



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

**FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Implementación y calibración de una estación hidrométrica  
en el río Zamora**

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de:

**INGENIERO CIVIL**

**Autor:** Salazar Orellana, Michael Orlando

**Director:** Oñate Valdivieso, Fernando Rodrigo

LOJA

2024



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NC-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2024

## **Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular**

Loja, 01 de abril de 2024

Magister.

Belizario Amador Zarate Torres

**Director de la carrera de la carrera de Ingeniería Civil**

Ciudad.-

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Integración Curricular denominado: Implementación y calibración de una estación hidrométrica en el río Zamora realizado por Michael Orlando Salazar Orellana ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la Universidad, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

Director: Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso PhD.

C.I.: 1103123384

Correo electrónico: fronate@utpl.edu.ec

### **Declaración de autoría y cesión de derechos**

Yo, Michael Orlando Salazar Orellana, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

Ser autor del Trabajo de Integración Curricular denominado: Implementación y calibración de una estación hidrométrica en el río Zamora, de la carrera de ingeniería civil, específicamente de los contenidos comprendidos en: Capítulo I. Materiales y métodos & Capítulo II. Resultados y discusión, siendo Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso, director (a) del presente trabajo; también declaro que la presente investigación no vulnera derechos de terceros ni utiliza fraudulentamente obras preexistentes. Además, ratifico que las ideas, criterios, opiniones, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad. Eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual de este trabajo.

Que la presente obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”, en tal virtud, cedo a favor de la Universidad Técnica Particular de Loja la titularidad de los derechos patrimoniales que me corresponden en calidad de autor/a, de forma incondicional, completa, exclusiva y por todo el tiempo de su vigencia.

La Universidad Técnica Particular de Loja queda facultada para ingresar el presente trabajo al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

.....

Autor: Michael Orlando Salazar Orellana

C.I.: 1900848217

Correo electrónico: mosalazar1@utpl.edu.ec

### **Dedicatoria**

Este trabajo no sería posible sin la ayuda incondicional de mis padres: María Teresa y Orlando Salazar, igualmente de mis hermanos: Enmita, Manuel, Sandra, Fernando, Diana y Bety. Que gracias a su apoyo incondicional y esfuerzo les dedico.

## **Agradecimiento**

En primer lugar, deseo expresar mi gratitud a la divinidad por otorgarme sabiduría y concederme la fortaleza, energía y valentía necesarias para proseguir con mis estudios. Mi reconocimiento se extiende a mis padres María Teresa y Orlando Salazar, cuya presencia a lo largo de mi trayectoria académica ha sido fundamental, proporcionándome amor y apoyo. Asimismo, no puedo pasar por alto el respaldo invaluable de mis hermanos: Enmita, Manuel, Sandra, Fernando, Diana y Bety, cuya orientación, asesoramiento y afecto han sido determinantes en la conclusión satisfactoria de mis estudios. Agradezco profundamente su contribución a este logro.

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento al Dr. Fernando Oñate, un destacado educador, cuya guía y asesoramiento fueron cruciales para la culminación de este trabajo. De manera especial, reconozco y agradezco a todas aquellas personas que compartieron este camino conmigo, brindándome un respaldo invaluable tanto en el ámbito académico como en el sentimental. Su presencia ha sido de gran importancia para mi desarrollo y éxito académico.

## Índice de contenido

Carátula .....	<i>I</i>
Aprobación del director del Trabajo de Integración Curricular .....	<i>II</i>
Declaración de autoría y cesión de derechos .....	<i>III</i>
Dedicatoria .....	<i>V</i>
Agradecimiento .....	<i>VI</i>
Índice de contenido .....	<i>VII</i>
Resumen.....	<i>1</i>
Abstract .....	<i>2</i>
Introducción .....	<i>3</i>
Capítulo uno.....	<i>5</i>
Materiales y métodos.....	<i>5</i>
1.1 Generalidades .....	<i>5</i>
1.1.1 <i>Ubicación</i> .....	<i>5</i>
1.1.2 <i>Hidrografía</i> .....	<i>5</i>
1.1.3 <i>Topografía</i> .....	<i>5</i>
1.1.4 <i>Punto de Análisis</i> .....	<i>6</i>
1.1.4.1 <i>Sección en punto de análisis</i> .....	<i>7</i>
1.1.5 <i>Cronograma</i> .....	<i>7</i>
1.1.5.1 <i>Tiempo</i> .....	<i>7</i>
1.2 Materiales.....	<i>7</i>
1.2.1 <i>Materiales de campo</i> .....	<i>8</i>
1.2.2 <i>Materiales de oficina</i> .....	<i>8</i>
1.3 Metodología.....	<i>8</i>
1.3.1 <i>Trabajo en campo</i> .....	<i>9</i>
1.3.1.1 <i>Medición de sección transversal</i> .....	<i>10</i>
1.3.2 <i>Aforo</i> .....	<i>10</i>
1.3.2.1 <i>Aforo con molinete</i> .....	<i>11</i>

<b>1.3.3 Medición hidrométrica .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3.4 Curva de descarga .....</b>	<b>12</b>
1.3.4.1 Determinación de la curva de descarga .....	13
1.3.4.2 Validación de la curva de descarga.....	14
1.3.4.2.1 Coeficiente de correlación .....	14
1.3.4.2.2 Coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe.....	15
1.3.4.2.3 Error cuadrático medio .....	15
1.3.4.3 Extrapolación.....	16
1.3.4.3.1 Método de Manning .....	16
1.3.4.3.2 Método de Stevens .....	19
1.3.4.4 Redes neuronales artificiales.....	20
<b>Capítulo dos .....</b>	<b>22</b>
<b>Resultados y discusión .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Aforos .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2 Cálculo de la curva de descarga general .....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 Redes neuronales .....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 Validación de la curva de descarga.....</b>	<b>28</b>
<b>2.5 Extrapolación .....</b>	<b>32</b>
2.5.1 Curva de descarga método de Manning.....	32
2.5.2 Curva de descarga método de Stevens.....	33
<b>Conclusiones .....</b>	<b>35</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>37</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>38</b>
<b>Apéndice.....</b>	<b>43</b>
<b>Apéndice A. Tablas y resultados .....</b>	<b>43</b>
<b>Apéndice B. Materiales y trabajo en campo.....</b>	<b>48</b>
<b>Apéndice C. Topografía y sección de interés .....</b>	<b>55</b>

### Índice de tablas

<b>Tabla 1</b>	<b>Coeficientes de Rugosidad n (manning)</b> .....	<b>17</b>
<b>Tabla 2</b>	<b>Coeficiente de rugosidad G</b> .....	<b>20</b>
<b>Tabla 3</b>	<b>Altura y Caudales promedio calculados</b> .....	<b>23</b>
<b>Tabla 4</b>	<b>80 % de datos para curva de descarga</b> .....	<b>24</b>
<b>Tabla 5</b>	<b>Resultados de caudales con redes neuronales</b> .....	<b>28</b>
<b>Tabla 6</b>	<b>Caudales calculados para validación</b> .....	<b>29</b>
<b>Tabla 7</b>	<b>Coeficientes de validación calculados</b> .....	<b>31</b>
<b>Tabla 8</b>	<b>Resultados de caudales con los métodos de Manning y Stevens</b> .....	<b>32</b>

### Índice de figuras

<b>Figura1</b>	<b>Esquema para la elaboración de la metodología</b> .....	<b>9</b>
<b>Figura2</b>	<b>Curva de descarga general</b> .....	<b>25</b>
<b>Figura3</b>	<b>Resultado de regresión lineal Matlab</b> .....	<b>27</b>
<b>Figura4</b>	<b>Curva de descarga para fórmula (16)</b> .....	<b>29</b>
<b>Figura5</b>	<b>Curva de descarga con redes neuronales</b> .....	<b>30</b>
<b>Figura6</b>	<b>Curva de descarga con método de Manning</b> .....	<b>33</b>
<b>Figura7</b>	<b>Curva de descarga con método de Stevens</b> .....	<b>34</b>

## Resumen

En la estimación y predicción de caudales, se dispone de herramientas y técnicas, desde estaciones hidrométricas automáticas o manuales hasta métodos de aforo, técnicas estadísticas y modelos predictivos, como el aprendizaje automático mediante redes neuronales. Nos centramos en la recopilación de datos relacionados con los caudales del río Zamora a través de aforos. Además, se realizó un análisis estadístico de los caudales obtenidos, utilizando técnicas de regresión y enfoques de inteligencia artificial, para prever los caudales a partir de alturas observadas y extrapoladas. Incluye una evaluación de la eficacia de los modelos de predicción, para identificar cuál muestra una mejor concordancia entre los caudales observados y los predichos. Los resultados revelan que el modelo de regresión lineal, aplicando mínimos cuadrados, exhibe una correlación notablemente superior en comparación con las redes neuronales. A pesar de esto, ambos modelos demuestran una capacidad significativa para prever los caudales, la regresión lineal destaca como la opción preferente en términos de correlación. El análisis contribuye en la estimación de caudales fluviales y la relevancia de la selección adecuada de modelos en función de la precisión requerida.

*Palabras clave:* Redes neuronales, curva de descarga, Río Zamora.

### **Abstract**

In the estimation and prediction of streamflow, a range of tools and techniques is available, encompassing both automatic and manual hydrometric stations, flow measurement methods, statistical techniques, and predictive models such as machine learning through neural networks. The focus of this study lies in the compilation of data related to the Zamora River's streamflow through flow measurements. Additionally, a statistical analysis of the obtained streamflow data was conducted using regression techniques and artificial intelligence approaches to predict streamflow based on observed and extrapolated water levels. The research includes an assessment of the effectiveness of prediction models to identify which exhibits better agreement between observed and predicted streamflow. The results indicate that the linear regression model, applying least squares, demonstrates a significantly higher correlation compared to neural networks. Despite this distinction, both models showcase a substantial capacity for streamflow prediction, with linear regression standing out as the preferred option in terms of correlation. This analysis contributes to the field of river streamflow estimation and underscores the importance of appropriate model selection based on required precision.

*Keywords:* Neural networks, rating curve, Zamora River.

## Introducción

La insuficiencia de datos precisos acerca de los ríos constituye una restricción significativa en el desarrollo de los recursos hidrológicos en naciones en vías de desarrollo (Negatu et al., 2022). Como resultado, numerosas investigaciones relacionadas con recursos hídricos se basan en registros diarios de caudales, que generalmente se consideran libres de errores, no obstante, los datos de caudal actual se derivan de mediciones diarias del nivel del agua y curvas de descarga (Osorio et al., 2018). Para estimar la descarga en los ríos de forma indirecta, basándose en mediciones del nivel del agua, se emplea una curva de descarga (Morlot et al., 2014). Estas curvas de descarga contienen valores de caudal que incluyen incertidumbres asociadas con las mediciones del caudal en la fase de aforos utilizada (Le Coz et al., 2014).

La imperante necesidad de obtener datos vinculados con la hidrometría superficial se centra en la medición, registro, cálculo y análisis de los volúmenes de agua que fluyen en una sección transversal de un curso fluvial, según el Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático (ICC, 2017). Se enfoca en las captaciones de los recursos fluviales y en los suministros de agua, como indican Pauta et al. (2019). Para ampliar el alcance y mejorar la precisión de las mediciones de los niveles de agua, resulta imprescindible llevar a cabo una campaña de medición de caudales, ya que este proceso representa un paso esencial en la creación de una curva de descarga confiable, se estima la sensibilidad de estas curvas en relación con el tamaño de la muestra utilizada, según lo expuesto por Haile et al. (2023).

El principal desafío en la operación de estaciones hidrométricas radica en asegurar la precisión y confiabilidad de los parámetros clave para la gestión de los recursos hídricos (Glovatskii et al., 2023). La estimación de los caudales en ríos inestables se enfrenta a dificultades debido a las alteraciones en la relación entre el caudal y el nivel del agua después de eventos de crecida (Mansanarez et al., 2019). Por lo tanto, ya sea que la red de estaciones hidrométricas sea operada manualmente o que los registros sean tomados por un observador experto en el uso de estos instrumentos (Ramírez et al., 2019). Esto lleva a una falta de eficiencia de información hidrométrica, lo que resulta en la ausencia de datos (Zárate, 2020).

