,42	2,285	5,92	0,574	17,00
10-10-06	0,18	0,400	2,73	0,216	14,50
27-10-06	0,35	1,491	4,26	0,494	20,60
21-11-06	0,06	0,010	0,06	0,213	1,20
30-11-06	0,33	0,986	2,89	0,482	18,60
19-12-06	0,90	13,900	15,19	0,974	31,40
19-01-07	1,30	109,600	67,68	2,368	54,00

## CALIBRACIÓN

30-01-07	0,39	8,658	11,32	0,873	29,00
06-02-07	0,19	3,830	7,82	0,661	18,00
27-03-07	0,65	13,540	12,35	1,091	24,00
10-04-07	0,50	7,676	9,24	0,943	20,80
27-04-07	0,46	6,537	8,38	0,914	20,80
10-05-07	0,45	6,529	8,63	0,916	21,00
29-05-07	0,43	6,029	8,09	0,906	21,00
20-06-07	0,42	5,430	7,68	0,879	20,50
31-07-07	0,43	4,312	8,29	0,595	18,00
FECHA	Escala (m)	Caudal (m3/s)	Área ( m2)	Vel, Med, (m/s)	Ancho (m)
08-08-07	0,42	4,280	8,17	0,598	18,00
27-09-07	0,24	1,830	4,48	0,584	16,50
12-10-07	0,08	0,509	0,31	0,307	10,50
13-11-07	0,11	0,748	3,28	0,349	13,70
20-11-07	0,56	8,664	9,81	0,983	19,80
11-12-07	0,33	2,989	4,66	0,764	10,75
19-12-07	1,30	87,960	56,50	1,740	54,00
12-01-08	1,55	174,500	85,11	2,909	58,00
23-01-08	1,10	66,410	40,72	1,700	49,00
13-02-08	1,09	13,690	18,38	0,906	36,00
04-05-08	1,01	6,613	9,24	0,758	17,00
22-05-08	1,01	6,308	9,33	0,813	19,00
14-01-09	1,04	13,920	17,03	0,972	41,00
06-02-09	1,04	17,730	16,79	1,400	40,20
17-03-09	1,05	18,640	15,09	1,741	34,00
02-04-09	1,02	16,010	16,19	1,368	44,70
07-05-09	0,88	10,630	12,24	1,020	26,00
17-06-09	0,81	8,170	10,54	0,936	22,50
27-06-09	0,79	7,100	7,37	1,105	19,00
29-07-09	0,75	5,651	9,10	0,711	21,50
17-08-09	0,74	5,051	8,53	0,806	20,50
05-09-09	0,72	4,514	8,83	0,630	21,00
23-10-09	0,58	1,221	3,47	0,492	14,00
05-11-09	0,56	1,519	3,13	0,727	13,20
20-01-10	0,82	5,562	9,22	0,766	22,60
21-01-10	0,81	4,862	8,32	0,692	21,00
22-03-10	1,05	12,660	15,26	1,080	37,00
22-04-10	0,93	8,656	8,32	1,316	25,40
23-04-10	0,93	7,479	10,39	0,790	26,90
21-05-10	0,93	5,974	9,56	0,730	27,50
17-06-10	0,90	6,091	7,52	1,024	25,00
30-06-10	0,88	6,206	8,39	1,000	23,00
23-07-10	0,84	5,802	0,77	1,072	23,00
25-08-10	0,79	4,904	6,71	1,049	21,00
02-09-10	0,76	4,495	6,37	1,014	21,50
09-11-10	0,63	1,035	3,51	0,369	14,00
12-11-10	0,63	1,013	3,50	0,361	13,00

15-12-10	0,65	1,049	3,75	0,339	12,00
17-12-10	0,65	0,957	3,24	0,371	11,50

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI

Como se puede apreciar en los datos de aforo Tabla 3.23, los periodos (2004-2007) cuentan con más datos y los cuales serán usados para el calentamiento y calibración del modelo hidrológico, los periodos (2007-2009) tienen datos de escala diaria incompletas (ver Anexo 5) y serán usados para simular el modelo, el periodo (2009-2010) servirá para comprobar el modelo por la información disponible de las escalas diarias y los registros de aforo.

### 3.6 Datos necesarios para la simulación del río en la cuenca.

Para la modelación hidrológica con uso del software RS-MINERVE, se usó el módulo denominado 'Lag Time' (tiempo de retardo) el cual ayuda a que el modelo simule el río, juntando las variables hidrológicas de mejor manera, tomando solo hasta la estación hidrométrica de El Puente se obtuvieron los valores de la Tabla 3.24.

La longitud del río se encontró con la ayuda del número de orden nivel 5, el cual nos dio una longitud de 328,44 km., solo hasta la estación hidrométrica de El Puente.

Los datos del río como ser el ancho, la pendiente, los coeficientes y el Tc ya fueron calculados, otros ya se obtuvieron de fuentes externas en este apartado.

El área de la cuenca, así como la cota media nos servirá también para poder modelar el modelo de flujo diario GR4J.

**Tabla 3.24** Información necesaria para simular el río en el modelo en RS-MINERVE por medio de 'Lag Time'.

Nombre	Abreviatura en el programa	Valor	Unidad
Longitud	L	328.439,70	metros
Ancho	BO	28,00	metros
Coef. de Manning	M	0,8	-
Pendiente	JO	0,0033	m/m
Coef. de Strickler	K	28,00	m <sup>1/3</sup> /s
Tiempo de concentración	Lag	489 $\cong$ 500	min

Fuente: Elaboración Propia

Además, los datos encontrados de la cuenca no ayudaran a sacar conclusiones sobre los parámetros encontrados después de calibrar el modelo y con ello se demostrará los resultados obtenidos.

## 4. APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO

### 4.1 Análisis y regionalización de la precipitación.

#### 4.1.1 Histograma anual.

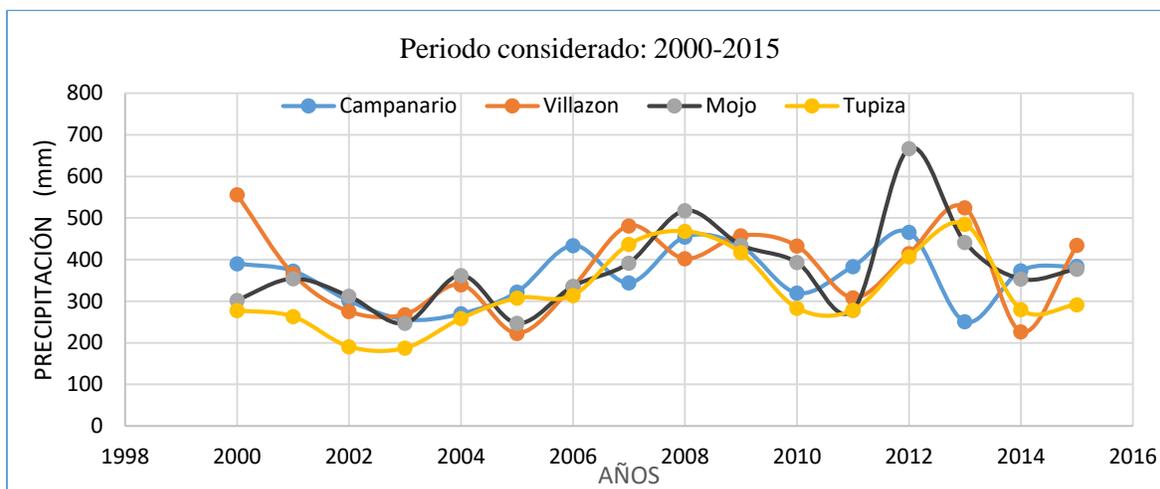
El análisis visual se realizó teniendo en cuenta la información incompleta de la serie, que debe ser completada con el promedio mensual, para tal fin se construyó un histograma de las Estaciones Campanario, Villazón, Mojo y Tupiza; la estación San Pablo no se tomó en cuenta debido a la gran variación de precipitación, las demás se usaron para observar si presentan un mismo comportamiento, se consideró el periodo 2000-2015 por la disponibilidad de información disponible de los registros de las estaciones más cercanas.

**Tabla 4.1** Precipitación anual (mm) Est. Campanario Villazón, Mojo y Tupiza.

Año	Estación			
	Campanario	Villazón	Mojo	Tupiza
2000	390,3	556,4	302,4	277,7
2001	372,8	365,3	353,9	263,1
2002	301,1	275,2	311,8	190,8
2003	256,4	268,1	246,9	187,3
2004	270	339,6	361,9	258,2
2005	322	223	246,9	307,5
2006	433,8	335,4	335,7	313,9
2007	344,3	481,4	391,5	436,9
2008	454,7	402,2	517,5	468,1
2009	431,9	457,7	434,6	416,6
2010	319,9	432,8	393,1	283,2
2011	383,6	308,4	278,2	278,8

2012	466	414,8	666,7	407,1
2013	250,9	524,9	441,2	485,2
2014	373,4	226,3	353,4	279,7
2015	383,7	434,3	377,2	291,6

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI

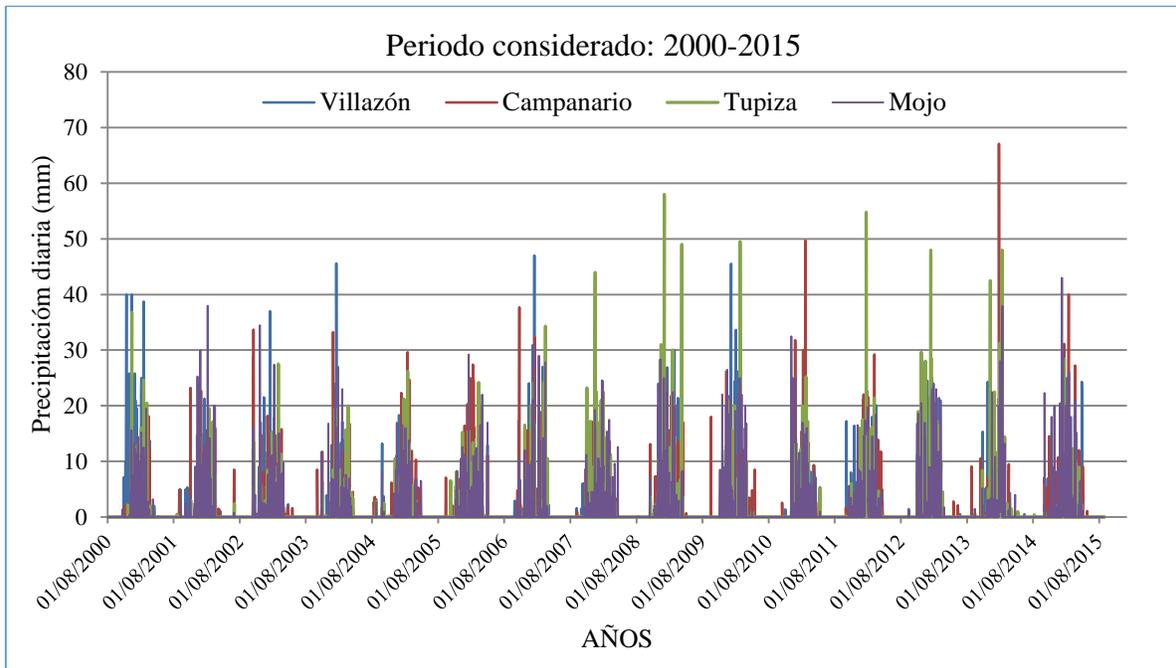


**Figura 4.1** Histograma anual Est. Campanario, Villazón, Mojo y Tupiza

Fuente: Elaboración propia– Información SENAMHI (SISMET).

#### 4.1.2 Histograma diario.

Un análisis más detallado se realizó teniendo en cuenta la precipitación diaria de las estaciones con más datos completos, para tal fin se construyó un histograma diario de las Estaciones Campanario, Villazón, Mojo y Tupiza, para observar si presentan un mismo comportamiento. El histograma se ordenó en periodo hidrológico para que así se aprecie mejor su desarrollo, la información tomada en cuenta se presenta en la Fig. 4.2.

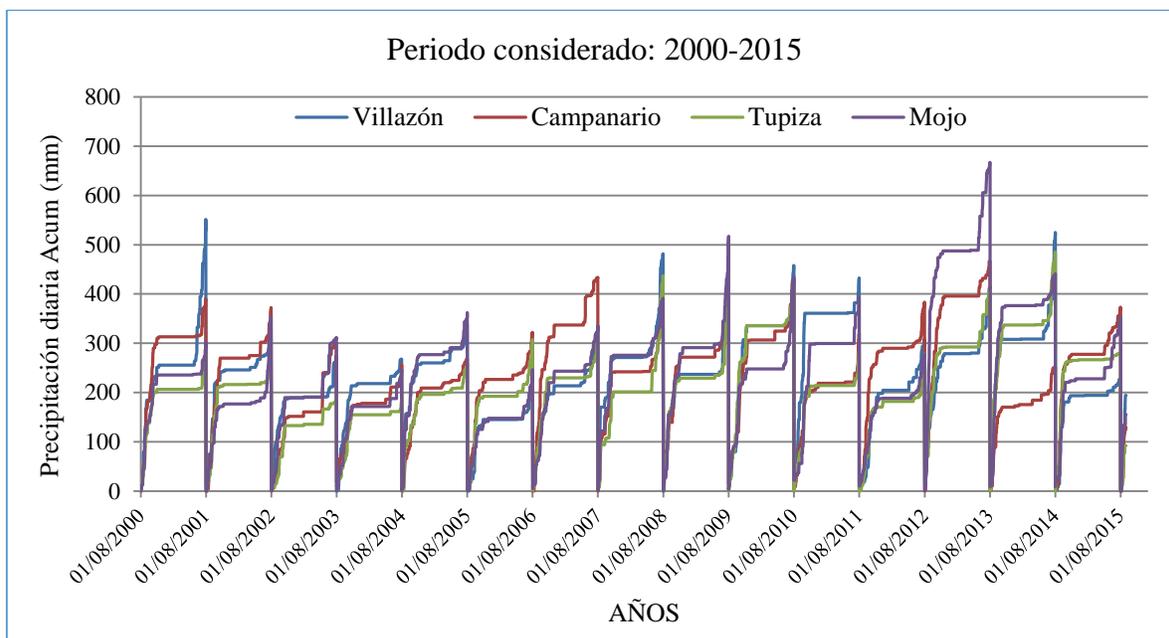


**Figura 4.2** Histograma diario, Est. Campanario, Villazón, Mojo y Tupiza.

Fuente: Elaboración propia– Información SENAMHI (SISMET).

#### 4.1.3 Histograma diario acumulado

El análisis visual que nos da un histograma Diario Acumulado nos hace ver si la precipitación acumulada de cada estación tomada en cuenta es mayor o menor con mejor detalle, la información tomada en cuenta se presenta en la Figura 4.3 para tal fin se construyó un histograma diario acumulado de las Estaciones Campanario, Villazón, Mojo y Tupiza, para observar su comportamiento.



**Figura 4.3** Histograma diario-anual acumulado, Est. Campanario, Villazón, Mojo y Tupiza.  
Fuente: Elaboración propia– Información SENAMHI (SISMET).

#### 4.1.4. Ubicación de las estaciones meteorológicas y centroide de la cuenca.

**Tabla 4.2** Coordenadas de estaciones meteorológicas

N°	Estación	Coordenadas UTM		Altitud	Municipio	Provincia	Dept.
		Datum WGS 1984					
		X(m)	Y (m)	m.s.n.m.			
1	Campanario	295357,44	7619836,74	3460	El Puente	Méndez	Tarija
2	Villazón	231716,32	7555663,28	3443	Villazón	Modesto Omiste	Potosí
3	Mojo	236347,38	7583894,89	3400	Villazón	Modesto Omiste	Potosí
4	Tupiza	218556,41	7626904,49	2952	Tupiza	Sud Chichas	Potosí
5	San Pablo	746890,95	7600348,57	4230	San Pablo de Lípez	Sud Lípez	Potosí

Fuente: Elaboración propia – Información SENAMHI (SISMET).

**Tabla 4.3** Centroide de la cuenca

Centroide de la Cuenca								Cota Media
Geográficas				Coordenadas UTM				
Latitud		Longitud		Datum WGS 1984 (z-19K)				
°	'	"	°	'	"	X(m)	Y (m)	m.s.n.m.
21	59	22,4	66	1	14,52	807648,85	7565333,52	3837,21

Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.5. Análisis de regresión Altura Vs. Precipitación.

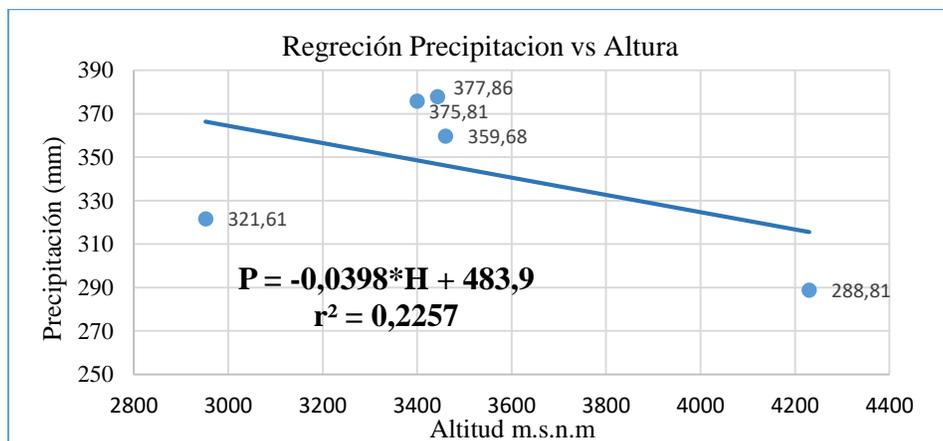
Para calcular a precipitación media de la cuenca de estudio, fue necesario partir de un análisis de regresión altura – precipitación de las cinco estaciones seleccionadas inicialmente como se muestra a continuación:

**Tabla 4.4** Análisis de regresión H vs P: Est. Campanario, Villazón, Mojo, Tupiza, San Pablo. Periodo considerado: (2000-2015)

Estación	Altitud (m.s.n.m)	Precipitación Media Anual (mm)
Campanario	3460	359,68
Villazón	3443	377,86
Mojo	3400	375,81
Tupiza	2952	321,61
San Pablo	4230	288,81

Fuente: Elaboración propia

De la regresión en función a las cinco estaciones se obtiene un bajo coeficiente de determinación como se muestra a continuación en la Figura 4.4.



**Figura 4.4** Regresión Lineal (Est. Campanario, Villazón, Mojo, Tupiza, San Pablo)

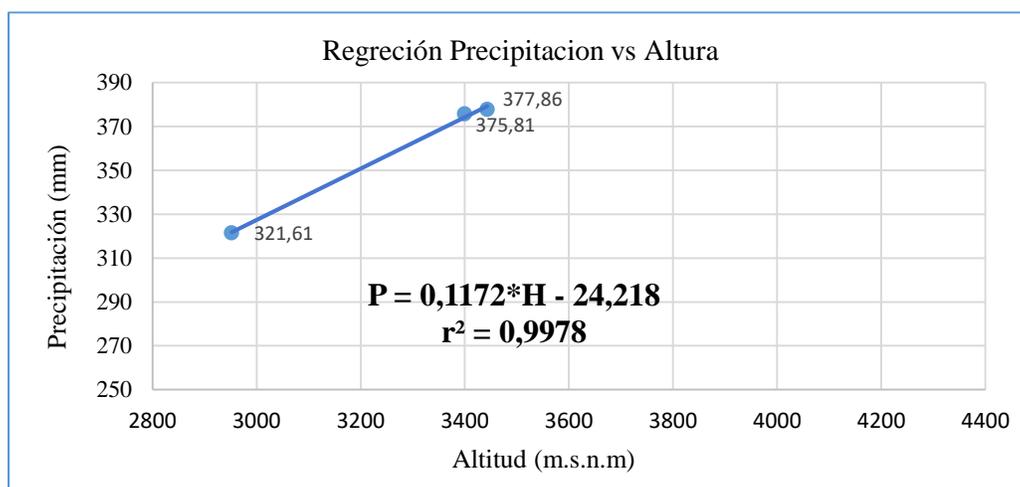
Por lo cual se procedió a buscar el mejor ajuste combinando estaciones hasta encontrar un coeficiente de determinación  $r^2$  superior al 95 % por lo cual ya se podría utilizar para hacer cálculos, las estaciones de Villazón, Mojo y Tupiza.

**Tabla 4.5** Análisis de regresión H vs P: Est. Villazón, Mojo, Tupiza. Periodo considerado: (2000-2015)

Estación	Altitud (m.s.n.m)	Precipitación Media Anual (mm)
Villazón	3443	377,86
Mojo	3400	375,81
Tupiza	2952	321,61

Fuente: Elaboración propia

El nuevo análisis de regresión lineal, que se optó por ser el más recomendado, nos da un coeficiente de determinación aceptable como se muestra en la siguiente Figura 4.5.



**Figura 4.5** Regresión Lineal (Est. Villazón, Mojo, Tupiza)

#### 4.1.6 Cálculo de la precipitación media anual en la cuenca.

A continuación, se muestra la obtención de la precipitación media anual de la cuenca de estudio, en función de la precipitación de las estaciones seleccionadas y de la altura a partir de la ecuación de Regresión Lineal:  **$P = 0,1172 \cdot H - 24,218$**  que fue la que mejor se ajustó con 3 estaciones.

**Tabla 4.6** Análisis regional de precipitación – Ecuación de Regresión altitud: Est. Villazón, Mojo, Tupiza. Periodo considerado: (2000-2015)

Estación	Altitud (m.s.n.m)	Precipitación Media Anual (mm)
Villazón	3443	377,86

Mojo	3400	375,81
Tupiza	2952	321,61

Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.7** Tipos de regresión de mejor ajuste Est. Villazón, Mojo, Tupiza. Periodo considerado: (2000-2015)

Variables	Lineal	Exponencial	Logarítmico	Polinómica	Potencial
	$y=a x + b$	$y=a e^{bx}$	$y=a \ln(x) + b$	$y=a x^2+ b x + c$	$y=a x^b$
<b>a</b>	0,1172	119,25	373,09	-0,0001	0,0621
<b>b</b>	-24,218	0,0003	-2659,4	1,0675	1,0704
<b>c</b>				-1531,1	
<b>Parámetros de Regresión</b>					
<b>r</b>	0,999	0,999	0,999	1,000	0,999
<b>R<sup>2</sup></b>	0,9978	0,9976	0,9983	1,000	0,9981

Fuente: Elaboración propia

La ecuación lineal es la que mejor se ajusta a las precipitaciones de las estaciones por ende se corrige la precipitación de éstas en función a dicha ecuación. <sup>2</sup>

**Tabla 4.8** Precipitaciones corregidas

Estación	Precipitación Media Anual Corregida (mm)
Villazón	379,30
Mojo	374,26
Tupiza	321,76

Fuente: Elaboración propia

De igual forma se calculó la precipitación total mensual (mm) para la cota media de la cuenca del río San Juan del Oro, y también para toda la matriz de precipitación teniendo como resultado la siguiente Tabla 4.9, (ver **Anexos 2**).

