

DISEÑO DE DISPOSITIVO DE SENSADO PARA LAS IDENTIFICACIONES DE
ALERTAS RELACIONADAS CON EL NIVEL DEL AGUA EN LA SUBCUENCA DE
TEUSACÁ

JULIANA PARRA LLORET
JUAN PABLO ROMERO CAMACHO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS LIMPIAS
BOGOTÁ D.C.

2023

DISEÑO DE DISPOSITIVO DE SENSADO PARA LAS IDENTIFICACIONES DE
ALERTAS RELACIONADAS CON EL NIVEL DEL AGUA EN LA SUBCUENCA DE
TEUSACÁ

JULIANA PARRA LLORET
JUAN PABLO ROMERO CAMACHO

Opción Trabajo de Grado

Dirigido por:

Angela María Jaramillo Londoño

Co-Dirigido por Sindy Paola Amaya

Dayam Calderon Rivera

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS LIMPIAS
BOGOTÁ D.C.

2023

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, noviembre de 2023

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre Diana Lloret Alba, y a mi hermana Daniela Parra Lloret por todo el apoyo incondicional que me brindaron durante la maestría. A mi esposo Andrés Steven Morales Rodríguez por siempre creer en mí, apoyarme para el desarrollo exitoso del proyecto y por ser parte de este sueño de ser mejor persona y profesional. También muchos agradecimientos a mi compañero Juan Pablo Romero por recorrer este camino conmigo y culminar este proyecto.

Finalmente a las directoras Angela Jaramillo, Dayam Calderón, y Cindy Paola Amaya, por guiarnos y hacer este sueño posible.

Juliana Parra Lloret

Agradezco a Dios, mis padres María Nelsy Camacho y Jorge Arturo Romero (Q.E.P.D), Mis Abuelos María Julia Reyes de Romero, Juan B. Romero y Felisa Leyton de Camacho (Q.E.P.D) por apoyarme en todo momento y confiar en mí. A mi quería novia María Alejandra Barrios por ser parte de mi vida y para el desarrollo exitoso de este proyecto. También a mis mejores amigos por siempre formar un gran equipo y estar allí cuando más nos necesitamos. A las directoras Angela Jaramillo, Dayam Calderón, y Cindy Paola Amaya, por guiarnos y su disposición en todo momento. Finalmente, y sobre todo a mi gran compañera Juliana Parra Lloret por su trabajo para lograr culminar este proyecto.

Juan Pablo Romero Camacho

Contenido

| | |
|--|----|
| Glosario..... | 10 |
| Resumen..... | 13 |
| Abstract..... | 13 |
| 1. Introducción..... | 14 |
| 2. Objetivos | 15 |
| 2.1. Objetivo general..... | 15 |
| 2.2. Objetivos específicos..... | 15 |
| 3. Antecedentes | 16 |
| 3.1. Sistemas de alertas tempranas en Colombia..... | 16 |
| 3.2. Sistemas de Alerta temprana comunitarios en Colombia..... | 16 |
| 3.3. Instrumentos de gestión integrada del recurso hídrico en Colombia..... | 17 |
| 3.4. Procesamiento de maquina como complemento para los sistemas de alertas tempranas..... | 17 |
| 4. Marco teórico..... | 18 |
| 4.1. Sistemas de alertas tempranas | 18 |
| 4.2. Métodos de medición de caudal | 19 |
| 4.3. Método de área velocidad | 20 |
| 4.4. Curva de gastos o calibración | 21 |
| 4.5. Procesamiento y almacenamiento de datos..... | 22 |
| 4.6. Definición de la alerta de sequía a partir del caudal ambiental | 22 |
| 4.7. Definición de la alerta de inundación a partir de caudales máximos..... | 23 |
| 4.8. Características Paspberry Pi 4 | 24 |
| 4.9. Sensor de Ultrasonido | 24 |
| 4.10. Lenguaje de programación Python. | 24 |
| 4.11. Librerías Pandas y Tkinter..... | 24 |
| 4.12. Bases de datos no relacionales. | 25 |
| 5. Metodología..... | 25 |
| 5.1. Determinación de la alerta de sequía e inundación..... | 27 |
| 5.1.1. Determinación de la alerta de sequía | 27 |
| 5.1.2. Determinación de la alerta de inundación..... | 28 |
| 5.2. Curva de calibración de la sección | 30 |
| 5.3. Requisitos del Hardware..... | 30 |

| | | |
|--------|--|----|
| 5.3.1. | Raspberry Pi | 31 |
| 5.3.2. | Sensor de Ultrasonido..... | 31 |
| 5.3.3. | Cables y conexiones..... | 32 |
| 5.3.4. | Elementos protectores..... | 32 |
| 5.3.5. | Dispositivos de Salida..... | 32 |
| 5.4. | Implementación y características clave del Software..... | 32 |
| 5.4.1. | Pseudo código del sistema de sensado..... | 34 |
| 6. | Análisis y discusión de resultados..... | 35 |
| 6.1. | Características de la subcuenca del río Teusacá | 35 |
| 6.2. | Área de influencia | 35 |
| 6.3. | Alerta de sequia..... | 36 |
| 6.4. | Alerta de inundación | 38 |
| 6.5. | Obtención de la curva de gasto | 42 |
| 6.1. | Descripción general – Interfaz gráfica | 44 |
| 6.2. | Alertas generadas..... | 46 |
| 7. | Impacto social y humanístico del proyecto..... | 48 |
| 8. | Conclusiones..... | 49 |
| 9. | Recomendaciones..... | 50 |
| 10. | Referencias | 51 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Criterios hidrológicos | 28 |
| Tabla 2. Estaciones limnimétricas utilizadas para la obtención de caudal medios diarios | 36 |
| Tabla 3. Frecuencia de caudales medios..... | 37 |
| Tabla 4. Frecuencia de caudales medios..... | 39 |
| Tabla 5. Periodos de retorno..... | 40 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Metodología aplicada la obtención del caudal ambiental | 27 |
| Figura 2. Metodología aplicada para el cálculo de eventos de inundación | 30 |
| Figura 3. Estaciones limnimétricas y punto de monitoreo | 36 |
| Figura 4. Análisis de datos atípicos | 37 |
| Figura 5. Curva de duración | 38 |
| Figura 5. Distribución base o teórica | 39 |
| Figura 7. Distribución normal ajustada | 40 |
| Figura 8. Sección transversal | 41 |
| Figura 9. Curva de calibración | 44 |

LISTA DE IMÁGENES

| | |
|--|----|
| Imagen 1. Sección transversal para medición de caudal | 20 |
| Imagen 2. Sección transversal para medición de caudal | 22 |
| Imagen 3. Flujograma básico para la captura y procesamiento de datos e información | 22 |
| Imagen 3. Sensor de ultrasonido | 32 |
| Imagen 6. Punto de muestreo Progresar..... | 42 |
| Imagen 7. Instrumentos | 43 |
| Imagen 8. Toma de mediciones | 43 |
| Imagen 9. Inicio de interfaz gráfica | 45 |
| Imagen 10. Inicio de medición con parámetros en tiempo real. | 45 |
| Imagen 11. Fin de medición con opción de guardar el archivo en formato de excel. | 46 |
| Imagen 12. Alerta Sequia - Nivel Crítico. | 47 |
| Imagen 13. Caudal considerablemente bajo. | 47 |
| Imagen 14. Posible Riesgo de inundación..... | 48 |

Glosario

Para efectos de la lectura de este documento, se presente a continuación los términos y significados correspondientes, lo cual permitirá una mejor comprensión de los contenidos del documento:

Sistema de Alertas Tempranas: Un sistema de alerta temprana (SAT) es un conjunto integrado de herramientas que permite identificar, monitorear y alertar anticipadamente sobre posibles amenazas o riesgos. Consta de cuatro componentes principales: conocimiento de los riesgos y monitoreo, servicio de pronóstico y alerta, diseminación efectiva de alerta, y capacidad de respuesta.

Estación hidrometeorológica: Una estación hidrometeorológica es una instalación equipada con instrumentos que permiten medir y monitorear variables climáticas e hidrológicas de una zona determinada. Consta de diferentes componentes:

- Sensores que miden parámetros como precipitación, temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento. Están conectados a un sistema de adquisición de datos.
- Pluviómetros y pluviógrafos que registran los niveles de lluvia y patrones de precipitación.
- Sensores de nivel que miden los cambios en el nivel de ríos, embalses y acuíferos subterráneos.
- Medidores de caudal que calculan el volumen de agua que fluye en corrientes superficiales.
- Equipos meteorológicos que monitorean variables como radiación solar, evaporación, etc.

Criterios hidrológicos: se refiere a un principio o norma técnica que se aplica en el campo de la hidrología para el estudio del ciclo hidrológico y la gestión de los recursos hídricos.

Caudal ecológico: caudal mínimo que se debe mantener en un río para preservar los ecosistemas y especies que dependen de él. Es un criterio para la gestión sostenible de ríos y cuencas.

Caudal de inundación: un caudal de inundación es el máximo volumen de agua que fluye por un río o canal durante un evento de crecida extrema. Se expresa generalmente en metros cúbicos por segundo (m³/s) o litros por segundo.

Ocurre cuando los niveles de precipitación son tan altos que superan la capacidad natural del cauce, desbordando las riberas e inundando las zonas aledañas al curso de agua. Puede deberse a lluvias intensas, deshielo acelerado o marejadas ciclónicas.

Los caudales de inundación representan un alto riesgo para comunidades cercanas a ríos o costas. Por ello es crucial monitorearlos y modelarlos para elaborar pronósticos y sistemas de alerta temprana. También es necesario considerarlos en el diseño de puentes, canales y otras obras de infraestructura hídrica, estableciendo resguardos para caudales máximos.

Periodo de retorno: intervalo de tiempo promedio en que se espera que se iguale o exceda un evento hidrológico extremo, como una crecida o sequía. Sirve para diseñar infraestructura y estimar riesgos.

Molinete: un molinete es un instrumento hidrométrico utilizado para medir la velocidad y caudal de corrientes de agua superficiales como ríos, canales y arroyos. Consiste en un rotor con álabes unido a un eje vertical que gira al ser empujado por la corriente. Los componentes principales son:

- Rotor: puede tener forma de hélice o de copa con álabes. Es la parte que gira con el paso del agua.
- Eje y soporte: sostienen el rotor en posición vertical sumergido en el flujo.
- Mecanismo de medición: registra el número de vueltas del rotor en un tiempo determinado. Puede ser visual, mecánico o electrónico.
- Peso o empuje: mantiene al molinete fijo en una posición estable dentro del flujo.