Es esencial evaluar la relevancia de cada estación de monitoreo de manera individual, ya que esto es crucial para lograr un diseño hidrométrico óptimo (Deepthi y Sivakumar, 2022). Se busca representar de manera precisa los flujos de agua promedio diarios en diferentes períodos con el objetivo de encontrar una alternativa para predecir tanto los caudales máximos de crecida como los mínimos, con el propósito de comprender el comportamiento del cauce (Carlos et al., 2023). Para lograrlo, es necesario llevar a cabo el proceso de calibración, que implica la comparación de los caudales medidos o registrados (Velásquez Moisés Agustín et al., 2022). El análisis de los datos permite formular hipótesis o predicciones sobre eventos (Antonio, 2019). Estos datos se procesarán utilizando diversas distribuciones de probabilidad para determinar los caudales, que servirán como referencia (Martínez y Joel, 2014). Es fundamental contar con una sólida base física, especialmente al extrapolar hacia caudales (Zhang et al., 2015).

En el presente proyecto, se llevarán a cabo mediciones de caudal en puntos estratégicos a lo largo del río Zamora, utilizando una estación hidrométrica para adquirir información sobre elevaciones, mientras que se emplea un molinete de aspas para medir el número de rotaciones y el tiempo, con el fin de calcular el caudal del flujo. Estos datos serán utilizados para desarrollar una curva de descarga pertinente y determinar los niveles de agua. De esta manera, podemos inferir que el flujo de agua en los ríos proporciona información relevante sobre el funcionamiento hidrológico de las cuencas (Giler-Ormaza et al., 2019).

## Capítulo uno

### Materiales y métodos

#### 1.1 Generalidades

##### 1.1.1 Ubicación

Para la investigación se trabaja directamente en el río Zamora, donde, el curso del río Zamora se configura por la confluencia de los ríos Zamora Huayco y Malacatos, y su trayecto continuo en la unión con el río Jipiro (Ortiz Piedra, 2019). El sitio de estudio está situado en la ciudad de Loja, la cual se encuentra al sur de la República del Ecuador, a una elevación de 2100 metros sobre el nivel del mar y su temperatura promedio anual registrada en esta localidad es de 16°C (Calva, 2013).

##### 1.1.2 Hidrografía

El río objeto de estudio se halla en la subcuenca correspondiente a la cuenca del río Zamora, la cual tiene su origen en el nudo de Cajanuma, donde los afluentes principales son el río Malacatos y el río Zamora Huayco, es en el norte de la ciudad de Loja donde estos ríos convergen, dando lugar a la formación del río Zamora (Aguilar Mora y Quille Caiza, 2021). El río Zamora constituye un tributario directo del río Santiago, y a su vez, este último desemboca en el río Marañón, luego se incorporan al cauce del río Amazonas, completando así su trayecto en esta importante red hidrográfica (Tello, 2016).

El río Zamora experimenta períodos de estiaje entre los meses de mayo a noviembre, con posibilidad de presentar caudales significativos de crecida durante la temporada lluviosa. La cuenca exhibe una elevación media de 2400 metros sobre el nivel del mar y un pendiente promedio del 30%, mientras que la pendiente media del cauce principal es del 8.3%. Respecto a la cobertura vegetal de la cuenca, se encuentra en buen estado, destacando la presencia de pastizales, matorrales y bosques (Oñate y Oñate, 2019).

##### 1.1.3 Topografía

La topografía es una de las disciplinas más antiguas utilizadas por la humanidad, lo que ha permitido el desarrollo de diversas prácticas y métodos que siguen siendo

fundamentales en la actualidad. Esta ciencia se emplea para configurar superficies, establecer ubicaciones, direcciones, caminos, linderos y longitudes con gran exactitud, brindando información clave. El uso de la topografía se ha vuelto esencial en el diseño y planificación, así como en la delimitación y en la toma de decisiones estratégicas. Su relevancia perdura a lo largo del tiempo, siendo una herramienta esencial en el ámbito de la ingeniería y las ciencias geoespaciales (Rojas, 2020).

Con el propósito de obtener la topografía detallada en el área de estudio, se llevará a cabo un levantamiento topográfico. Este proceso incluirá la realización de mediciones en un tramo de cien metros tanto en dirección aguas arriba como aguas abajo del punto de análisis. La información recopilada durante este levantamiento permitirá determinar con precisión las características geográficas del lugar en cuestión.

#### **1.1.4 Punto de Análisis**

El sitio de estudio seleccionado para nuestro análisis corresponde al puente ubicado en la calle Juan de Salinas, entre las Avenidas Orillas del Zamora y Emiliano Ortega, justo frente al colegio Técnico Daniel Álvarez Burneo. Para este estudio, hemos establecido las coordenadas UTM WGS 84Z\_17S en  $X= 699680.16$  m e  $Y=9558613.58$ m, este lugar ofrece condiciones de seguridad para los equipos utilizados en la investigación, ya que cuenta con una cámara del ecu 911 y es un lugar con considerable flujo de personas.

**1.1.4.1 Sección en punto de análisis.** Para la selección de nuestra sección de aforo, consideramos la necesidad de que el tramo sea homogéneo, estable y de fácil accesibilidad. Asimismo, se tuvo en cuenta que los bordes del tramo posean una altitud adecuada para evitar posibles deslizamientos que puedan afectar las mediciones de caudal, especialmente durante eventos de máxima crecida. Además, durante el proceso de selección, se llevó a cabo una inspección exhaustiva para asegurar que no existan obstrucciones que puedan alterar el proceso de aforo. Este enfoque garantiza la obtención de datos hidrológicos precisos y confiables para el análisis y estudio.

### **1.1.5 Cronograma**

El propósito de llevar a cabo estos aforos radica en la obtención de datos hidrológicos fundamentales que faciliten la comprensión del comportamiento del cauce y su caudal en el transcurso del tiempo. Con base en la duración prevista para el estudio y la importancia de obtener mediciones periódicas, se ha diseñado un cronograma de actividades para su ejecución. Este enfoque nos permitirá obtener información valiosa que respalde el análisis y estudio detallado.

**1.1.5.1 Tiempo.** Se ha determinado que la realización de los aforos se llevará a cabo de manera semanal a lo largo del período académico. Esta decisión se ha tomado con el objetivo de mejorar significativamente la precisión de los datos recopilados y así obtener la información necesaria para la correcta ejecución del estudio hidrológico. El enfoque semanal asegurará que se capturen diversas condiciones hidrológicas, lo que contribuirá a una mejor comprensión del comportamiento del cauce y su caudal en diferentes momentos del tiempo.

## **1.2 Materiales**

En el contexto de mi investigación acerca de la "Implementación y calibración de una estación hidrométrica en el río Zamora," se emplearon una serie de materiales esenciales con el propósito de ejecutar el proyecto de manera óptima y eficiente. Estos materiales jugaron un papel fundamental en la realización exitosa de la implementación y calibración de la estación hidrométrica en dicho río y se dividen en:

### **1.2.1 *Materiales de campo***

- Molinete de Aspas
- Estación total
- Cinta métrica
- Cámara
- Estación Hidrométrica
- Libreta de campo
- Gps

### **1.2.2 *Materiales de oficina***

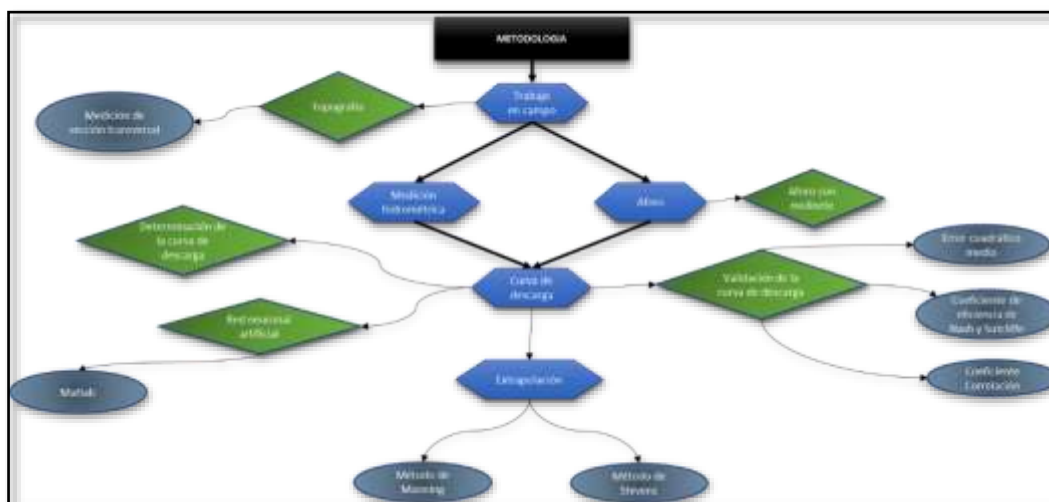
- Computadora
- Software (Excel, Matlab, AutoCAD, Word)

## **1.3 Metodología**

El presente capítulo expone la metodología empleada para realizar el estudio hidrológico del río Zamora. Se proporciona una descripción detallada de los procedimientos y herramientas utilizadas durante la investigación, con el propósito primordial de obtener datos precisos y confiables que respalden el análisis y la toma de decisiones pertinentes en el ámbito hidrológico. El enfoque metodológico se ha diseñado garantizando la obtención de información de calidad para el adecuado desarrollo y conclusión del estudio, como se muestra la metodología en la figura 1.

Figura 1

Esquema para la elaboración de la metodología



### 1.3.1 Trabajo en campo

En el desarrollo del trabajo de campo, se requirió el apoyo de una estación topográfica con el fin de obtener información detallada sobre las características del río. Este proceso se llevó a cabo mediante la realización de secciones transversales cada 20 metros a lo largo del cauce, con el propósito de obtener datos precisos y representativos tanto aguas arriba como aguas abajo. La utilización de la estación topográfica permite obtener una visión integral del terreno y del cauce del río, lo que contribuyó significativamente a la calidad y exactitud de las características obtenidas durante el trabajo en campo. La selección estratégica de puntos de medición a intervalos regulares proporcionó una perspectiva más completa del comportamiento hidrológico en el área de estudio.

Luego de completar el levantamiento topográfico, se procede a realizar un análisis detallado de la sección específica donde se llevarán a cabo los aforos, ya que este punto es de particular interés para la investigación hidrológica. Es en esta ubicación donde se efectuará la toma de mediciones de caudal a lo largo del estudio. El análisis minucioso de la sección seleccionada es esencial para asegurar la representatividad y validez de los datos obtenidos,

lo que contribuirá a una comprensión precisa del comportamiento del río y su caudal en el área de estudio.

**1.3.1.1 Medición de sección transversal.** Con el fin de realizar la medición transversal en el punto de interés y posteriormente llevar a cabo el aforo con molinete, se inicia delimitando cuidadosamente la zona. para este propósito, se utiliza una línea perpendicular a las orillas del río, lo que permite determinar de manera precisa el ancho del cauce en ese punto específico. esta delimitación es un paso esencial para asegurar la correcta ubicación y dimensionamiento de la sección de estudio, lo que garantiza mediciones representativas y confiables durante el proceso de aforo (solano, 2021).

### **1.3.2 Aforo**

El aforo es la determinación del volumen de agua que fluye por un acueducto o torrentera (Romero, 2021). Estos aforos se llevan a cabo mediante diversas metodologías, como el uso de correntómetros, flotadores, vertederos y medidores ultrasónicos, entre otros. La aplicación de estas técnicas no solo permite la obtención precisa de datos hidrológicos, sino que también posibilita la toma de decisiones informadas en la planificación y diseño de proyectos relacionados con recursos hídricos, gestión de inundaciones, operación de presas y control de caudales, contribuyendo así a la sostenibilidad y eficiencia en el uso de los recursos hídricos. Proporciona una evaluación integral del comportamiento hidráulico en el área de estudio, siendo esencial para obtener información precisa y relevante para la toma de decisiones en proyectos relacionados con los recursos hídricos (Pavoline, 2014).

**1.3.2.1 Aforo con molinete.** Como método comúnmente empleado, se realiza la subdivisión de la sección transversal en segmentos más pequeños, permitiendo la medición de un valor representativo de la velocidad media. Para este propósito, se utiliza el dispositivo conocido como molinete, el cual caracteriza cada sección con su respectivo caudal representativo. De esta manera, el caudal total del cauce se determina sumando los caudales de todas las secciones definidas. Esta técnica se considera fundamental en la evaluación hidrológica, ya que facilita la obtención de datos precisos para el análisis y estudio, proporcionando una visión integral del comportamiento del flujo de agua en la sección transversal del río analizado (González, 2018).

En el caso de cauces de menor tamaño, el molinete puede ser manejado directamente por el operador, quien se ubicaría en el interior de la corriente para realizar las mediciones (Galecio, 2007). En la ejecución de nuestro aforo, implementamos el dispositivo denominado Prince. En la fase inicial de este proceso, procedimos a medir la amplitud de la sección de estudio, que en este escenario específico abarca 9.5 metros. Para llevar a cabo esta medición, empleamos una cuerda que fue colocada en ambos extremos del río. Posteriormente, dividimos la cuerda en segmentos de un metro y, finalmente, a metro y medio, generando un total de ocho subdivisiones internas. Este procedimiento meticuloso estableció las bases para la realización del aforo, permitiendo una evaluación precisa de las variables hidrológicas en consideración.