**Tabla 4.9** Precipitación total mensual de la cuenca en base a factores de influencia altura –distancia.

<b>CUENCA DE ESTUDIO:</b>	<b>Latitud:</b>	21° 59'22.4"	S	<b>Estaciones:</b>	Villazón
Río San Juan del Oro	<b>Longitud:</b>	66° 01'14.52"	W		Mojo
	<b>Altitud:</b>	3837.21	m.s.n.m		Tupiza

<sup>2</sup>Señalo Lima Usnayo, Nisgsiar Braulio, 2016. Trabajo de Fin de Master (Edición 2016), "MODELACIÓN HIDROLÓGICA CON HEC-HMS Y RS-MINERVE DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO APURÍMAC-PERÚ", Peru:Universidad de Alcalá de Henares y Universidad Rey Juan Carlos . / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído: [https://ww3.uah.es/master\\_universitario\\_hidrologia/archivos/Proyectos\\_2016.pdf](https://ww3.uah.es/master_universitario_hidrologia/archivos/Proyectos_2016.pdf)

N° REG	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
1	2000	175,69	28,02	65,10	18,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,87	131,85	155,04	583,62
2	2001	82,65	116,63	8,71	4,81	0,02	0,00	0,00	0,00	7,84	22,35	16,05	187,13	446,19
3	2002	132,97	75,63	28,13	2,04	0,00	0,98	0,00	0,00	0,00	13,84	62,33	65,11	381,03
4	2003	98,80	79,21	51,70	4,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,06	5,89	57,92	320,64
5	2004	200,89	104,76	25,74	0,00	0,00	0,00	0,00	5,32	22,88	1,41	9,11	60,53	430,64
6	2005	28,63	55,92	13,37	7,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,67	43,69	176,91
7	2006	54,10	95,29	18,97	47,64	8,79	0,00	0,00	0,00	5,85	36,52	16,63	70,81	354,61
8	2007	196,09	79,58	58,03	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,05	6,70	26,88	71,15	443,47
9	2008	132,72	48,47	85,22	24,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63	71,49	80,43	443,12
10	2009	85,58	113,72	67,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,40	182,58	480,49
11	2010	164,57	176,10	96,63	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,49	92,11	531,49
12	2011	28,26	78,20	60,22	46,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	28,96	32,96	36,24	311,50
13	2012	314,07	43,34	69,18	19,08	0,00	0,00	0,00	0,00	2,28	25,73	66,23	97,00	636,92
14	2013	227,75	111,68	1,77	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,76	17,64	52,73	75,22	488,06
15	2014	68,24	76,72	13,48	2,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	28,00	56,42	44,16	289,53
16	2015	251,25	72,77	94,95	64,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,12	31,53	18,24	538,19
Media		<b>140.14</b>	<b>84,75</b>	<b>47,40</b>	<b>15,19</b>	<b>0,55</b>	<b>0,12</b>	<b>0,00</b>	<b>0,33</b>	<b>2,67</b>	<b>13,74</b>	<b>40,04</b>	<b>83,58</b>	<b>428,53</b>
Desv. Estándar		83.50	35,51	31,76	20,46	2,20	0,28	0,00	1,33	5,89	12,39	32,95	49,98	119,11
Coef. Variación		0.60	0,42	0,67	1,35	3,99	2,29	0,00	4,00	2,21	0,90	0,82	0,60	0,28

Fuente: Elaboración propia – Información SENAMHI.

#### 4.1.7 Cálculo de la precipitación media diaria en la cuenca por medio de factores de influencia altura – distancia.

De la misma manera que se analizaron las regresiones anuales, se analizó las regresiones diarias de los años 2004 a 2010, se contó con la misma información disponible de las estaciones consideradas, extraídas del SENAMHI-SISMET. A continuación, se muestra la obtención de la precipitación media diaria de la cuenca de estudio, en función de la precipitación y altura de las estaciones consideradas, a partir de ecuaciones de regresión lineal para la cota media de la cuenca del río San Juan del Oro, y también para toda la matriz de precipitación diaria teniendo como resultado la siguientes Tablas 4.10-4.16, (ver **Anexo 3**). Cabe mencionar que los valores de regresiones diarias arrojaban valores negativos (lo que significaba, que no había lluvia)

**Tabla 4.10** Precipitación total diaria de la cuenca en base a factores de influencia altura — distancia del año 2004 de las estaciones Villazón, Mojo y Tupiza

N° REG	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1	2004	0,81	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,21
2	2004	5,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,58
3	2004	3,05	0,00	0,00	3,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,61	9,67
4	2004	0,00	1,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,96	0,00	0,00	5,60
5	2004	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,85	1,85
6	2004	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2004	6,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	6,58
8	2004	0,00	0,00	11,88	1,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,50
9	2004	24,25	0,00	8,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,53
10	2004	32,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,53
11	2004	14,39	16,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,05	41,67
12	2004	6,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,77	10,31
13	2004	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	2004	5,55	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,35
15	2004	7,40	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,97	33,55
16	2004	49,69	0,00	0,00	2,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	52,59
17	2004	4,78	21,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,03
18	2004	11,53	31,15	1,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	44,05
19	2004	0,00	7,57	3,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,59
20	2004	0,00	5,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,90
21	2004	1,85	14,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,91
22	2004	16,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,43	0,00	0,00	0,00	0,00	22,03
23	2004	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,23	0,00	0,00	0,00	0,00	2,23
24	2004	0,00	0,00	8,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,61	12,42
25	2004	0,00	0,00	1,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,61	0,00	0,00	0,00	22,22
26	2004	22,92	1,40	5,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,99	0,00	0,00	3,28	35,60
27	2004	0,00	4,27	6,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,51	0,00	0,00	6,40	18,25
28	2004	0,00	3,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,57	21,03
29	2004	0,00	5,02	4,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,12	0,00	11,74
30	2004	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,61	2,78	9,38
31	2004	0,00		0,00		0,00		0,00	0,00		0,00		2,37	2,37
<b>SUM</b>	<b>2004</b>	<b>214,00</b>	<b>111,98</b>	<b>53,05</b>	<b>7,53</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>7,68</b>	<b>25,11</b>	<b>3,96</b>	<b>8,72</b>	<b>82,25</b>	<b>514,27</b>
Media		6,90	3,86	1,71	0,25	0,00	0,00	0,00	0,25	0,84	0,13	0,29	2,65	16,59
Desv, Estándar		11,6	7,6	3,1	0,8	0,0	0,0	0,0	1,0	3,8	0,7	1,3	5,8	14,4
Coef, Variación		1,7	2,0	1,8	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	2,2	0,9

Fuente: Elaboración propia — con información del SENAMHI.

**Tabla 4.11** Precipitación total diaria de la cuenca en base a factores de influencia altura — distancia del año 2005 de las estaciones Villazón, Mojo y Tupiza

N° REG	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1	2005	0,00	18,20	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	18,20
2	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	1,03	1,03

3	2005	0,00	4,01	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,48	4,49
4	2005	0,00	3,50	1,46	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	4,97
5	2005	0,00	7,31	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	5,33	12,64
6	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	5,54	0,00	5,54
7	2005	0,00	0,00	4,03	2,21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,83	0,00	7,06
8	2005	0,50	1,46	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,14	0,00	2,11
9	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	8,40	1,01	9,41
10	2005	0,00	17,69	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,53	18,22
11	2005	0,00	14,02	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	6,23	0,00	20,26
12	2005	0,00	0,45	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	24,36	24,81
13	2005	10,30	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	7,69	0,00	18,00
14	2005	23,77	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	23,77
15	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
16	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,53	0,53
17	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	9,61	9,61
18	2005	2,47	4,49	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	6,96
19	2005	0,57	22,11	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,48	23,15
20	2005	0,00	8,28	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	1,03	9,31
21	2005	13,49	0,00	1,99	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,93	0,96	17,37
22	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	9,30	9,30
23	2005	4,82	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,53	5,34
24	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
25	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,50	6,58	7,08
26	2005	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
27	2005	0,00	2,02	5,22	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	13,93	21,17
28	2005	0,00	11,97	4,01	5,43	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,50	0,00	21,92
29	2005	1,03		0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	1,61	7,74	10,38
30	2005	0,57		10,23	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	2,04	5,04	17,88
31	2005	0,00		0,00		0,0		0,0	0,0		0,00		4,13	4,13
<b>SUM</b>	<b>2005</b>	<b>57,52</b>	<b>115,50</b>	<b>26,94</b>	<b>7,64</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>34,42</b>	<b>92,59</b>	<b>334,62</b>
Media		1,86	4,13	0,87	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,15	2,99	10,79
Desv, Estándar		5,1	6,6	2,2	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	5,4	8,1
Coef, Variación		2,7	1,6	2,5	4,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	1,8	0,7

Fuente: Elaboración propia — con información del SENAMHI.

**Tabla 4.12** Precipitación total diaria de la cuenca en base a factores de influencia altura — distancia del año 2006 de las estaciones Villazón, Mojo y Tupiza

N° REG	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
--------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----	-------

1	2006	3,25	0,00	10,53	18,37	6,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,41
2	2006	18,38	0,00	0,00	0,00	2,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,39	26,31
3	2006	0,00	23,15	0,96	1,33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	25,44
4	2006	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	2006	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	2006	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,89	15,89
7	2006	0,00	14,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,11	20,46
8	2006	0,00	2,50	12,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,07	23,20
9	2006	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	2006	0,00	2,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,52	0,00	0,00	6,46
11	2006	0,33	2,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,49	10,07
12	2006	0,00	21,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,79
13	2006	0,00	1,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,01	0,00	2,49
14	2006	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,09	2,09
15	2006	9,05	1,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,66
16	2006	36,25	11,09	14,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,81	94,62
17	2006	0,00	0,19	12,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,52	0,00	13,85
18	2006	8,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,33	5,47	13,81
19	2006	15,15	5,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,17	20,89
20	2006	0,00	7,21	4,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,61	0,00	0,00	38,64
21	2006	0,00	9,19	12,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,08
22	2006	8,09	11,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,42	21,74
23	2006	3,19	9,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,03
24	2006	2,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,50	0,00	3,56
25	2006	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,94	0,00	2,94
26	2006	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	2006	0,00	0,00	5,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	6,58	8,46	0,93	23,52
28	2006	0,00	0,00	3,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,36	0,00	4,56	14,90	26,32
29	2006	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	2006	0,00		0,00	27,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40	0,98	0,00	29,94
31	2006	0,00		0,00		0,00		0,00	0,00		0,00		20,56	20,56
<b>SUM</b>	<b>2006</b>	<b>103,75</b>	<b>124,34</b>	<b>77,03</b>	<b>47,26</b>	<b>8,79</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>5,85</b>	<b>38,15</b>	<b>21,30</b>	<b>122,30</b>	<b>548,77</b>
Media		3,35	4,44	2,48	1,58	0,28	0,00	0,00	0,00	0,20	1,23	0,71	3,95	17,70
Desv, Estándar		7,7	6,7	4,7	5,9	1,2	0,0	0,0	0,0	0,8	4,9	1,8	7,6	18,3
Coef, Variación		2,3	1,5	1,9	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	1,9	1,0

Fuente: Elaboración propia — con información del SENAMHI.

**Tabla 4.13** Precipitación total diaria de la cuenca en base a factores de influencia altura — distancia del año 2007 de las estaciones Villazón, Mojo y Tupiza

N° REG	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1	2007	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	2007	17,45	0,00	0,00	2,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,43	23,35
3	2007	8,54	0,00	12,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93	21,77
4	2007	5,31	0,00	10,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,21	17,56
5	2007	49,69	0,00	4,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,54	0,00	10,56	8,06	73,95
6	2007	0,00	3,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,75	0,00	13,28
7	2007	0,00	33,43	3,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	36,77
8	2007	0,00	0,00	5,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,05	0,00	15,67	26,91
9	2007	5,54	0,00	9,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,17
10	2007	12,18	2,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,65
11	2007	0,00	3,50	2,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,70
12	2007	38,71	0,03	10,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	49,65
13	2007	30,23	0,50	9,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	39,99
14	2007	47,75	8,90	33,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,33	44,03	136,93
15	2007	0,00	0,00	15,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,66	0,00	0,00	22,72
16	2007	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,30	1,49	6,55	9,33
17	2007	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,97	4,10	6,07
18	2007	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	2007	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,03	0,00	0,00	4,03
20	2007	0,00	0,00	5,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,95	11,53	20,52
21	2007	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,71	8,71
22	2007	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	2007	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,98	1,24	18,22
24	2007	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	2007	0,00	1,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,97
26	2007	0,00	1,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,94	0,00	5,93
27	2007	0,00	1,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,43	0,00	0,00	8,83
28	2007	0,00	27,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,90	0,00	32,49
29	2007	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,76	0,00	14,31	21,07
30	2007	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,51	0,00	0,00	1,99	3,50
31	2007	0,00		0,00		0,00		0,00	0,00		0,00		0,00	0,00
<b>SUM</b>	<b>2007</b>	<b>215,40</b>	<b>85,33</b>	<b>120,97</b>	<b>2,47</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>3,05</b>	<b>33,22</b>	<b>55,86</b>	<b>122,76</b>	<b>639,06</b>
Media		6,95	3,05	3,90	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	1,07	1,86	3,96	20,61
Desv. Estándar		14,4	8,0	7,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	2,4	4,0	8,7	27,3
Coef. Variación		2,1	2,6	1,8	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,1	2,2	1,3

Fuente: Elaboración propia — con información del SENAMHI.

**Tabla 4.14** Precipitación total diaria de la cuenca en base a factores de influencia altura — distancia del año 2008 de las estaciones Villazón, Mojo y Tupiza

N° REG	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1	2008	0,00	9,53	0,00	1,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	15,55	26,47
2	2008	22,36	0,00	27,16	5,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	55,13
3	2008	10,77	0,98	0,00	6,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,35
4	2008	4,68	0,00	16,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,72
5	2008	0,00	0,00	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,53
6	2008	24,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,21
7	2008	0,00	0,00	11,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,54
8	2008	0,00	1,06	7,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,73	1,40	11,55
9	2008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	2008	0,00	8,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,52	30,30	44,11
11	2008	0,00	1,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,71
12	2008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,53	11,53
13	2008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,03	0,00	19,26	25,29
14	2008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,45	9,45
15	2008	5,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,17
16	2008	12,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,56	14,80
17	2008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,15	13,15
18	2008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	2008	0,81	13,34	0,00	10,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,91
20	2008	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	2008	8,06	0,00	6,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,33
22	2008	25,24	0,00	6,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	31,29
23	2008	27,57	6,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,61	4,03	41,63
24	2008	0,00	9,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,04	3,28	17,77
25	2008	3,16	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,40
26	2008	13,90	1,07	3,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,11	0,00	21,66
27	2008	26,36	0,00	3,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,29	17,19	50,85
28	2008	8,11	0,00	4,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,80	10,24	41,10
29	2008	0,00	16,61	5,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,38	8,55	41,57
30	2008	0,00		4,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,14	22,56	49,24
31	2008	5,67		4,53		0,00		0,00	0,00		0,00		0,00	10,21
<b>SUM</b>	<b>2008</b>	<b>198,30</b>	<b>68,69</b>	<b>100,61</b>	<b>24,37</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>6,03</b>	<b>74,61</b>	<b>169,06</b>	<b>641,67</b>
Media		6,40	2,37	3,25	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	2,49	5,45	20,70
Desv, Estándar		9,3	4,6	5,9	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	5,4	8,2	16,5
Coef, Variación		1,5	1,9	1,8	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	1,5	0,8

Fuente: Elaboración propia — con información del SENAMHI.

**Tabla 4.15** Precipitación total diaria de la cuenca en base a factores de influencia altura — distancia del año 2009 de las estaciones Villazón, Mojo y Tupiza

N° REG	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1	2009	18,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,08
2	2009	7,62	0,00	9,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,61	19,08
3	2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	2009	6,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,43	12,09	26,04
5	2009	6,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,85
6	2009	4,71	0,00	0,00	11,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,15
7	2009	0,31	0,81	4,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,63
8	2009	0,00	0,00	1,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,27	18,87
9	2009	0,00	1,98	3,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,49
10	2009	8,21	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,29
11	2009	2,33	0,00	0,00	19,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,09
12	2009	0,05	15,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,61	0,00	19,43
13	2009	0,00	2,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,82	5,91
14	2009	4,28	6,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,40	12,59
15	2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,79	33,79
16	2009	10,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,99
17	2009	33,09	19,10	22,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,89	13,53	106,64
18	2009	0,00	0,00	17,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18,90	35,90
19	2009	4,39	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,52	36,99	44,71
20	2009	0,00	10,56	1,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,41
21	2009	0,00	0,00	12,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	12,73
22	2009	4,54	0,00	2,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,26	23,22
23	2009	0,00	31,88	4,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,99	44,90
24	2009	1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,01
25	2009	0,00	24,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,52
26	2009	0,00	27,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,99	0,00	0,00	12,58	43,51
27	2009	6,83	13,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,52	12,38	34,68
28	2009	0,59	9,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,64	12,38	30,54
29	2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,00	0,59
30	2009	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,97	1,97
31	2009	0,00		0,00		0,00		0,00	0,00		0,00		0,50	0,50
<b>SUM</b>	<b>2009</b>	<b>120,41</b>	<b>165,44</b>	<b>80,40</b>	<b>31,21</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>2,99</b>	<b>0,00</b>	<b>42,20</b>	<b>204,48</b>	<b>647,12</b>
Media		3,88	5,70	2,59	1,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	1,41	6,60	20,87
Desv, Estándar		6,9	9,5	5,4	4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	3,9	10,0	20,9
Coef, Variación		1,8	1,7	2,1	3,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	1,5	1,0

Fuente: Elaboración propia — con información del SENAMHI.

**Tabla 4.16** Precipitación total diaria de la cuenca en base a factores de influencia altura — distancia del año 2010 de las estaciones Villazón, Mojo y Tupiza

N° REG	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Total
1	2010	18,65	0,00	13,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,49	0,00	33,16
2	2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	2010	2,02	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,61
4	2010	10,77	1,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	47,85	60,18
5	2010	43,72	0,00	18,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	62,60
6	2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	2010	4,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,41
9	2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	2010	0,00	4,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	21,31	25,87
11	2010	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,21	14,71
12	2010	0,00	0,00	7,64	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7,64
13	2010	0,00	0,00	1,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,97
14	2010	0,00	45,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	45,52
15	2010	0,00	5,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,43
16	2010	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	2010	2,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,42
18	2010	1,40	10,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,81	12,74
19	2010	12,55	4,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	17,58
20	2010	0,00	3,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,68
21	2010	0,00	4,50	0,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,09
22	2010	5,96	18,39	13,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	38,02
23	2010	0,00	38,91	3,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42,37
24	2010	24,46	0,00	17,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	41,73
25	2010	0,00	15,57	9,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	11,57	36,98
26	2010	3,78	15,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,15
27	2010	10,00	15,30	7,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,47
28	2010	14,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16,30	30,88
29	2010	0,00	0,00	0,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32,65	33,46
30	2010	0,00		5,71	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,31
31	2010	30,10		0,00		0,00		0,00	0,00		0,00		3,02	33,13
<b>SUM</b>	<b>2010</b>	<b>197,31</b>	<b>183,85</b>	<b>100,64</b>	<b>0,60</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>1,49</b>	<b>136,24</b>	<b>620,12</b>
Media		6,36	6,34	3,25	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	4,39	20,00
Desv, Estándar		10,5	11,5	5,6	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	11,0	19,0
Coef, Variación		1,7	1,8	1,7	5,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,5	2,5	0,9

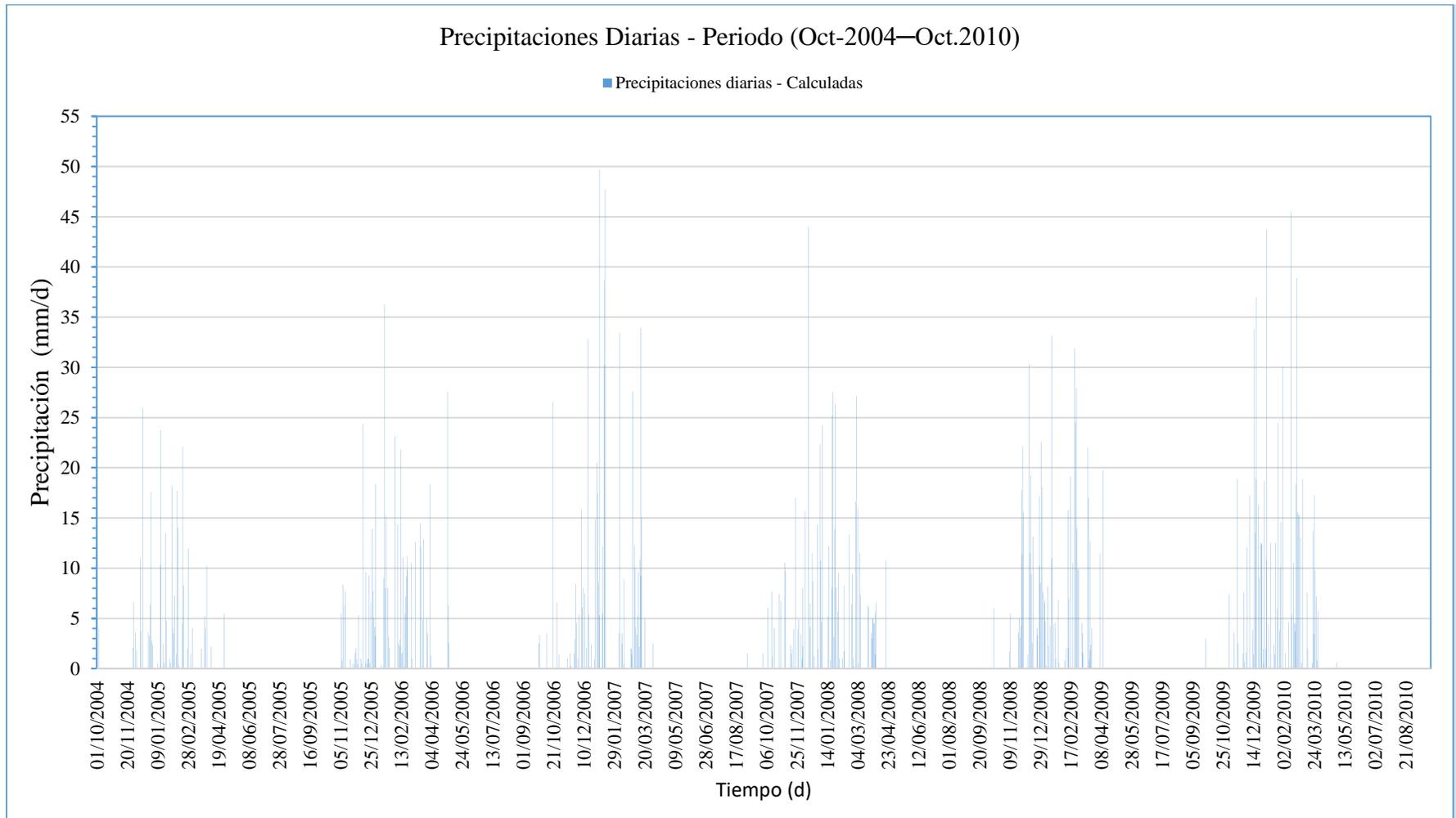
Fuente: Elaboración propia — con información del SENAMHI.

#### 4.1.7.1 Histograma diario entre el periodo de modelación de la Cuenca

El análisis visual que nos da un histograma diario nos hace ver la precipitación calculada, encontrada por regresiones de la cuenca, con mejor detalle; para tal fin se construyó un

histograma diario del periodo hidrológico de octubre de 2004 hasta 2010 de las Estaciones Villazón, Mojo y Tupiza, para observar su comportamiento.