Sensor de nivel: es un dispositivo que se utiliza para medir y monitorear la altura o profundidad de un líquido dentro de un depósito, canal, río o cualquier otra masa de agua. Existen diferentes tipos de sensores de nivel: flotadores, medidores de presión hidrostática, ultrasonido, radar, entre otros. Cada uno posee un principio de funcionamiento distinto.

Los sensores de nivel entregan mediciones del nivel del agua en tiempo real, las cuales son registradas y transmitidas a un sistema de adquisición de datos. Esta información es valiosa para controlar procesos industriales, calcular volúmenes de agua, generar alertas de crecidas o sequías, y automatizar operación de compuertas, bombas y canales.

Los registros históricos de niveles también son útiles para estudios hidrológicos e hidráulicos. En resumen, los sensores de nivel son instrumentos indispensables para el monitoreo y gestión eficiente de los recursos hídricos.

DataFrame: un DataFrame es una estructura de datos tabular muy utilizada en el análisis de datos con Python. Es similar a una hoja de cálculo o tabla de una base de datos. El DataFrame permite almacenar y manipular datos con diferentes tipos de columnas, como números enteros, strings, fechas, etc. Cada columna representa una variable y cada fila corresponde a una observación o registro.

Los DataFrames hacen muy eficiente realizar operaciones como seleccionar, ordenar, agrupar filas según valores de una columna, aplicar funciones a columnas enteras y joining con otros DataFrames.

En Python se crean DataFrames principalmente con las librerías Pandas y PySpark. Tienen métodos para leer y escribir en CSV, JSON, SQL, etc. Facilitan tareas como la limpieza, transformación y análisis exploratorio de datos.

Tkinter de Python: Tkinter es una biblioteca estándar de Python que permite crear interfaces gráficas de usuario (GUI) de forma sencilla. Proporciona una colección de widgets como botones, cuadros de texto, labels, menús, etc. que se pueden utilizar para construir la GUI.

Tkinter está basada en la biblioteca Tcl/Tk, por lo que hereda su versatilidad y portabilidad entre los diferentes sistemas operativos. Para crear la interfaz basta con importar Tkinter e instanciar una ventana principal, sobre la cual se agregan los diferentes widgets deseados de forma programática o declarativa.

Las GUI creadas con Tkinter pueden responder a eventos como clicks de ratón, permitiendo dar interactividad a las aplicaciones. Resulta ideal para crear interfaces amigables de forma rápida tanto en scripts de Python como en programas más complejos. Es una herramienta muy útil para crear prototipos o interfaces básicas sin necesidad de mayor complejidad.

Raspberry Pi: Raspberry Pi es una pequeña computadora de bajo costo del tamaño de una tarjeta de crédito, desarrollada por la Fundación Raspberry Pi en Reino Unido. Utiliza un procesador ARM y tiene capacidades similares a un ordenador personal, permitiendo ejecutar diversos sistemas operativos como Raspbian, Ubuntu, Windows 10 IoT, entre otros.

Cuenta con puertos GPIO que facilitan la conexión de sensores, cámaras, motores y otros dispositivos electrónicos. Debido a su reducido tamaño, bajo consumo eléctrico y amplia capacidad de uso, Raspberry Pi es muy popular para proyectos de electrónica, robótica, domótica, Internet de las Cosas (IoT) y todo tipo de aplicaciones embebidas.

Impacto ambiental: Un impacto ambiental es la alteración, modificación o cambio en el ambiente, en uno o más de sus componentes, provocada por una acción humana. Por ejemplo, la construcción de una carretera en un bosque genera impactos como remoción de vegetación, incremento de ruido, mayor escorrentía de agua y fragmentación de hábitats.

Bases de datos no relacional: también llamadas NoSQL, son un tipo de sistemas de gestión de bases de datos que no usan el modelo relacional tradicional basado en tablas con filas y columnas. En su lugar, emplean modelos de datos alternativos como documentos, grafos, clave-valor, etc.

Resumen

Este proyecto aborda la preocupante escasez de agua en la subcuenca de Teusacá, causada por el cambio climático y el crecimiento poblacional. La falta de sistemas de alerta temprana para gestionar este recurso vital ha creado la necesidad de desarrollar un sistema de sensores de bajo costo. El objetivo es diseñar un sensor, implementar un algoritmo de recolección de datos y alertas, y proporcionar una interfaz comunitaria. Este proyecto busca garantizar un suministro de agua más eficiente, beneficiando a la comunidad de Teusacá y fomentando la gestión sostenible del recurso hídrico.

Abstract

This project addresses the pressing issue of water scarcity in the Teusacá sub-basin, driven by climate change and population growth. The lack of early warning systems to manage this vital resource has created the need to develop a low-cost sensor system. The objective is to design a sensor, implement a data collection and alert algorithm, and provide a community interface. This project aims to ensure a more efficient water supply, benefiting the Teusacá community and promoting sustainable water resource management.

1. Introducción

El trabajo de grado Diseño de Dispositivo de Sensado para las Identificaciones de Alertas Relacionadas con el Nivel del Agua en la Subcuenca de Teusacá, representa la culminación de un proceso de investigación que ha llevado un periodo de tiempo significativo desde su planeación hasta su ejecución. En esta investigación parte de la creciente preocupación por el cambio climático, y el crecimiento poblacional que en los últimos años han puesto en riesgo los recursos hídricos del planeta.

La subcuenca de Teusacá se ve afectada por las diversas actividades económicas de la zona las cuales requieren el suministro y abastecimiento de agua potable de manera continua lo que crea la necesidad de un sistema de alertas tempranas para fortalecer la gestión y monitoreo del agua. Este proyecto busca implementar un diseño de sistema de sensado para recopilar datos de niveles de agua, y mediante la caracterización de un modelo poder emitir alertas tempranas del caudal de la subcuenca.

Es de conocimiento que a pesar de los diferentes planes de gestión ambiental de las diversas entidades ambientales a nivel nacional no son suficientes para monitorear la gran mayoría de recursos hídricos del país ya que se conoce que la instrumentación de las cuencas suele ser demasiado costosa, es así que en este proyecto se dan las bases para responder la pregunta: ¿Cuál es el mejor tipo de sensor que se puede instalar en la subcuenca Teusacá, para la detección de niveles de agua y generación temprana de alertas?.

Es así que los objetivos se diseñaron para construir un prototipo de sistema de sensado en donde se implementa un algoritmo capaz de procesar y almacenar los datos en tiempo real permitiendo así crear un sistema de información capaz de tomar decisiones al momento de identificar una alerta potencial, todo se gestiona mediante una interfaz gráfica la cual puede ser manipulada por cualquier persona capacitada en el uso de la herramienta. Por otro lado se entiende que el proyecto tiene pertinencia social al beneficiar a la comunidad de Teusacá y al acueducto Progresar E.S.P. Además, promueve el uso sostenible del recurso hídrico.

Finalmente es importante destacar que la metodología comprende la investigación, el diseño del sistema de sensado, la implementación del sistema y ajustes, y la implementación de alertas tempranas. El sistema se ubicará en un punto estratégico de monitoreo.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Implementar un sistema de información de sensado de bajo costo, para generar alertas tempranas y fortalecer la toma de decisiones con respecto a los niveles de agua de la subcuenca Teusacá.

2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un prototipo de sensor a partir de una tarjeta embebida, y un sensor, para la recolección de datos relacionados a niveles de agua.
- Implementar un algoritmo que permita almacenar la información haciendo uso de base de datos relacionales o no relacionales.
- Procesar los datos almacenados para la construcción de un modelo que permita la emisión oportuna de alertas tempranas.
- Elaborar una interfaz gráfica para la interpretación de los datos que facilite la interacción entre el sistema de sensado y el usuario final.

3. Antecedentes

3.1. Sistemas de alertas tempranas en Colombia

A nivel mundial se han logrado crear grandes redes de información las cuales hacen uso de tecnologías que permiten monitorear los fenómenos hidrometeorológicos. Dichas redes están compuestas por tecnologías, las cuales han sido capaces de evolucionar de tal forma que permiten la recolección de información relacionada, en este caso con los fenómenos que afectan los cuerpos hídricos, como herramienta clave para la planeación y el manejo del recurso hídrico (Domínguez, E., Lozano, S 2014).

Actualmente y en el contexto colombiano la gestión del riesgo también son tema consignados en la política pública Colombiana en el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastre (PNGRD) y el Plan Nacional de Desarrollo 2018 – 2022 (Ochoa, C., Euscátegi, C., & Martínez, S, 2021). Además, gracias a convenios internacionales, se ha logrado la implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT), las cuales monitorean recursos hídricos, un ejemplo de ello es la red SIATA, implementada en el valle de Aburrá, esta red registra datos hidrometeorológicos y al procesarlos permiten tener una información relevante que reporta en tiempo real, a gestores de riesgo, UMGRD, organismos de respuesta y aquellos que participan en la toma de decisiones, para prepararse. (SIATA, 2022).

Otro gran proyecto relevante es el sistema de Alerta de Bogotá que administra el IDIGER, sin embargo muchas de los municipios aledaños a la capital desconocen este tipo de sistemas y tan poco tienen como acceder a ella (Instituto Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático, 2023).

Esto último permite inferir que existen sistemas vigilando los principales recursos hídricos del país, ahora bien, del mismo modo también existen casos de municipios o regiones en donde no existe control o monitoreo alguno de estos recursos hídricos y esto genera un riesgo latente para las poblaciones que viven dentro de esos municipios (UNGRD, 2016).

3.2. Sistemas de Alerta temprana comunitarios en Colombia

Si bien se han desarrollado Sistemas de Alertas Temprana en Colombia, no son sistemas enfocados a predecir a lo largo de una cuenca alertas de sequía e inundación para comunidades que realizan actividades económicas con el recurso hídrico, y que a su vez proteja tal recurso. También los sistemas de alerta que se han implementado en Colombia son de gran escala y de alto costo, lo que los hace inviables para muchos municipios del país.

No obstante, los Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios se enfocan en salvar vidas humanas y se entienden como complemento a las alertas de carácter más

general. Ahora, sin importar el grado de tecnificación del sistema este debe estar basado en la comunidad e impulsado por la comunidad, para ello es necesario que la misma comunidad se involucre en el desarrollo del sistema y entienda la importancia de conocer los tipos de alertas y cómo actuar ante cada una (NGRD, 2016). Un ejemplo de este tipo de alertas son los SAT ubicados en 21 comunidades de alto riesgo en el Valle de Aburrá. Algunos de dichos sectores son: la Inmaculada en el municipio de la Estrella, las veredas Primavera en Barbosa y Guadalajara en Copacabana (Metropolitana Valle de Aburrá, 2023).