Para calcular la velocidad del agua, se utilizan las ecuaciones (1) y (2) suministradas por el fabricante del equipo (Suéscun, 2007):

Para el caso que los intervalos sean menores a 40:

$$V = \left( \left( \frac{Rev}{t} \right) \times 2.180 + 0.02 \right) \times 0.3048 \quad ( 1 )$$

En el caso que sean mayores a 40:

$$V = \left( \left( \frac{Rev}{t} \right) \times 2.170 + 0.03 \right) \times 0.3048 \quad ( 2 )$$

Donde:

t= tiempo

V= Velocidad

Rev= Revoluciones

### **1.3.3 Medición hidrométrica**

Las estaciones hidrométricas se presentan como dispositivos graduados que se colocan de forma escalonada a lo largo de cursos de agua, como ríos, arroyos, lagunas o embalses. Su objetivo principal radica en la medición cuantitativa de la disponibilidad de agua en dichos cuerpos acuáticos, la cual tiene su origen en fenómenos como las precipitaciones y los procesos de escurrimiento (Lopez y Alvarado, 2020). Se trata de miras graduadas con incrementos centimétricos, dispuesta a las orillas del flujo de agua con el propósito de medir el nivel de este en un momento específico (Méndez, 2019).

La estación hidrométrica se posiciona estratégicamente en el punto de interés del río, siendo colocada adyacente a nuestra sección, específicamente en la orilla más profunda, con el propósito de llevar a cabo la medición precisa de la altura del agua.

### **1.3.4 Curva de descarga**

La curva de descarga representa la correlación entre los calados de agua medidos durante los aforos y los caudales correspondientes en el río. Esta relación proporciona información valiosa sobre cómo varía el caudal en función del nivel del agua en el cauce, permitiendo establecer una referencia fundamental para la estimación precisa de los caudales en diferentes condiciones hidrológicas (Silva, 2014).

Con el propósito de mejorar la precisión en el ajuste de la curva de descarga, es fundamental contar con un amplio número de aforos y registrar detalladamente cualquier irregularidad que surja durante el proceso. De esta manera, se construirá una base de datos más robusta y representativa, lo que permitirá obtener una curva de descarga más fiel a las condiciones hidrológicas reales del río (Rosario, 2016).

**1.3.4.1 Determinación de la curva de descarga.** La curva de descarga exhibe una analogía significativa con una función parabólica de mayor complejidad, la cual puede ser descrita mediante la ecuación (3) (Oñate, 2003).

$$Q = a * (h - h_0)^n \quad ( 3 )$$

Donde la relación funcional entre dos variables, representadas como 'h' y 'Q', donde 'h<sub>0</sub>' denota el valor de 'h' cuando 'Q' es igual a cero, y 'a' representa el valor de 'Q' cuando la diferencia entre 'h' y 'h<sub>0</sub>' es igual a uno.

Ahora, a la ecuación anterior, la transformamos a logarítmica, quedaría la ecuación (4) como se muestra de la siguiente manera:

$$\text{Log } Q = \text{Log } a + n * \text{Log } (h - h_0) \quad ( 4 )$$

Esta ecuación es una recta, donde el parámetro 'n' desempeña el papel de la tangente de la recta.

Para mejorar la curva de descarga, es factible utilizar el enfoque de mínimos cuadrados dentro de la ecuación (4), que presenta una estructura similar a la de una recta y se expresa en la ecuación (5):

$$Y = a + \beta * X \quad ( 5 )$$

Donde:

Y= Log Q

a= Log a

$\beta$ =n

X= Log(h-h<sub>0</sub>)

Las ecuaciones (6) y (7) para a y  $\beta$  son las siguientes:

$$a = \frac{[(\sum Y) * (\sum X)^2] - [(\sum X) * (\sum X * Y)]}{[N * (\sum X^2)] - [\sum X]^2} \quad ( 6 )$$

$$\beta = \frac{[N * (\sum X * Y)] - [(\sum X) * (\sum Y)]}{[N * (\sum X^2)] - [\sum X]^2} \quad (7)$$

Entonces, N es el número de datos que existen.

Se utiliza la ecuación (8), donde, el valor de r que sea superior será aquel que definirá nuestra curva de descarga.

$$r = \frac{[N * (\sum X * y)] - [(\sum X) * (\sum Y)]}{\{[N * (\sum X^2) - (\sum X)^2] * [N * (\sum Y^2) - (\sum Y)^2]\}^{0.5}} \quad (8)$$

Utilizando las fórmulas previamente expuestas, podemos construir la curva de descarga a partir de los datos obtenidos mediante el aforo del río.

**1.3.4.2 Validación de la curva de descarga.** Para verificar la autenticidad y confiabilidad de nuestra curva de descarga, se emplearán tres enfoques metodológicos que facilitarán la comparación de estas, los cuales son:

**1.3.4.2.1 Coeficiente de correlación.** Se trata de un indicador relativo que cuantifica el nivel de adecuación a una línea recta entre los datos observados y simulados. Un valor de  $R^2$  igual a 1 denota una correspondencia lineal perfecta entre los datos. Este coeficiente, adimensional en naturaleza, se obtiene mediante la ecuación (9) (Silva, 2014):

$$R^2 = \left[ \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1} (Qo(i) - \mu_o)(Qc(i) - \mu_c)}{\sigma_o * \sigma_c} \right] \quad (9)$$

**1.3.4.2.2 Coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe.** Este índice permite evaluar el grado de concordancia 1:1 entre los datos analizados, siguiendo el enfoque propuesto por Nash y Sutcliffe en 1970. Los valores resultantes pueden variar entre 0 y 1, donde un valor de 1 indica una correspondencia perfecta entre los datos observados y simulados. Si el índice  $ef=0$ , esto señala que la precisión de la predicción es igual a la de la medida del modelo. Por otro lado, si  $ef<0$ , indica que la medida constituye una predicción más acertada que la proporcionada por el modelo. En términos generales, un valor comprendido entre 0.1 y 0.7 puede considerarse estadísticamente adecuado para validar el ajuste del modelo (Silva, 2014). como se muestra en la ecuación (10):

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qo(i) - Qc(i))^2}{\sum_{i=1}^N (Qo(i) - \overline{Qo})^2} \quad (10)$$

**1.3.4.2.3 Error cuadrático medio.** Este método permite contrastar la concordancia entre los datos observados en el campo y aquellos calculados por el modelo. La unidad de medida es idéntica a la de los datos observados. Valores de RMSE que alcanzan el valor cero se consideran óptimos, ya que esto indicaría la ausencia de errores y una relación perfecta entre los datos. No obstante, es normal que se presenten valores positivos, los cuales reflejan la magnitud del error entre los datos calculados y los observados (Silva, 2014), como se representa en la ecuación (11):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Qo(i) - Qc(i))^2}{N}} \quad (11)$$

**1.3.4.3 Extrapolación.** En el proceso de extrapolación, se emplearán dos enfoques destacados: el método de Manning y el método de Stevens. Estas metodologías han demostrado ser altamente confiables y ampliamente adoptadas en la búsqueda de una comparación.

**1.3.4.3.1 Método de Manning.** Fundamentado en la fórmula de Manning, originalmente desarrollada para canales abiertos, este método permite analizar las condiciones hidráulicas y geométricas de los cursos de agua, incluyendo en particular las estaciones hidrométricas, mediante la realización de aforos (Vera, 2002). Por consiguiente, el caudal se determina mediante la expresión (12):

$$Q = AR^{2/3} \frac{\sqrt{S}}{n} \quad (12)$$

Donde:

A= Área de sección

S= Pendiente

R= Radio hidráulico,  $R= A/P$

P= Perímetro mojado

n= Coeficiente de rugosidad

Q= Caudal

En la Tabla 1 se detallan las localizaciones donde se adquirió el valor de "n", que corresponde al coeficiente de rugosidad. Este parámetro varía en función de las condiciones físicas específicas de nuestro río (Villón, 2002).

**Tabla 1***Coefficientes de Rugosidad n (manning)*

<u>Superficie</u>	<b>Condiciones de las paredes</b>			
	<b>Perfectas</b>	<b>Buenas</b>	<b>Medianas</b>	<b>Malas</b>
Tubería hierro forjado negro comercial	0.012	0.013	0.014	0.015
Tubería hierro forjado galvanizado comercial	0.013	0.014	0.015	0.016
Tubería de latón o vidrio	0.009	0.01	0.011	0.013
Tubería acero remachado en espiral	0.013	0.015	0.017	
Tubería de barro vitrificado	0.01	0.013	0.015	0.017
Tubos comunes de barro para drenaje	0.011	0.012	0.014	0.017
Tabique con mortero de cemento; albañales de tabique	0.012	0.013	0.015	0.017
Superficie de cemento pulido	0.1	0.11	0.12	0.13
Superficies aplanadas con mortero de cemento	0.011	0.012	0.013	0.015
Tuberías de concreto	0.012	0.013	0.015	0.016
Tuberías de duela	0.01	0.011	0.012	0.013
Acueductos de tablón:				
Labrado	0.01	0.012	0.014	0.016
Sin labrar	0.011	0.013	0.014	0.015
Con astillas	0.012	0.015	0.016	
Canales revestidos con concreto	0.012	0.014	0.016	0.018
Superficie de mampostería con cemento	0.017	0.02	0.025	0.03
Superficie de mampostería en seco	0.025	0.03	0.033	0.035
Acueductos semicirculares metálicos, lisos	0.011	0.012	0.013	0.015

Acueductos semicirculares metálicos corrugados	0.0225	0.025	0.0275	0.03
Canales y zanjas:				
En tierra, alineados y uniformes	0.017	0.02	0.0225	0.025
En roca, lisos y uniformes	0.025	0.03	0.033	0.035
En roca, con salientes y sinuosos	0.035	0.04	0.045	
Sinuosos y de escurrimiento lento	0.0225	0.025	0.0275	0.03
Degradados en tierra Con lecho pedregoso y bordos de tierra enhierbados	0.025	0.0275	0.03	0.033
Plantilla de tierra, taludes ásperos	0.028	0.03	0.033	0.035
Corrientes naturales:				
(1) Limpios, bordos rectos, llenos, sin hendeduras ni charcos profundos	0.025	0.0275	0.03	0.033
(2) Igual al (1) pero con algo de hierba y piedra	0.03	0.033	0.035	0.04
(3) Sinuoso, algunos charcos y escollos, limpio	0.033	0.035	0.04	0.045
(4) Igual a (3), algo de hierbas y piedras	0.04	0.045	0.05	0.055
(5) Igual al (3), algo de hierbas y piedras	0.035	0.04	0.045	0.05
(6) Igual al (4), secciones pedregosas	0.045	0.05	0.055	0.06
(7) Ríos con tramos lentos, cauce enhierbado o con charcos profundos	0.05	0.06	0.07	0.08

(8) Playas muy enyerbadas	0.075	0.1	0.125	0.15
---------------------------	-------	-----	-------	------

---

*Nota.* Adaptado de Hidrología (pp. 246-247), por M, Villón, 2002, Editorial Tecnológica de Costa Rica.

**1.3.4.3.2 Método de Stevens.** Este enfoque se fundamenta en la fórmula de chezy y encuentra aplicación en ríos con una amplitud considerable y poca profundidad (Vera, 2002). Se presenta en la ecuación (13):

$$Q = AC\sqrt{SR} \quad (13)$$

Donde:

Q= Caudal

S= Pendiente de la línea de energía

A= Área de la sección

C= Coeficiente de Chezy

R= Radio hidráulico, con una extensión significativa y escasa profundidad, se procede a sustituir dicha variable por la profundidad media (D), donde D se define como el cociente entre el área de la sección transversal (A) y la anchura (a).

Para calcular el coeficiente C, se utiliza la expresión matemática, conocida como la fórmula de Bazin, posibilita la estimación de la velocidad media y la determinación del caudal correspondiente (Rocha, 2007), se aplicó la fórmula 14, que se expresa en la ecuación (14):

$$C = \frac{87}{1 + \frac{G}{\sqrt{R}}} \quad (14)$$

Donde:

G=Coeficiente de rugosidad de la pared

R= Radio Hidráulico

Con el propósito de determinar el coeficiente  $G$ , se hizo uso de la información proporcionada en la Tabla 2, la cual presenta los valores del coeficiente de rugosidad, como se ilustra a continuación:

**Tabla 2**

*Coeficiente de rugosidad  $G$*

CATEGORIA	DESCRIPCION	$G$
1	Contorno muy liso, perfectamente ejecutado. Plancha metálica. Cemento liso, madera cepillada.	0,06
2	Contornos lisos. Concreto bien acabado.	0,16
3	Concreto sin pulir. Albañilería de piedra bien terminada.	0,46
4	Canales en tierra, sin vegetación.	0,85
5	Canales en hierbas. Ríos de cause irregular, sin vegetación.	1,3
6	Canales en tierra con vegetación. Fondo de cantos rodados. Canales en tierra muy erosionados e irregulares.	1,75

*Nota.* Adaptada de Hidráulica de tuberías y canales (p. 264), por A, Rocha Felices, 2007.