**Figura 4.6** Precipitaciones diarias obtenidas por factores Precipitación — Altura entre el periodo hidrológico (2004-2010) de la cuenca río San Juan del Oro



Fuente: Elaboración propia

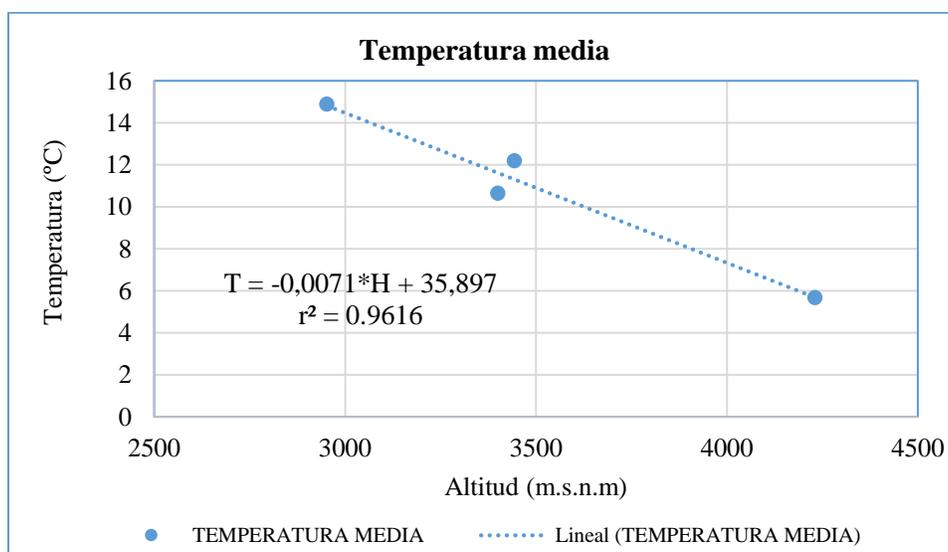
## 4.2 Análisis y regionalización de la temperatura

Se analizó los datos de temperatura de las estaciones Campanario, Villazón, Mojo y Tupiza, la estación San Pablo no se tomó en cuenta por la considerable diferencia de temperatura. Posteriormente se procedió a calcular la ecuación de temperatura a través de un análisis de regresión, obteniendo a partir de ello la gradiente de temperatura y la temperatura media anual de la cuenca.

**Tabla 4.17** Regionalización de Temperatura – Temperatura media de la cuenca (°C)

Estación	Cota msnm	MES												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Media
Villazón	3443	15,37	14,97	14,81	13,06	9,51	7,14	6,92	8,84	10,91	13,08	15,63	16,14	12,20
Mojo	3400	13,74	13,16	12,83	11,32	7,80	6,02	5,70	7,80	9,78	12,11	13,43	14,13	10,65
Tupiza	2952	17,20	17,44	17,09	15,61	11,96	9,84	9,71	11,97	14,50	16,90	18,12	18,33	14,89
San Pablo	4230	9,45	9,07	8,61	6,26	3,07	1,26	1,28	2,34	3,97	6,02	7,88	8,98	5,68
Promedio	3497,0	13,4	13,2	12,9	11,4	8,2	6,4	6,2	7,9	9,8	11,9	13,3	13,8	10,7
Desv. Estandar	460,4	3,1	3,3	3,3	3,5	3,3	3,2	3,1	3,5	3,8	3,9	3,9	3,7	3,4
Coef. a		35,182	36,225	36,283	37,052	32,26	29,415	28,702	33,953	38,344	41,554	41,775	40,018	35,897
Coef. b		-0,0061	-0,0064	-0,0065	-0,0073	-0,0069	-0,0067	-0,0065	-0,0075	-0,0081	-0,0084	-0,008	-0,0073	-0,0071
Coef. r		0,9444	0,9391	0,9338	0,9551	0,9524	0,9741	0,9671	0,9807	0,9793	0,9839	0,9433	0,9422	0,9616
Cuenca de Estudio	3837,21	11,78	11,67	11,34	9,04	5,78	3,71	3,76	5,17	7,26	9,32	11,08	12,01	8,65

Fuente: Elaboración propia – Información SENAMHI (SISMET).



**Figura 4.7** Temperatura media de la cuenca (° C)

Ecuación de la temperatura:  $T = -0,0071 \cdot H + 35,89$

### 4.3 Cálculo, Análisis y regionalización de la Evapotranspiración por el Método de Penman – Monteith y HearGreaves

El panel de expertos, organizado por la FAO (1990), recomendó la adopción de la ecuación Penman Monteith como un nuevo estándar de la Evapotranspiración de referencia y sugiere procedimientos para el cálculo de los diferentes parámetros de la ecuación. Se define el cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura de 0,12 m, una resistencia de la superficie de 70 (s/m) y un albedo de 0,23; que cercanamente reproduce la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, que crece activamente sin restricciones de suelo y agua.

Ec. (3.1)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_s (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_s)}$$

Dónde:

ET<sub>o</sub> = Evapotranspiración de referencia (mm/d)

R<sub>n</sub> = Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m<sup>2</sup>d)

G = Flujo de calor del suelo (MJ/m<sup>2</sup>d)

T = Temperatura media del aire (° C)

U<sub>2</sub> = Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

(e<sub>s</sub>-e<sub>a</sub>) = Déficit de presión de vapor (kpa)

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/° C)

γ = Constante psicométrica (kPa/° C)

La consulta de expertos organizada por la FAO<sup>1</sup>, recomienda el Método Penman Monteith como método estándar para ser usada para el cálculo de la Evapotranspiración de referencia en todo el mundo. El procedimiento de cálculo prevé procedimientos para datos completos y para datos faltantes. El método puede ser usado incluso cuando se cuenta solo con datos de temperatura máxima y mínima.

Para la modelación de la cuenca, se analizó los datos de los resúmenes climatológicos de las estaciones Villazón, Mojo, San Pablo y Tupiza, la estación Campanario no se tomó en cuenta

<sup>1</sup> Señalo la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, nº 56-, Estudio FAO riego y drenaje. (Edición 1990), "GUÍA PARA LA DETERMINACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION DE CULTIVO ", / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído [http:// www.fao.org/3/a-x0490s.pdf](http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf).

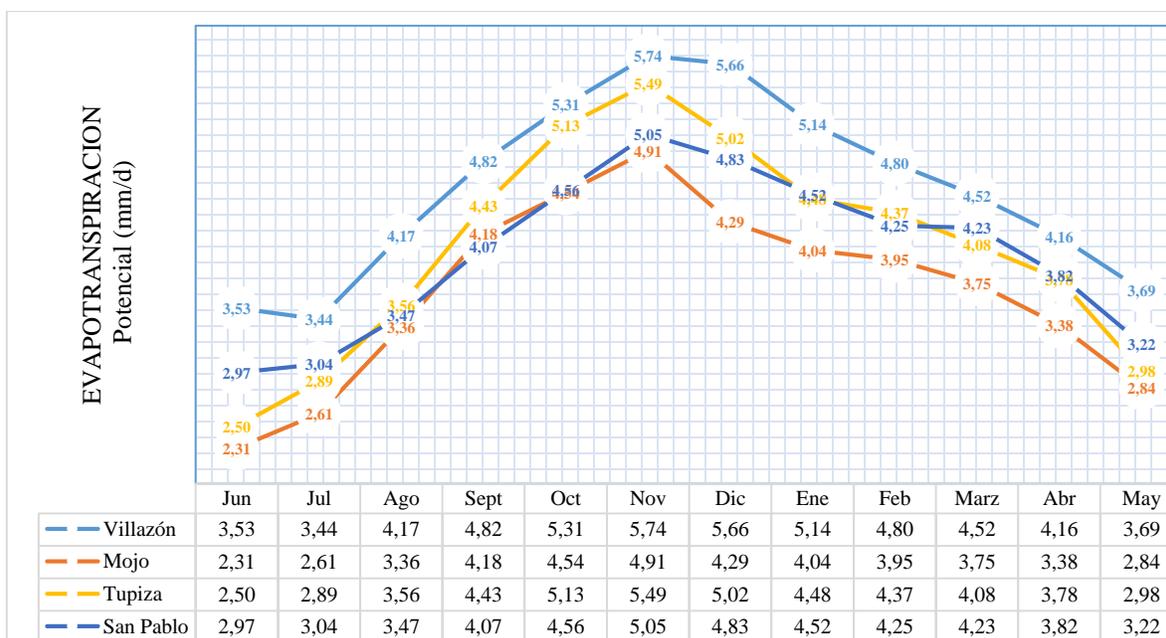
por la considerable diferencia de sus valores de temperatura, en la Tabla 4.18 y Figura 4.8 se pueden ver los resultados de la evapotranspiración por el método de Penman Monteith, (ver **Anexos 10**)

**Tabla 4.18** Resultados de ETP media diaria de cada mes – por el Método de Penman Monteith (mm/d)

Estación	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Campanario	3,11	3,12	3,46	3,90	4,07	4,27	4,02	3,64	3,51	3,31	3,24	3,08
Villazón	3,53	3,44	4,17	4,82	5,31	5,74	5,66	5,14	4,80	4,52	4,16	3,69
Mojo	2,31	2,61	3,36	4,18	4,54	4,91	4,29	4,04	3,95	3,75	3,38	2,84
Tupiza	2,50	2,89	3,56	4,43	5,13	5,49	5,02	4,48	4,37	4,08	3,78	2,98
San Pablo	2,97	3,04	3,47	4,07	4,56	5,05	4,83	4,52	4,25	4,23	3,82	3,22

Fuente: Elaboración propia – Información SENAMHI

**Figura 4.8** Estaciones consideradas en la ETP de la cuenca río San Juan del Oro



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la obtención de la evapotranspiración media diaria de cada mes en la cota media de la cuenca de estudio, en función de los resultados obtenidos por el método de Penman Monteith y la altura de las estaciones consideradas, como se muestra en la Tabla 4.19, considerando los años respectivos.

**Tabla 4.19** ETP potencial media diaria de cada mes regionalizada de la Cuenca (mm/d)

Estación	Altura m.s.n.m	Mes												
		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Media
Villazón	3443	5,31	5,74	5,66	5,14	4,80	4,52	4,16	3,69	3,53	3,44	4,17	4,82	4,58
Mojo	3400	4,54	4,91	4,29	4,04	3,95	3,75	3,38	2,84	2,31	2,61	3,36	4,18	3,68
Tupiza	2952	5,13	5,49	5,02	4,48	4,37	4,08	3,78	2,98	2,50	2,89	3,56	4,43	4,06
San Pablo	4230	4,56	5,05	4,83	4,52	4,25	4,23	3,82	3,22	2,97	3,04	3,47	4,07	4,00
Cuenca de Estudio	<b>3837,21</b>	<b>4,84</b>	<b>5,28</b>	<b>4,97</b>	<b>4,56</b>	<b>4,31</b>	<b>4,05</b>	<b>3,79</b>	<b>3,35</b>	<b>2,75</b>	<b>2,95</b>	<b>3,60</b>	<b>4,30</b>	<b>4,07</b>

Fuente: Elaboración propia – Información SENAMHI

Como los datos que necesitamos son de valores diarios se recurrió a usar la información que el SENAMHI proporciona a nivel mensual de cada año en las estaciones de Mojo, Tupiza y Villazón, el método que se usó para encontrar esos datos fue el de HearGreaves, que solo usa valores de temperatura y radiación solar encontrando así la evapotranspiración total (mm), los datos se extrajeron de la página oficial del SENAMHI-SISMET, entre los años 2004 a 2010, como se muestra en las Tablas siguientes.

Ecuación de HearGreaves:

$$ET_0 = 0,0023 (t_{med} + 17,78) R_0 * (t_{dmáx} - t_{dmin})^{0,5} \quad \text{Ec. (3.2)}$$

Dónde:

ET<sub>0</sub>= Evapotranspiración potencial, (mm/d)

t med= temperatura media diaria, (° C)

R<sub>0</sub> = Radiación solar extraterrestre, en mm/día (tabulada)

t dmax= temperatura diaria máxima, (° C)

t dmin= temperatura diaria mínima, (° C)

**Tabla 4.20** EVT potencial total de cada mes por HearGreaves, Estación Villazón (mm),

AÑOS	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	MEDIA
2004	125,1	109,2	106	101,8	73,7	57	65,6	102,7	116,9	140,3	146,4	160,9	108,8
2005	157	118,8	135,4	107,5	53,3	47,6	70,8	93,8	108,6	140,9	150,9	144,3	110,7
2006	124,1	106,9	123,9	99,5	79,3	67,2	76,1	95,3	117,6	143,6	150,7	151,3	111,3
2007	131,1	124,8	98,8	91,1	78	62,7	70,3	94,3	110,4	140,7	142,8	137,2	106,8
2008	116,8	109,5	114,1	94	80,3	68,8	74,2	86,8	112	125,8	137,6	124,7	103,72
2009	115,4	109,2	104,3	92,2	74,8	69	69,1	92	115,5	120,4	164,6	190,7	109,8
2010	124,2	123,8	128,9	103,7	77,7	60,2	65,9	84,3	79,5	104,3	116,8	135	100,4

Fuente: Información SENAMHI – SISMET

**Tabla 4.21** EVT potencial total de cada mes por HearGreaves, Estación Mojo (mm),

AÑOS	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	MEDIA
2004	118,7	105,5	100,7	87	57,5	49,8	73,5	89,3	118,9	139,8	156,1	158,4	104,6
2005	123,7	96,9	109	81,1	77,3	47,4	51,5	72	76,9	113,2	116,5	129,5	91,2
2006	112,2	88,8	101,7	72,4	50,3	44,4	46,4	59,4	78,7	112,4	143,6	146,7	88,1
2007	110,4	104,7	83,9	67,5	51	42,9	43,2	57,9	74,5	91,4	102,9	106,1	78
2008	106,4	93,6	76,5	64,3	52,3	39	43,8	58,7	94,6	105,3	111,7	109,6	79,6
2009	103	90,6	85,9	62	51	39,4	64,9	85,2	115,9	141,8	155,2	138,4	94,4
2010	135,4	109,9	113,3	88,9	65,7	60,9	63,1	78,9	101,6	107,8	119,6	130,5	98

Fuente: Información SENAMHI – SISMET

**Tabla 4.22** EVT potencial total de cada mes por HearGreaves, Estación Tupiza (mm),

AÑOS	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.	MEDIA
2004	144,8	123,7	126,4	109,9	66,8	59,8	68,8	83,1	122	141,2	155,4	130,8	111,1
2005	152,9	115,5	133,6	106,9	70,9	66,6	48,3	97,1	114,2	149,1	134,9	136,8	110,6
2006	123,5	97,9	102	101,4	77,5	63,2	74,1	95,7	107,7	110,4	136,3	173,8	105,3
2007	142,8	120,5	104	97,3	59,5	63,1	69,7	100,5	114,1	145,7	116,9	160,5	107,9
2008	124,9	112,3	121,2	101	75,9	63,5	68,9	90,3	112,9	143,4	136,4	126,1	106,4
2009	126	134,3	104,4	86,4	70,8	50,9	57,7	73,9	83,9	121,6	140,3	135,6	98,8
2010	128,8	123,5	118,9	93,9	68,1	63,4	71,5	96,2	103,3	113,9	101	133,7	101,4

Fuente: Información SENAMHI – SISMET

Los valores de evapotranspiración diaria se obtuvieron con las estaciones Villazón, Mojo y Tupiza, promediando y dividiendo entre los números de días de cada mes de cada año, como se muestra en la Tabla 4.23.

**Tabla 4.23** EVT potencial diaria de cada mes por HearGreaves, de las estaciones consideradas ordenadas en periodo hidrológico (mm/d)

Año	MES												
	OCT.	NOV.	DIC.	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	MED
2004-2005	4,5	5,1	4,8	4,7	3,9	4,1	3,3	2,2	1,8	1,8	2,8	3,3	3,5
2005-2006	4,3	4,5	4,4	3,9	3,5	3,5	3,0	2,2	1,9	2,1	2,7	3,4	3,4
2006-2007	3,9	4,8	5,1	4,1	4,2	3,1	2,8	2,0	1,9	2,0	2,7	3,3	3,3
2007-2008	4,1	4,0	4,3	3,7	3,8	3,4	2,9	2,2	1,9	2,0	2,5	3,6	3,2
2008-2009	4,0	4,3	3,9	3,7	4,0	3,2	2,7	2,1	1,8	2,1	2,7	3,5	3,2
2009-2010	3,5	3,7	4,3	4,2	4,3	3,9	3,2	2,3	2,1	2,2	2,8	3,2	3,3

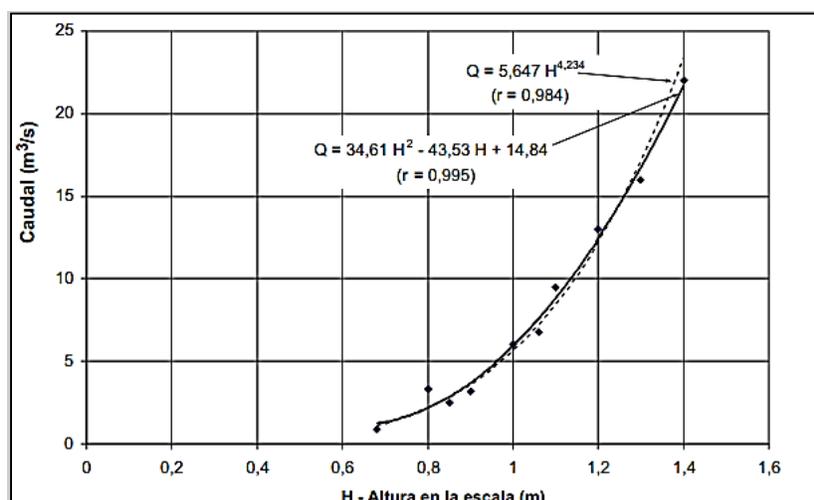
Fuente: Elaboración propia - Información SENAMHI – SISMET.

Los valores de evapotranspiración se tomarán para cada mes tal cual, para cada año, siendo los mismos valores de la Tabla 4.23 de la cuenca en estudio, para los respectivos meses. Los periodos a modelar son los años 2004-2010, en los cuales serán usados.

#### 4.4 Análisis y elaboración de la curva de gastos del río San Juan del Oro

La curva de gastos (F. Javier Sánchez, 2013:5) <sup>2</sup>, el limnógrafo o la escala limnimétrica solamente miden el **nivel del agua**, siendo necesario una ecuación que convierta el nivel en caudal. Para obtener esta curva para un punto concreto de un cauce, será necesario realizar numerosos aforos directos para establecer la relación entre niveles y caudales, que nos permitirá **obtener el caudal a partir de la altura**. En la Figura 4.9 se muestra unos puntos de aforos directos sobre los que se ha realizado un ajuste polinómico y otro potencial.

**Figura 4.9** Ejemplo de Curva de gastos (relación altura vs caudal)



Fuente: extraído del libro (F. Javier Sánchez, 2013:5)

En este ejemplo, con cualquiera de las dos ecuaciones obtendremos el caudal a partir de un dato de nivel del agua en el cauce. Esta relación hay que actualizarla periódicamente ya que la sección del cauce puede sufrir variaciones por erosión o deposición de sedimentos.

Para la elaboración de la curva de gastos en la cuenca del Río San Juan del Oro se usó los siguientes datos de los años Tabla 4.24, de la estación de aforo de El Puente.

<sup>2</sup>Señalo Sanchez F. Javier, (Edición 2013:5), "MEDIDA DE CAUDALES" España: Dpto. Geología Universidad de Salamanca, / Fecha de consulta: 08/03/2018, extraído <http://hidrologia.usal.es/temas/Aforos.pdf>.

**Tabla 4.24** Datos a considerar para la modelación hidrológica de la Cuenca.

Información a recolectar	Años del periodo	Información de escalas
Calentamiento	2004-2005	Con datos
Calibración	2005-2007	Con datos
Simulación	2007-2009	Sin datos
Validación	2009-2010	Con datos

Fuente: Elaboración propia.

Elaboración de la curva de gastos del periodo Oct. 2004- Oct. 2005, con la información de la siguiente Tabla 4.25.

**Tabla 4.25** Datos de aforo de la estación hidrométrica El Puente entre el periodo hidrológico 2004-2005.

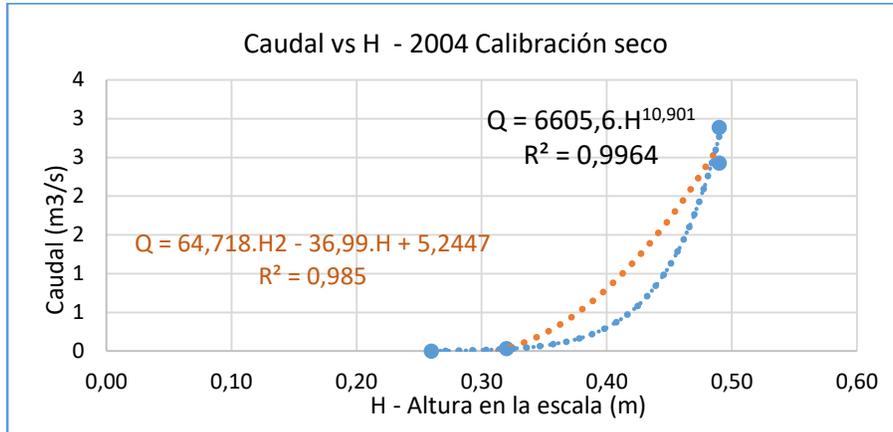
Nº	Registro	Escala (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
1	30-11-04	0,26	0,00
2	04-12-04	0,32	0,04
3	21-12-04	0,49	2,89
4	08-01-05	0,49	2,43
5	26-01-05	1,05	34,66
6	10-02-05	1,34	74,88
7	25-02-05	1,76	129,60
8	12-03-05	1,08	41,68
9	29-03-05	0,94	30,90
10	26-04-05	0,45	5,37
11	12-05-05	0,44	5,54
12	04-06-05	0,58	4,54
13	21-06-05	0,42	4,81
14	13-07-05	0,43	5,04
15	20-07-05	0,41	4,74
16	02-08-05	0,37	4,04
17	19-08-05	0,39	3,63
18	04-09-05	0,36	2,69
19	30-09-05	0,27	1,13
20	12-10-05	0,10	0,45
21	25-10-05	0,07	0,23

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI

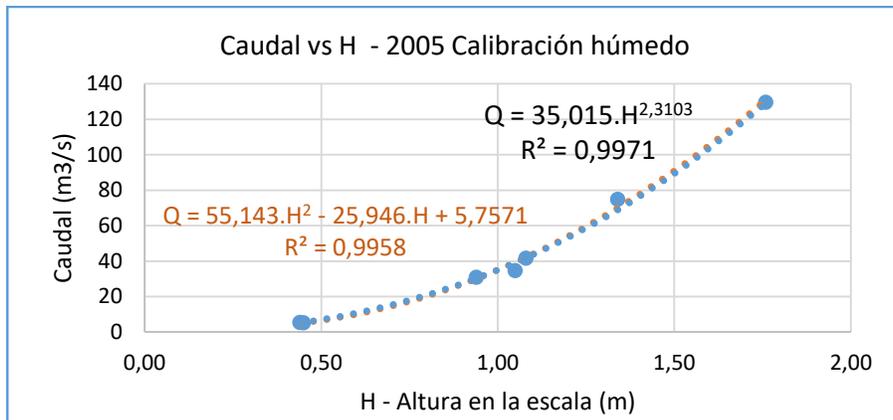
Con los datos de aforo considerados, se elaboró las curvas de calibración Caudal vs Altura, para la obtención de los parámetros de calibración en época seca y época húmeda por la

variación de flujo en esas épocas debido a factores que contemplan el ciclo hidrológico. Las curvas de gastos se detallan en las Figuras 4.10 a 4.12.