3.3. Instrumentos de gestión integrada del recurso hídrico en Colombia

A partir del estudio realizado por la universidad del Valle, Cali, se determinó que en Colombia, si bien, los prerequisites centrales de una Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) efectiva no se han puesto en marcha, en la práctica no se tiene un reconocimiento en el marco legal, y la participación de la comunidad en la gestión del agua no está formalmente definida, es decir que Colombia carece de la formación de comités de cuenca que incluyan a la comunidad en término de la gestión del recurso hídrico (Maroneze y col., 2014).

Además, existe una variedad de herramientas de GIRH que se usan en la práctica, parte de las cuales son los propios Comités de Cuenca “informales”. Sin embargo, la crítica sobre estas asociaciones de usuarios es que se estructuran para defender los intereses de grupos de usuarios poderosos (como los productores de caña), dejando por fuera usuarios como pequeños agricultores o sistemas de abasto comunitario (Maroneze y col., 2014).

3.4. Procesamiento de maquina como complemento para los sistemas de alertas tempranas

Para los sistemas de alertas tempranas existen actualmente una gran variedad de aplicaciones en donde la intervención humana es mínima, tal como para el caso de fenómenos hidrológicos que son de interés para poder explorar distintas maneras de generar alertas a partir de los datos recolectados en un afluente hídrico. En la actualidad se están usando los sistemas de información para generar sistemas de alertas, estos sistemas de información no son más que algoritmos desarrollados con la intención de poder realizar una toma de decisiones partiendo datos previamente recolectados, un ejemplo de un modelo de procesamiento computacional es el modelo ARIMA aplicado para el monitoreo y pronóstico en afluentes en Colombia. Este modelo por lo general puede ser aplicado con propósitos predictivos, en los fenómenos hidrometeorológicos, los sistemas de alertas pueden llegar a hacer uso de estos modelos ya que al cumplir con las características del modelo computacional puede ser aplicado para obtener pronósticos confiables y tomar decisiones (Puerta y col., s.f)

4. Marco teórico

4.1. Sistemas de alertas tempranas

En esta oportunidad es importante poder identificar que es un sistema de alertas tempranas (SAT). Un SAT siempre va a tener una gran significancia en el desarrollo de una sociedad, esto debido a que es una herramienta de gestión de riesgo para la prevención y mitigación de fenómenos que puedan afectar a una población, varios ejemplos podrían ser algunos fenómenos naturales o los fenómenos antrópicos. El SAT, no solo permitirá identificar fenómenos mediante herramientas tecnológicas, sino que también permitirán recolectar información la cual pueda ser almacenada y posteriormente procesada con la esperanza de lograr identificar patrones que permitan describir mejor cualquier fenómeno potencial sin importar su naturaleza (EWC III, 2016). Ahora bien, se puede establecer que el objetivo del SAT es el pronóstico temprano de las posibles amenazas que puedan afectar a las poblaciones vulnerables, en cuanto a el interés gubernamental se espera que los SAT permitan articular diferentes entidades en pro a la toma de decisiones que conlleven a la prevención y mitigación de dichas amenazas (Cruz, 2009).

Si se desea trabajar un SAT, como sistema que recolecta y procesamiento de información, se puede pensar en usar herramientas no convencionales para el tratamiento de la información. En esta oportunidad se plantea el uso de técnicas que han tomado relevancia en los últimos años, un ejemplo de ello es el procesamiento de máquina, esta técnica de procesamiento computacional es una ciencia la cual involucra un procesamiento de datos saliéndose de la programación computacional convencional. Una de las técnicas que se suele usar para trabajar este tipo de datos son los sistemas de inferencia, los cuales son una rama de la inteligencia artificial, y está dedicada al desarrollo e implementación de algoritmos capaces de extraer patrones de diferentes tipos de datos. Es importante resaltar que cada algoritmo al procesar datos categorizados, será capaz de obtener una solución acorde a los patrones de esos datos, pero ese modelo creado no será capaz de procesar datos que contengan diferentes patrones en su corpora de datos.

Para cualquier modelo de inteligencia artificial siempre será indispensable llevar a cabo numerosas tareas relacionadas al pre procesamiento de la información. Este pre procesamiento son tareas relacionadas a la identificación de la fuente de datos, su limpieza e identificación de datos sesgados que puedan alterar el comportamiento del modelo, y sus estadísticas descriptivas, las cuales permitirán obtener algunas conclusiones iniciales del comportamiento de los datos.

Ahora bien, los sistemas de inferencia son métodos aplicados que se suelen usar para la interpretación de un resultado basándose en datos, estas condiciones se

basan en reglas de inferencia, las cuales son establecidas por expertos que por lo general son sujetos que poseen una amplia experiencia en un tema determinado.

También existe el sistema difuso que se interpreta como una caja blanca, la cual partiendo de datos de entrada se obtiene una respuesta basada en reglas, donde se realiza el proceso de las variables que determinan un conjunto relacional.

Existen algoritmos de inferencia que son usados para resolver problemáticas variadas, como por ejemplo para la toma de decisiones relacionadas en la generación de alertas. Se pueden usar algunos algoritmos de los sistemas de inferencia más conocido tales como los sistemas difusos o los sistemas de recomendaciones (Viedma, 2016).

Ahora bien, para generar dichos sistemas, bien sean difusos o de recomendaciones, es necesario tener valores de referencia, en este caso, determinar cuándo se debe generar dicha alerta, ya sea porque el nivel del agua es más bajo comparado con el caudal ambiental o cuando es mucho mayor a este. A continuación se realiza una introducción con respecto a la estimación de caudales y definición de los tipos de alertas que formaran parte del presente SAT.

4.2. Métodos de medición de caudal

El caudal, que representa el volumen de agua o flujo que atraviesa un punto en un determinado período, se calcula mediante diversos métodos, los cuales se dividen en mediciones directas e indirectas (Anónimo, s.f).

Los métodos directos comprenden:

- Método Área-Velocidad: Este enfoque implica la medición del área de la sección transversal del cauce y la velocidad del flujo en ese punto (Anónimo, s.f).
- Dilución con trazadores: Se basa en la introducción de sustancias trazadoras en el agua y el seguimiento de su dispersión para calcular el caudal (Anónimo, s.f).

Por otro lado, los métodos indirectos incluyen:

- Estructuras hidráulicas: Emplean la geometría de las estructuras construidas para medir el flujo, como canales y vertederos (Anónimo, s.f).
- Método Área-Pendiente: Utilizan la relación entre el área del cauce y la pendiente del terreno para estimar el caudal (Anónimo, s.f).

Dado que llevar a cabo mediciones de caudal de forma continua a lo largo del tiempo resulta costoso, se opta por establecer una relación entre el caudal y el nivel del agua. Esto se debe a que la medición del nivel del agua resulta ser un procedimiento

más sencillo. Las curvas que representan esta relación entre los niveles de agua y el caudal se conocen como "curvas de gasto". (Ideam e Invemar, 2021). Sin embargo, para construir estas curvas, es necesario emplear uno de los métodos mencionados anteriormente para medir las velocidades y estimar los caudales. En este trabajo, se ha optado por el método Área-Velocidad, que se detallará a continuación.

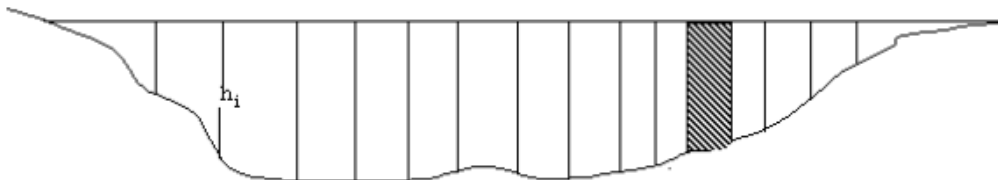
4.3. Método de área velocidad

Este método consiste en medir en un área transversal del cauce las velocidades de flujo con las cuales se obtiene el caudal. Para la selección de puntos se deben tener los siguientes criterios de selección para la medición de niveles de agua y caudales (Ideam e Invemar, 2021):

1. La sección de medición debe ser un tramo recto de la corriente. El tramo debe ser unitario
2. En lo posible la sección debe ser profunda para garantizar la medición de niveles máximos.
3. La pendiente longitudinal del cauce debe ser uniforme El río debe ser de geometría regular y un cauce estable.
4. No deben presentar confluencias cercanas que generen remanso.
5. La geología del terreno debe facilitar las mediciones.

Ahora bien, una vez definida la sección transversal acorde a los criterios mencionados anteriormente se realiza un levantamiento de topográfica del área a fin de dividir la sección en tramos iguales, como se observa en la Imagen 1 (García, M, s.f).

Imagen 1. Sección transversal para medición de caudal



Fuente: (Anónimo, s.f).

En cada ubicación vertical, es esencial llevar a cabo mediciones de velocidad, sin embargo, la profundidad de la vertical determina los porcentajes específicos a los cuales se debe medir la velocidad en relación con la profundidad total. Este cálculo se efectúa de la siguiente manera (García, M, s.f):

- Cuando la profundidad es menor a 70 cm, se mide la velocidad al 60% de la profundidad.
- En el rango de profundidades entre 70 cm y 120 cm, la medición abarca desde el 20% hasta el 80% de la profundidad.

- Si la profundidad es igual o superior a 120 cm, se deben medir velocidades a tres niveles: 20%, 60%, y 80% de la profundidad total.

Una vez registradas las velocidades de acuerdo con estas directrices, se procede al cálculo de la velocidad media en cada ubicación vertical de la siguiente manera (Garcia, M, s.f).

Ecuación 1. Velocidad media de la vertical

$$V_i = \frac{V_{20\%} + V_{60\%} + V_{80\%}}{3}$$

Seguido a ello, se calcula el área de acuerdo a la geometría que forma la vertical para calcular el caudal en dicho punto (Garcia, M, s.f).

Ecuación 2. Caudal de la sección formada con la vertical

$$Q_i = V_i * A_i$$

Por último, la suma de los caudales en cada punto será el caudal total de la sección transversal del cauce medido (Garcia, M, s.f).