**1.3.4.4 Redes neuronales artificiales.** Las redes neuronales artificiales son representaciones matemáticas que se inspiran en los procesos neurobiológicos, buscando emular el análisis de la información de manera similar a las acciones llevadas a cabo por las neuronas en el cerebro. La configuración típica de una red neuronal artificial consta de un conjunto de neuronas dispuestas en capas (entrada, ocultas y de salida), organizadas jerárquicamente para formar un sistema funcional autónomo (Enrique Béjar Chacón et al., 2016).

La simulación de redes neuronales artificiales se llevó a cabo utilizando la herramienta nntool (neural network tool) del software Matlab. La configuración de la red neuronal consta de conjuntos de datos de entrada y datos de salida. En cuanto a los parámetros empleados para calibrar el modelo, se optó por el tipo de entrenamiento backpropagation. Dada la

arquitectura multicapa implementada, que incluye neuronas ocultas, se utilizó la función de aprendizaje Levenberg-Marquardt, reconocida por su eficacia en el ajuste de patrones del sistema (Enrique Béjar Chacón et al., 2016).

Se estableció un límite máximo de mil iteraciones para ejecutar el modelo hasta alcanzar la validación completa del procesamiento de la información, en conjunto con un gradiente mínimo de  $1e-07$ . Se realizaron hasta seis revisiones de validación para evaluar la calidad del modelo. El enfoque computacional divide los datos en tres conjuntos: el 70% del total de datos se utiliza para el entrenamiento, el 15% se destina a la validación, y el restante 15% se reserva para las pruebas del modelo (Enrique Béjar Chacón et al., 2016).

## **Capítulo dos**

### **Resultados y discusión**

#### **2.1 Aforos**

Después de ejecutar las mediciones correspondientes y realizar los cálculos pertinentes, se logró obtener los valores medios de alturas y caudales como se muestra en la Tabla 3. Estos resultados representan información esencial para la generación de la curva de descarga.

Tras examinar los datos relativos a las alturas y caudales, se constató la presencia de un número reducido de caudales significativos. Esta situación se atribuye a la sequía que afectó entre los meses de septiembre a finales de noviembre, ejerciendo un impacto directo en los niveles de flujo de agua estudiado. La escasez de caudales notables durante el período analizado revela la influencia sustancial del fenómeno de sequía en el comportamiento hidrológico de la región, suscitando la necesidad de considerar este factor al interpretar los resultados y formular conclusiones pertinentes.

**Tabla 3***Altura y Caudales promedio calculados*

<b>CAUDALES Y ALTURAS MEDIOS DE CADA AFORO</b>			
<b>No</b>	<b>Fecha</b>	<b>H prom (m)</b>	<b>Q prom (m3/s)</b>
AF1	13/10/2023	0.14	0.697617651
AF2	13/10/2023	0.13	0.596878646
AF3	14/10/2023	0.15	0.736798091
AF4	14/10/2023	0.15	0.736798091
AF5	17/10/2023	0.14	0.677680776
AF6	17/10/2023	0.14	0.687852651
AF7	27/10/2023	0.17	0.944394411
AF8	27/10/2023	0.17	0.932730661
AF9	30/10/2023	0.14	0.664932026
AF10	30/10/2023	0.14	0.674832651
AF11	31/10/2023	0.15	0.764465591
AF12	31/10/2023	0.19	1.047084794
AF13	1/11/2023	0.24	1.666905303
AF14	2/11/2023	0.16	0.859779596
AF15	4/11/2023	0.22	1.433826554
AF16	5/10/2023	0.13	0.630634086
AF17	7/10/2023	0.15	0.804459781
AF18	12/11/2023	0.34	2.331481069
AF19	13/11/2023	0.28	1.815492331
AF20	13/11/2023	0.14	0.697617651
AF21	16/11/2023	0.40	2.776161311
AF22	17/11/2023	0.30	1.907299068
AF23	19/11/2023	0.17	1.038774226
AF24	24/11/2023	0.25	1.748833988
AF25	27/11/2023	0.20	1.303724736

Se planteó emplear el 80% de los datos obtenidos en los cálculos para la generación de la curva de descarga como se muestra en la tabla 3, reservando el 20% restante con el propósito de llevar a cabo la validación de dicha curva. La asignación diferenciada de datos para la construcción y validación de la curva de descarga contribuye a fortalecer la confiabilidad y la generalización de los resultados, permitiendo una evaluación más sólida de la eficacia y aplicabilidad.

Tabla 4

80 % de datos para curva de descarga

<b>DATA SELECCIONADA PARA CURVA DE DESCARGA</b>			
	<b>h (m)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>N</b>
<b>AF1</b>	0.14	0.70	<b>20</b>
<b>AF2</b>	0.13	0.60	
<b>AF3</b>	0.15	0.74	
<b>AF4</b>	0.15	0.74	
<b>AF5</b>	0.14	0.68	
<b>AF6</b>	0.14	0.69	
<b>AF7</b>	0.17	0.94	
<b>AF10</b>	0.14	0.67	
<b>AF11</b>	0.15	0.76	
<b>AF12</b>	0.19	1.05	
<b>AF14</b>	0.16	0.86	
<b>AF15</b>	0.22	1.43	
<b>AF17</b>	0.15	0.80	
<b>AF19</b>	0.28	1.82	
<b>AF20</b>	0.14	0.70	
<b>AF21</b>	0.40	2.78	
<b>AF22</b>	0.30	1.91	
<b>AF23</b>	0.17	1.04	
<b>AF24</b>	0.25	1.75	
<b>AF25</b>	0.20	1.30	

## 2.2 Cálculo de la curva de descarga general

La metodología delineada en este estudio se implementó con éxito, culminando en la obtención de los parámetros  $a$  y  $n$  mediante la aplicación de técnicas logarítmicas. Durante la fase de determinación del coeficiente de correlación  $r$ , se llevó a cabo la estimación del valor de  $H_0$  mediante ensayos que abarcaron un rango de valores, con el objetivo de optimizar  $r$  hasta alcanzar niveles cercanos a la unidad.

En el contexto de esta investigación, se determinó con los valores de la tabla 3 que un valor de  $H_0$  igual a 0.07 conlleva un coeficiente de correlación  $r$  de 0.9965, señalando un

ajuste altamente óptimo para la ecuación de descarga. La expresión resultante de la curva de descarga general, la cual se representa en la expresión (15):

$$Q_{calgeneral} = 7.7511 * (h - 0.07)^{0.9039} \quad (15)$$

**Figura 2**

*Curva de descarga general*



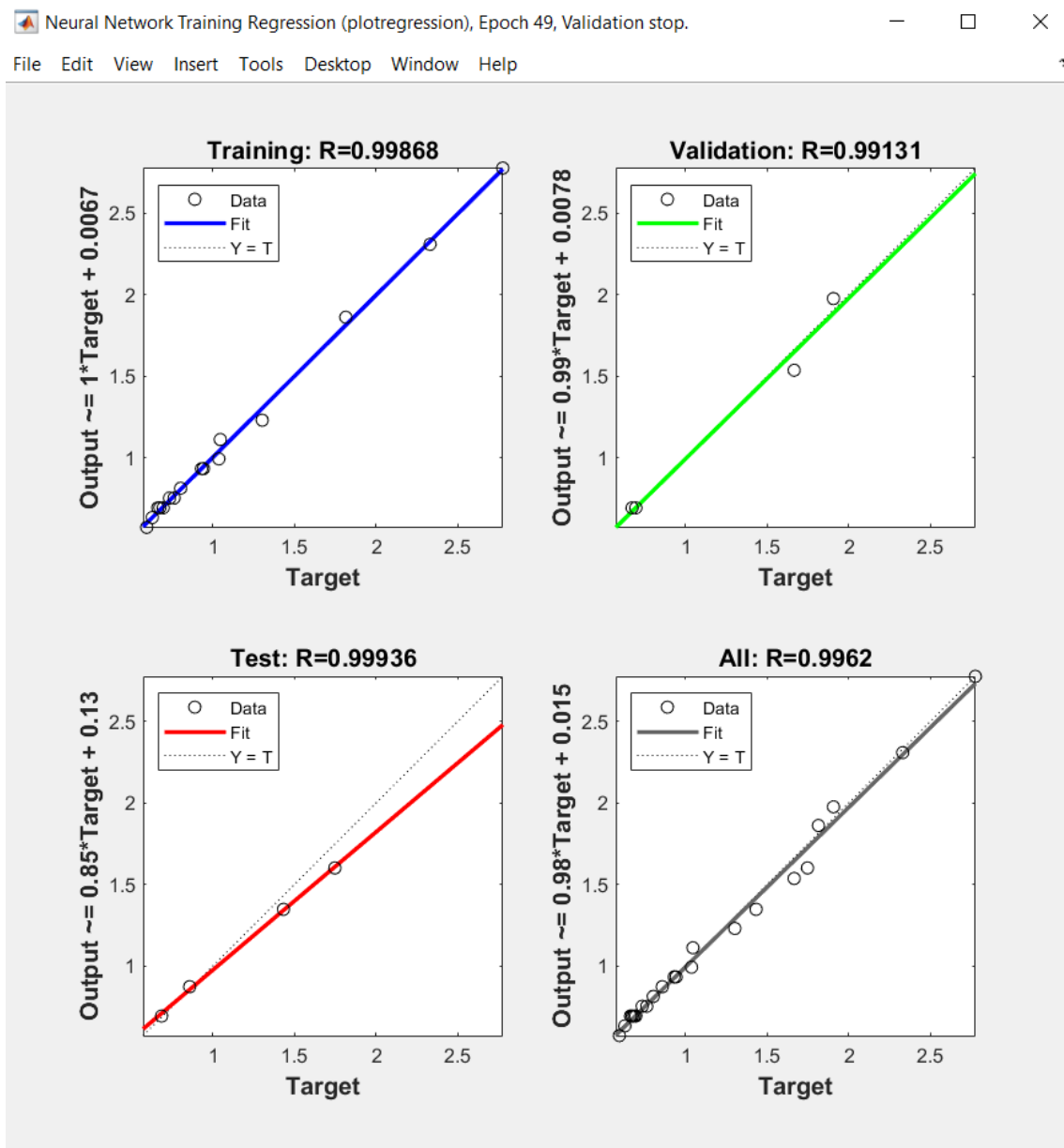
### 2.3 Redes neuronales

La anticipación de caudales fue llevada a cabo mediante el empleo de técnicas de aprendizaje automático, específicamente utilizando la aplicación Neural Net Fitting de Matlab. Esta herramienta proporcionó un marco integral para la construcción y ajuste de redes neuronales. El enfoque de Machine Learning es una metodología avanzada para la predicción de caudales, capitalizando la capacidad de las redes neuronales para identificar patrones complejos y relaciones no lineales en los datos hidrológicos. Este enfoque innovador no solo destaca la aplicación práctica de tecnologías de vanguardia en la investigación hidrológica, sino que también subraya la importancia de la precisión en la predicción de caudales para la gestión efectiva de recursos hídricos.

Los datos correspondientes a las Alturas ( $h$  observadas) de la Tabla 3 se emplearon como entrada para la capa inicial, mientras que los caudales calculados mediante los aforos se utilizaron como datos de salida en la capa correspondiente. La configuración de la red neuronal, como se visualiza en la figura 3, revela la presencia de una única capa intermedia con 2 neuronas, y se optó por el algoritmo de entrenamiento Levenberg Marquardt. Esta elección de arquitectura se basa en la búsqueda de resultados óptimos y en la prevención del sobreentrenamiento (overfitting), lo que respalda la robustez y la eficacia del modelo en la interpretación de las relaciones complejas entre las alturas y los caudales.

Figura 3

Resultado de regresión lineal Matlab



La aplicación seleccionada proporciona una serie de resultados, entre ellos, destaca la evaluación de la correlación (R) entre los resultados, tal como se ilustra en la Figura 3. Se observa que los valores de R obtenidos para el conjunto de entrenamiento, validación, prueba y en general, tienden a aproximarse a 1. Esta proximidad a la unidad sugiere una tendencia lineal prácticamente perfecta, indicando que los caudales predichos mantienen una relación

altamente concordante con los valores observados. Este hallazgo respalda la capacidad del modelo para capturar de manera efectiva las complejidades de la relación entre las variables hidrológicas, destacando la idoneidad de la aplicación y la validez de las predicciones generadas en el contexto de la investigación.