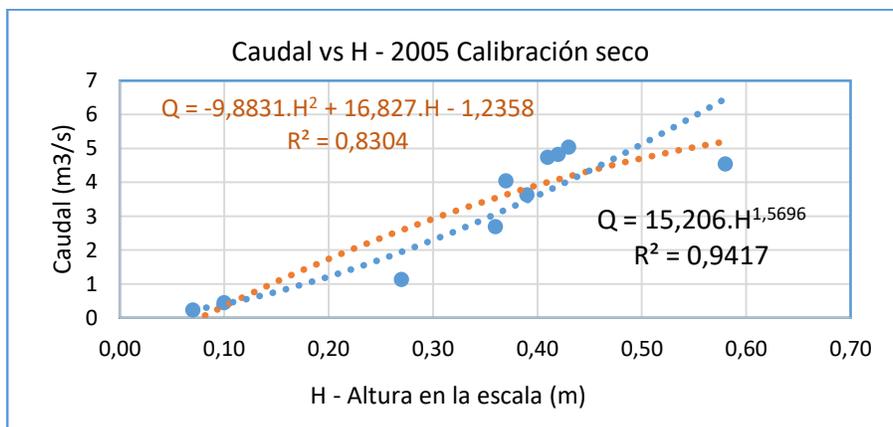
**Figura 4.10** Curva de gastos en época seca del año 2004 (relación altura vs caudal)



**Figura 4.11** Curva de gastos en época húmeda del año 2005 (relación altura vs caudal)



**Figura 4.12** Curva de gastos en época seca del año 2005 (relación altura vs caudal)



Fuente: Elaboración propia — Información SENAMHI

**Tabla 4.26** Ecuaciones de regresión del periodo hidrológico 2004-2005

AÑO	2004_Seco		2005_Hum		2005_Seco	
Regresión	Potencial	Cuadrática	Potencial	Cuadrática	Potencial	Cuadrática
Coefficientes	$y=a.x^b$	$y=ax^2+bx+c$	$y=a.x^b$	$y=ax^2+bx+c$	$y=a.x^b$	$y=ax^2+bx+c$
a	6605,6	64,718	35,015	55,143	15,206	-9,8831
b	10,901	-36,99	2,3103	-25,946	1,5696	16,827
c		5,2447		5,7571		-1,2358
R <sup>2</sup>	0,9964	0,985	0,9971	0,9958	0,9417	0,8304
r	0,9982	0,9925	0,9985	0,9979	0,9704	0,9113

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la curva de gastos de los años 2004-2005, se muestran más a detalle (ver **Anexo 5**). En la tabla siguiente se muestran los caudales indirectos obtenidos.

**Tabla 4.27** Caudales diarios (m<sup>3</sup>/s), obtenidos por el método de la curva de gasto en el periodo hidrológico 2004-2005

DIA	2004			2005									
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT
1	1,16	0,42	0,00	11,78	11,07	40,28	17,33	5,46	3,90	3,90	3,35	2,93	1,11
2	0,65	0,22	0,00	44,21	10,15	33,52	10,71	5,50	3,90	3,95	3,19	2,93	1,01
3	0,48	0,15	1,39	34,21	10,45	38,98	9,08	5,29	4,02	3,90	3,33	2,93	0,90
4	0,31	0,11	0,03	15,42	51,20	37,59	8,39	5,25	4,04	3,90	3,45	3,06	0,74
5	0,30	7,83	1,93	11,39	63,63	27,01	7,95	5,25	4,04	4,17	3,47	2,98	0,61
6	0,24	0,18	11,04	9,51	55,96	24,38	7,10	5,25	4,01	3,97	3,47	2,93	0,49
7	0,48	0,03	1,00	7,52	89,35	18,79	6,90	5,25	3,91	3,97	3,52	2,93	0,34
8	0,67	0,01	0,47	6,74	53,61	17,19	7,82	5,25	3,90	3,95	3,59	2,88	0,26
9	0,67	0,01	0,40	7,18	43,64	16,26	8,48	5,43	3,90	3,90	3,61	2,76	0,21
10	0,53	0,00	0,31	8,25	68,85	14,49	6,78	5,43	4,02	3,93	3,54	2,65	0,18
11	0,52	0,00	0,23	9,60	44,45	24,71	6,46	5,53	4,04	3,95	3,43	2,67	0,25
12	0,52	0,00	0,10	7,52	40,61	78,34	6,82	4,25	3,99	4,04	3,45	2,56	0,41
13	0,41	0,00	1,39	6,98	372,03	35,62	6,78	4,21	3,99	3,97	3,47	2,54	0,33
14	0,37	0,00	19,58	7,82	632,72	25,89	6,39	4,19	3,97	4,02	3,59	2,43	0,29
15	0,16	0,00	5,44	13,41	316,98	23,73	6,08	4,19	3,93	4,04	3,61	2,28	0,25
16	0,19	0,00	2,21	35,22	113,71	19,22	5,86	4,19	3,91	3,91	3,61	2,24	0,18
17	0,13	0,00	2,48	80,82	69,15	16,92	5,68	4,15	3,90	3,77	3,49	2,18	0,15
18	0,19	0,00	6,86	35,93	48,97	13,64	5,53	4,04	3,86	3,75	3,47	2,12	0,16
19	0,10	0,00	9,06	19,65	39,41	12,32	5,71	4,04	3,75	3,81	3,47	2,24	0,14
20	0,07	0,00	6,35	38,98	38,23	11,39	5,68	4,04	3,88	3,75	3,47	2,12	0,15
21	0,07	0,00	2,77	107,34	33,42	10,81	5,53	4,04	3,90	3,72	3,43	1,89	0,27
22	0,07	0,00	3,18	81,96	151,69	10,20	5,53	4,04	3,90	3,61	3,45	1,70	0,25
23	0,09	0,00	5,71	76,50	482,49	9,51	5,53	4,04	3,90	3,61	3,52	1,61	0,10
24	0,07	0,00	4,85	135,06	260,20	9,17	5,53	4,04	3,90	3,61	3,36	1,55	0,11
25	0,08	0,00	3,69	95,48	129,26	8,75	5,53	4,04	3,99	3,61	3,33	1,46	0,23
26	0,17	0,00	3,28	39,19	96,74	8,43	5,53	4,04	4,04	3,61	3,33	1,48	0,30
27	0,08	0,00	3,05	32,54	67,82	7,82	5,53	4,04	4,04	3,54	3,16	1,48	0,35
28	0,07	0,00	2,90	23,24	52,08	7,43	5,53	3,91	4,01	3,47	3,06	1,41	0,49
29	0,07	0,01	2,80	17,40		30,35	5,53	3,90	4,02	3,47	2,96	1,41	0,39
30	0,06	0,00	5,12	14,67		13,00	5,53	3,90	3,91	3,47	2,91	1,95	0,30
31	82,58		5,29	11,07		29,89		3,90		3,47	2,93		0,30
Prom	2,95	0,30	3,64	33,76	123,14	21,79	6,89	4,52	3,95	3,80	3,39	2,28	0,36
Max	82,58	7,83	19,58	135,06	632,72	78,34	17,33	5,53	4,04	4,17	3,61	3,06	1,11
Min	0,06	0,00	0,00	6,74	10,15	7,43	5,53	3,90	3,75	3,47	2,91	1,41	0,10

Fuente: Elaboración propia

Elaboración de la curva de gastos del periodo Oct. 2005- Oct. 2006, con la información de la siguiente Tabla 4.28.

**Tabla 4.28** Datos de aforo de la estación hidrométrica El Puento entre el periodo hidrológico 2005-2006.

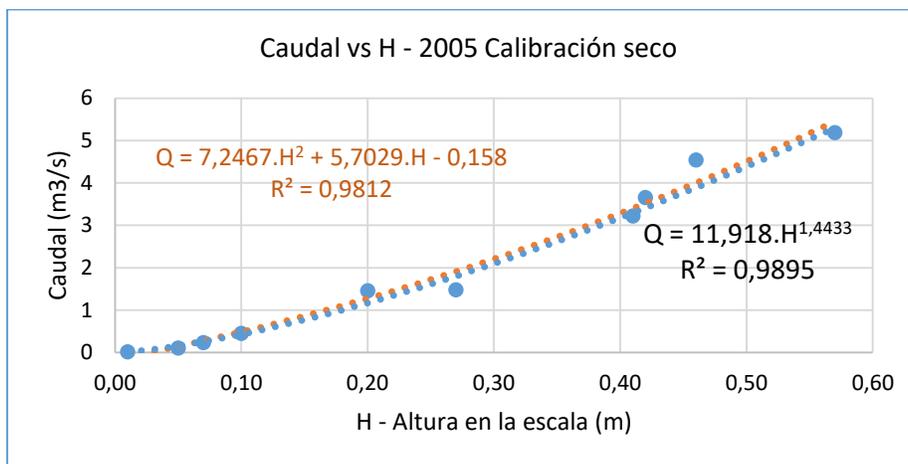
Nº	Registro	Escala (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
1	12/10/2005	0,10	0,4489
2	25/10/2005	0,07	0,2314
3	03/11/2005	0,05	0,1079
4	11/11/2005	0,20	1,456
5	17/11/2005	0,27	1,482
6	30/11/2005	0,01	0,0195
7	08/12/2005	0,57	5,185
8	14/12/2005	0,46	4,541
9	26/12/2005	0,42	3,653
10	13/01/2006	0,41	3,224
11	22/02/2006	1,28	54,68
12	09/03/2006	0,79	9,793
13	22/03/2006	0,98	16,38
14	17/04/2006	0,73	9,486
15	26/04/2006	0,71	8,148
16	11/05/2006	0,70	7,452
17	25/05/2006	0,65	6,78
18	09/06/2006	0,65	5,841
19	20/06/2006	0,63	5,727
20	13/07/2006	0,60	5,233
21	17/08/2006	0,51	3,483
22	31/08/2006	0,48	2,746
23	14/09/2006	0,43	2,287
24	21/09/2006	0,42	2,285
25	10/10/2006	0,18	0,4001
26	27/10/2006	0,35	1,491

Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI

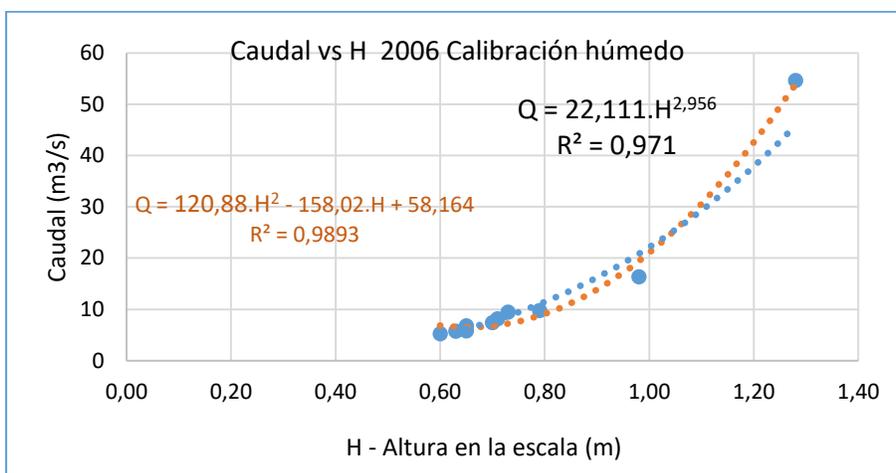
Con los datos de aforo considerados, se elaboró las curvas de calibración Caudal vs Altura en escala para la obtención de los parámetros de calibración en época seca y época húmeda por la variación de flujo en esas épocas debido a factores que contemplan el ciclo hidrológico.

Las curvas de gastos se detallan en las Figuras 4.13 a 4.15.

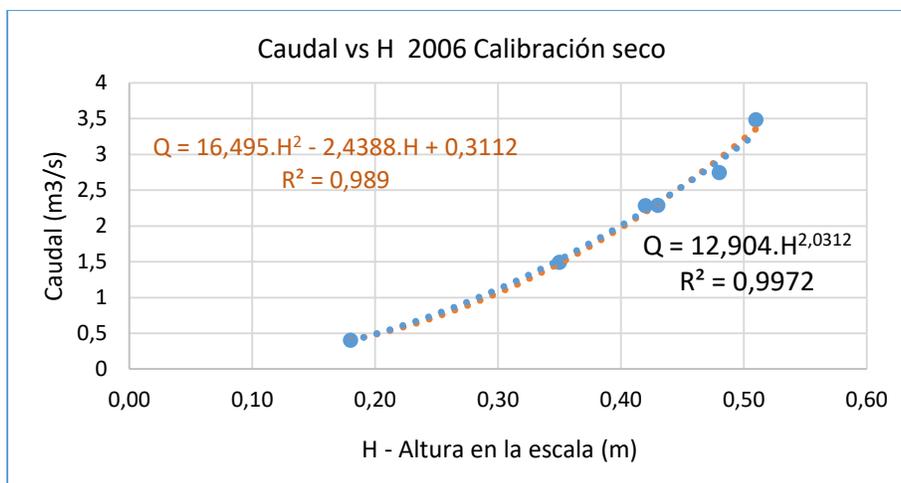
**Figura 4.13** Curva de gastos en época seca del año 2005 (relación altura vs caudal)



**Figura 4.14** Curva de gastos en época húmeda del año 2006 (relación altura vs caudal)



**Figura 4.15** Curva de gastos en época seca del año 2006 (relación altura vs caudal)



Fuente: Elaboración propia – Información SENAMHI

**Tabla 4.29** Ecuaciones de regresión del periodo hidrológico 2005-2006.

AÑO	2005_Seco		2006_Hum		2006_Seco	
	Potencial	Cuadrática	Potencial	Cuadrática	Potencial	Cuadrática
Coefficientes	$y=a.x^b$	$y=ax^2+bx+c$	$y=a.x^b$	$y=ax^2+bx+c$	$y=a.x^b$	$y=ax^2+bx+c$
a	11,918	7,2467	22,111	120,88	12,904	16,495
b	1,4433	5,7029	2,956	-158,02	2,0312	-2,4388
c		-0,158		58,164		0,3112
R <sup>2</sup>	0,9895	0,9812	0,9711	0,9893	0,9972	0,989
r	0,9947	0,9906	0,9854	0,9946	0,9986	0,9945

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la curva de gastos de los años 2005-2006, se muestran más a detalle (ver **Anexo 5**). En la tabla siguiente se muestran los caudales indirectos obtenidos.

**Tabla 4.30** Caudales diarios (m<sup>3</sup>/s), obtenidos por el método de la curva de gasto en el periodo hidrológico 2005-2006

DIA	2005			2006									
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT
1	1,07	0,29	1,17	17,38	144,59	15,86	14,84	7,42	6,47	5,38	4,03	2,80	1,15
2	0,98	0,15	3,81	20,53	177,34	13,86	12,58	13,92	6,37	5,38	3,81	2,89	1,00
3	0,88	0,16	6,02	21,86	87,90	51,51	15,41	10,06	6,47	5,38	3,69	2,91	0,87
4	0,74	0,15	3,90	17,91	62,34	81,54	27,85	8,08	6,47	5,38	3,69	2,91	0,82
5	0,62	0,28	2,98	26,37	122,34	24,74	26,82	8,16	6,12	5,38	3,69	2,91	0,74
6	0,51	0,45	2,29	13,99	124,63	20,83	19,52	8,03	6,29	5,38	3,69	2,91	0,75
7	0,36	0,45	5,91	9,73	112,00	18,06	17,07	7,74	5,88	5,38	3,81	2,91	0,66
8	0,28	0,41	5,46	7,49	78,29	14,59	13,98	7,42	5,78	5,16	3,96	2,91	0,53
9	0,23	0,86	3,44	6,15	141,22	10,96	12,41	7,38	5,95	5,13	3,97	2,91	0,42
10	0,21	1,89	2,51	5,01	136,26	48,57	11,02	7,54	5,95	5,29	3,97	2,80	0,40
11	0,28	2,05	1,87	4,19	149,16	61,53	10,16	7,58	5,68	5,13	3,81	2,68	0,40
12	0,43	2,62	1,44	3,58	249,47	40,90	9,49	7,15	5,88	4,91	3,69	2,59	0,82
13	0,35	2,65	1,84	3,35	216,59	38,96	9,12	7,07	5,68	4,88	3,57	2,56	0,87
14	0,31	2,43	5,27	4,51	181,26	31,22	9,08	7,07	5,54	4,88	3,47	2,42	0,64
15	0,27	2,20	7,03	43,78	177,02	18,27	9,40	7,38	5,64	4,88	3,42	2,27	0,52
16	0,21	2,43	5,63	102,48	88,10	16,33	9,45	7,54	5,64	4,82	3,35	2,16	0,47

17	0,18	1,65	4,83	95,65	65,47	13,62	8,99	7,07	5,78	4,77	3,29	2,06	0,45
18	0,18	1,18	7,14	99,80	56,53	12,47	8,94	7,07	5,91	4,68	3,29	2,12	0,44
19	0,16	0,91	5,19	117,09	50,24	63,32	8,81	6,81	5,91	4,59	3,29	2,06	0,43
20	0,17	0,90	4,16	75,68	45,74	32,46	8,99	6,77	5,91	4,40	3,34	2,01	0,45
21	0,30	1,04	3,01	153,83	50,24	20,52	8,12	6,62	5,91	4,29	3,35	1,98	0,47
22	0,27	0,83	2,28	64,97	47,48	19,30	7,74	6,47	5,91	4,31	3,39	1,86	14,91
23	0,11	0,64	1,34	169,81	47,34	21,38	7,70	6,47	5,91	4,32	3,29	1,78	7,89
24	0,12	0,49	2,01	103,61	98,03	35,62	7,70	6,47	5,84	4,27	3,17	1,75	3,90
25	0,22	0,36	3,76	63,98	52,67	39,92	7,91	6,22	5,41	4,27	3,16	1,72	2,74
26	0,32	0,27	9,81	57,60	27,48	27,19	7,58	6,19	5,38	4,27	3,16	1,63	2,03
27	0,38	0,05	11,49	55,32	22,36	23,79	7,58	6,19	5,61	4,23	3,16	1,51	1,57
28	0,51	0,02	15,79	41,26	18,42	21,38	7,58	6,51	5,74	4,12	3,16	1,38	1,46
29	0,41	0,08	9,19	54,43		16,19	7,70	6,55	5,41	4,12	3,16	1,24	1,28
30	0,32	0,37	16,09	86,08		16,19	7,70	6,47	5,38	3,99	3,05	1,23	1,24
31	0,33		24,42	98,69		12,98		6,47		4,06	2,97		7,63
Prom	0,38	0,94	5,84	53,10	101,09	28,52	11,38	7,35	5,86	4,76	3,48	2,26	1,87
Max	1,07	2,65	24,42	169,81	249,47	81,54	27,85	13,92	6,47	5,38	4,03	2,91	14,91
Min	0,11	0,02	1,17	3,35	18,42	10,96	7,58	6,19	5,38	3,99	2,97	1,23	0,40

Fuente: Elaboración propia

Elaboración de la curva de gastos del periodo Oct. 2006- Oct. 2007, con la información de la siguiente Tabla 4.31.

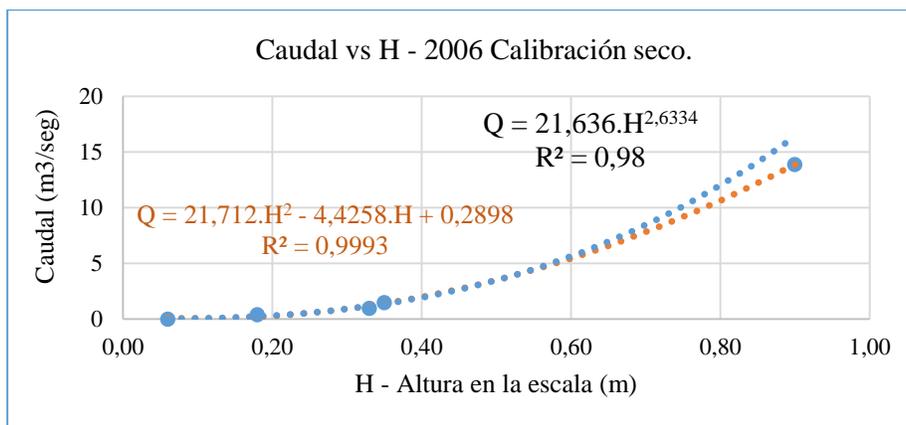
**Tabla 4.31** Datos de aforo de la estación hidrométrica El Puente entre el periodo hidrológico 2006-2007.

Nº	Registro	Escala (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
1	10/10/2006	0,18	0,400
2	27/10/2006	0,35	1,491
3	21/11/2006	0,06	0,010
4	30/11/2006	0,33	0,986
5	19/12/2006	0,90	13,900
6	19/01/2007	1,30	109,600
7	30/01/2007	0,39	8,658
8	06/02/2007	0,19	3,830
9	27/03/2007	0,65	13,540
10	10/04/2007	0,50	7,676
11	27/04/2007	0,46	6,537
12	10/05/2007	0,45	6,529
13	29/05/2007	0,43	6,029
14	20/06/2007	0,42	5,430
15	31/07/2007	0,43	4,312
16	08/08/2007	0,42	4,280
17	07/09/2007	0,33	3,145
18	27/09/2007	0,24	1,830
19	12/10/2007	0,08	0,509

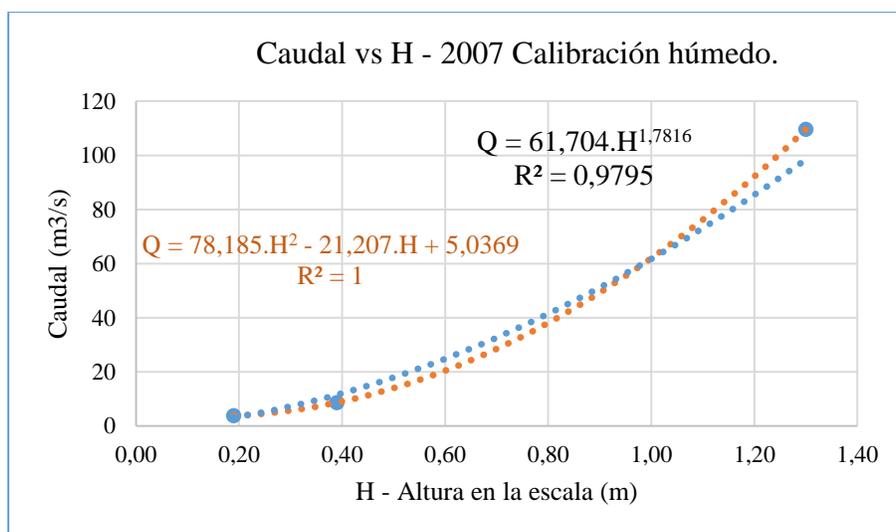
Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI

Con los datos de aforo considerados, se elaboró las curvas de calibración Caudal vs Altura en escala para la obtención de los parámetros de calibración en época seca y época húmeda por la variación de flujo en esas épocas debido a factores que contemplan el ciclo hidrológico. Las curvas de gastos se detallan en las Figuras 4.16 a 4.18.