Ecuación 3. Caudal total de la sección vertical

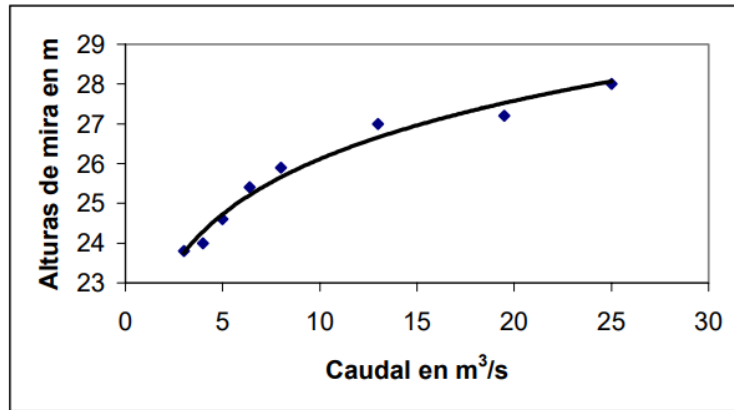
$$Q_t = \sum Q_i$$

4.4. Curva de gastos o calibración

Después de completar la medición del caudal, un procedimiento comúnmente denominado aforo con molinete, se procede a la creación de la curva de gastos. Esta curva puede ser elaborada a través de una ecuación o mediante una tabla de datos que contenga pares ordenados.

El propósito principal de llevar a cabo el aforo en una corriente en una sección específica es establecer la curva de calibración o de gasto de dicha sección. Esta curva desempeña un papel fundamental al transformar los niveles de agua obtenidos mediante sensores en valores de caudal. Para lograrlo, como se ha mencionado previamente, es esencial realizar aforos a lo largo de un extenso período de tiempo, lo que permite abarcar tanto niveles bajos como elevados del río (Prieto y Velásquez, 2016). Un ejemplo de la gráfica que se debe obtener es la siguiente:

Imagen 2. Sección transversal para medición de caudal

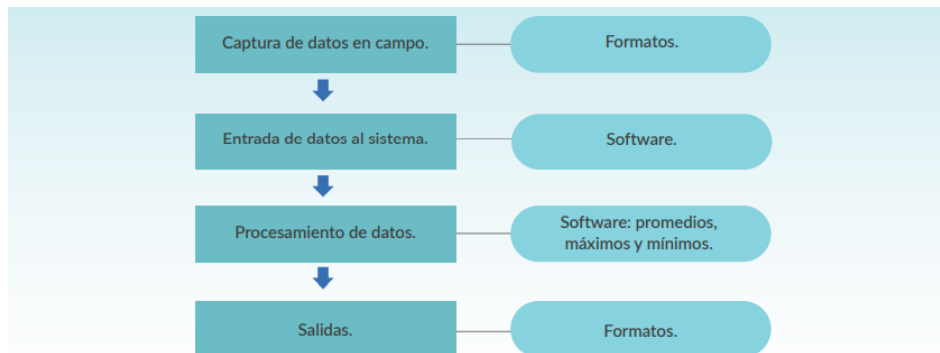


Fuente: (Anónimo, s.f).

4.5. Procesamiento y almacenamiento de datos

Una vez realizadas las actividades de campo y capturado o registrado los datos, estos deben ser compilados por medio de un software para su procesamiento y posterior resultado, es decir la salida de los datos. En la imagen 1 es posible observar el flujograma básico para la captura y procesamiento de datos e información acorde al protocolo del IDEAM para el monitoreo y seguimiento del agua (Ideam e Invemar, 2021).

Imagen 3. Flujograma básico para la captura y procesamiento de datos e información



Fuente: elaboración propia

4.6. Definición de la alerta de sequía a partir del caudal ambiental

Entendiendo que el caudal ambiental es el flujo mínimo que se debe mantener en un sistema hidrológico para garantizar el funcionamiento del sistema y los servicios ecosistémicos que este presta, se utiliza dicho criterio para definir la alerta de sequía a partir del cálculo del caudal ambiental (Cantera, J. Carvajal, & Castro, L, 2009).

La alerta de sequía en un sistema de alertas tempranas es fundamental para poder planificar las actividades socio económicas que se desarrollan a lo largo del cauce. Para tal fin y acorde a la Guía Metodológica del IDEAM se define la alerta de sequía en el sistema a partir del caudal ambiental. El caudal ambiental de un cuerpo es construir una curva de duración a través de un historico significativo de caudales medios diarios minimo de 10 años. Esta curva permite obtener en el eje “y” el caudal (m^3/s) y en el eje “x” el porcentaje de días acumulados (Ideam, 2017).

Seguido a lo anterior y de acuerdo a la metodología, el caudal que representa el caudal ambiental, es el valor correspondiente a los 95% de días acumulados o a la ecuacion que mejor se ajuste a la curva, generalmente las ecuaciones polinomiales y potenciales son las que mejor describe dicho comportamiento (Ideam, 2017).

Cabe recalcar que para el procesamiento de datos se recomienda la difinición de criterios hidrológicos que permitan obtener el menor porcentaje de error en el calculo, entre ellos se encuentra: calidad de la información hidrométrica y consistencia de la propuesta. La calidad de la información hidrometrica hace referencia a el número de estaciones minimas necesarias para construir una curva de duración, al igual que el historico minimo de 10 años de caudales, por otra parte, la consistencia de la propuesta consiste en definir el criterio de selección del caudal ambiental (Pinilla, G., Eramos, A., & Camacho, L, 2014). De esta forma es posible definir la alerta de sequía para un sistema de alertas tempranas.

4.7. Definición de la alerta de inundación a partir de caudales máximos

La alerta de inundación se basa en un proceso que implica recopilar datos históricos de los caudales máximos diarios durante un período de al menos 10 años. Estos datos se utilizan para calcular los caudales máximos medios a lo largo de varios años, que sirven como la base para determinar los caudales en diferentes periodos de retorno según las especificaciones del INVIAS. Estos periodos de retorno suelen ser de 2.5 años, 10 años, 25 años, 50 años y 100 años (Gamba, J, & Gonzalez, J, 2015).

Para identificar estos eventos hidrológicos, se procede a seleccionar una distribución teórica que se ajuste a los datos recopilados. Luego, se realiza una prueba de bondad de ajuste para determinar cuál es la distribución teórica que mejor se adapta a los datos históricos. Los modelos matemáticos que utiliza el software para realiza la prueba son:

- Normal
- LogNormal
- Exponential
- Gamma
- Pearson III
- Log Pearson III

Una vez que se ha identificado la distribución teórica más adecuada, se utiliza la ecuación correspondiente a esta distribución para calcular los caudales en los periodos de retorno especificados (Gamba, J, & Gonzalez, J, 2015).

En resumen, la alerta de inundación se basa en el análisis de datos históricos de caudales máximos, la identificación de la distribución teórica que mejor se ajusta a estos datos y el uso de esta distribución para calcular los caudales en diferentes periodos de retorno definidos por el INVIAS (Gamba, J, & Gonzalez, J, 2015).

Finalmente, se utiliza el software HEC-RAS utilizando el perfil de la cuenca y los periodos de retorno para realizar la modelación y analizar cuales caudales máximos pueden generar desbordamiento en la subcuenca y así mismo establecer la alerta de inundación (Gamba, J, & Gonzalez, J, 2015).

4.8. Características Raspberry Pi 4

Raspberry Pi 4: La Raspberry Pi 4 es una placa embebida de bajo costo y alto rendimiento, se utiliza en una variedad de aplicaciones, desde la automatización hasta la robótica y la educación. La Raspberry Pi 4 tiene un procesador de cuatro núcleos a 1,5 GHz, 1 GB, 2 GB o 4 GB de RAM, y soporte para video 4K (Rasperry). Además, la Raspberry Pi 4 tiene una gran cantidad de puertos de entrada y salida, lo que la hace ideal para proyectos de electrónica y robótica (Solé, 2021).

4.9. Sensor de Ultrasonido

Este dispositivo utiliza ondas sonoras de alta frecuencia para medir la distancia entre el punto de origen (Sensor), hasta un objetivo. Estos dispositivos comúnmente son usados en proyectos de robótica, y automatización, para la detección de obstáculos y la medición de la distancia (Freaks, 2020).

4.10. Lenguaje de programación Python.

Este lenguaje interpretado de alto nivel es comúnmente utilizado en una variedad de aplicaciones, desde la ciencia de datos, bigData, hasta la inteligencia artificial. Python es muy conocido por su sintaxis clara y sencilla lo que permite facilitar su implementación y entendimiento, esto sin contar la variedad de librerías las cuales permiten facilitar los desarrollos en diferentes aplicaciones (Lutz, 2001).

4.11. Librerías Pandas y Tkinter

Las librerías son usualmente usadas para mejorar en gran medida la lógica de programación, es código pre compilado y almacenado que permite interactuar la

información de una manera más dinámica. Pandas es una librería de datos la cual es capaz de abstraer la información y organizarla en una variable propia que puede ir interactuando en tiempo real para así al final se exportada como un tipo de archivo comúnmente utilizado como el formato Excel, o CSV. Por otro lado TKinter es otra librería pero enfocada al desarrollo Frontend, está es capaz de crear interfaces gráficas de usuarios (GUI), para interactuar visualmente con el usuario final (Minguez, 2022).

4.12. Bases de datos no relacionales.

Las bases de datos no relacionales son una alternativa a las bases de datos relacionales tradicionales. A diferencia de las bases de datos relacionales, las bases de datos no relacionales no utilizan tablas para almacenar datos. En su lugar, utilizan una variedad de estructuras de datos, como documentos y gráficos, para almacenar información. Las bases de datos no relacionales son especialmente útiles para aplicaciones que requieren una escalabilidad horizontal y una alta disponibilidad .