En la tabla 5 que se presenta a continuación, se recopila un conjunto de caudales calculados mediante el código generado a través de técnicas de Machine Learning. Este conjunto de datos será empleado para llevar a cabo la validación utilizando diferentes coeficientes, como se abordará en detalle:

**Tabla 5**

*Resultados de caudales con redes neuronales*

N°	h	Machine Learning
1	0,167	0.9346
2	0,139	0.6947
3	0.239	1.5378
4	0.132	0.6348
5	0.340	2.3093

## 2.4 Validación de la curva de descarga

El procedimiento para derivar la curva de descarga se ejecutó utilizando el 80% de los datos recopilados, en este caso son los que se encuentran en la Tabla 4, empleando el método previamente delineado. Durante este proceso, se determinó que un valor de  $H_0$  igual a 0.07 conlleva un coeficiente de correlación  $r$  de 0.994, señalando un ajuste altamente óptimo para la ecuación de descarga. La formulación resultante de la curva de descarga se presenta en la expresión (16):

$$Q_{cal_{80\%}} = 7.6248 * (h - 0.07)^{0.8969} \quad (16)$$

Utilizando la fracción remanente del 20% de los datos extraídos de la Tabla 3 y los caudales provenientes de la Tabla 5, se llevará a cabo el proceso de validación. Para este propósito, se aplicará la ecuación 16 con el fin de calcular los caudales correspondientes basados en las alturas registradas en este conjunto de datos específico. Asimismo, se llevará

a cabo la validación comparando los caudales calculados mediante técnicas de aprendizaje automático (machine learning). Los resultados de estos cálculos validativos se presentan detalladamente en la Tabla 6, que se muestra a continuación:

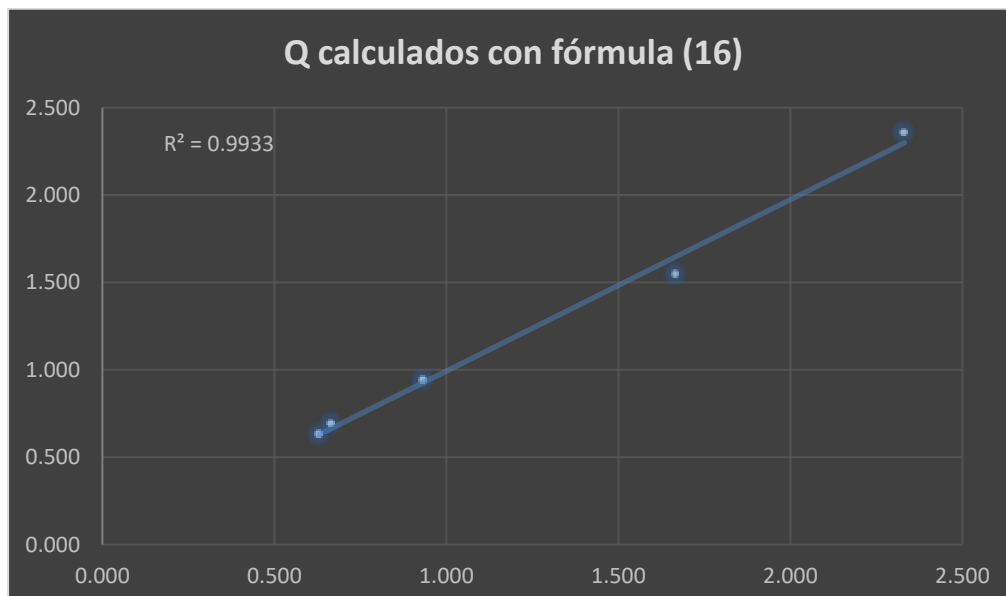
**Tabla 6**

*Caudales calculados para validación*

	h	Q observado	Q calculados con fórmula (16)	Q calculados con redes neuronales
AF8	0.167	0.933	0.941	0.9346
AF9	0.139	0.665	0.693	0.6947
AF13	0.239	1.667	1.548	1.5378
AF16	0.132	0.631	0.630	0.6348
AF18	0.34	2.331	2.356	2.3093

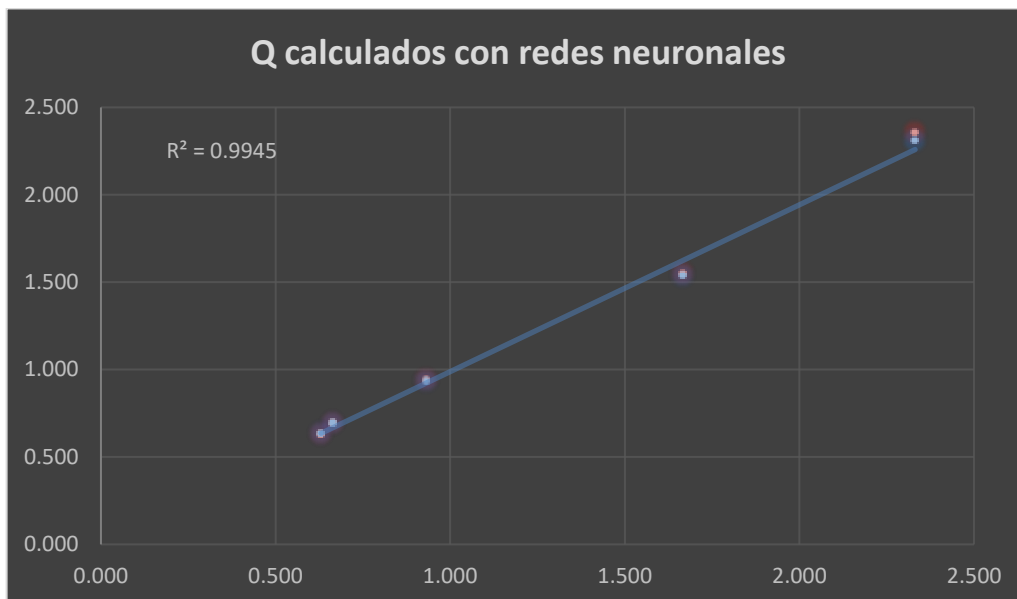
**Figura 4**

*Curva de descarga para fórmula (16)*



**Figura 5**

*Curva de descarga con redes neuronales*



Utilizando los caudales calculados que se han derivado de la información presentada en la Tabla 6, procedemos a llevar a cabo la validación de estos datos utilizando varios indicadores significativos. Entre los indicadores considerados se encuentran el Coeficiente de Correlación ( $R^2$ ), el Error Medio Cuadrático (RMSE) y la eficiencia Nash y Sutcliffe (NSE).

Estos indicadores son fundamentales para evaluar la calidad y precisión del modelo en términos de su capacidad para prever los caudales en comparación con los datos observados. El Coeficiente de Correlación revelará la fuerza y dirección de la relación entre las predicciones y los valores reales, el RMSE cuantificará la discrepancia promedio entre las predicciones y los datos observados, mientras que la eficiencia NSE proporcionará una medida de la habilidad del modelo para capturar la variabilidad de los caudales.

**Tabla 7***Coefficientes de validación calculados*

	Curva de descarga	Machine Learnig
Coeficiente de Correlación ( $R^2$ )	0,993	0,994
Error Medio Cuadratico (RMSE)	0,056	0,060
Nash y Sutcliffe (NSE)	0,993	0,992

La Tabla 7 revela una consistencia notable entre los resultados provenientes de la curva de descarga y aquellos generados mediante la aplicación de técnicas de aprendizaje automático (machine learning), según los indicadores examinados.

Este hallazgo subraya la coherencia y eficacia de ambas aproximaciones en la predicción de caudales, destacando la validez de la curva de descarga y la capacidad predictiva del modelo basado en machine learning. La comparación sistemática de estos resultados ofrece una visión integral sobre la precisión y confiabilidad de ambas metodologías, contribuyendo significativamente al entendimiento del comportamiento hidrológico en el contexto del estudio.

Los resultados obtenidos mediante la curva de descarga exhiben valores que se acercan a los considerados satisfactorios, destacándose un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0.993. La proximidad de este valor a 1 indica una relación prácticamente perfecta de tipo lineal entre los resultados calculados y los observados, respaldando la coherencia y la validez del modelo empleado. Asimismo, el error cuadrático medio de raíz (RMSE) registrado es de 0.056, indicando un rendimiento sobresaliente. La cercanía de este valor a 0 sugiere un error relativamente pequeño, lo cual se considera aceptable para propósitos de pronóstico.

Además, el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) se aproxima a la unidad, señalando que los pronósticos se han ejecutado de manera eficaz y precisa. La cercanía del índice de eficiencia NSE a 1 refleja una correspondencia estrecha entre los valores pronosticados y los observados, indicando un rendimiento destacado del modelo en la predicción de los caudales.

## 2.5 Extrapolación

Debido a la notable temporada de sequía que predominó durante la recopilación de datos, resulta esencial realizar una extrapolación para estimar los caudales en alturas que exceden los 30 cm. La topografía detallada proporcionada en el primer capítulo constituye una fuente crucial de información hidráulica y geométrica sobre la sección en estudio. Además, al hacer referencia a la tabla 1, que contiene los coeficientes de rugosidad correspondientes, se selecciona cuidadosamente un valor "n" esencial para la aplicación del método de Manning y Stevens, en nuestro caso hasta una altura de 0.50 m se utilizó un valor de n y superados los mismo se utilizó uno diferente.

**Tabla 8**

*Resultados de caudales con los métodos de Manning y Stevens*

SECCIÓN	h	h <sub>prom</sub>	AREA	PERIMETRO	R.H.	Q MANNING	Q STEVENS
1	0.25	0.10	1.37	7.38	0.19	0.62	0.59
2	0.5	0.29	2.85	9.05	0.31	1.85	1.60
3	0.75	0.53	5.17	10.57	0.49	6.84	7.54
4	1	0.78	7.55	11.07	0.68	12.46	13.00
5	1.25	1.03	9.92	11.57	0.86	19.07	19.15
6	1.5	1.28	12.30	12.07	1.02	26.53	25.89
7	1.75	1.53	14.67	12.57	1.17	34.64	33.04
8	2	1.78	17.05	13.07	1.30	43.36	40.60
9	2.25	1.73	19.57	14.17	1.38	51.70	47.95
10	2.5	1.98	22.10	14.67	1.51	61.86	56.55
11	2.75	2.23	24.62	15.17	1.62	72.42	65.39
12	3	2.48	25.77	15.67	1.64	76.48	68.90

### 2.5.1 Curva de descarga método de Manning

Al determinar caudales, se seleccionó un coeficiente de rugosidad de  $n = 0.035$  para cierta altura y  $n = 0.023$  para diferente altura, decisión tomada a partir de la información proporcionada en la Tabla 1. Asimismo, se empleó una pendiente del cauce igual a  $S = 0.0024$ , la cual fue obtenida a partir del análisis del perfil longitudinal realizado en software Civil 3D.

Se determinó que al asignar un valor de  $H_o$  igual a 0.06 se obtiene un coeficiente de correlación  $r$  de 0.9953, señalizando un ajuste excepcional para la ecuación de descarga. La formulación resultante de la curva de descarga se presenta en la expresión (17):

$$Q_{cal_{manning}} = 12.2916 * (h - 0.06)^{1.8432} \quad (17)$$

**Figura 6**

*Curva de descarga con método de Manning*



### 2.5.2 Curva de descarga método de Stevens

Al determinar de los caudales, se seleccionó un coeficiente de rugosidad de  $n = 0.035$  para cierta altura y  $n = 0.023$  para diferente altura, información proporcionada en la Tabla 1. Asimismo, se empleó una pendiente del cauce igual a  $S = 0.0024$ , la cual fue obtenida a partir del análisis del software Civil 3D.

Al asignar un valor de  $H_o$  igual a 0.06, se determinó un coeficiente de correlación  $r$  de 0.9910, indicando un ajuste excepcional para la ecuación de descarga. La formulación resultante de la curva de descarga se presenta a continuación:

**Figura 7**

*Curva de descarga con método de Stevens*



La extrapolación se convierte en una herramienta esencial al permitir estimar caudales más allá de los niveles observados, proporcionando así una comprensión más completa de la variabilidad hidrológica. El método de Manning y Stevens, al basarse en la ecuación de continuidad y en la relación altura-caudal, ofrece un enfoque robusto para extrapolar los caudales en condiciones específicas.