**Figura 4.16** Curva de gastos en época seca del año 2006 (relación altura vs caudal)

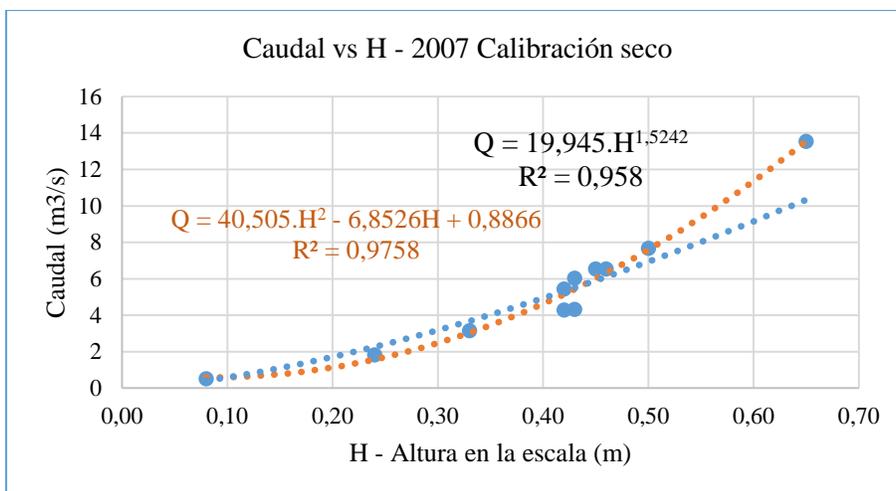


**Figura 4.17** Curva de gastos en época húmeda del año 2007 (relación altura vs caudal)



Fuente: Elaboración propia – Información SENAMHI

**Figura 4.18** Curva de gastos en época seca del año 2007 (relación altura vs caudal)



Fuente: Elaboración propia — Información SENAMHI

**Tabla 4.32** Ecuaciones de regresión del periodo hidrológico 2006-2007.

Año	2006_Seco		2007_Húmedo		2007_Seco	
Regresión	Potencial	Cuadrática	Potencial	Cuadrática	Potencial	Cuadrática
Coefficientes	$y=a x^b$	$y=ax^2+bx+c$	$y=a x^b$	$y=ax^2+bx+c$	$y=a x^b$	$y=ax^2+bx+c$
a	21,636	21,712	61,704	78,185	19,945	40,505
b	2,6334	-4,4258	1,7816	-21,207	1,5242	-6,8526
c		0,2898		5,0369		0,8866
R <sup>2</sup>	0,985	0,9993	0,9795	1,00	0,958	0,9758
r	0,9925	0,9996	0,9897	1,00	0,9788	0,9878

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la curva de gastos de los años 2006-2007, se muestran más a detalle (ver **Anexo 5**). En la tabla siguiente se muestran los caudales indirectos obtenidos.

**Tabla 4.33** Caudales diarios (m<sup>3</sup>/s), obtenidos por el método de la curva de gasto en el periodo hidrológico 2006-2007

DIA	2006			2007									
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT
1	0,94	3,15	3,13	21,18	7,51	6,04	8,87	6,11	5,34	5,32	5,49	4,29	1,80
2	0,78	1,32	5,73	112,09	7,12	5,99	8,21	6,11	5,32	5,32	5,51	4,20	1,78
3	0,66	1,39	4,22	64,62	6,39	5,99	7,96	6,11	5,32	5,32	5,68	4,31	1,56
4	0,61	1,17	3,13	48,39	5,55	5,79	7,80	6,11	5,32	5,32	5,71	4,20	1,45
5	0,53	0,91	2,72	74,46	4,72	115,61	7,69	5,93	5,49	5,39	5,51	3,96	1,13
6	0,54	0,81	6,46	60,20	3,71	57,38	7,58	5,91	5,51	5,39	5,66	3,92	0,94
7	0,46	0,76	3,31	145,74	3,24	54,35	7,47	6,01	5,51	5,39	5,71	4,00	0,78
8	0,34	0,68	14,38	68,45	3,20	70,63	7,36	6,11	5,51	5,32	5,53	3,94	0,64
9	0,26	0,48	27,98	72,98	9,27	106,72	6,99	6,11	5,51	5,32	5,41	3,85	0,55

10	0,24	0,34	15,92	71,21	34,37	147,75	6,93	6,11	5,51	5,32	5,32	3,68	0,51
11	0,24	0,29	9,75	122,95	35,54	81,62	6,93	6,11	5,51	5,32	5,32	3,33	0,43
12	0,61	0,22	5,04	416,97	23,02	70,19	6,70	6,01	5,41	5,22	5,32	3,18	0,43
13	0,66	0,12	11,29	231,41	54,32	69,75	6,52	5,91	5,32	5,12	5,32	3,10	0,33
14	0,44	0,08	8,18	149,77	56,05	83,02	6,52	5,91	5,32	5,24	5,22	3,02	0,24
15	0,33	0,04	2,80	879,10	69,32	81,31	6,52	5,91	5,32	5,12	5,12	2,85	0,27
16	0,30	0,04	1,55	949,22	47,29	141,44	6,34	5,73	5,49	5,17	5,12	2,67	0,27
17	0,28	0,04	1,12	490,79	47,04	168,08	6,49	5,71	5,51	5,12	4,96	2,56	0,27
18	0,27	0,03	0,96	194,75	27,57	208,94	6,34	5,71	5,51	5,12	4,94	2,43	0,27
19	0,26	0,03	11,10	103,07	19,41	130,48	6,31	5,71	5,51	5,12	4,94	2,41	0,96
20	0,28	0,02	13,83	75,66	16,00	69,17	6,13	5,71	5,41	5,12	4,94	2,37	0,73
21	0,29	0,01	13,09	51,40	12,74	57,11	6,11	5,71	5,49	5,12	4,77	2,27	0,60
22	26,10	0,01	4,24	39,52	10,69	44,04	6,11	5,63	5,41	5,12	4,75	2,45	0,62
23	11,44	0,50	3,49	31,04	9,21	38,85	6,18	5,53	5,32	5,12	4,68	2,12	0,94
24	4,59	3,67	3,22	25,67	8,45	35,54	6,11	5,51	5,32	5,12	4,59	1,98	0,93
25	2,90	7,10	3,94	21,18	7,49	33,31	6,11	5,51	5,32	5,29	4,40	1,98	0,92
26	1,97	3,84	2,43	18,92	6,75	11,42	6,11	5,51	5,32	5,32	4,38	1,98	0,79
27	1,41	2,58	2,68	13,65	6,04	10,56	5,98	5,51	5,32	5,32	4,38	1,95	0,74
28	1,28	2,27	2,33	14,58	10,14	12,06	6,11	5,51	5,32	5,32	4,45	1,77	0,88
29	1,08	1,68	1,45	14,08		11,42	6,11	5,51	5,39	5,32	4,45	1,85	1,77
30	1,03	1,07	1,84	12,71		10,62	6,11	5,51	5,32	5,32	4,38	3,04	3,81
31	10,95		6,04	12,06		9,92		5,51		5,36	4,38		3,60
Prom	2,32	1,16	6,37	148,64	19,72	63,07	6,76	5,80	5,40	5,25	5,04	2,99	1,00
Max	26,10	7,10	27,98	949,22	69,32	208,94	8,87	6,11	5,51	5,39	5,71	4,31	3,81
Min	0,24	0,01	0,96	12,06	3,20	5,79	5,98	5,51	5,32	5,12	4,38	1,77	0,24

Fuente: Elaboración propia

El periodo Oct. 2007 a Oct. 2009 tienen datos incompletos de alturas de escala, por lo que se usará para realizar la simulación del modelo de flujo diario GR4J.

Elaboración de la curva de gastos del periodo Oct. 2009- Oct. 2010, con la información de la siguiente Tabla 4.34.

**Tabla 4.34** Datos de aforo de la estación hidrométrica El Puente (2009-2010).

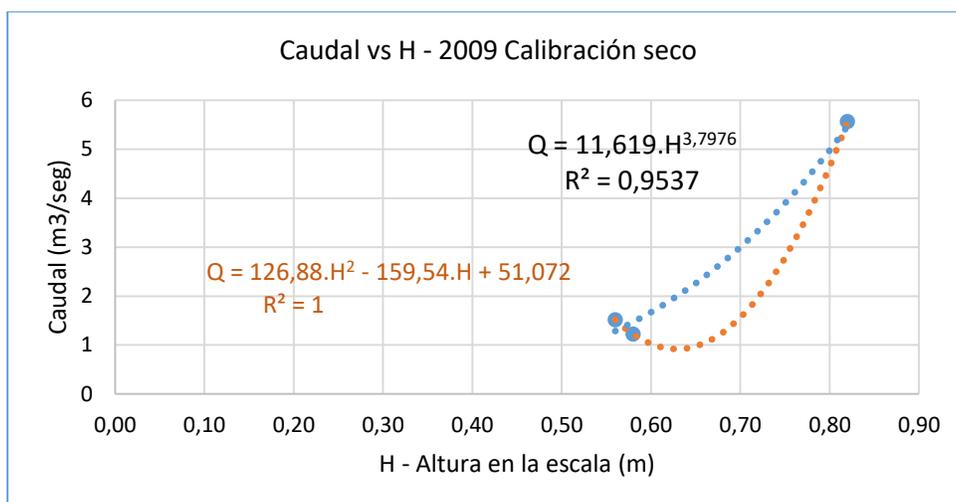
N°	Registro	Escala (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
1	23-10-09	0,58	1,221
2	05-11-09	0,56	1,519
3	20-01-10	0,82	5,562
4	21-01-10	0,81	4,862
5	22-03-10	1,05	12,660
6	22-04-10	0,93	8,656
7	23-04-10	0,93	7,479

8	21-05-10	0,93	5,974
9	17-06-10	0,90	6,091
10	30-06-10	0,88	6,206
11	23-07-10	0,84	5,802
12	25-08-10	0,79	4,904
13	02-09-10	0,76	4,495

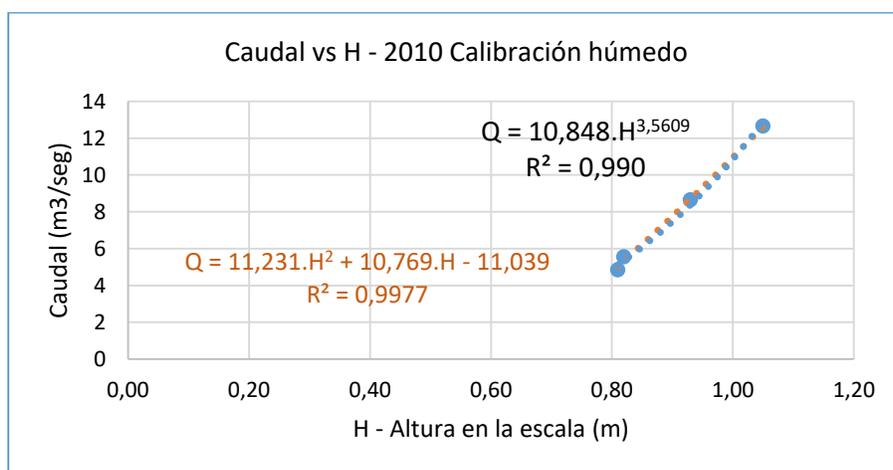
Fuente: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología — SENAMHI

Con los datos de aforo considerados, se elaboró las curvas de calibración Caudal vs Altura en escala para la obtención de los parámetros de calibración en época seca y época húmeda por la variación de flujo en esas épocas debido a factores que contemplan el ciclo hidrológico. Las curvas de gastos se detallan en las Figuras 4.19 a 4.21.

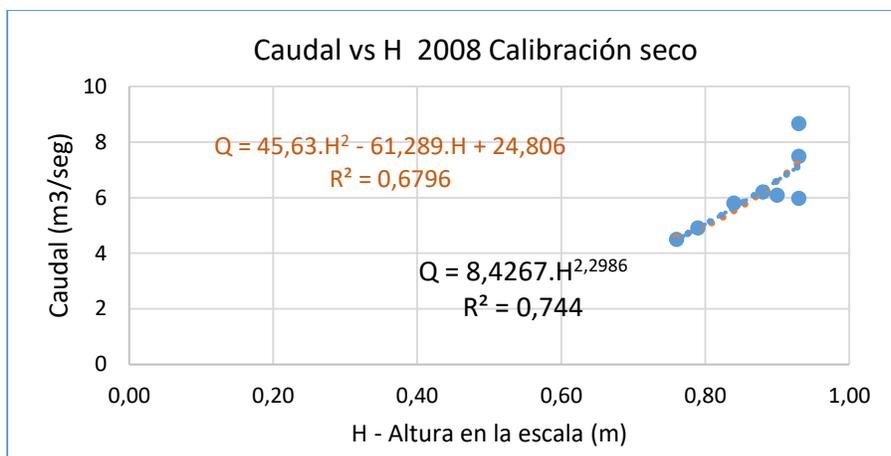
**Figura 4.19** Curva de gastos en época seca del año 2009 (relación altura vs caudal)



**Figura 4.20** Curva de gastos en época húmeda del año 2010 (relación altura vs caudal)



**Figura 4.21** Curva de gastos en época seca del año 2010 (relación altura vs caudal)



Fuente: Elaboración propia — Información SENAMHI

La época seca del año 2010 presenta escalas un tanto deficientes para la modelación, por lo que se usarán solo las escalas hasta la época húmeda, posteriormente en la simulación.

**Tabla 4.35** Ecuaciones de regresión del periodo hidrológico 2009-2010.

AÑO	2009_Seco		2010_Hum		2010_Seco	
	Potencial	Cuadrática	Potencial	Cuadrática	Potencial	Cuadrática
Regresión	$y=a,x^b$	$y=ax^2+bx+c$	$y=a,x^b$	$y=ax^2+bx+c$	$y=a,x^b$	$y=ax^2+bx+c$
Coefficientes						
a	11,619	126,88	10,848	11,231	8,4267	45,63
b	3,7976	-159,54	3,5609	10,769	2,2986	-61,289
c		51,072		-11,039		24,806
R <sup>2</sup>	0,9537	1	0,9901	0,9977	0,744	0,6796
r	0,9766	1,0000	0,9950	1,0000	0,8626	0,8244

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la curva de gastos de los años 2009-2010, se muestran más a detalle (ver **Anexo 5**). En la tabla siguiente se muestran los caudales indirectos obtenidos.

**Tabla 4.36** Caudales diarios (m<sup>3</sup>/s), obtenidos por el método de la curva de gasto en el periodo hidrológico 2009-2010

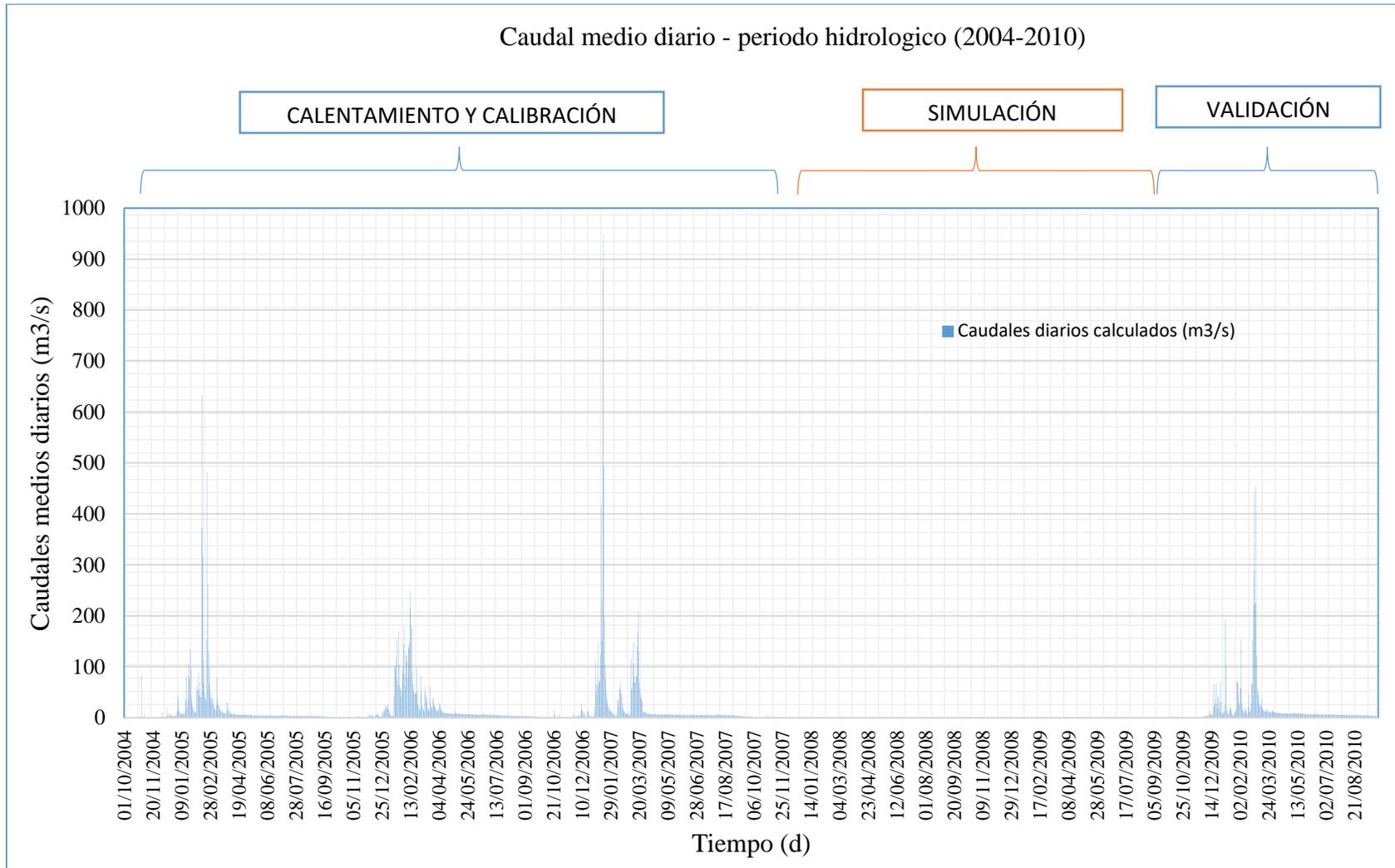
DIA	2009			2010									
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT
1	2,13	1,28	2,40	9,09	29,55	225,63	12,26	8,06	6,94	6,28	5,55	4,50	3,47
2	2,13	1,28	4,00	7,42	56,88	455,40	11,14	8,18	6,87	6,28	5,62	4,54	3,47
3	2,13	1,28	3,80	7,15	153,28	120,77	10,66	8,62	6,78	6,28	5,70	4,60	3,47
4	2,07	1,28	3,66	12,58	59,46	58,32	10,37	9,29	6,85	6,28	5,62	4,62	3,47
5	1,98	1,28	3,68	10,05	28,76	53,15	10,00	9,56	6,74	6,28	5,61	4,62	3,47
6	1,89	1,20	3,70	25,31	19,71	46,23	9,73	9,04	6,76	6,28	5,57	4,62	3,47
7	1,89	1,28	3,70	193,14	14,99	31,69	9,42	8,70	6,74	6,28	5,64	4,55	3,53
8	1,89	1,28	3,70	102,69	12,10	25,41	9,38	8,62	6,64	6,28	5,61	4,48	3,52
9	1,82	1,20	3,70	24,06	10,19	20,76	9,38	8,38	6,61	6,22	5,59	4,45	3,50
10	1,79	1,20	5,22	13,80	20,92	26,59	9,21	8,22	6,61	6,28	5,45	4,42	3,41

11	1,68	1,20	12,88	8,38	14,39	36,29	9,04	8,06	6,61	6,20	5,40	4,27	3,50
12	1,67	1,28	6,96	6,92	17,50	24,01	9,04	8,06	6,61	6,22	5,30	4,09	3,65
13	1,67	1,28	6,09	6,55	10,90	18,76	8,95	8,22	6,61	6,12	5,28	4,02	3,61
14	1,58	1,28	5,93	14,63	8,14	15,23	8,70	8,22	6,61	6,10	5,27	3,96	3,55
15	1,52	1,28	5,37	27,01	6,74	14,15	8,70	8,14	6,61	5,98	5,34	3,96	3,74
16	1,47	1,28	5,01	18,33	46,65	13,35	8,70	8,30	6,61	6,00	5,23	3,96	3,73
17	1,47	1,28	21,44	17,64	21,94	12,47	8,62	8,06	6,61	6,12	5,14	3,96	3,67
18	1,44	1,37	66,80	13,00	11,85	12,00	8,38	8,06	6,53	5,98	5,17	3,96	3,14
19	1,37	1,37	28,37	6,44	10,19	12,21	8,66	8,14	6,45	5,94	5,19	3,79	3,13
20	1,37	1,37	22,05	5,47	15,60	16,50	8,34	8,26	6,40	5,86	5,28	3,91	3,08
21	1,37	1,37	38,40	5,28	27,05	14,27	8,34	7,11	6,36	5,76	5,23	3,93	3,02
22	1,35	1,37	67,61	4,92	64,71	12,42	8,30	7,04	6,32	5,66	5,06	3,83	2,97
23	1,28	1,37	27,22	4,89	67,00	10,99	8,34	6,96	6,40	5,61	5,08	3,73	3,02
24	1,28	1,37	18,64	12,41	151,67	10,85	8,22	6,96	6,28	5,49	4,99	3,71	2,93
25	1,28	1,47	41,13	12,12	221,80	10,85	8,10	6,96	6,28	5,62	4,92	3,65	2,95
26	1,28	1,47	42,41	17,23	444,85	10,85	7,94	6,96	6,28	5,61	4,97	3,59	2,91
27	1,28	1,47	18,10	72,72	288,46	10,42	7,87	6,96	6,38	5,59	4,92	3,59	2,91
28	1,28	1,47	32,16	67,72	223,07	10,66	8,02	6,96	6,28	5,64	4,78	3,53	2,95
29	1,28	1,47	11,29	69,91		11,14	7,98	6,87	6,28	5,64	4,64	3,47	2,91
30	1,28	1,67	71,31	48,89		13,75	8,02	6,78	6,28	5,64	4,62	3,47	2,91
31	1,28		30,56	25,59		14,80		6,78		5,51	4,50		2,91
Prom	1,59	1,34	19,91	28,11	73,51	44,19	8,99	7,89	6,55	5,97	5,23	4,06	3,29
Max	2,13	1,67	71,31	193,14	444,85	455,40	12,26	9,56	6,94	6,28	5,70	4,62	3,74
Min	1,28	1,20	2,40	4,89	6,74	10,42	7,87	6,78	6,28	5,49	4,50	3,47	2,91

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la curva de gastos de los años 2004 a 2010. A continuación, se muestra en la Figura 4.22 los datos obtenidos de los caudales medios diarios encontrados anteriormente con la curva de gastos de la cuenca río San Juan del Oro.

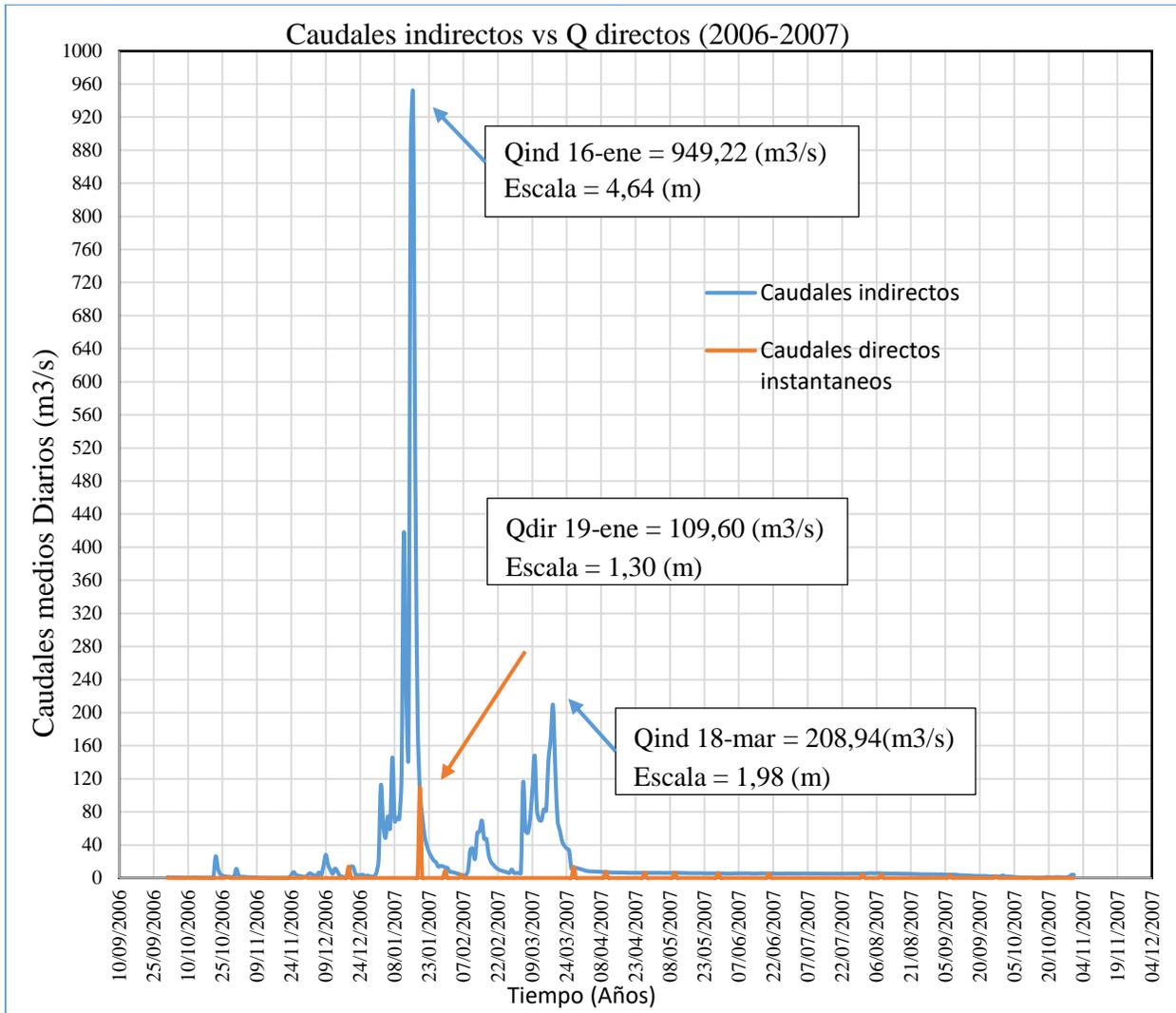
**Figura 4.22** Caudales medios diarios de la cuenca río San Juan del Oro ( $m^3/s$ ) y años a usar para las etapas de modelación.