5. Metodología

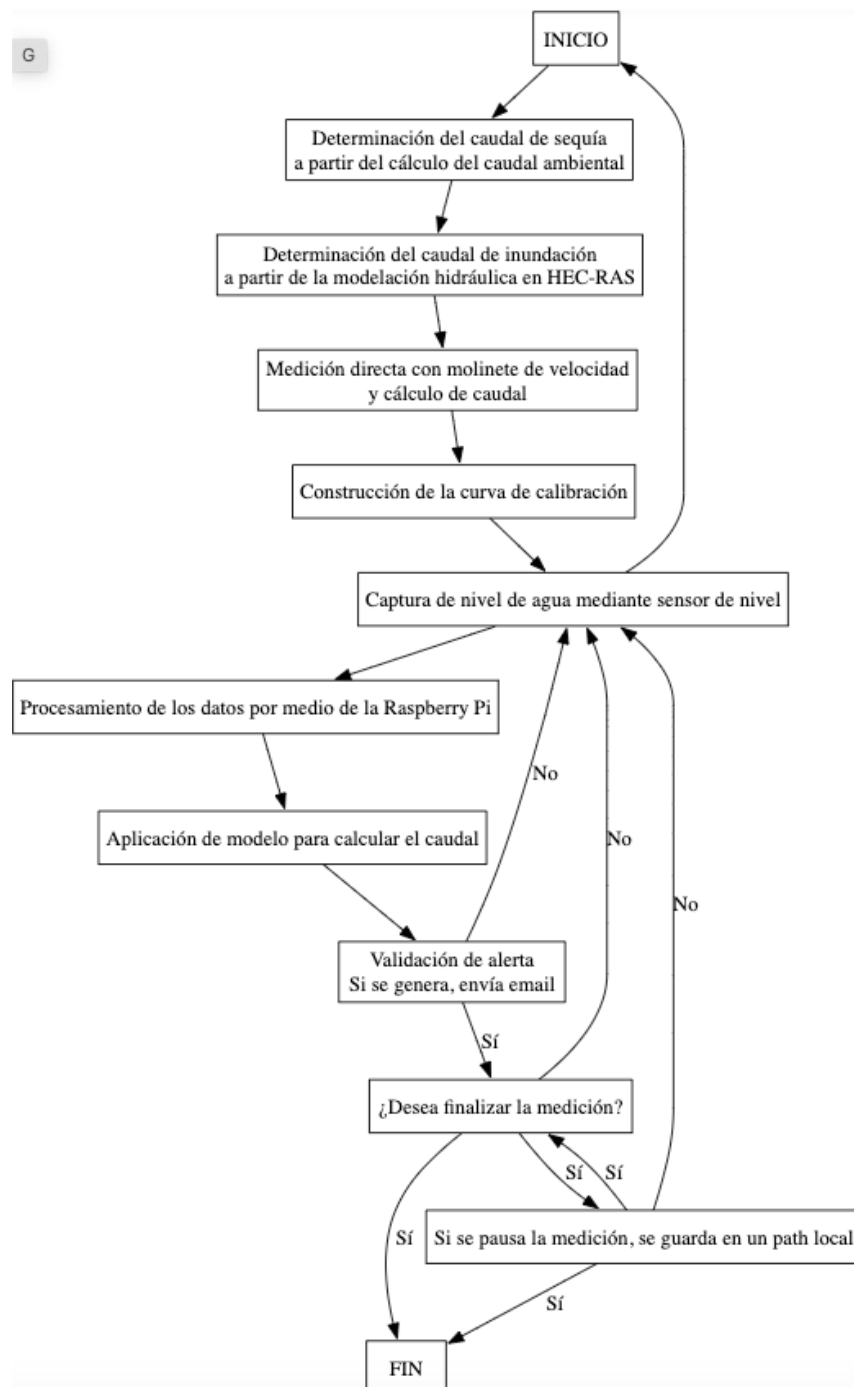
El propósito del presente trabajo consiste en la implementación de un sistema de alerta temprana para inundaciones y sequías en la cuenca baja de la subcuenca de Teusacá. Con este objetivo en mente, se llevó a cabo la definición de los datos de entrada que permitieron calibrar el sensor y, por consiguiente, el sistema de alertas.

El primer paso en este proceso consistió en identificar las alertas que se ajustaran a las características específicas de la cuenca. Esto se hizo con el fin de generar alarmas en dos situaciones clave: cuando el caudal es inferior al caudal ambiental, y cuando el caudal es capaz de provocar desbordamientos, de acuerdo a la morfología del cuerpo de agua.

Una vez que se establecieron los valores y las alertas tempranas necesarios para el sistema, se procedió a realizar mediciones y la toma de datos en el campo para su posterior procesamiento y calibración con el sensor.

A continuación, se proporciona un desglose detallado de cada una de las fases que contribuyeron a definir los datos de entrada para el sistema de alertas y posteriormente para la configuración del software.

Imagen 4. Proceso para la Medición, Validación de Caudales, y procesamiento de datos para el SAT



Fuente: elaboración propia

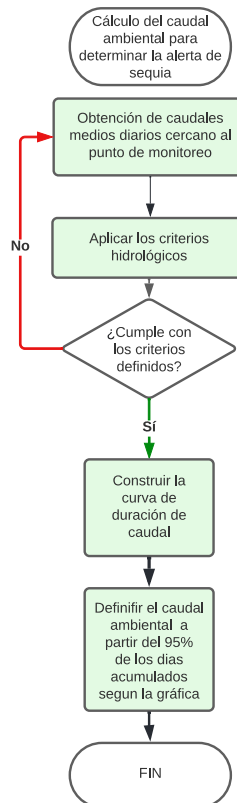
5.1. Determinación de la alerta de sequía e inundación

Las alertas consideradas relevantes se han determinado en base a aquellas que resultan más representativas en un Sistema de Alertas Tempranas diseñado para abordar los significativos desafíos que el cambio climático plantea en relación al uso del agua. En el contexto específico de la subcuenca de Teusacá, donde el recurso hídrico del cauce principal se emplea tanto para el suministro de agua potable como para actividades agropecuarias, como la ganadería y los cultivos, es imperativo establecer un sistema de alertas tempranas que pueda generar dos tipos de alarmas: una para advertir sobre sequías y otra para alertar sobre inundaciones.

5.1.1. Determinación de la alerta de sequía

La generación de alertas por sequía en el sistema se basó en una serie de criterios hidrológicos. Estos criterios se definieron a partir de un artículo de investigación publicado por Pinilla, G., Eramos, A., y Camacho, L, el cual se centra en la estimación del caudal ambiental en proyectos con licencia otorgada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en Colombia. La metodología empleada para la obtención del caudal ambiental se define a continuación.

Figura 1. Metodología aplicada la obtención del caudal ambiental



Fuente: elaboración propia

En lo que respecta a los criterios hidrológicos aplicados, se han definido tres aspectos fundamentales:

1. Primer Criterio: Información Hidrométrica. Este criterio establece el número mínimo de estaciones necesarias para la obtención de caudales medios diarios.
2. Segundo Criterio: Calidad de la Información. Se evalúa la confiabilidad y se realiza el llenado de datos faltantes como parte de este criterio, asegurando la integridad de la información.
3. Tercer Criterio: Consistencia de la Propuesta. Este criterio se basa en la metodología previamente mencionada, garantizando la coherencia y robustez de la propuesta en su conjunto.

Estos tres criterios desempeñan un papel fundamental en la evaluación de los aspectos hidrológicos involucrados.

Tabla 1. Criterios hidrológicos

| Criterio | Definición | Propuesta |
|------------------------------|--|--|
| Información hidrométrica | Número mínimo de estaciones Tipo de información requerida Nivel de agregación temporal Longitud mínima del registro | 1. Disponer de 2 estaciones meteorológicas. 2. Series mayores a 10 años 3. Caudales medios diarios |
| Calidad de la información | Análisis de confiabilidad | 1. Admisión de datos con menos del 10% de datos faltantes 2. Relleno de datos 3. Puntos anómalos en las series |
| Consistencia de la propuesta | Coherencia de la propuesta hidrológica con las metodologías más aplicadas | 1. Garantizar caudales ambientales superiores a el índice Q95%. |

Fuente: elaboración propia

Con los criterios definidos, se procede a solicitar la información de caudales medios diarios a la entidad correspondiente de 4 estaciones limnimétricas cercanas al punto de medición directa, y luego realizar el debido procesamiento para finalmente construir la gráfica de duración de caudal y por medio de ella obtener el caudal ecológico o de sequía (Ideam, 2017).

5.1.2. Determinación de la alerta de inundación

Conforme al informe del Instituto Americano de Ciencias Biológicas (AIBS), resulta crucial la identificación de eventos hidrológicos en un cuerpo de agua con el fin de comprender su régimen hidrológico y considerar eventos específicos, como los caudales máximos.

En primer lugar, se emplean los registros de caudales máximos diarios obtenidos de una estación hidrometeorológica. A continuación, se procede a calcular los

caudales máximos medios multianuales. Estos cálculos se realizan con el propósito de introducir los datos en el software Hydrognomon. El objetivo de esta introducción es obtener los caudales correspondientes a distintos intervalos de tiempo de retorno, que abarcan periodos de 2.5 años, 10 años, 25 años, 50 años y 100 años.

Este proceso sigue las directrices establecidas por el INVIAS para la gestión del riesgo en Colombia. En consecuencia, el caudal obtenido para un intervalo de tiempo de retorno de 2.5 años se asocia con una amenaza de bajo nivel, mientras que el caudal correspondiente a 50 años se considera una amenaza de nivel medio. Por último, el caudal calculado para un intervalo de tiempo de retorno de 100 años se clasifica como una amenaza de bajo nivel (Gamba, J, & Gonzalez, J, 2015).

El software hydrognomon utiliza una distribución teórica con la ley de Weibull como distribución base.

Ecuación 4. Ley de Weibull

$$Probabilidad \% = \frac{M}{N + 1}$$

Donde

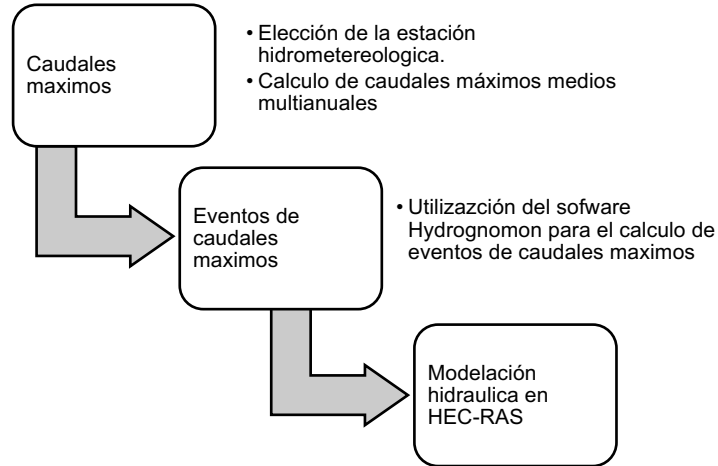
M= Número de observación

N=Total de observaciones

Con la distribución teórica se realiza la prueba de bondad con los diferentes modelos matemáticos para determinar cuál se ajusta mejor y por ende el que se debe aplicar para calcular los caudales máximos a dichos periodos de retorno.

Una vez obtenido los caudales en los periodos de retorno indicados, se procede a realizar una modelación hidráulica con el software HEC-RAS que permite analizar el comportamiento de los caudales obtenidos a diferentes tiempos de retorno dependiendo de la topografía de la cuenca para analizar los caudales de desbordamiento e inundación de la cuenca. A continuación se describe la metodología utilizada (Gamba, J, & Gonzalez, J, 2015).

Figura 2. Metodología aplicada para el cálculo de eventos de inundación



Fuente: elaboración propia

5.2. Curva de calibración de la sección

Según el documento de estimación de curvas de gasto, realizar una curva de calibración permite transformar los niveles de agua, leído en este caso con un sensor de ultrasonido, en caudales (Prieto y Velásquez, 2016).