La importancia de estos métodos radica en su capacidad para adaptarse a situaciones donde la observación directa de caudales puede ser limitada. La extrapolación permite abordar los desafíos asociados con la variabilidad hidrológica estacional, garantizando la generación de estimaciones fiables y precisas. Estos métodos, al emplear coeficientes de rugosidad, pendientes y otros parámetros hidráulicos, facilitan la proyección de caudales con un nivel aceptable de confianza, respaldando así la toma de decisiones informadas en la gestión de recursos hídrico.

## Conclusiones

Mediante la ejecución de mediciones y cálculos, se obtuvieron los valores medios de alturas y caudales, fundamentales para la generación de la curva de descarga. La identificación de un reducido número de caudales significativos evidencia el impacto directo de la sequía, que prevaleció entre septiembre y finales de noviembre, sobre los niveles de agua. La escasez de caudales notables subraya la influencia sustancial de la sequía en el comportamiento hidrológico regional, subrayando la importancia de considerar este fenómeno al interpretar los resultados.

La estrategia de utilizar el 80% de los datos para la generación de la curva de descarga y reservar el 20% restante para la validación ha sido implementada con el objetivo de fortalecer la confiabilidad y generalización de los resultados.

La generación de la curva de descarga se llevó a cabo utilizando todos los datos calculados, resultando en un valor de  $h_0$  igual a 0.07 y un coeficiente de correlación de 0.9965. Este ajuste óptimo respalda la confiabilidad de la curva de descarga obtenida. La ecuación resultante (ecuación 15) proporciona el caudal calculado general.

Para iniciar el proceso de validación, se procedió a dividir los datos, destinando el primer 80% para la construcción de la curva de descarga y reservando el 20% restante para su validación. La curva de descarga se generó mediante el uso y cálculo de los datos seleccionados, resultando en la obtención de la ecuación 16. Posteriormente, se empleó el 20% de los datos separados en el programa Matlab, Para obtener datos de manera efectiva utilizando redes neuronales, se llevaron a cabo pruebas con un rango de capas que abarcaba desde 1 hasta 10. Sin embargo, se constató que los resultados mejoraron significativamente al utilizar dos capas en lugar de otras configuraciones. cuyos resultados se presentan detalladamente en la Tabla 5. En la ecuación 16, se incorporaron las mismas alturas correspondientes al 20% de los datos, permitiendo una distinción en la validación con las redes neuronales, cuyos resultados se reflejan en la Tabla 6. La notable similitud entre ambos conjuntos de datos sugiere una validación exitosa y precisa, respaldando la robustez de la metodología empleada.

Utilizando el 20% de los datos, se lograron derivar los coeficientes de validación, tales como el coeficiente de corrección  $R^2$ , el error medio cuadrático (RMSE) y el coeficiente de Nash y Sutcliffe (NSE). Posteriormente, estos coeficientes fueron contrastados con aquellos obtenidos previamente mediante redes neuronales, cuyos resultados se encuentran detallados en la Tabla 7. La notable similitud entre ambos conjuntos de coeficientes indica que los cálculos realizados fueron precisos y efectivos, respaldando así la validez de la metodología empleada en el estudio.

En el proceso de extrapolación, se aplicaron los métodos de Manning y de Stevens, seleccionando alturas incrementadas en intervalos de 0.25 m. En el caso de Manning y Stevens, se optó por variar los coeficientes de rugosidad después de alcanzar los 0.50 m, considerando la configuración específica del río. Los resultados de estos cálculos se presentan en la Tabla 8, y al analizarlos, se concluye que el método de Manning exhibe mayor eficiencia, dado que su aproximación es más cercana a los datos obtenidos.

## Recomendaciones

Dada la significativa influencia de la sequía en los resultados, se sugiere realizar un análisis detallado de los posibles impactos climáticos a largo plazo en la hidrología regional. Explorar escenarios climáticos futuros puede proporcionar información valiosa para una planificación más precisa y la gestión de los recursos hídricos en contextos cambiantes.

Explorar técnicas adicionales o métodos de validación cruzada para fortalecer aún más la confiabilidad de la curva de descarga generada. Esta exploración adicional podría ofrecer una perspectiva más completa de la eficacia del modelo.

Aunque se ha demostrado la eficiencia del método de Manning en la extrapolación, se sugiere investigar la posibilidad de ajustar los parámetros utilizados en este método para mejorar la precisión de las predicciones, considerando la topografía específica del río y otros factores hidrológicos.

Considerar una investigación más detallada de la interacción de factores ambientales, como la vegetación y la topografía, para comprender mejor su contribución a las variaciones observadas en los caudales. Esto puede contribuir a una interpretación más completa de los resultados y a la identificación de posibles variables ocultas que afectan el comportamiento hidrológico.

## Referencias

- Aguilar Mora, C. G., y Quille Caiza, E. M. (2021). Evaluación de la calidad y salud del suelo de los ríos Zamora y Zamora Huayco, subcuenca del río Zamora, Cantón Loja - Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana sede Quito.
- Antonio, L. (2019). Instalación de estaciones hidrométricas y meteorológicas. Universidad Nacional de Cordova.
- Calva, N. (2013). La contaminación del Río Zamora y su influencia en la salud de los habitantes de Sauces Norte. Universidad Nacional de Loja.
- Carlos, A. M., Giovane, P. C., y María, P. C. (2023). Hydrological Modeling for Daily Step Flood Forecasts with a Semi Distributed Approach Using the GR4J Model-Camaná River Basin – Arequipa. *Civil Engineering and Architecture*, 11(3), 1137–1145. <https://doi.org/10.13189/CEA.2023.110303>
- Deepthi, B., y Sivakumar, B. (2022). Towards assessing the importance of individual stations in hydrometric networks: application of complex networks. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. <https://doi.org/10.1007/S00477-022-02340-W>
- Enrique Béjar Chacón, W., Yonatan ValerianoValdez, K., Cesar Ilachoque Umasi, J., y Sulla Torres, J. (2016). Predicción de caudales medios diarios en la cuenca del Amazonas aplicando redes neuronales artificiales y el modelo neurodifuso ANFIS Forecast of Average Daily Flows in the Amazon Basin Using Artificial Neural Networks and the Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (ANFIS). *23 Research in Computing Science*, 113.
- Galecio, J. (2007). Métodos de aforo para la estimación de la recarga de acuíferos . Universidad de Chile.
- Giler-Ormaza, A. ;, Navarrete, Z., Alejandra, X., Zambrano, C., Luis, J., Vera, A., Armando, D., Sánchez, G., Paul, J., Mera, F., Enrique, J., Toro, C., David, M., Loor, A., y Ramón, J. (2019). Análisis del comportamiento hidrológico de cuencas hidrográficas tropicales utilizando

índices: estudio de caso en la región costa del Ecuador. 3.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72164777003>

Glovatskii, O., Usmanov, S., Ergashev, R., Hamdamov, B., y Gazaryan, A. (2023). Hydrometric flow measurement in water management. *E3S Web of Conferences*, 365.  
<https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202336503016>

González, I. (2018). Aspectos hidráulicos en el diseño de una plataforma de gestión y monitoreo de canales de regadío - aplicación al caso de la junta de vigilancia primera sección del río Aconcagua . Universidad de Chile .

Haile, A. T., Geremew, Y., Wassie, S., Fekadu, A. G., y Taye, M. T. (2023). Filling streamflow data gaps through the construction of rating curves in the Lake Tana sub-basin, Nile basin. *Journal of Water and Climate Change*. <https://doi.org/10.2166/WCC.2023.372>

ICC. (2017). Manual de medición de caudales. Instituto Privado de investigación sobre Cambio Climático

Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., y Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, 573–587.  
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2013.11.016>

Lopez, O., y Alvarado, G. (2020). Informe de los registros de las estaciones Hidrométricas .

Mansanarez, V., Renard, B., Coz, J. Le, Lang, M., y Darienzo, M. (2019). Shift Happens! Adjusting Stage-Discharge Rating Curves to Morphological Changes at Known Times. *Water Resources Research*, 55(4), 2876–2899. <https://doi.org/10.1029/2018WR023389>

Martínez, Q., y Joel, W. (2014). Estimación de los caudales máximos y caracterización morfométrica de la subcuenca pashimbi, tena napo-ecuador. 1.

- Méndez, J. (2019). Estaciones hidrométricas y aforo con molinete. Aforo Con Molinete. [https://www.academia.edu/40633778/Estaciones\\_hidrom%C3%A9tricas\\_y\\_aforo\\_con\\_molinete](https://www.academia.edu/40633778/Estaciones_hidrom%C3%A9tricas_y_aforo_con_molinete)
- Morlot, T., Perret, C., Favre, A. C., y Jalbert, J. (2014). Dynamic rating curve assessment for hydrometric stations and computation of the associated uncertainties: Quality and station management indicators. *Journal of Hydrology*, 517, 173–186. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2014.05.007>
- Negatu, T. A., Zimale, F. A., y Steenhuis, T. S. (2022). Establishing Stage–Discharge Rating Curves in Developing Countries: Lake Tana Basin, Ethiopia. *Hydrology*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology9010013>
- Oñate, F. (2003). Hidrología (Apuntes de clase). Universidad Técnica Particular de Loja.
- Oñate, F., y Oñate, A. (2019, August 9). El crecimiento urbano y su influencia en los caudales de crecida: un caso de estudio en una cuenca urbana en los andes ecuatorianos. *Geoespacial*, 1–15.
- Ortiz Piedra, K. G. (2019). Caracterización de la basura presente en las riberas del río Zamora de la ciudad de Loja como una herramienta para plantear una propuesta educativa ambiental. Universidad Nacional de Loja.
- Osorio, A. L. N. A., Rampinelli, C. G., y Reis, D. S. (2018). A Bayesian Approach to Incorporate Imprecise Information on Hydraulic Knowledge in a River Reach and Assess Prediction Uncertainties in Streamflow Data. *World Environmental and Water Resources Congress 2018: Watershed Management, Irrigation and Drainage, and Water Resources Planning and Management - Selected Papers from the World Environmental and Water Resources Congress 2018*, 425–437. <https://doi.org/10.1061/9780784481400.040>

- Paoletti, M., Pellegrini, M., Belli, A., Pierleoni, P., Sini, F., Pezzotta, N., y Palma, L. (2023). Discharge Monitoring in Open-Channels: An Operational Rating Curve Management Tool. *Sensors*, 23(4). <https://doi.org/10.3390/S23042035>.
- Pauta, G., Velasco, M., Gutiérrez, D., Vázquez, G., Rivera, S., Morales, Ó., y Abril, A. (2019). Evaluación de la calidad del agua de los ríos de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *Maskana*, ISSN 1390-6143, ISSN-e 2477-8893, Vol. 10, No. 2, 2019, Págs. 76-88, 10(2), 76–88. <https://doi.org/10.18537/mskn.10.02.08>
- Pavoline, E. (2014). Diseño de sistemas de contención de aguas: Estudio Hidráulico e Hidrológico. Universidad de los Andes.
- Ramírez, R. M., Flores, J. R., Juárez, M. L. A., Mora, R. D., y Elizondo, E. C. (2019). Análisis de Estaciones Climatológicas e Hidrométricas de la Presa Cointzio.
- Ribeiro, A. R., Gobbi, M. F., Leite, E. A., y Kleina, M. (2017). Quantificação das Incertezas em Curvas de Descarga de Postos Fluviométricos Utilizando Inferência Bayesiana. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, 40(2), 266–277. [https://doi.org/10.11137/2017\\_2\\_266\\_277](https://doi.org/10.11137/2017_2_266_277)
- Rocha, A. (2007). HIDRAULICA DE CANALES Y TUBERIAS (Vol. 1). 2007.
- Rojas, L. (2020). Levantamiento topografico para uso agricola del predio finca García, Cantón Naranjal". Universidad de Guayaquil.
- Romero, V. (2021). Caudales, Aforos y Cálculo de las persistencias. UNIVERSIDAD JOSÉ CARLOS MARIÁTEGUI.
- Rosario, K. D. C. (2016). Propuesta metodológica para la determinación de descargas máximas en función de parámetros morfométricos y de infiltración. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Silva, K. (2014). Generación de información base y estudios de relaciones lluviaescorrentía en la micro-cuenca El Limón- Zamora Chinchipe. Universidad Técnica Particular de Loja.