Fuente: Elaboración propia

Para comprobar la similitud de los caudales indirectos calculados mediante la curva de gasto y los caudales directos instantáneos, se hizo la verificación de los datos de aforo vs la curva de gasto del periodo hidrológico más significativo que va desde Oct.2006-Oct.2007, como se muestra en la siguiente Figura 4.23.

**Figura 4.23** Caudales directos instantáneos y caudales indirectos (2006-2007).



Fuente: Elaboración Propia

#### 4.5 Modelación hidrológica de la cuenca del río San Juan del Oro con RS-MINERVE

La modelación hidrológica de una cuenca es una simulación de los procesos que ocurren durante un proceso de precipitación y evapotranspiración, su transformación de esta en escorrentía, así como lo asociado a pérdidas iniciales, flujo base y otros. Para la modelación hidrológica de la cuenca del río San Juan del Oro se utilizó el modelo GR4J, los cuales tienen un conjunto de 4 parámetros y otros parámetros de calibración con los cuales se simulan los

fenómenos asociados a la hidrología, este modelo se encuentra dentro del RS-MINERVE como un sub-modelo GR4J.

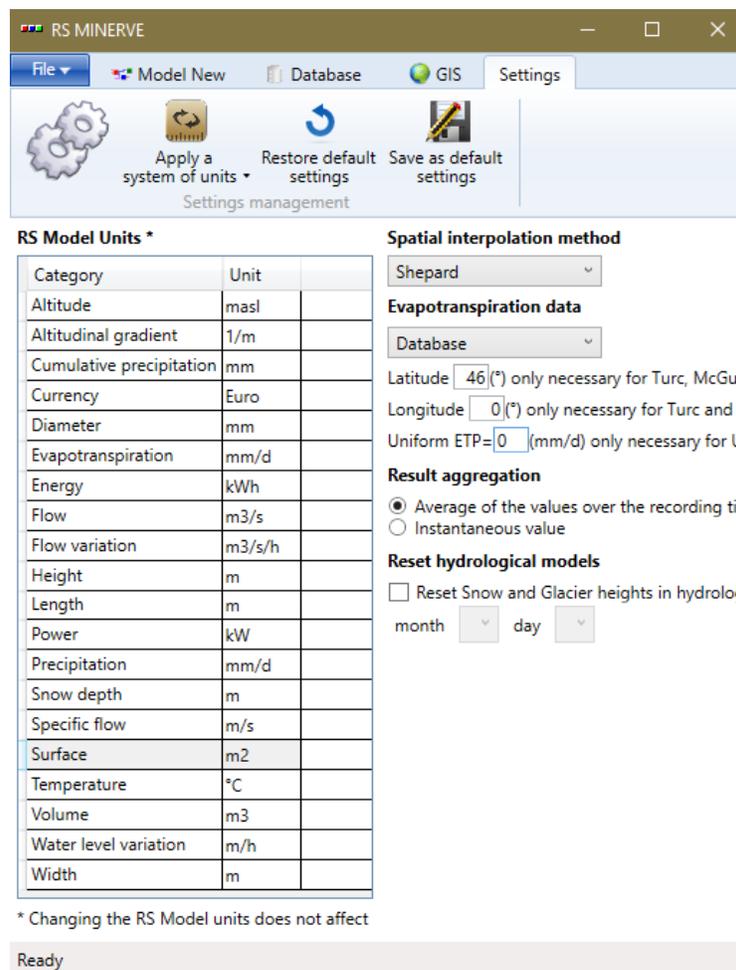
Para tal caso se consideró los periodos de modelación entre los años 2004 y 2010, se calentará y calibrará el modelo en el periodo 2004-2007, y se simulará en los años 2007-2009, haciendo la validación de los parámetros encontrados en la etapa de validación en los años 2009-2010.

#### 4.5.1 Preparación del entorno de trabajo de la Modelación

##### a) Modelación con RS MINERVE

Primeramente, se configuro las unidades del programa para poder cargar los datos correctamente. En la Figura 4.24 se seleccionó la configuración adecuada para el modelamiento, unidades de precipitación, forma de evapotranspiración, caudales, superficie, etc...

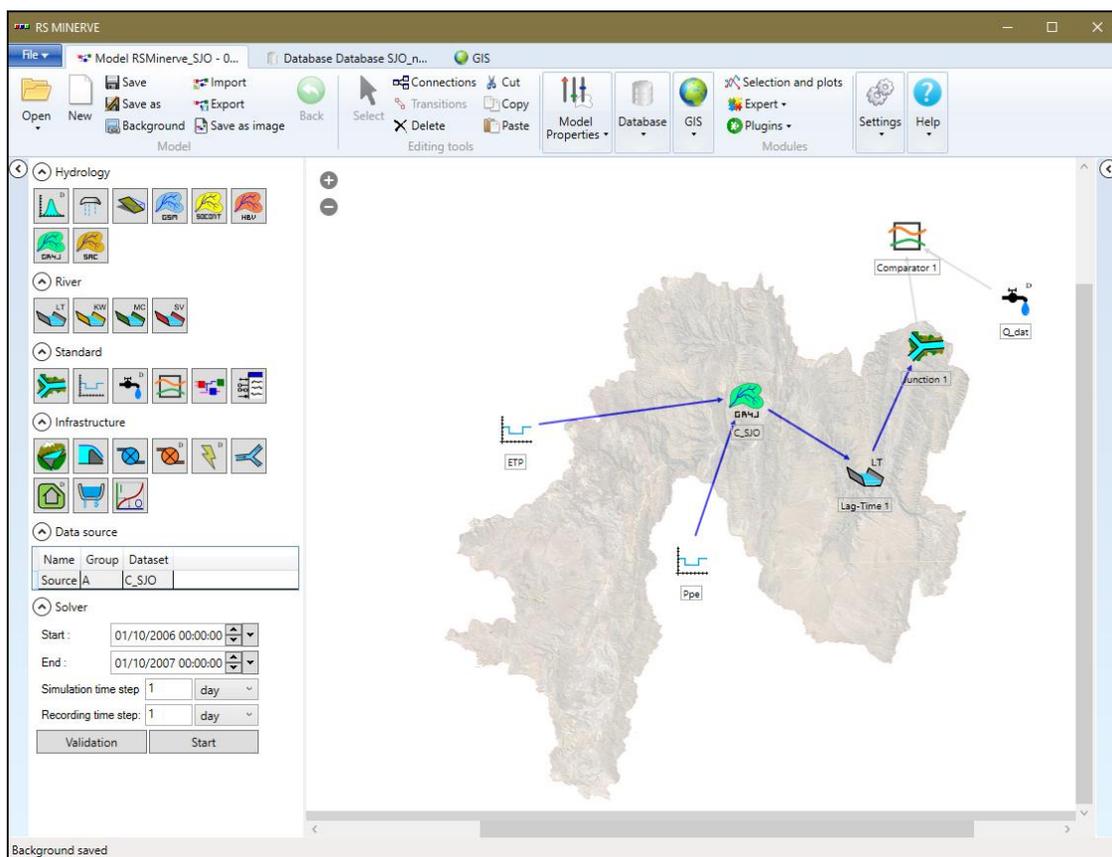
**Figura 4.24** Configuración de los datos de entrada al RS MINERVE.



Fuente: Elaboración propia-Programa RS-Minerve

Posteriormente se definió la cuenca representándose de forma esquemática, caracterizando su morfología y así facilitar el modelado teniendo de referencia la imagen de la cuenca de estudio. En la Figura 4.25 se definió la estructura del modelo de la cuenca incorporándose los elementos hidrológicos tales como red de drenaje, estaciones de precipitación y evapotranspiración potencial, cuenca GR4J, simulado del río por el método de Lag Time (tiempo de retardo) y unión del mismo, conectándose estos desde aguas arriba hacia aguas abajo comparándolos con los elementos de comparador y caudales de referencia.

**Figura 4.25** Esquematación con RS MINERVE de la cuenca del río San Juan del Oro.



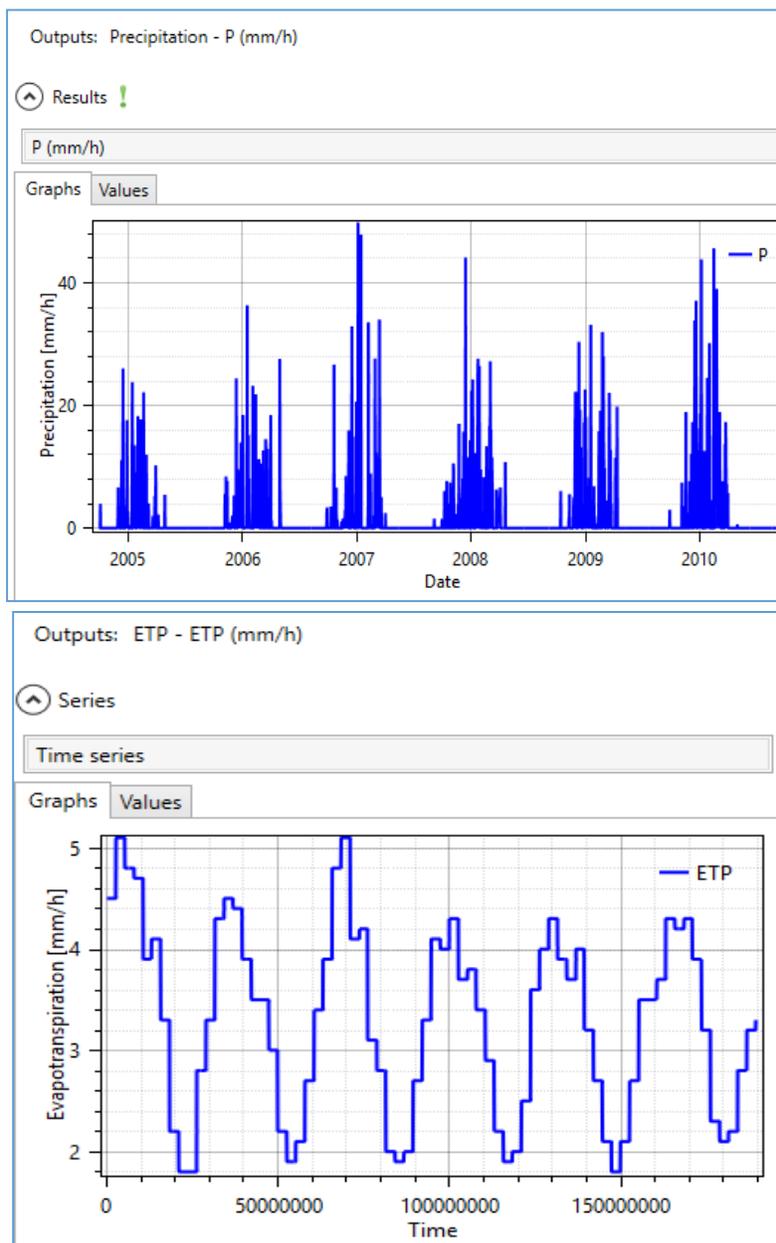
Fuente: Elaboración propia-Programa RS-Minerve

Cabe mencionar que para modelar la cuenca del río San Juan del Oro fue representada la cuenca con el sub modelo GR4J incorporado al RS MINERVE con 4 parámetros de control, también con el método de Lag Time "tiempo de retardo" para simular en tránsito de caudales por los ríos, así mismo se colocó estación dentro de la cuenca para representar la precipitación regionalizada y la evapotranspiración potencial.

#### 4.5.2 Introducción de los datos para modelar el periodo (2004-2010)

En la Figura 4.26 se muestra data de precipitación y de evapotranspiración, encontrada anteriormente y que ha sido cargada al programa, los cuales son los registros diarios de precipitación y evapotranspiración potencial representadas diariamente en un intervalo de tiempo acumulado en segundos diariamente en el periodo hidrológico 2004-2010, (ver Anexo 6).

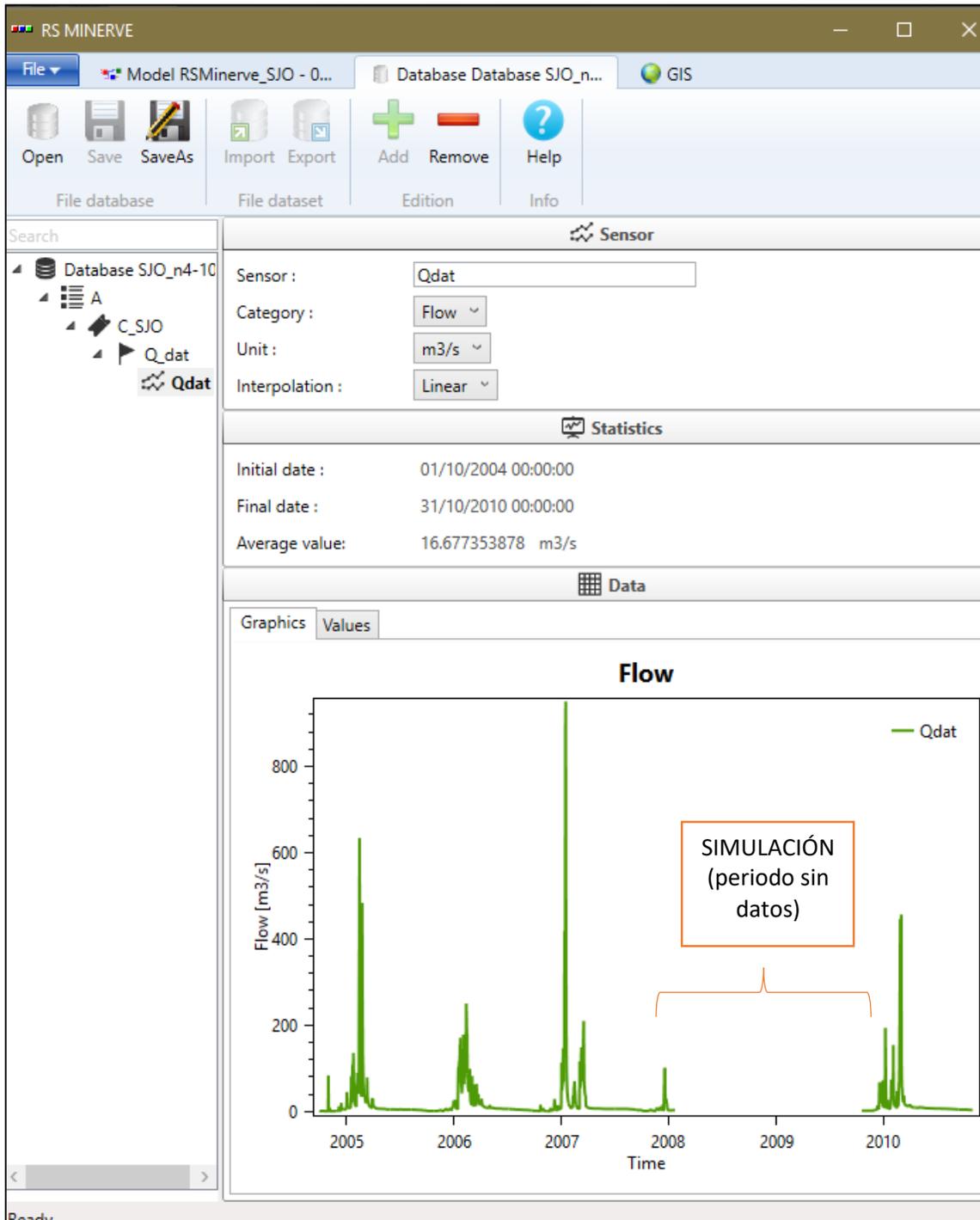
**Figura 4.26** Hietogramas de precipitación y evapotranspiración cargado en el database de RS MINERVE. (2004-2010)



Fuente: Elaboración propia

Juntamente con los registros anteriores se cargaron los caudales diarios de referencia de la estación de aforo de El Punte, a través de la pestaña data base como se ve en la Figura 4.27, durante el periodo 2004-2010.

**Figura 4.27.** Caudales diarios de referencia cargados en el database de RS MINERVE.



Fuente: Elaboración propia

### 4.5.3 Calentamiento, Calibración-simulación y validación del modelo GR4J (2004-2010).

Para comenzar con el proceso de calibración del modelo GR4J se introdujeron los parámetros mínimos recomendados por el programa y también los datos obtenidos anteriormente sobre las características de la cuenca y el río, ver Figura 4.28.

**Figura 4.28** Parámetros iniciales cargados en el modelo en RS MINERVE, Lag-Time y GR4J

The screenshot displays two panels of the RS MINERVE software interface. The left panel is titled 'Lag-Time' and the right panel is titled 'GR4J'. Both panels show various input and output parameters, a table of model parameters, and initial conditions.

**Lag-Time Panel:**

- Lag-Time 1 (784.8627, 432.46)
- Zone: A
- Inputs: Flow - QUp (m3/s)
- Outputs: Flow - QDown (m3/s)
- Parameters table:

Name	Value	Unit
L	328439.7	m
B0	28	m
m	0.8	-
J0	0.0033	-
K	28	m <sup>1/3</sup> /s
Lag	500	min

Initial conditions table:

Name	Value	Unit
Qlni	0.2	m <sup>3</sup> /s

**GR4J Panel:**

- C\_SJO (662.5133, 357.3533)
- Zone: A
- Inputs: Precipitation - P (mm/h) / ETP - ETP (mm/h)
- Outputs: Flow - Qtot (m3/s) / Flow - Qr (m3/s) / Flow - Qd (m3/s) / ETP - ETR (mm/h)
- Parameters table:

Name	Value	Unit
A	19807230000	m <sup>2</sup>
X1	1.2	m
X2	0.003	m
X3	0.5	m
X4	1.5	d

Parameter info (X3):

- Description: Capacity of routing store
- Default value: 0.05 m
- Regular range: [ 0.01 , 0.5 ] m

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se procede a ejecutar el solucionador del programa colocando las fechas establecidas, para luego proceder a calibrar automáticamente la cuenca, para ello se ingresa a la pestaña de modulo experto, luego a la opción de calibración, y ahí se ajusta los datos del modelo en escala diaria, la calibración se vuelve a introducir entre las fechas 01/10/2004 hasta el 01/10/2010 como se ve en la Figura 4.29, donde se tomaron los parámetros requeridos recomendados como se muestran en el apartado II. para el comparador de la estación de aforo, la calibración de SCE-UA y el modelo GR4J y el Lag-Time.

Cabe mencionar que para la calibración óptima se usaron los datos de algunos caudales diarios que se logró salvar del periodo 2007-2009, en donde mayormente el en año 2008 no hay registros diarios de escala ni tampoco de aforos directos instantáneos suficientes.

**Figura 4.29** Parámetros encontrados después de calibrar el modelo GR4J en RS MINERVE

The screenshot displays the RS MINERVE software interface with the following sections:

- Calibration Configuration:** A table with columns 'Name' and 'Order'. It lists 'Calibration1' and 'Calibration2', with 'Calibration2' checked.
- Comparators:** A list containing 'Comparator 1'.
- Selection:** Two tables. The first, 'Object types', lists 'GR4J' and 'Lag-Time'. The second, 'Zones Id', lists 'A'.
- Models:** A table with columns 'Type', 'Name', 'Parent model', and 'Zone'. It lists 'GR4J' (C\_SJO) and 'Lag-Time' (Lag-Time 1), both under the parent model 'RSMinerve\_SJO - 04-10n' and zone 'A'.
- Objective Function (OF):** A section for 'Total Weight for the Objective Function' set to 2.7. It includes a table of indicators and weights:
 

Indicators	Weight
Kling-Gupta Efficiency	0
Bias Score	1
RRMSE	0
Relative Volume Bias	0
Normalized Peak Error	0
- Hydrologic parameters optimization:** A section with 'Solver' set to 'Algorithm parameters', 'Start' date '01/10/2006 00:00:00', and 'End' date '01/10/2007 00:00:00'. A 'Start' button is visible.
- Summary results:** A section showing 'Normalized Peak Error = 0.959023072243991' and 'Initial OF value = 0.796591474891715'. It also displays the 'Best Solution' with parameters:
  - GR4J - X1 = 0.2973213
  - GR4J - X2 = -0.005
  - GR4J - X3 = 0.0215138
  - GR4J - X4 = 1.4263432
 And best indicator values for Comparator 1:
  - Nash = -0.361229771794275
  - Nash-In = -0.496368181614364
  - Pearson Correlation Coeff = 0.833819314011595
  - Kling-Gupta Efficiency = 0.359587282205315
  - Bias Score = 0.641716931787918
  - RRMSE = 4.09632309867044
  - Relative Volume Bias = 0.598567513495414
  - Normalized Peak Error = 0.959023072243991
  - Best OF value = 0.796591474891715

Fuente: RS-Minerve

Finalmente se obtuvieron los resultados con el RS-Minerve, modelando para el periodo (2004-2010) los valores de las Tabla 4.37 y 4.38.