El primer paso consiste en aplicar el método de obtención de caudal directo por medio del uso de un molinete, se recomienda que mínimo 10 mediciones a lo largo de un tiempo considerable. Una vez definida la sección transversal para la toma de mediciones se realiza una división de la sección cada metro para medir la velocidad y luego por medio de geometría de calcula el caudal en cada sección en la que fue medida la velocidad para al final obtener una altura promedio de la profundidad de la subcuenca a un caudal correspondiente (la suma de los caudales unitarios hallados para cada sección (Prieto y Velásquez, 2016). De esa manera al final se obtendrá por cada medición un punto en la gráfica de calibración que permitirá relacionar una altura o profundidad del agua aun caudal específicos. En el caso de que no se cuente con el número necesario de mediciones se deberán extrapolar los resultados.

Para la calibración de la gráfica obtenida lo ideal es obtener las curvas de gasto actuales del IDEAM para definir el porcentaje de error, el cual no debe superar el 10% y que se debe tener en cuenta para determinar las alertas de inundación y sequía (Molina, D., Hernández, L, 2018).

5.3. Requisitos del Hardware

En esta sección, se describe los requisitos fundamentales de hardware necesarios para la implementación exitosa del sistema de monitoreo de nivel de agua. Se

pondrá un enfoque especial en elementos críticos, como la Raspberry Pi, el sensor de ultrasonido, las conexiones y otros componentes esenciales, todos los cuales desempeñan un papel fundamental en la creación de un sistema que permita una interacción efectiva con el usuario final a través de una interfaz intuitiva y funcional. Un conocimiento detallado de estas piezas clave sienta las bases para garantizar la precisión en la captura de datos y la entrega de notificaciones oportunas, elementos esenciales en la operatividad y efectividad del sistema de monitoreo.

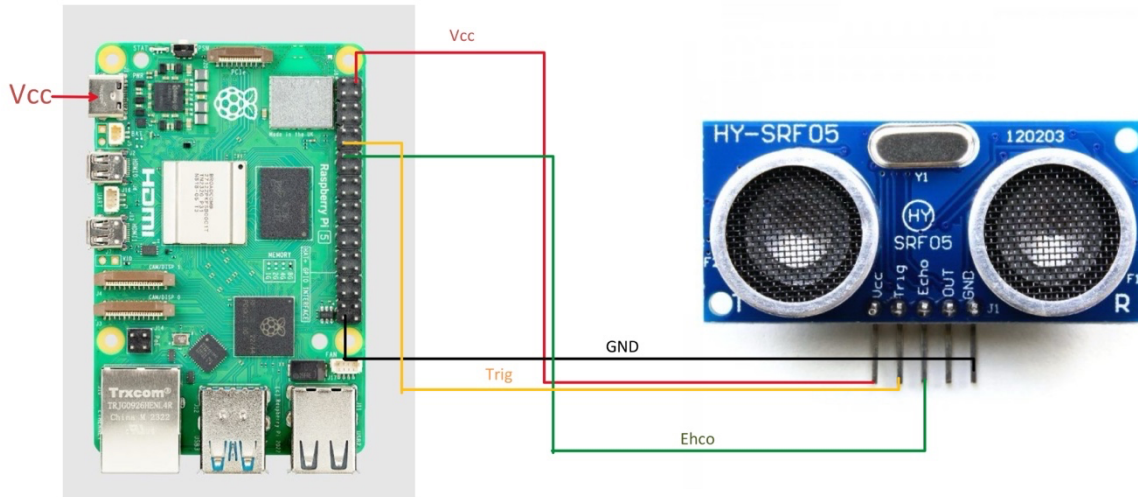
5.3.1. Raspberry Pi

- Modelo: RaspberryPi 4.
- Procesador: Procesador de cuatro núcleos a 1,5 GHz con brazo Cortex-A72.
- Memoria: 4GB LPDDR4 RAM.
- Conectividad: 802.11ac Wi-Fi / Bluetooth 5.0, Gigabit Ethernet.
- Vídeo y Sonido: 2 x puertos micro-HDMI que admiten pantallas de 4K@60Hz a través de HDMI 2.0, puerto de pantalla MIPI DSI, puerto de cámara MIPI CSI, salida estéreo de 4 polos y puerto de vídeo compuesto.
- Puertos: 2 x USB 3.0, 2 x USB 2.0.
- Alimentación: 5v / 3A – vía USB-C.
- GPIO: 40 pines – puertos digitales.

5.3.2. Sensor de Ultrasonido

- Sensor: HC-SR04.
- Alcance de medición: 2 cm - 400 cm.
- Frecuencia de funcionamiento: Aproximadamente 40 kHz.
- Interfaz de conexión: Cuatro pines - VCC, Trig, Echo, GND.

Imagen 4. Sensor de ultrasonido



Fuente: elaboración propia

5.3.3. Cables y conexiones.

- Cables de conexión: UTP – 20m, con terminales de borneras hembra.
- Adaptador de corriente de 5v / 3A, fuente de alimentación para la tarjeta.

5.3.4. Elementos protectores.

- Caja metálica: elemento diseñado específicamente para la Raspberry y protegerla de daños potenciales.

5.3.5. Dispositivos de Salida.

- Kuman 7 Inch Raspberry PI Touch Screen.

5.4. Implementación y características clave del Software.

La configuración del software del sistema de alertas tempranas desempeña un papel fundamental al facilitar la integración con el sistema de sensado, siendo una parte esencial de la solución. Se ha optado por desarrollar el software en Python, un lenguaje de programación conocido por su versatilidad y capacidad para interactuar de manera efectiva con elementos de hardware, con el fin de garantizar un funcionamiento efectivo. La implementación de Python es el núcleo del programa, el cual permite realizar lecturas continuas del sensor de ultrasonido para medir el nivel de agua en tiempo real, estableciendo una frecuencia de lectura en intervalos de un segundo, lo que posibilita una supervisión constante y un seguimiento de la situación en tiempo real.

Una característica importante de este software es su capacidad para administrar y almacenar los datos recopilados. Se utiliza una estructura de datos de pandas

llamada DataFrame, que posibilita el almacenamiento de datos estructurados de manera efectiva, otorgando a los usuarios la flexibilidad de gestionar los datos según sus necesidades, incluyendo la opción de exportarlos en Excel u otras formas de análisis posterior.

Además, se ha integrado una interfaz gráfica de usuario (GUI) utilizando la biblioteca Tkinter de Python para mejorar la experiencia del usuario. Esta interfaz facilita la comprensión y el uso del sistema al mostrar datos en tiempo real.

En resumen, el software permite a los usuarios almacenar datos en un directorio de Raspberry Pi personalizable, lo que facilita la creación de un registro histórico esencial para análisis a largo plazo. Además, su compatibilidad con la plataforma Raspberry Pi permite replicar el desarrollo en diferentes plataformas y adaptarse a una variedad de aplicaciones, lo que maximiza la versatilidad. Finalmente, esta solución de software ofrece una base sólida para la adquisición, gestión y presentación de datos en tiempo real, garantizando una experiencia de usuario efectiva y la capacidad de adaptarse a diferentes configuraciones y necesidades.

5.4.1. Pseudo código del sistema de sensado

```
# Inicio del Programa de Monitoreo de Nivel de Agua

# Configuración de Parámetros
umbral_alerta = valorCaudal # Umbral para alertas (en centímetros)

# Inicialización de la Base de Datos
base_de_datos = InicializarBaseDeDatos() # Crea una estructura para
almacenar datos

# Configuración de la Interfaz Gráfica
interfaz_grafica = CrearInterfazGrafica() # Inicializa la interfaz
gráfica

# Inicio del Bucle Principal
while True:
    # Lectura de Datos del Sensor
    nivel_agua_actual = LeerSensorUltrasonido() # Obtiene el nivel de
    agua actual desde el sensor

    # Cálculo del Caudal (en función del nivel de agua, fórmula de
    ejemplo)
    caudal = caudalFunction(nivel_agua_actual) # Ajusta la fórmula según
    tus necesidades

    # Actualización de la Interfaz Gráfica
    interfaz_grafica.ActualizarPantalla(nivel_agua_actual, caudal)

    # Almacenamiento de Datos
    base_de_datos.AgregarDato(TiempoActual(), nivel_agua_actual, caudal)

    # Comprobación de Alerta
    if caudal > umbral_alerta || caudal < umbral_alerta:
        GenerarAlertaCorreo(nivel_agua_actual, caudal) # Envía una
        alerta por correo electrónico

    # Retardo de Medición
    Retardo(1 segundo) # Espera un segundo antes de la siguiente lectura

# Fin del Programa de Monitoreo de Nivel de Agua
```

Fuente: elaboración propia

El anterior pseudocódigo representa de una manera sencilla la estructura básica del Programa de Monitoreo de Nivel de Agua desarrollado en Python. El propósito de este programa es llevar a cabo un seguimiento continuo del nivel de agua en la subcuenca de Teusacá y generar alertas en caso de que se produzcan cambios significativos o inusuales en su caudal basándose en el nivel del agua.

6. Análisis y discusión de resultados

6.1. Características de la subcuenca del río Teusacá

La subcuenca del río Teusacá se localiza en la zona Nororiental del Departamento de Cundinamarca conformada por los municipios de La calera, Sopó, Guasca, Bogotá, Tocancipá, Choachí, Chía y Ubaque. El área total de cuenca es de 3.5818,42 hectáreas y el cauce principal tiene una longitud de 69 km (CAR, s.f).