- Solano, E. (2021). Evaluación del comportamiento hidrodinámico y fisicoquímico del río Santa Clara y su influencia en el río San Pedro. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.
- Suércun, S. (2007). Implementación de una estación de aforo en la subcuenca del río Zamora para el estudio de las relaciones lluvia escurrentía en la ciudad de Loja. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Tello, J. (2016). Inventario y evaluación de la vegetación en las riberas del río Zamora de la ciudad de Loja. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Velásquez Moisés Agustín, -Lozano, León Khalil, V., y Velásquez Moisés Agustín, L. (2022). Calibración y Validación de un modelo Hidrológico mediante el WEAP método humedad del suelo, para la cuenca alta del Río Guadalquivir. Ciencia Sur, 7(8), 72–88. <http://dicyt.uajms.edu.bo/revistas/index.php/ciencia-sur/article/view/1317>
- Vera, Luis. (2002). Análisis de aforo de la estación hidrométrica Obrajillo - periodo 2000-2001. Universidad Nacional Mayor de San Marcos .
- Villón, M. (2002). Hidrología (2nd ed.). 2002.
- Zárate, T. C. (2020). Modelamiento hidrológico de caudales medios mensuales en cuencas sin información hidrométrica aplicando el método Lutz Scholz y las redes neuronales artificiales, en la microcuenca Huajuri - Oropesa - Antabamba - Apurímac. UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS.
- Zhang, W., Wang, W. guang, Zheng, J. hai, Wang, H. ge, Wang, G., y Zhang, J. sheng. (2015). Reconstruction of stage-discharge relationships and analysis of hydraulic geometry variations: The case study of the Pearl River Delta, China. Global and Planetary Change, 125, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.12.004>.

## Apéndice

### Apéndice A. Tablas y resultados

A continuación, se presentará las tablas de los datos y resultados que se dieron durante el transcurso de nuestra investigación.

**Tabla A1**

*Tabla resumen de aforos calculados*

---

#### AFORO CON MOLINETE METODO NUMERICO RESUMEN

**Elaborado:** Michael Orlando Salazar Orellana

**Lugar:** Río Zamora, puente ubicado en la calle Juan de Salinas, entre las Avenidas Orillas del Zamora y Emiliano Ortega

#### CAUDALES Y ALTURAS MEDIOS DE CADA AFORO

No	Fecha	H prom (m)	Q prom (m3/s)
AF1	13/10/2023	0.139	0.697617651
AF2	13/10/2023	0.125	0.596878646
AF3	14/10/2023	0.146	0.736798091
AF4	14/10/2023	0.146	0.736798091
AF5	17/10/2023	0.139	0.677680776
AF6	17/10/2023	0.139	0.687852651
AF7	27/10/2023	0.167	0.944394411
AF8	27/10/2023	0.167	0.932730661
AF9	30/10/2023	0.139	0.664932026
AF10	30/10/2023	0.139	0.674832651
AF11	31/10/2023	0.146	0.764465591
AF12	31/10/2023	0.188	1.047084794
AF13	1/11/2023	0.239	1.666905303
AF14	2/11/2023	0.16	0.859779596
AF15	4/11/2023	0.216	1.433826554
AF16	5/10/2023	0.132	0.630634086
AF17	7/10/2023	0.153	0.804459781
AF18	12/11/2023	0.34	2.331481069
AF19	13/11/2023	0.28	1.815492331
AF20	13/11/2023	0.139	0.697617651
AF21	16/11/2023	0.396	2.776161311
AF22	17/11/2023	0.295	1.907299068
AF23	19/11/2023	0.174	1.038774226
AF24	24/11/2023	0.247	1.748833988

AF25      27/11/2023      0.202      1.303724736

---

**Tabla A2**

*Curva de descarga general*

												ho	
												0.07	
	h (m)	Q (m3/s)	N	h (m)	Q (m3/s)	Y	X	X^2	Y^2	XY	Q	r	1.00
AF1	0.139	0.70	25	0.139	0.70	-0.16	-1.16	1.35	0.02	0.18	0.69	$\alpha$	0.89
AF2	0.125	0.60		0.125	0.60	-0.22	-1.26	1.59	0.05	0.28	0.56	$\beta$	0.90
AF3	0.146	0.74		0.146	0.74	-0.13	-1.12	1.25	0.02	0.15	0.75	a	7.75
AF4	0.146	0.74		0.146	0.74	-0.13	-1.12	1.25	0.02	0.15	0.75	n	0.90
AF5	0.139	0.68		0.139	0.68	-0.17	-1.16	1.35	0.03	0.20	0.69		
AF6	0.139	0.69		0.139	0.69	-0.16	-1.16	1.35	0.03	0.19	0.69		
AF7	0.167	0.94		0.167	0.94	-0.02	-1.01	1.03	0.00	0.03	0.94		
AF8	0.167	0.93		0.167	0.93	-0.03	-1.01	1.03	0.00	0.03	0.94		
AF9	0.139	0.66		0.139	0.66	-0.18	-1.16	1.35	0.03	0.21	0.69		
AF10	0.139	0.67		0.139	0.67	-0.17	-1.16	1.35	0.03	0.20	0.69		
AF11	0.146	0.76		0.146	0.76	-0.12	-1.12	1.25	0.01	0.13	0.75		
AF12	0.188	1.05		0.188	1.05	0.02	-0.93	0.86	0.00	-0.02	1.12		
AF13	0.239	1.67		0.239	1.67	0.22	-0.77	0.60	0.05	-0.17	1.55		
AF14	0.16	0.86		0.16	0.86	-0.07	-1.05	1.09	0.00	0.07	0.88		
AF15	0.216	1.43		0.216	1.43	0.16	-0.84	0.70	0.02	-0.13	1.36		
AF16	0.132	0.63		0.132	0.63	-0.20	-1.21	1.46	0.04	0.24	0.63		
AF17	0.153	0.80		0.153	0.80	-0.09	-1.08	1.17	0.01	0.10	0.82		
AF18	0.34	2.33		0.34	2.33	0.37	-0.57	0.32	0.14	-0.21	2.37		
AF19	0.28	1.82		0.28	1.82	0.26	-0.68	0.46	0.07	-0.18	1.89		
AF20	0.139	0.70		0.139	0.70	-0.16	-1.16	1.35	0.02	0.18	0.69		
AF21	0.396	2.78		0.396	2.78	0.44	-0.49	0.24	0.20	-0.22	2.81		
AF22	0.295	1.91		0.295	1.91	0.28	-0.65	0.42	0.08	-0.18	2.01		
AF23	0.174	1.04		0.174	1.04	0.02	-0.98	0.97	0.00	-0.02	1.00		
AF24	0.247	1.75		0.247	1.75	0.24	-0.75	0.57	0.06	-0.18	1.62		
AF25	0.202	1.30		0.202	1.30	0.12	-0.88	0.77	0.01	-0.10	1.24		
						<b>0.110</b>	<b>24.476</b>	<b>25.108</b>	<b>0.942</b>	<b>0.927</b>	<b>28.176</b>		
						<b>Y</b>	<b>X</b>	<b>X^2</b>	<b>Y^2</b>	<b>XY</b>	<b>Qtot</b>		

Tabla A3

Curva de descarga para validación

												ho	
												0.07	
	h (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	N	h (m)	Q (m <sup>3</sup> /s)	Y	X	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	XY	Q	r	
AF1	0.139	0.70	20	0.139	0.70	-0.16	-1.16	1.35	0.02	0.18	0.69	$\alpha$	1.00
AF2	0.125	0.60		0.125	0.60	-0.22	-1.26	1.59	0.05	0.28	0.57	$\beta$	0.88
AF3	0.146	0.74		0.146	0.74	-0.13	-1.12	1.25	0.02	0.15	0.76	a	7.62
AF4	0.146	0.74		0.146	0.74	-0.13	-1.12	1.25	0.02	0.15	0.76	n	0.90
AF5	0.139	0.68		0.139	0.68	-0.17	-1.16	1.35	0.03	0.20	0.69		
AF6	0.139	0.69		0.139	0.69	-0.16	-1.16	1.35	0.03	0.19	0.69		
AF7	0.167	0.94		0.167	0.94	-0.02	-1.01	1.03	0.00	0.03	0.94		
AF10	0.139	0.67		0.139	0.67	-0.17	-1.16	1.35	0.03	0.20	0.69		
AF11	0.146	0.76		0.146	0.76	-0.12	-1.12	1.25	0.01	0.13	0.76		
AF12	0.188	1.05		0.188	1.05	0.02	-0.93	0.86	0.00	-0.02	1.12		
AF14	0.16	0.86		0.16	0.86	-0.07	-1.05	1.09	0.00	0.07	0.88		
AF15	0.216	1.43		0.216	1.43	0.16	-0.84	0.70	0.02	-0.13	1.36		
AF17	0.153	0.80		0.153	0.80	-0.09	-1.08	1.17	0.01	0.10	0.82		
AF19	0.28	1.82		0.28	1.82	0.26	-0.68	0.46	0.07	-0.18	1.88		
AF20	0.139	0.70		0.139	0.70	-0.16	-1.16	1.35	0.02	0.18	0.69		
AF21	0.396	2.78		0.396	2.78	0.44	-0.49	0.24	0.20	-0.22	2.79		
AF22	0.295	1.91		0.295	1.91	0.28	-0.65	0.42	0.08	-0.18	2.00		
AF23	0.174	1.04		0.174	1.04	0.02	-0.98	0.97	0.00	-0.02	1.00		
AF24	0.247	1.75		0.247	1.75	0.24	-0.75	0.57	0.06	-0.18	1.61		
AF25	0.202	1.30		0.202	1.30	0.12	-0.88	0.77	0.01	-0.10	1.24		
						<b>-0.07</b>	<b>-19.75</b>	<b>20.36</b>	<b>0.69</b>	<b>0.83</b>	<b>21.94</b>		
						<b>Y</b>	<b>X</b>	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>Y<sup>2</sup></b>	<b>XY</b>	<b>Qtot</b>		

Tabla A4

Tabla de validación con error cuadrático medio (RMSE)

	H	Q	Qc	Q-Qc	(Q-Qc) <sup>2</sup>	RMSE
AF8	0.167	0.93273066	0.9407279	-0.0079972	6.3956E-05	0.05595065
AF9	0.139	0.66493203	0.69309411	-0.0281621	0.0007931	
AF13	0.239	1.6669053	1.54781853	0.11908677	0.01418166	
AF16	0.132	0.63063409	0.62968676	0.00094732	8.9742E-07	
AF18	0.34	2.33148107	2.35623507	-0.024754	0.00061276	
					<b><math>\Sigma =</math></b>	<b>0.01565238</b>

Tabla A5

Tabla de validación coeficiente de eficiencia de Nash y Sutcliffe (EF)

	H	Q	Qc	Q-Qc	(Q-Qc)^2	(Q-Qprm)	(Q-Qprm)^2	EF
AF8	0.167	0.9327	0.9407	-0.0080	0.0001	-0.3126	0.0977	0.9928
AF9	0.139	0.6649	0.6931	-0.0282	0.0008	-0.5804	0.3369	
AF13	0.239	1.6669	1.5478	0.1191	0.0142	0.4216	0.1777	
AF16	0.132	0.6306	0.6297	0.0009	0.0000	-0.6147	0.3779	
AF18	0.34	2.3315	2.3562	-0.0248	0.0006	1.0861	1.1797	
<b>Promedio</b>		1.2453		$\Sigma=$	<b>0.0157</b>	$\Sigma=$	<b>2.1699</b>	

Tabla A6

Caudales calculados con el método de extrapolación de Manning

SECCIÓN	h	h <sub>prom</sub>	AREA	PERIMETRO	R.H.	n	S	Q MANNING
1	0.25	0.104	1.37	7.38	0.19	0.04	0.0024	0.62
2	0.5	0.287	2.85	9.05	0.31	0.04	0.0024	1.85
3	0.75	0.526	5.17	10.57	0.49	0.02	0.0024	6.84
4	1	0.776	7.55	11.07	0.68	0.02	0.0024	12.46
5	1.25	1.026	9.92	11.57	0.86	0.02	0.0024	19.07
6	1.5	1.276	12.3	12.07	1.02	0.02	0.0024	26.53
7	1.75	1.526	14.67	12.57	1.17	0.02	0.0024	34.64
8	2	1.776	17.05	13.07	1.30	0.02	0.0024	43.36
9	2.25	1.73	19.57	14.17	1.38	0.02	0.0024	51.70
10	2.5	1.98	22.1	14.67	1.51	0.02	0.0024	61.86
11	2.75	2.23	24.62	15.17	1.62	0.02	0.0024	72.42
12	3	2.48	25.77	15.67	1.64	0.02	0.0024	76.48