**Tabla 4.37** Indicadores estadísticos de bondad de ajuste obtenidos.

Indicadores Estadísticos		Valores Iniciales	Calibración (2004-2009)	Validación (2009-2010)
<b>Modelo GR4J</b>	<b>Nash</b>	1	-0,029	-0,399
	<b>Nash-ln</b>	1	-0,357	0,028
	<b>Coef, Pearson</b>	1	0,590	0,231
	Kling-Gupta Eff,	1	0,553	0,217
	<b>BS</b>	1	0,999	0,997
	RRMSE	0	2,924	3,144
	RVB	0	0,023	0,049
	NPE	0	0,024	-0,060

Fuente: Elaboración Propia-con RS-Minerve

**Tabla 4.38** Parámetros del modelo GR4J obtenidos.

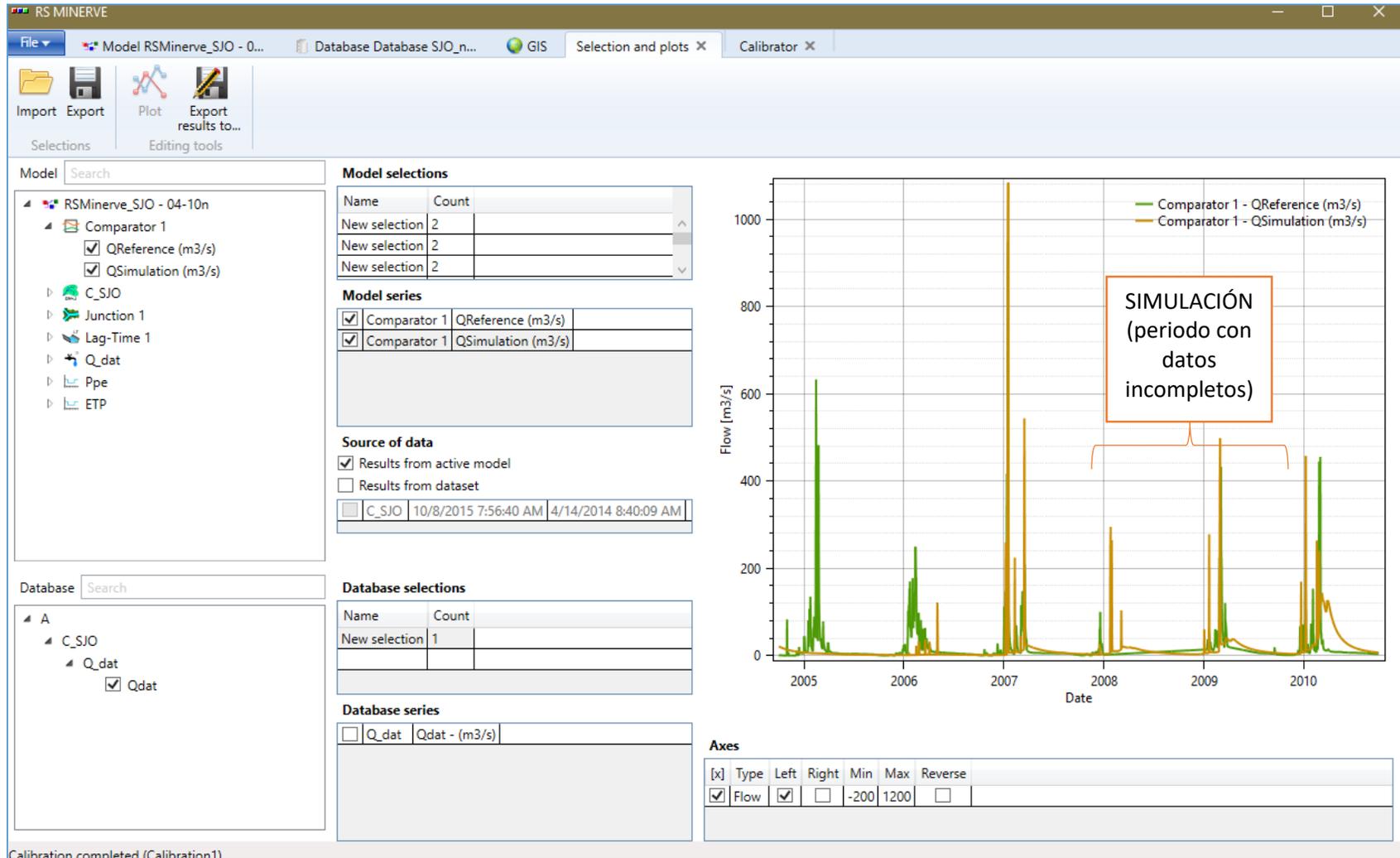
Parámetros	Valores Iniciales	Calibración (2004-2009)
X1 (m)	1,20	0,289
X2 (m)	0,003	-0,005
X3 (m)	0,50	0,036
X4 (d)	1,50	1,315

Fuente: Elaboración Propia-con RS-Minerve

#### 4.5.4 Obtención de Caudales diarios con RS MINERVE (2004-2010)

Los caudales generados por el programa RS-MINERVE se puede apreciar mejor en la pestaña de selección de datos y ploteo, en la Figura 4.30 se muestra un reporte del hidrograma creado por el programa en donde se muestra una visualización de los caudales diarios simulados y de referencia en modelación hidrológica del río San Juan del Oro, con el modelo GR4J de cuatro parámetros, ver caudales simulados vs de referencia en el **Anexo 7**.

Figura 4.30 Hidrograma de salida del RS MINERVE (2004-2010).



Fuente: Elaboración propia

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Interpretación de resultados obtenidos con el modelo GR4J usando el programa RS-Minerve en el periodo hidrológico (2004-2010).

#### 5.1.1 Caudales generados con RS-MINERVE vs Q indirectos o de referencia

Los caudales obtenidos por simulaciones extensas mayor a dos años en cuencas grandes presentan variaciones en sus parámetros finales, (ver **Anexo 7**) donde se muestran los caudales obtenidos durante el calentamiento, calibración, simulación y validación en el periodo 2004 a 2010.

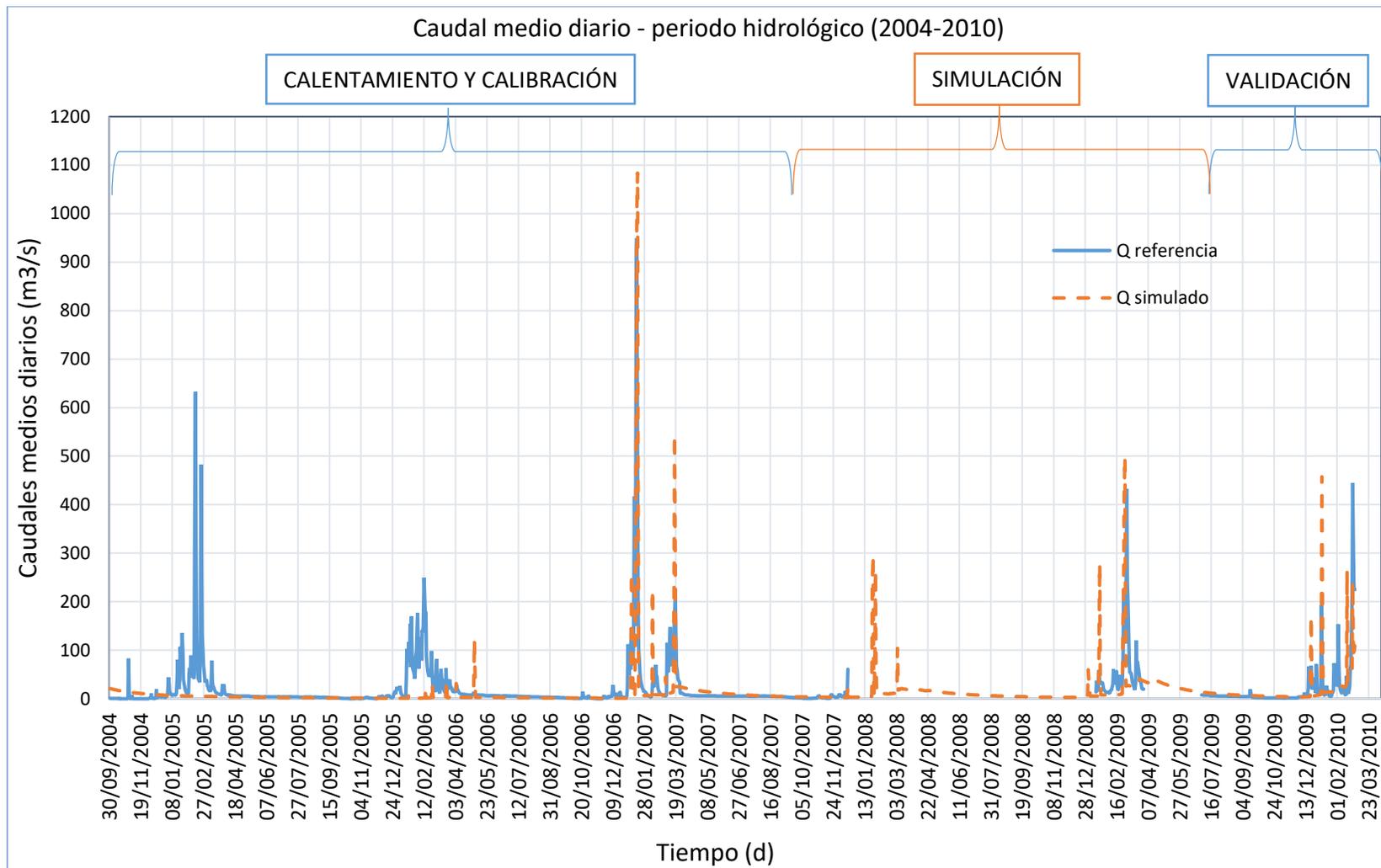
**-Calentamiento y Calibración automática.** -En la etapa de calentamiento se puede apreciar que no hay una modelación del todo pareja, se encontró que en ese periodo (2004-2005-2006), los caudales simulados están muy por debajo de la obtenida con los caudales indirectos. Este resultado refleja la incapacidad del modelo para representar eventos máximos en los primeros años. Pero en la calibración de los años 2006-2007, se va adecuando el modelo obteniéndose los caudales simulados con pequeña diferencia a los caudales indirectos, lográndose representar el evento máximo

**-Simulación.** - El modelo simulo regularmente los eventos mínimos de los caudales diarios en los años 2007-2009, periodo en donde no existen datos.

**-Validación.** - La validación no fue satisfactoria con los parámetros encontrados, notándose la disminución de los caudales simulados en el evento máximo en comparación con los caudales indirectos.

Los caudales medios diarios obtenidos con RS-MINERVE, también fueron graficados en un histograma para ver las diferencias que pudieran tener, pero si hay que destacar que en ambos casos se observa los eventos máximos con ligeros saltos de caudales generados por RS-MINERVE, como en el año más representativo el caudal máximo de ese periodo nos lo demuestra. En la Figura 5.1 se muestran los resultados de la modelación hidrológica con el programa RS-MINERVE2 con el modelo de flujo diario en GR4J y los datos de caudales diarios indirectos, en donde se puede apreciar mejor la calibración en los años hidrológicos del periodo 2004 a 2010.

**Figura 5.1** Interpretación del Hidrograma de salida con RS MINERVE, caudales diarios simulados y los caudales diarios indirectos, con los parámetros ajustados.



Fuente: Elaboración propia

### 5.1.2 Análisis de parámetros finales obtenidos con RS-MINERVE vs Q indirectos o de referencia

**Tabla 5.1** Análisis de los parámetros del modelo GR4J obtenidos.

Parámetros	Valores Iniciales	Calibración (2006-2009)
X1 (m)	1,20	0,289
X2 (m)	0,003	-0,005
X3 (m)	0,50	0,036
X4 (d)	1,50	1,315

Fuente: Elaboración Propia-con RS-Minverve

Los parámetros encontrados indican lo siguiente:

**El parámetro [X<sub>1</sub>=0,289 m]** ; parámetro estaría indicando la máxima capacidad del depósito de almacenamiento, a su vez indica la precipitación existente en la cuenca con relación al tamaño de la misma, lo cual hace que la lluvia se reparta en toda la cuenca considerándose la variabilidad temporal y espacial cuando la misma se incrementa, como también cabe mencionar que la longitud del río también es alta, por lo que este parámetro es bajo.

**En el parámetro [X<sub>2</sub>=-0,005 m]**; El valor salió negativo en la calibración lo que indica que hay perdidas de flujo subterráneo en la cuenca, esto puede deberse a diversos factores como por ejemplo el agua de lluvia es utilizada como agua potable, agua para riego, almacenamiento en atajados o represas de tierra, etc... pero salió un valor negativo mínimo, lo que indica también el poco intercambio de flujo.

**El parámetro [X<sub>3</sub>=0,036 m]**; Este valor nos salió menor que el parámetro X1 lo que indica que el 90% de la intensidad de flujo de percolación y de flujo directo va al depósito de almacenamiento del modelo, que es constituida por el hidrograma número 1 con tiempo base igual al parámetro X4, cuando el depósito de producción es menor este valor incrementa. Debido a la cantidad que ingresa y sale del depósito de distribución es mayor en zonas altas de la cuenca, donde el río esta menos intervenido, siendo esto cierto debido a la poca urbanización existente en el área de la cuenca modelada, y es menor en zonas donde existe una alta urbanización.

El parámetro [ $X_4=1,315$  d]; refleja el tiempo de respuesta de la cuenca en convertir la lluvia a caudal, como el área de la cuenca y la longitud del río es grande este valor saldrá siempre elevado.

### 5.1.3 Análisis de indicadores estadísticos finales obtenidos con RS-MINERVE vs Q indirectos o de referencia.

Los indicadores estadísticos obtenidos, con la calibración automática con el programa RS-Minerve para el periodo (2004-2010) se muestran en la Tabla 5.2, los mismos serán explicados:

**Tabla 5.2.** Indicadores estadísticos de bondad de ajuste generados con RS-Minerve.

Indicadores Estadísticos		Valores Iniciales	Calibración (2004-2009)	Validación (2009-2010)
Modelo GR4J	Nash	1	-0,029	-0,399
	Nash-ln	1	-0,357	0,028
	Coef, Pearson	1	0,590	0,231
	Kling-Gupta Eff,	1	0,553	0,217
	BS	1	0,999	0,997
	RRMSE	0	2,924	3,144
	RVB	0	0,023	0,049
	NPE	0	0,024	-0,060

Fuente: Elaboración Propia-con RS-Minerve

**Indicador 1. Coeficiente Nash:** calibración [ $Nash=-0,029$ ] y validación [ $Nash=-0,399$ ], Los criterios de Nash-Sutcliffe se utilizan para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos, como se ve el valor obtenido de una escala de  $(-\infty$  a 1) donde 1 es el valor ideal, se demuestra entonces que el poder predictivo del modelo es defectuoso.

**Indicador 2. Coeficiente de Nash-ln:** calibración [ $Nash-ln=-0,357$ ], y validación [ $Nash-ln=0,028$ ], El coeficiente de Nash-Sutcliffe para valores de flujo logaritmo (Nash-ln) se utiliza para evaluar el rendimiento de modelos hidrológicos para flujos bajos, en una escala de  $(-\infty$  a 1) el valor ideal es 1, se demuestra que el rendimiento del modelo es regular para predecir los flujos subterráneos.

**Indicador 3. Coef. Pearson:** calibración [ $Pearson=0,549$ ] y validación [ $Pearson=0,231$ ], El coeficiente de correlación de Pearson muestra la covariabilidad de las descargas simuladas

y observadas sin penalizar el sesgo. Varía de 0 a 1, donde 1 es el valor ideal, lo coef. de Pearson obtenidos indica que la similitud de caudales es regular para modelar.

**Indicador 4. Coeficiente de Eficiencia Kling-Gupta :** calibración [ **KGE=0,553**] y validación [ **KGE=0,217**], El coeficiente de Kling-Gupta proporciona un indicador que facilita el análisis global basado en diferentes componentes (correlación, sesgo y variabilidad). Varía de 0 a 1, lo cual indica que los componentes del modelo rinden regularmente.

**Indicador 5. Puntuación de Parcialidad BS:** calibración [ **BS=0,999**] y validación [ **BS=0,997**], es una estimación simétrica del emparejamiento entre la simulación promedio y la observación promedio. Varía de 0 a 1, donde 1 es el valor ideal, lo cual indica que el modelo rinde bien para emparejamientos de caudales promedios.

**Indicador 6. Error cuadrático medio de raíz relativa:** calibración [ **RRMSE=3,144**] y validación [ **RRMSE=2,924** ], El Error cuadrático medio de raíz relativa (RRMSE) se define como el RMSE normalizado a la media de los valores observados. Varía de 0 a  $+\infty$ . Como el valor es mayor que cero el rendimiento del modelo es regular.

**Indicador 7. Volumen relativo de Parcialidad:** calibración [ **RVB =0,023**] y validación [ **RVB =0,049**], Varía de -1 a  $+\infty$ , a veces denominado de manera diferente, corresponde en este caso al error relativo entre los volúmenes simulados y observados durante el período estudiado, un valor cercano a cero indica un buen rendimiento de la simulación y el valor positivo significa que el modelo es de excedente.

**Indicador 8. Error pico normalizado:** calibración [ **NPE =0,024**] y validación [ **NPE =-0,060**], varía de -1 a  $+\infty$ . Los valores son cercanos a cero lo cual indica un regular rendimiento de los picos simulados con respecto a los observados del modelo.

## 5.2. Visualización de los resultados en escalas menores en el periodo (2006-2007)

### 5.2.1 Visualización de caudales diarios generados en un año hidrológico con el programa RS-MINERVE vs Q indirectos o de referencia.

Para apreciar mejor los caudales diarios obtenidos se redujo la escala a un año más representativo.

**Tabla 5.3** Caudales obtenidos con RS-Minerve por el modelo GR4J periodo (2006-2007)

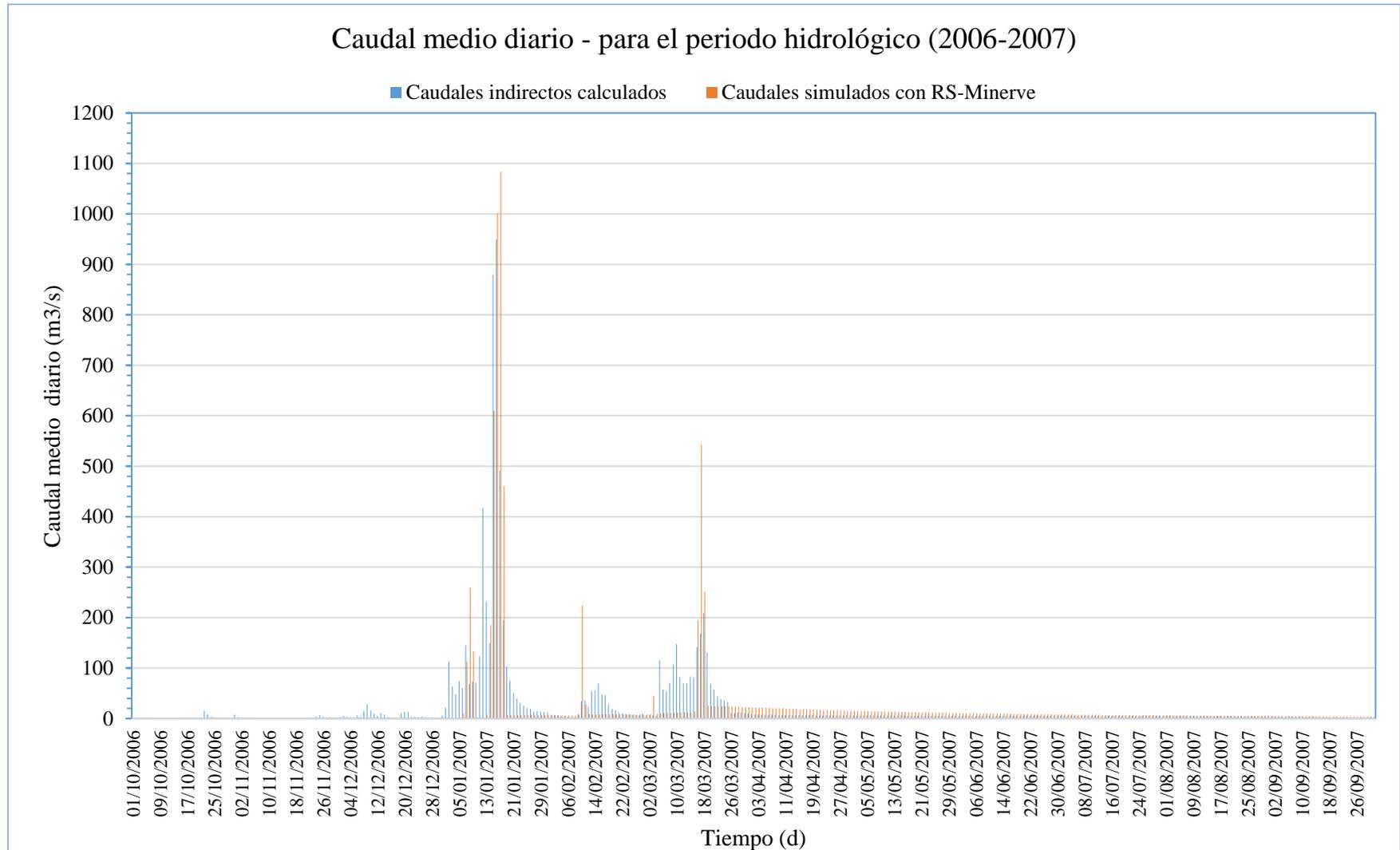
Caudal (m3/s)	Fecha (d)								
1,45	1-oct.-06	1,28	13-nov.-06	1,21	26-dic.-06	6,14	7-feb.-07	24,78	22-mar.-07
1,44	2-oct.-06	1,28	14-nov.-06	1,21	27-dic.-06	6,28	8-feb.-07	24,86	23-mar.-07
1,44	3-oct.-06	1,27	15-nov.-06	1,20	28-dic.-06	7,13	9-feb.-07	24,56	24-mar.-07
1,43	4-oct.-06	1,27	16-nov.-06	1,20	29-dic.-06	224,33	10-feb.-07	24,27	25-mar.-07
1,43	5-oct.-06	1,26	17-nov.-06	1,21	30-dic.-06	27,87	11-feb.-07	23,98	26-mar.-07
1,42	6-oct.-06	1,26	18-nov.-06	1,22	31-dic.-06	8,36	12-feb.-07	23,69	27-mar.-07
1,41	7-oct.-06	1,25	19-nov.-06	1,22	1-ene.-07	8,30	13-feb.-07	23,40	28-mar.-07
1,41	8-oct.-06	1,25	20-nov.-06	1,25	2-ene.-07	8,24	14-feb.-07	23,12	29-mar.-07
1,40	9-oct.-06	1,24	21-nov.-06	1,28	3-ene.-07	8,22	15-feb.-07	22,83	30-mar.-07
1,40	10-oct.-06	1,24	22-nov.-06	1,31	4-ene.-07	8,33	16-feb.-07	22,56	31-mar.-07
1,39	11-oct.-06	1,24	23-nov.-06	1,36	5-ene.-07	8,52	17-feb.-07	22,28	1-abr.-07
1,39	12-oct.-06	1,23	24-nov.-06	10,03	6-ene.-07	8,45	18-feb.-07	22,01	2-abr.-07
1,38	13-oct.-06	1,23	25-nov.-06	113,22	7-ene.-07	8,39	19-feb.-07	21,74	3-abr.-07
1,37	14-oct.-06	1,22	26-nov.-06	259,19	8-ene.-07	8,32	20-feb.-07	21,47	4-abr.-07
1,37	15-oct.-06	1,22	27-nov.-06	133,59	9-ene.-07	8,26	21-feb.-07	21,21	5-abr.-07
1,36	16-oct.-06	1,21	28-nov.-06	1,85	10-ene.-07	8,19	22-feb.-07	20,95	6-abr.-07
1,36	17-oct.-06	1,21	29-nov.-06	1,86	11-ene.-07	8,13	23-feb.-07	20,69	7-abr.-07
1,35	18-oct.-06	1,21	30-nov.-06	1,91	12-ene.-07	8,06	24-feb.-07	20,44	8-abr.-07
1,35	19-oct.-06	1,20	1-dic.-06	7,77	13-ene.-07	8,00	25-feb.-07	20,19	9-abr.-07
1,34	20-oct.-06	1,20	2-dic.-06	185,25	14-ene.-07	7,93	26-feb.-07	19,94	10-abr.-07
1,34	21-oct.-06	1,19	3-dic.-06	610,05	15-ene.-07	7,87	27-feb.-07	19,70	11-abr.-07
1,36	22-oct.-06	1,19	4-dic.-06	1001,08	16-ene.-07	7,80	28-feb.-07	19,46	12-abr.-07
1,39	23-oct.-06	1,19	5-dic.-06	1083,78	17-ene.-07	7,90	1-mar.-07	19,22	13-abr.-07
1,38	24-oct.-06	1,18	6-dic.-06	460,60	18-ene.-07	8,64	2-mar.-07	18,99	14-abr.-07
1,38	25-oct.-06	1,18	7-dic.-06	6,89	19-ene.-07	44,65	3-mar.-07	18,76	15-abr.-07
1,37	26-oct.-06	1,18	8-dic.-06	6,86	20-ene.-07	9,80	4-mar.-07	18,53	16-abr.-07
1,37	27-oct.-06	1,19	9-dic.-06	6,82	21-ene.-07	10,19	5-mar.-07	18,30	17-abr.-07
1,36	28-oct.-06	1,19	10-dic.-06	6,79	22-ene.-07	11,04	6-mar.-07	18,08	18-abr.-07
1,36	29-oct.-06	1,19	11-dic.-06	6,75	23-ene.-07	11,49	7-mar.-07	17,86	19-abr.-07
1,36	30-oct.-06	1,18	12-dic.-06	6,71	24-ene.-07	11,47	8-mar.-07	17,65	20-abr.-07
1,35	31-oct.-06	1,18	13-dic.-06	6,67	25-ene.-07	11,40	9-mar.-07	17,43	21-abr.-07
1,35	1-nov.-06	1,18	14-dic.-06	6,63	26-ene.-07	11,51	10-mar.-07	17,22	22-abr.-07
1,34	2-nov.-06	1,18	15-dic.-06	6,59	27-ene.-07	11,93	11-mar.-07	17,01	23-abr.-07
1,34	3-nov.-06	1,17	16-dic.-06	6,55	28-ene.-07	12,35	12-mar.-07	16,81	24-abr.-07
1,33	4-nov.-06	1,17	17-dic.-06	6,51	29-ene.-07	12,34	13-mar.-07	16,61	25-abr.-07
1,33	5-nov.-06	1,20	18-dic.-06	6,47	30-ene.-07	12,78	14-mar.-07	16,41	26-abr.-07
1,32	6-nov.-06	1,24	19-dic.-06	6,43	31-ene.-07	14,29	15-mar.-07	16,21	27-abr.-07
1,32	7-nov.-06	1,24	20-dic.-06	6,39	1-feb.-07	195,27	16-mar.-07	16,02	28-abr.-07
1,31	8-nov.-06	1,24	21-dic.-06	6,35	2-feb.-07	543,42	17-mar.-07	15,83	29-abr.-07
1,31	9-nov.-06	1,23	22-dic.-06	6,31	3-feb.-07	251,34	18-mar.-07	15,64	30-abr.-07
1,30	10-nov.-06	1,23	23-dic.-06	6,26	4-feb.-07	25,33	19-mar.-07	15,46	1-may.-07
1,30	11-nov.-06	1,22	24-dic.-06	6,22	5-feb.-07	25,04	20-mar.-07	15,27	2-may.-07
1,29	12-nov.-06	1,22	25-dic.-06	6,18	6-feb.-07	24,80	21-mar.-07	15,09	3-may.-07