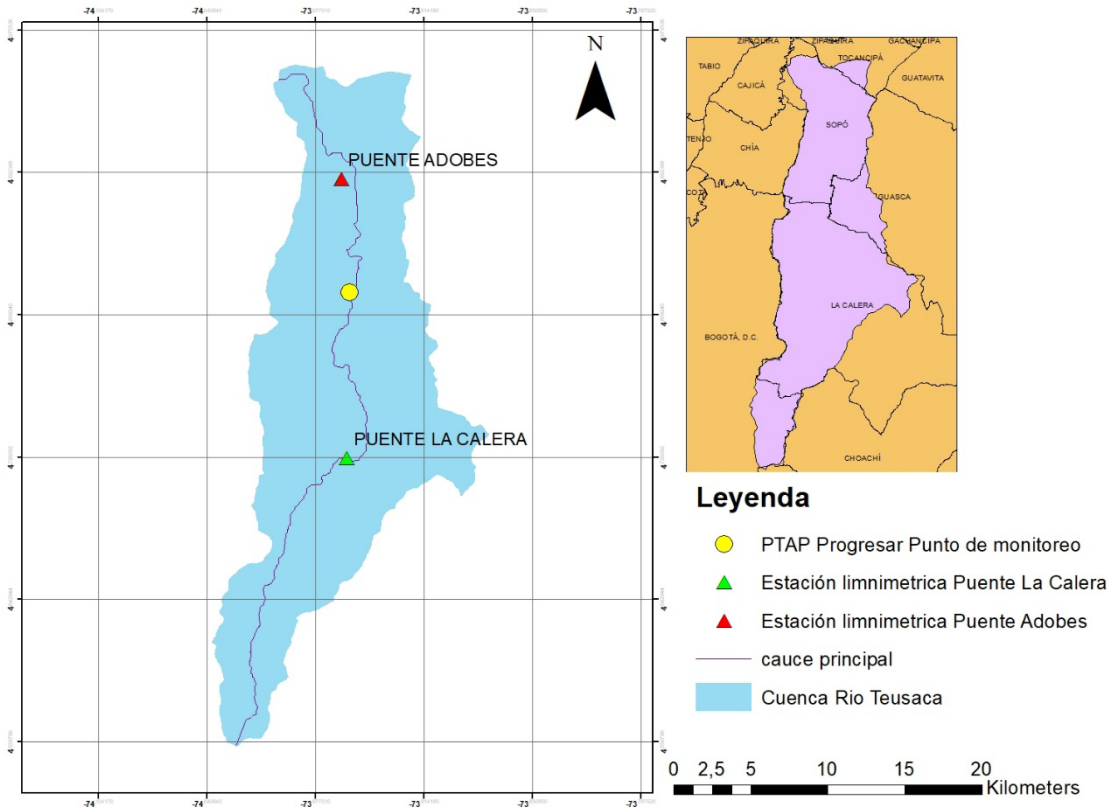
En la subcuenca predominan el tipo de clima de páramo bajo semihúmedo, que se localiza en toda la cuenca alta, y el frío semiárido, que se encuentra en la cuenca baja, cubriendo cada uno aproximadamente el 40% del área total de la misma, luego se observa el clima frío semi húmedo en la cuenca media con un cubrimiento del 15% y finalmente se tiene el páramo bajo húmedo, que se encuentra en las partes altas de la subcuenca, al oriente de la misma, cubriendo el 5% del área restante (CAR, s.f).

Por otro lado, debido a que la subcuenca está en jurisdicción de la CAR, DAMA, CORPOGUAVIO y CORPORINOQUIA se presenta falencias en la cooperación interinstitucional para la solución de la problemática ambiental de la cuenca y algunos conflictos de competencias en cuanto al otorgamiento de permisos y concesiones (CAR, s.f).

6.2. Área de influencia

Ahora bien, el área de influencia del proyecto se define como la cuenca en su totalidad, puesto que las actividades realizadas aguas arriba siempre afectan el cauce aguas abajo y se reflejara en el punto de instalación del sensor de nivel. Para efectos de mediciones directas del caudal e instalación del sensor de nivel se escogió un punto cercano a la PTAP de Progresar, este punto se encuentra en la parte baja de la cuenca, la cual comprende los municipios de Sopo y Guasca. En la siguiente imagen se puede observar la subcuenca de Teusacá, el punto de medidas directas y el cauce principal. En la siguiente imagen se aprecia el punto de toma de monitoreo, la estación de referencia para el cálculo del caudal de sequía (Puente la Calera) y la estación para la generación el modelamiento hidráulico y análisis de inundación (Puente Adobes) .

Figura 3. Estaciones limnimétricas y punto de monitoreo



Fuente: elaboración propia

6.3. Alerta de sequía

Se recopilaron datos de caudales medios diarios de cuatro estaciones limnimétricas pertenecientes a la Corporación Autónoma Regional (CAR) ubicadas dentro de la subcuenca de Teusacá. Estos datos abarcan un período de 24 años, desde 1998 hasta 2022. Las estaciones mencionadas son las siguientes:

Tabla 2. Estaciones limnimétricas utilizadas para la obtención de caudal medios diarios

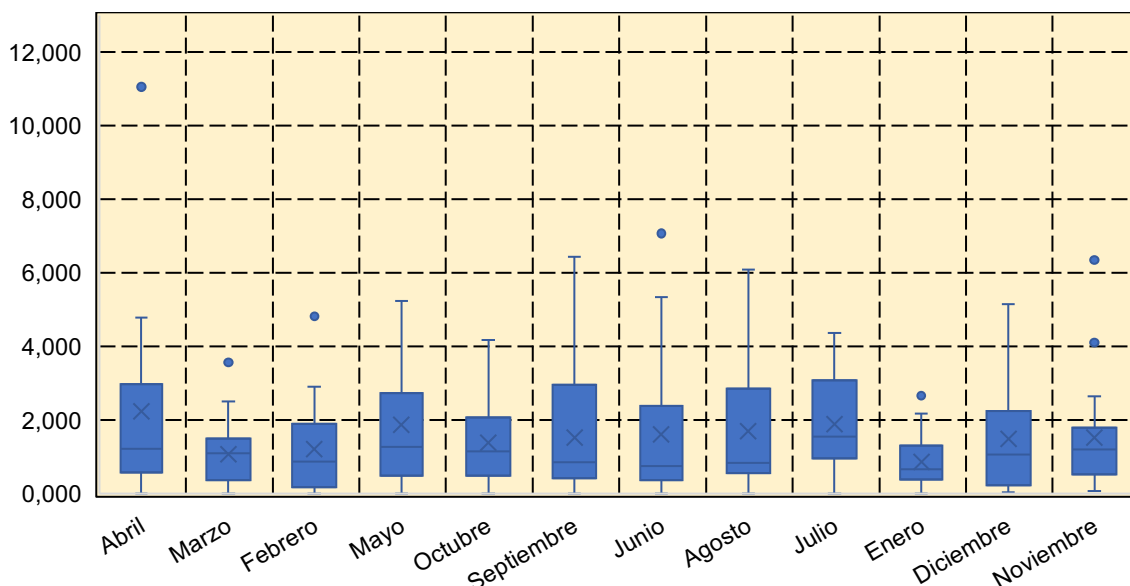
| Estaciones limnimétricas para un periodo de análisis de 1998 a 2022 | | |
|---|----------|------------|
| Estación | Latitud | Longitud |
| Puente la Calera | 4,725444 | -73,959056 |
| Puente Adobes | 4,888556 | -73,96225 |
| El vergel | 4,864667 | -73,954083 |
| Puente Francis | 4,67399 | -73,9958 |

Fuente: elaboración propia

De acuerdo con el criterio de calidad previamente establecido, se optó por la estación **Puente la Calera** debido a que esta estación presentaba menos del 10% de datos faltantes. A su vez, se procedió a eliminar los años que no cumplían con el mencionado criterio, lo que resultó en una serie de datos que abarcaba un período

de 19 años. Luego, se aplicó la metodología de distancia ponderada para la imputación de los datos faltantes. Una vez que se contó con los datos completos, se procedió a identificar los caudales medios diarios anómalos o atípicos mediante la construcción de un gráfico de Box Plot.

Figura 4. Análisis de datos atípicos



Fuente: elaboración propia

La figura anterior indica los valores atípicos en los meses correspondientes, acorde a lo anterior se eliminaron los datos atípicos. Finalmente se construyó la curva de duración acorde a la metodología definida en el capítulo 7 de análisis de caudales determinando los intervalos de clase, la frecuencia, números de días y % de días. Lo anterior se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 3. Frecuencia de caudales medios

| Intervalo de clase | Límite superior (m ³ /s) | Límite inferior (m ³ /s) | Frecuencia | Nº Días | % Días |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------|---------|--------|
| 1 | 7,1 | 6,22 | 3 | 3 | 1,3% |
| 2 | 6,2 | 5,35 | 1 | 4 | 1,8% |
| 3 | 5,4 | 4,49 | 7 | 11 | 5% |
| 4 | 4,5 | 3,63 | 10 | 21 | 9% |
| 5 | 3,6 | 2,77 | 17 | 38 | 17% |
| 6 | 2,8 | 1,91 | 26 | 64 | 28% |
| 7 | 1,9 | 1,05 | 51 | 115 | 50% |
| 8 | 1,05 | 0,19 | 79 | 194 | 85% |

Fuente: elaboración propia

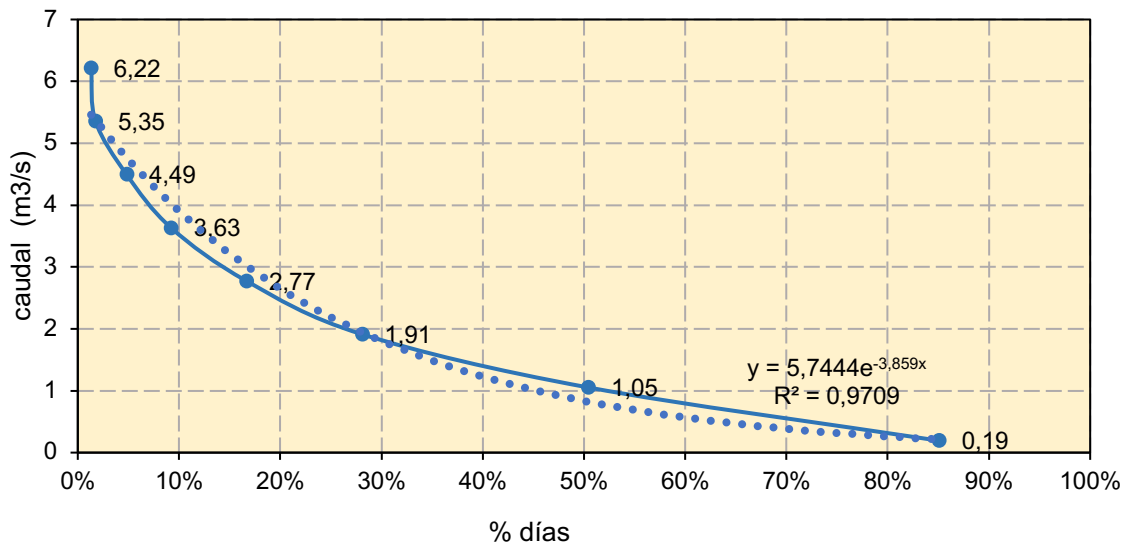
A partir de la curva de duración de caudales se definen los siguientes caudales característicos de la subcuenca de Teusacá.

- **Caudal característico máximo:** En este caso este caudal resulta ser aquel causal que rebasó 10 días al año, para la subcuenca de Teusacá el caudal característico máximo es 4,49 m³ /s.
- **Caudal Característico de sequía:** el caudal que excedió el 95% del tiempo es 0,15 m³ /s.