Tabla A7

Caudales calculados con el método de extrapolación de Stevens

SECCIÓN	h	h <sub>prom</sub>	AREA	PERIMETRO	R.H.	n	S	Q STEVENS
1	0.25	0.104	1.37	7.38	0.19	0.04	0.0024	0.59
2	0.5	0.287	2.85	9.05	0.31	0.04	0.0024	1.60
3	0.75	0.526	5.17	10.57	0.49	0.02	0.0024	7.54
4	1	0.776	7.55	11.07	0.68	0.02	0.0024	13.00
5	1.25	1.026	9.92	11.57	0.86	0.02	0.0024	19.15
6	1.5	1.276	12.3	12.07	1.02	0.02	0.0024	25.89
7	1.75	1.526	14.67	12.57	1.17	0.02	0.0024	33.04
8	2	1.776	17.05	13.07	1.30	0.02	0.0024	40.60
9	2.25	1.73	19.57	14.17	1.38	0.02	0.0024	47.95
10	2.5	1.98	22.1	14.67	1.51	0.02	0.0024	56.55
11	2.75	2.23	24.62	15.17	1.62	0.02	0.0024	65.39
12	3	2.48	25.77	15.67	1.64	0.02	0.0024	68.90

Tabla A8

Curva de descarga con caudales calculados con el método de extrapolación de Manning

Nº	h (m)	Q (m3/s)	Y = Log Q	x = Log (h-h0)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y	Q Calculado
1	0.25	0.62	-0.2048	-0.7212	0.5202	0.0419	0.1477	0.58
2	0.50	1.85	0.2663	-0.3565	0.1271	0.0709	-0.0950	2.71
3	0.75	6.84	0.8348	-0.1612	0.0260	0.6969	-0.1345	6.20
4	1.00	12.46	1.0955	-0.0269	0.0007	1.2002	-0.0294	10.97
5	1.25	19.07	1.2803	0.0755	0.0057	1.6393	0.0967	16.94
6	1.50	26.53	1.4237	0.1584	0.0251	2.0271	0.2255	24.07
7	1.75	34.64	1.5395	0.2279	0.0519	2.3702	0.3508	32.33
8	2.00	43.36	1.6371	0.2878	0.0828	2.6800	0.4712	41.70
9	2.25	51.70	1.7134	0.3404	0.1159	2.9359	0.5833	52.14
10	2.50	61.86	1.7914	0.3874	0.1501	3.2092	0.6940	63.63
11	2.75	72.42	1.8599	0.4298	0.1847	3.4591	0.7993	76.17
12	3.00	76.48	1.8835	0.4683	0.2193	3.5477	0.8821	89.72
		Σ=	<b>15.1208</b>	<b>1.1097</b>	<b>1.5096</b>	<b>23.8783</b>	<b>3.9917</b>	<b>417.15</b>

Tabla A9

Curva de descarga con caudales calculados con el método de extrapolación de Stevens

Nº	h (m)	Q (m3/s)	Y = Log Q	x = Log (h-h0)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	X*Y	Q Calculado
1	0.25	0.59	-0.2276	-0.7212	0.5202	0.0518	0.1642	0.57
2	0.50	1.60	0.2052	-0.3565	0.1271	0.0421	-0.0732	2.64
3	0.75	7.54	0.8773	-0.1612	0.0260	0.7696	-0.1414	5.99
4	1.00	13.00	1.1139	-0.0269	0.0007	1.2408	-0.0299	10.52
5	1.25	19.15	1.2822	0.0755	0.0057	1.6439	0.0969	16.18
6	1.50	25.89	1.4131	0.1584	0.0251	1.9967	0.2238	22.91
7	1.75	33.04	1.5190	0.2279	0.0519	2.3075	0.3462	30.68
8	2.00	40.60	1.6085	0.2878	0.0828	2.5873	0.4629	39.45
9	2.25	47.95	1.6808	0.3404	0.1159	2.8249	0.5722	49.21
10	2.50	56.55	1.7524	0.3874	0.1501	3.0710	0.6789	59.93
11	2.75	65.39	1.8155	0.4298	0.1847	3.2960	0.7802	71.60
12	3.00	68.90	1.8382	0.4683	0.2193	3.3789	0.8609	84.20
		Σ=	<b>14.8783</b>	<b>1.1097</b>	<b>1.5096</b>	<b>23.2105</b>	<b>3.9416</b>	<b>393.88</b>

## Apéndice B. Materiales y trabajo en campo

Aquí se presentarán los materiales que fueron utilizados para la obtención de datos e igualmente el trabajo que se realizó.

### Figura B1

*Molinete, equipo para realizar aforo*



### Figura B2

*Sensor para medición de tiempo y número de vueltas*



**Figura B3**

*Levantamiento topográfico*



**Figura B4**

*Levantamiento topográfico del río Zamora*



**Figura B5**

*Aforo con molinete en Río Zamora*



**Figura B6**

*Recolección de datos*



**Figura B7**

*Sección de río Zamora*

**Figura B8**

*Sección de río Zamora*



**Figura B9**

*Sección de río Zamora*

**Figura B10**

*Sección de río Zamora*



## Apéndice C. Topografía y sección de interés

Figura C1

Levantamiento topográfico

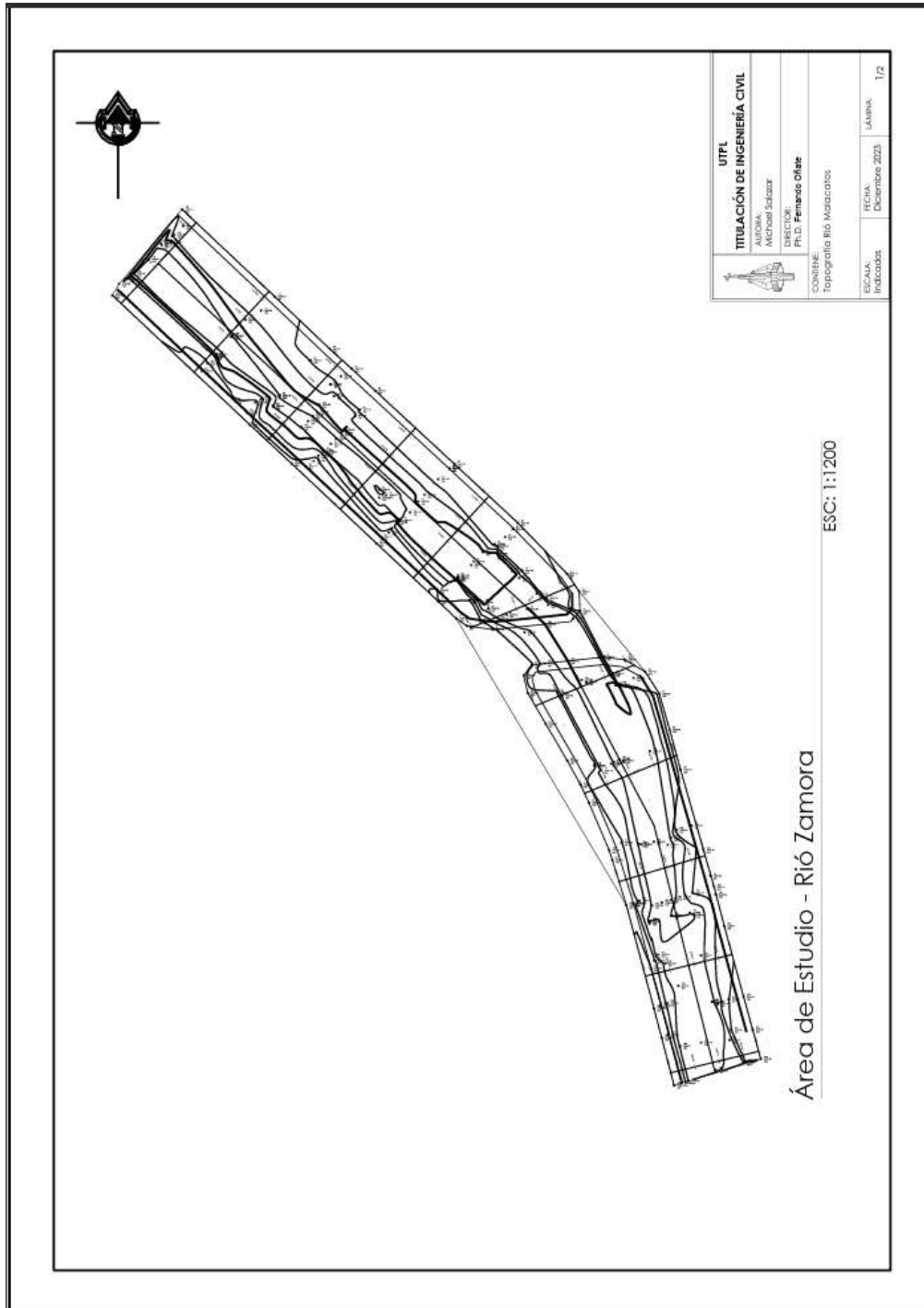
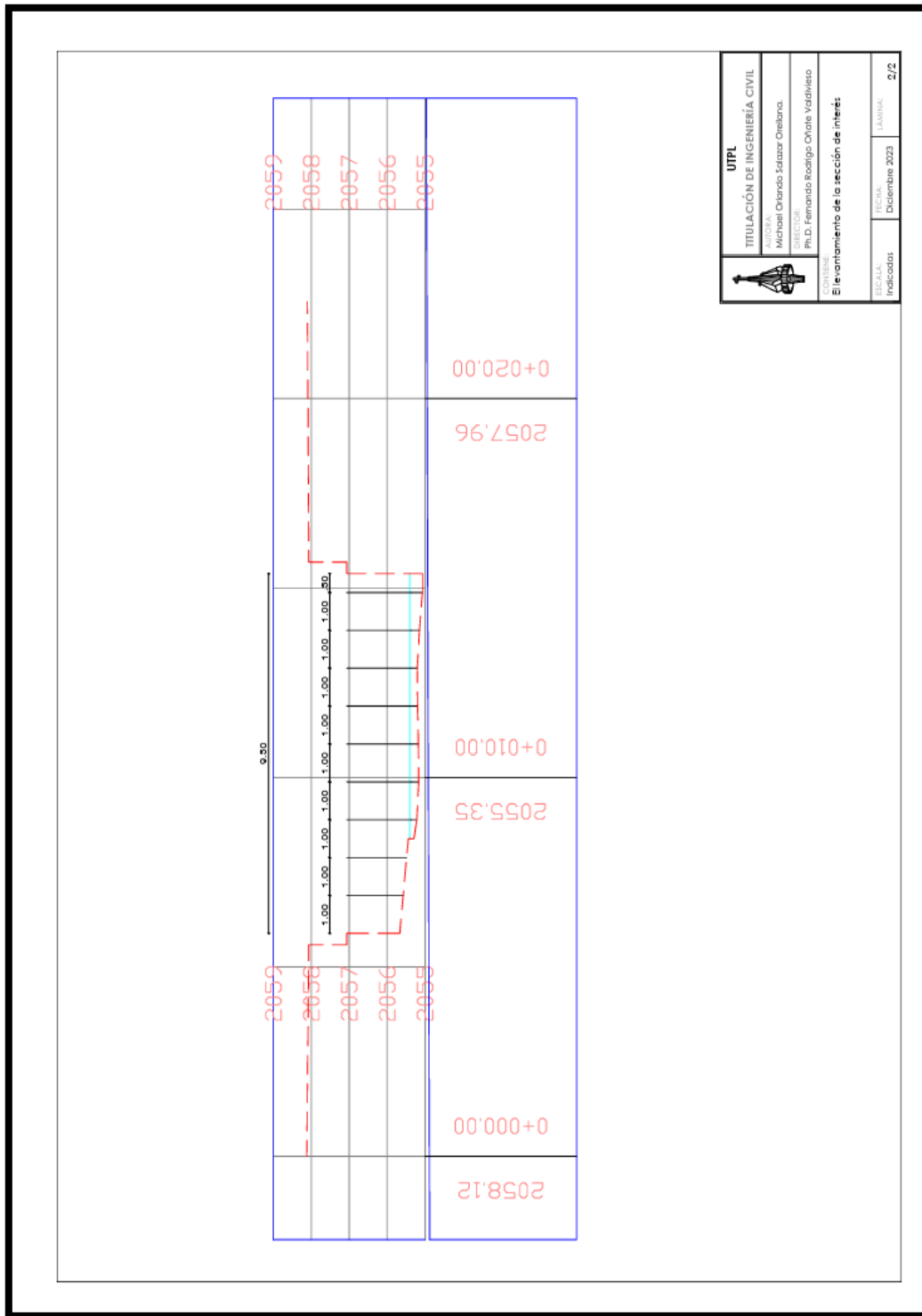


Figura C2

Sección del punto de interés



 <b>UTPL</b> TITULACIÓN DE INGENIERÍA CIVIL	
AUTOR: Michael Orlando Estigarribia	TÍTULO: El levantamiento de la sección de interés
ASISTENTE: Ph.D. Fernando Rodríguez Cordero Valdivieso	FECHA: Diciembre 2023
ESCALA: Indicadas	LÁMINA: 2/2

Figura C3

Área de estudio