Caudal (m3/s)	Fecha (d)						
14,92	4-may.-07	9,35	16-jun.-07	6,29	29-jul.-07	4,48	10-sep.-07
14,74	5-may.-07	9,26	17-jun.-07	6,24	30-jul.-07	4,45	11-sep.-07
14,57	6-may.-07	9,17	18-jun.-07	6,19	31-jul.-07	4,41	12-sep.-07
14,40	7-may.-07	9,08	19-jun.-07	6,14	1-ago.-07	4,38	13-sep.-07
14,23	8-may.-07	8,99	20-jun.-07	6,09	2-ago.-07	4,35	14-sep.-07
14,07	9-may.-07	8,90	21-jun.-07	6,03	3-ago.-07	4,32	15-sep.-07
13,91	10-may.-07	8,81	22-jun.-07	5,98	4-ago.-07	4,29	16-sep.-07
13,75	11-may.-07	8,73	23-jun.-07	5,93	5-ago.-07	4,26	17-sep.-07
13,59	12-may.-07	8,64	24-jun.-07	5,89	6-ago.-07	4,23	18-sep.-07
13,44	13-may.-07	8,56	25-jun.-07	5,84	7-ago.-07	4,20	19-sep.-07
13,29	14-may.-07	8,48	26-jun.-07	5,79	8-ago.-07	4,17	20-sep.-07
13,14	15-may.-07	8,40	27-jun.-07	5,74	9-ago.-07	4,14	21-sep.-07
12,99	16-may.-07	8,32	28-jun.-07	5,70	10-ago.-07	4,11	22-sep.-07
12,84	17-may.-07	8,24	29-jun.-07	5,65	11-ago.-07	4,08	23-sep.-07
12,70	18-may.-07	8,16	30-jun.-07	5,60	12-ago.-07	4,05	24-sep.-07
12,56	19-may.-07	8,09	1-jul.-07	5,56	13-ago.-07	4,02	25-sep.-07
12,42	20-may.-07	8,01	2-jul.-07	5,51	14-ago.-07	3,99	26-sep.-07
12,29	21-may.-07	7,94	3-jul.-07	5,47	15-ago.-07	3,96	27-sep.-07
12,15	22-may.-07	7,86	4-jul.-07	5,43	16-ago.-07	3,94	28-sep.-07
12,02	23-may.-07	7,79	5-jul.-07	5,38	17-ago.-07	3,91	29-sep.-07
11,89	24-may.-07	7,72	6-jul.-07	5,34	18-ago.-07	3,88	30-sep.-07
11,76	25-may.-07	7,65	7-jul.-07	5,30	19-ago.-07	3,86	1-oct.-07
11,63	26-may.-07	7,58	8-jul.-07	5,26	20-ago.-07		
11,51	27-may.-07	7,51	9-jul.-07	5,22	21-ago.-07		
11,38	28-may.-07	7,44	10-jul.-07	5,17	22-ago.-07		
11,26	29-may.-07	7,37	11-jul.-07	5,13	23-ago.-07		
11,14	30-may.-07	7,31	12-jul.-07	5,09	24-ago.-07		
11,02	31-may.-07	7,24	13-jul.-07	5,05	25-ago.-07		
10,91	1-jun.-07	7,18	14-jul.-07	5,02	26-ago.-07		
10,79	2-jun.-07	7,11	15-jul.-07	4,98	27-ago.-07		
10,68	3-jun.-07	7,05	16-jul.-07	4,94	28-ago.-07		
10,57	4-jun.-07	6,99	17-jul.-07	4,90	29-ago.-07		
10,46	5-jun.-07	6,92	18-jul.-07	4,86	30-ago.-07		
10,35	6-jun.-07	6,86	19-jul.-07	4,83	31-ago.-07		
10,25	7-jun.-07	6,80	20-jul.-07	4,79	1-sep.-07		
10,14	8-jun.-07	6,74	21-jul.-07	4,75	2-sep.-07		
10,04	9-jun.-07	6,69	22-jul.-07	4,72	3-sep.-07		
9,93	10-jun.-07	6,63	23-jul.-07	4,68	4-sep.-07		
9,83	11-jun.-07	6,57	24-jul.-07	4,65	5-sep.-07		
9,73	12-jun.-07	6,51	25-jul.-07	4,61	6-sep.-07		
9,64	13-jun.-07	6,46	26-jul.-07	4,58	7-sep.-07		
9,54	14-jun.-07	6,40	27-jul.-07	4,55	8-sep.-07		
9,44	15-jun.-07	6,35	28-jul.-07	4,51	9-sep.-07		

Fuente: Elaboración propia con RS-Minerve

Los caudales medios diarios simulados para el periodo (2006-2007), fueron graficados en un histograma para ver las diferencias que pudieran tener, cabe destacar que en ambos casos se observa los eventos máximos con ligeros saltos de caudales generados por RS-MINERVE comparados con los caudales de referencia tal como describe el indicador estadístico [NPE]. En la Figura 5.2 se muestran los resultados de la simulación con el programa RS-MINERVE en el año hidrológico más representativo.

**Figura 5.2** Caudales diarios simulados con RS-Minerve vs Caudales indirectos, para una escala de un año.



Fuente: Elaboración propia con RS-Minerve

### 5.2.2 Visualización y análisis del mes más representativo

Para apreciar mejor los datos de caudales diarios simulados obtenidos con RS-Minerve y los caudales de referencia se redujo la escala a un más, se visualizará en el mes más representativo.

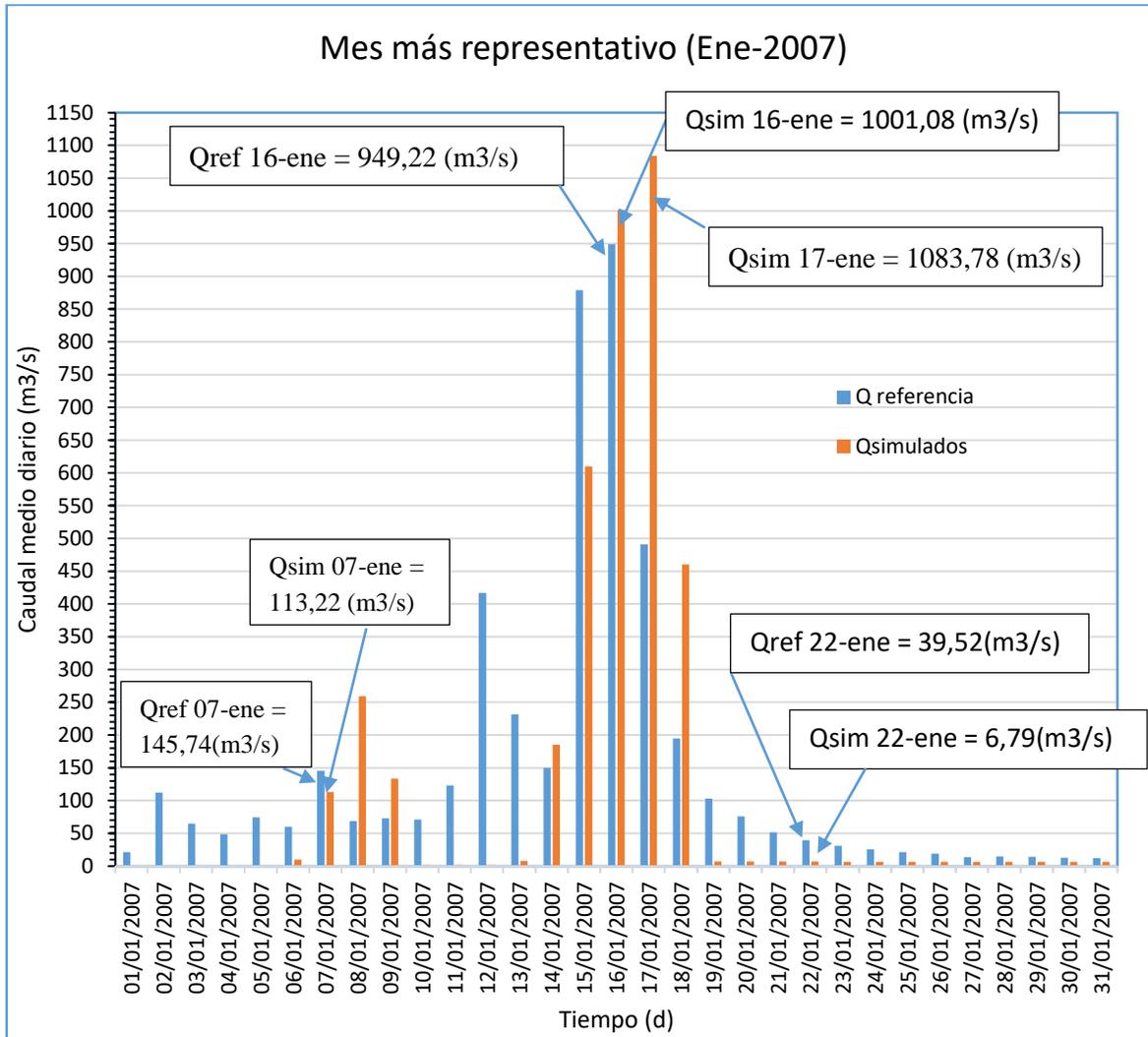
**Tabla 5.4** Caudales obtenidos con RS-Minerve por el modelo GR4J en el mes de enero/ 2007

Fecha	Qsm m3/s	Qref m3/s
2-ene.-07	1,25	112,09
3-ene.-07	1,28	64,62
4-ene.-07	1,31	48,39
5-ene.-07	1,36	74,46
6-ene.-07	10,03	60,20
7-ene.-07	113,22	145,74
8-ene.-07	259,19	68,45
9-ene.-07	133,59	72,98
10-ene.-07	1,85	71,21
11-ene.-07	1,86	122,95
12-ene.-07	1,91	416,97
13-ene.-07	7,77	231,41
14-ene.-07	185,25	149,77
15-ene.-07	610,05	879,10
16-ene.-07	1001,08	949,22
17-ene.-07	1083,78	490,79
18-ene.-07	460,60	194,75
19-ene.-07	6,89	103,07
20-ene.-07	6,86	75,66
21-ene.-07	6,82	51,40
22-ene.-07	6,79	39,52
23-ene.-07	6,75	31,04
24-ene.-07	6,71	25,67
25-ene.-07	6,67	21,18
26-ene.-07	6,63	18,92
27-ene.-07	6,59	13,65
28-ene.-07	6,55	14,58
29-ene.-07	6,51	14,08
30-ene.-07	6,47	12,71
31-ene.-07	6,43	12,06

Fuente: Elaboración propia con RS-Minerve

Para representar mejor los valores se redujo la escala de caudales simulados a solo un mes, (el mes más representativo) en el caso de la cuenca del río San Juan del Oro, fue el mes de enero del 2007, en donde se encontraron caudales máximos, los cuales siendo simulados diariamente se produjo una crecida el día 16-17 del mes de enero del año 2007.

**Figura 5.3** Caudales diarios simulados con RS-Minerve vs Caudales indirectos, para una escala de un mes.



Fuente: Elaboración propia-con el programa RS-Minerve

**5.3. Validación del modelo con la función objetivo con indicadores estadísticos obtenidos con RS-MINERVE, modelo GR4J y Q referencia en el periodo modelado (2004-2010)**

Con lo cual para este trabajo se utilizará la combinación de 4 índices de eficiencia (los cuales se explicaron anteriormente), para así garantizar un mejor ajuste y no asignarle una mayor o menor importancia a algunos comportamientos como los flujos altos, bajos, linealidad de series, etc, asignándoles el mismo peso a cada índice es decir un 25% para lograr una media ponderada de la siguiente manera:

$$FO = (Nash * 0,25) + (Nashln * 0,25) + (Pearson * 0,25) + (BS * 0,25)$$

Aplicando la ecuación de función objetivo se obtuvieron los valores de la Tabla 5.

**Tabla 5.5** Resultados de calibración - simulación y validación, de la cuenca del río San Juan del Oro (2004-2010).

Calibración (2004-2009)		Validación (2009-2010)	
Nash	-0,029	Nash	-0,399
Nash-ln	-0,357	Nash-ln	0,028
Coef, Pearson	0,59	Coef, Pearson	0,231
BS	0,999	BS	0,997
<b>FUNC. OBJ</b>	<b>0,301</b>	<b>FUNC. OBJ</b>	<b>0,214</b>

Fuente: Elaboración propia-con el programa RS-Minerve

No se lograron obtener unos resultados apropiados en la calibración y validación, ya que se obtuvo una función objetivo regular con [**FUNC. OBJ=0,301**], y [**FUNC. OBJ=0,214**] respectivamente. En ambas fases se tuvo la misma problemática en la que tanto para el índice de eficiencia de Nash como el de Nash-In (es decir los picos altos y bajos) reflejaron poco ajuste teniendo un bajo valor, la relación entre las medias de las medias de los resultados simulados y reales representadas por el índice de Bias Score es bueno a pesar del problema previamente especificado.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Del estudio realizado podemos extraer las siguientes conclusiones:

a) Del Programa y modelo

Las Funciones objetivos encontrados para validar el modelo GR4J con el software RS-Minerve se obtuvo que no es aceptable, es decir no se validó el modelo, como se verá a continuación:

Cuenca		Calibración	Valoración	Validación	Valoración
Río San Juan del Oro	F.O.	0,301	Regular	0,214	Regular

El modelo GR4J que es componente del programa RS-Minerve está diseñado para modelar caudales diarios, por lo que se obtuvo una función objetivo regular de **[FUNC. OBJ=0,301]**, para el periodo de calibración – simulación, con los indicadores estadísticos: **[Nash=-0,029]**, **[Nash-ln=-0,357]** ], **[Pearson=0,590]** y **[BS=0,999]**, los cual indica que el modelo no es aceptable, es decir no se validó según la hipótesis planteada.

Por otra parte , para el modelo GR4J, también se obtuvo una función objetivo regular de **[FUNC. OBJ=0,214]**, para el periodo de validación, con los indicadores estadísticos: **[Nash=-0,399]** ], **[Nash-ln= 0,028]**, **[Pearson=0,231]** y **[BS=0,997]**, lo cual indica que el modelo igual no es aceptable.

Por los tanto los caudales encontrados no pueden ser utilizados para el diseño de obras hidráulicas, debido a que el modelo no logro validarse con la función objetivo.

b) De la información y Modelo

Los parámetros finales calibrados automáticamente a base de indicadores estadísticos en el programa RS-Minerve para el modelo GR4J son:

Parámetros	Calibración (2004-2009)
X1 (m)	0,289
X2 (m)	-0,005
X3 (m)	0,036
X4 (d)	1,315

Debido a estos parámetros se puede decir que en la hidrografía y morfología de la cuenca del río San Juan del Oro se puede apreciar espejos de agua (lagunas) de las cuales no se tomó su área como parte de la modelación, debido a las mismas el parámetro [ $X_2=-0,005$  m] sale negativo para la calibración, lo cual indica que existe pérdida de flujo subterráneo, en este caso se almacena el agua en las partes altas de la cuenca, lo que indica que se hace uso del agua para riego lo cual es cierto debido a la gran cantidad de hectáreas cultivadas en la zona, agua potable, etc....

En el análisis de las características morfológicas encontradas por el programa Q-GIS juntamente con el Argis, permite considerar la cuenca del río San Juan del Oro como irregular y alargada, con una densidad de drenaje lenta, tal como se muestra en el parámetro  $X_4$  en la calibración salió un tiempo de [ $X_4=1,315$  días ]; que es lo que tarda la cuenca en convertir la lluvia en caudal.

El área que se tomó para la modelación hidrológica en la cuenca del río San Juan del Oro hasta la estación de El Puente, es muy extensa por lo que los coeficientes estadísticos indican que la modelación es compleja por ser un modelo a escala diaria.

A su vez se encontró una clara afección y alteración del régimen natural de caudales diarios, primero debido a la gran cantidad de zonas agrarias, segundo a la cantidad de embalses y lagunas existentes situados alrededor en las partes altas de la cuenca del río San Juan del Oro y tercero la cantidad de área tomada para el modelo debido a la información disponible, produciendo regulaciones de caudales muy considerables.

Se puede concluir, que el área seleccionada sirvió para calibrar los parámetros lo mejor posible considerando todas las complejidades (como ser el tamaño de la cuenca a modelar, la falta de información disponible de escalas diarias, precipitación, ETP, más puntos de control) en la cuenca, pero aun así no se pudo validar el modelo GR4J.

Si es posible generar caudales con RS-MINERVE con pocos datos, con pocos parámetros, obteniéndose resultados regulares para el modelo GR4J en comparación a otros modelos más complejos, aplicando el modelo de flujo diario GR4J, se concluye que sería buena alternativa para modelar las cuencas que tengan suficiente información diaria y que no sean de área

extensa. Además, se consiguió que el usuario comprenda mejor los procesos hidrológicos y así también poder entender mejor los resultados finales.

Sin embargo, el programa RS-Minerve fue de considerable apoyo gracias a la calibración automática que lleva incluido, permitiendo así obtener con facilidad los parámetros del modelo GR4J, como también poder realizar un óptimo ajuste de sus indicadores estadísticos, ayudando bastante en el proceso de modelación hidrológica de la cuenca y su validación por medio de la función objetivo.

En cuanto a los procesos de calibración automática debe considerarse que a mayor número de parámetros a calibrar la incertidumbre también puede ser mayor, debido a la tendencia que tienen los métodos de calibración automática a encontrar óptimos locales, mas no globales. Por lo que no se recomienda calibrar todos los parámetros de un modelo relativamente complejo de forma simultánea.

c) De los caudales:

El resultado final del Balance para la cuenca del río San Juan del Oro con uso del programa RS-Minerve modelando con el modelo de flujo diario GR4J para el periodo (2004-2010), valorado con la función objetivo correspondiente es el siguiente:

La cuenca del río San Juan del Oro recibe una precipitación anual de 563,66 mm, valor intermedio entre el periodo (2004-2010), como consecuencia de la orografía y situación entre el Altiplano. Las pérdidas por evapotranspiración son del orden del 72,9 %, lo que supone 443,37 mm al año. La aportación total de la cuenca supone un caudal continuo anual de 186,42 m<sup>3</sup>/s, equivalente a una altura de 0,813 mm anuales sobre toda la cuenca, suponiendo un volumen total de esta escorrentía igual a 16,1 hm<sup>3</sup> La aportación específica anual es de 0,78 l/s-km<sup>2</sup>, llegando a variar en época húmeda desde los 3,64 l/s-km<sup>2</sup> a 0,07 l/s-km<sup>2</sup> en época seca.

## RECOMENDACIONES

Puesto que una de las deficiencias más notables corresponde a la información de las estaciones pluviométricas, de aforo, etc.... y a la ubicación de las mismas, se recomienda:

- Revisión periódica de las estaciones con el objeto de verificar el correcto funcionamiento de las misma, el correcto uso y lectura de los instrumentos.
- Efectivizar una actualización técnica de los operadores.
- Ordenar, revisar y actualizar la información.
- Formar un banco de datos de fácil acceso para los aforos.
- Se recomienda la implementación de nuevos puntos de secciones de control, preferiblemente en zonas medias y bajas, nuevas estaciones en la parte alta de la cuenca o la actualización y reparación de las ya existentes,
- También se recomendaría hacer una representación de los procesos del flujo subterráneo en puntos aguas arriba o anteriores a los espejos de agua (lagunas) existentes en los alrededores de la cuenca los más representativos son: Lago de los Pozuelos, Pululos, Villama y Palar en territorio argentino y las lagunas Corana, Arena, Pujsara Tajsara, Lago Grande y Chica en territorio boliviano.

Para el programa y modelo se recomendaría:

- Debería hacerse un estudio de sensibilidad de las variables de RS-MINERVE modelando una cuenca diferente y así determinar sus ventajas y desventajas mediante análisis estadísticos. Se recomienda investigar el desempeño del RS-MINERVE en una cuenca con mayor área de drenaje y que tenga muchas agentes que intervengan y así determinar sus capacidades para modelar la hidrología en condiciones más complejas y usando el modulo GIS y sistemas hidráulicos que lleva incorporado junto a sus demás sub modelos.
- Se debería mejorar el conocimiento en el campo de modelación hidrológica, que está condicionada en gran medida por la disponibilidad en calidad y cantidad de los datos de lluvia, así como del grado de conocimiento de la cuenca y de la cantidad de datos de aforo.
- Las limitantes que posee el programa RS-MINERVE se basa en la información proporcionada por del usuario, por lo que se recomienda hacer correcto uso del mismo siguiendo los pasos que se explican en el manual el cual lleva incluido y consultando la

biografía respectiva para el modelo y usar adecuados parámetros según el modelo para representar la cuenca.

- Con el modelo de flujo diario GR4J se podría comparar con otros modelos realizados en el balance hídrico de Bolivia, usando las mismas escalas temporales de los periodos usados en este modelo y sacar así conclusiones sobre los resultados de los parámetros y los caudales medios en la cuenca del río San Juan del Oro.