El caudal característico de sequía corresponde al caudal ambiental el cual se calculó a partir de la ecuación que mejor se ajustó a la curva. La mejor ecuación que se ajustó fue la polinomial y se presenta a continuación: $y = 5,7444e^{-3,859x}$, donde “Y” es el caudal en m³/s y “X” es el % de días acumulados

A partir de la ecuación, el caudal ambiental se define según la metodología aplicada como el caudal al 95% de los días acumulados, reemplazando la variable x por 95%, se obtuvo el caudal de sequía 0,15 m³ /s.

Figura 5. Curva de duración



Fuente: elaboración propia

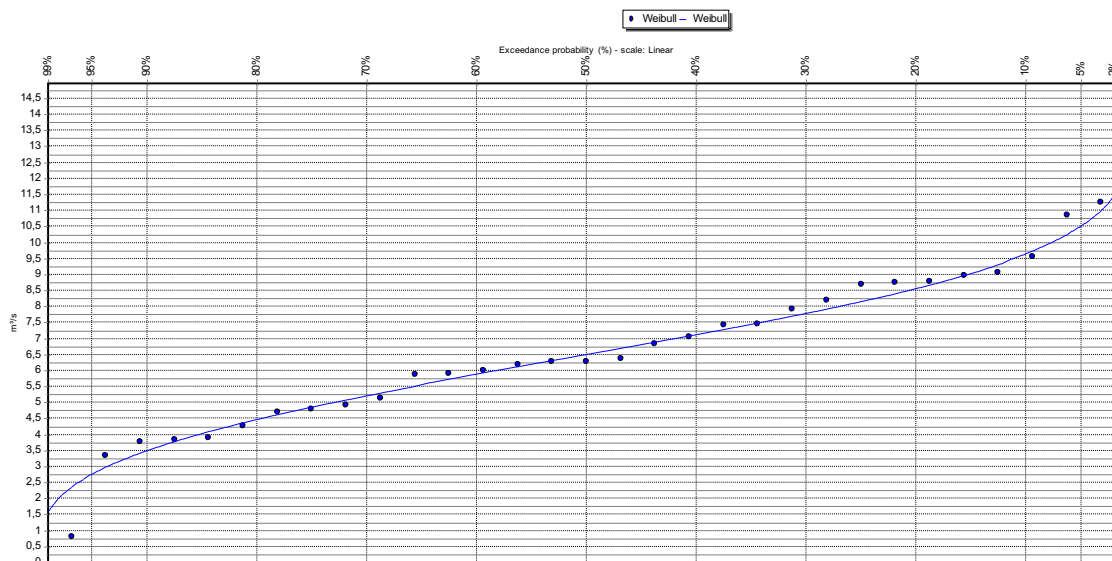
6.4. Alerta de inundación

Para calcular los caudales posibles causantes de desbordamiento se emplearon los registros de caudales máximos obtenidos por la estación hidrometeorológica de la CAR **Puente Adobes**. La elección de esta estación climatológica se basó en su ubicación aguas abajo, su proximidad al lugar de instalación del sensor para el sistema de alerta y la baja presencia de datos faltantes, los cuales se completaron.

Para el cálculo de caudales máximos medios multianuales, se utilizó la estación mencionada anteriormente, Puente Adobes, con una serie de tiempo de 31 años,

luego con el uso del software Hydrognomon se calcularon los eventos de caudales máximos. Como se observa en la siguiente figura la distribución teórica muestra que entre mayor sea el valor del caudal menor será la probabilidad de excedencia.

Figura 6. Distribución base o teórica



Fuente: elaboración propia

Luego de lo anterior el software realiza una prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov que permite seleccionar la distribución que mejor se ajusta a la distribución base. En la siguiente tabla se aprecian los resultados obtenidos.

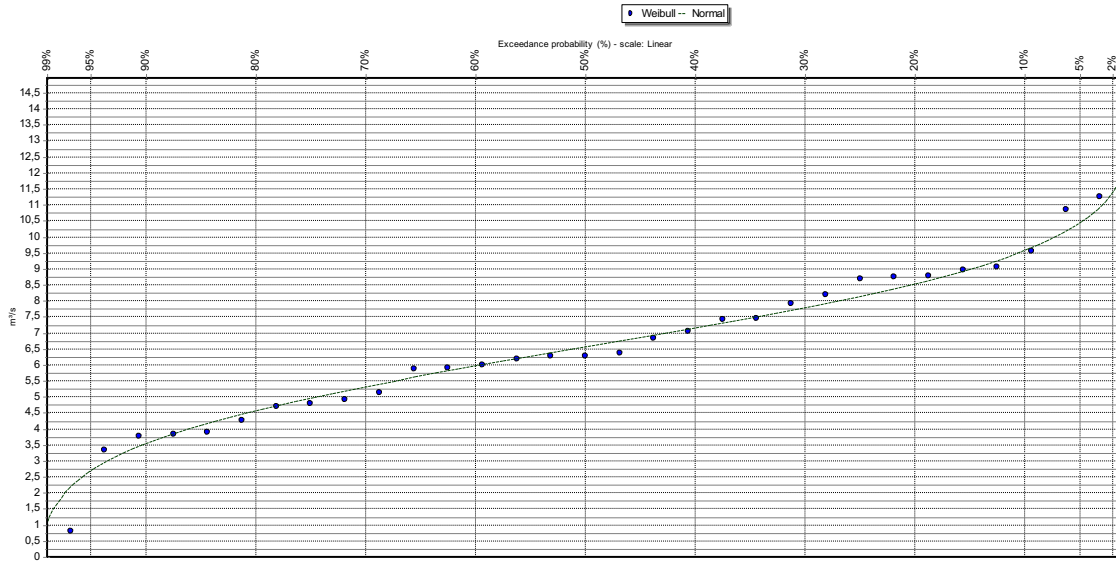
Tabla 4. Frecuencia de caudales medios

| Kolmogórov-Smirnov test for: All data | a=1% | a=5% | a=10% | Attained a | DMax |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|------------|---------|
| Normal | ACCEPT | ACCEPT | ACCEPT | 99,36% | 0,06957 |
| LogNormal | ACCEPT | ACCEPT | ACCEPT | 85,58% | 0,10207 |
| Exponential | ACCEPT | ACCEPT | ACCEPT | 30,66% | 0,16692 |
| Gamma | ACCEPT | ACCEPT | ACCEPT | 94,80% | 0,08695 |
| Pearson III | ACCEPT | ACCEPT | ACCEPT | 99,36% | 0,06957 |
| Log Pearson III | REJECT | REJECT | REJECT | 0,82% | 0,29107 |

Fuente: elaboración propia

Cabe aclarar que el Dmax es la distancia de los valores de la curva construidos a partir de la ley de Weibull con respecto a la curva de la distribución teórica, por tanto la distribución que mejor se ajusta es la Normal con una distancia de 0,06957.

Figura 7. Distribución normal ajustada



Fuente: elaboración propia

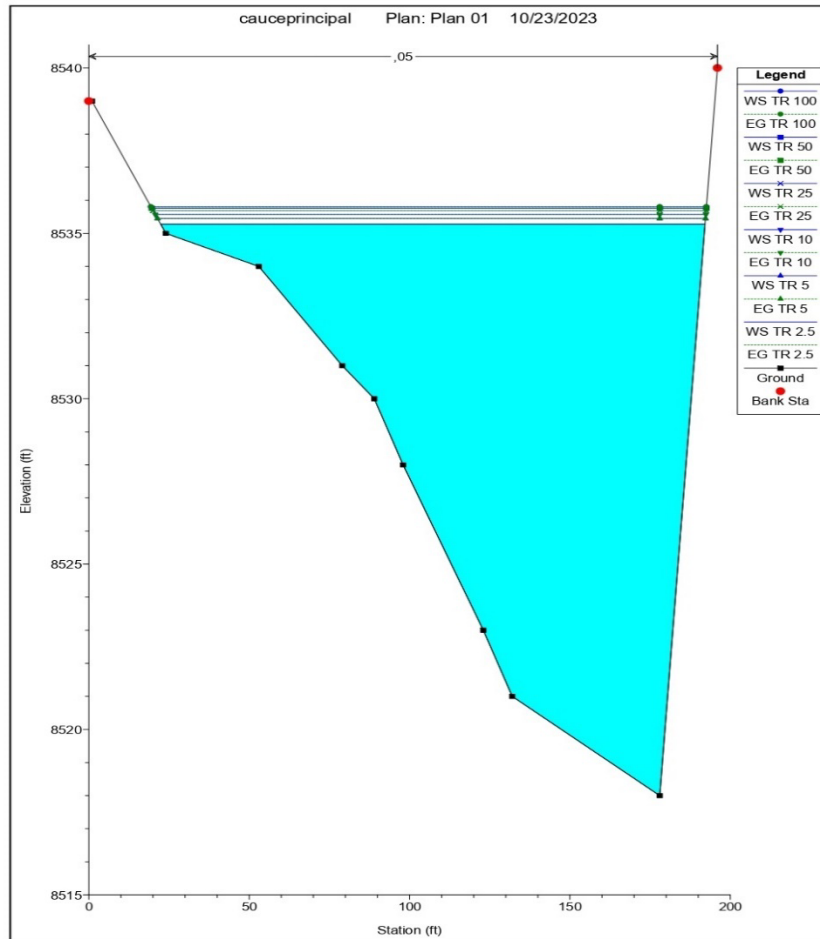
Tabla 5. Periodos de retorno

| T años | m³/s |
|--------|------|
| 100 | 12,0 |
| 50 | 11,4 |
| 25 | 10,7 |
| 10 | 9,6 |
| 5 | 8,5 |
| 2,5 | 7,15 |

Fuente: elaboración propia

Se utilizó el software de libre acceso ASF Data Search para adquirir el Modelo de Elevación Digital (DEM) de la subcuenca de Teusacá. Luego, se procedió a procesarlo en ArcMap, a partir del cual se generaron las curvas de nivel. Estas curvas de nivel se utilizaron como base para definir el perfil correspondiente, el cual se ingresó posteriormente en CivilCAD. Finalmente, este perfil se incorporó en el software HEC-RAS para llevar a cabo el modelamiento hidráulico, teniendo en cuenta los periodos de retorno previamente establecidos.

Figura 8. Sección transversal



Fuente: elaboración propia

La sección seleccionada, es aguas abajo y muy cercana al punto de instalación del sensor y de la estación **Puente Adobes**, este punto es muy cercano al acueducto de Progresar E.S.P., lo que representa punto de captación importante, sin embargo, aunque no se haya identificado un desbordamiento de caudal con los periodos de retornos y la línea de energía tan poco indique un desbordamiento, en ocasiones la planta tiene que realizar su respectivo proceso de mantenimiento, por ende no se realizará el proceso de captación de agua en un corto periodo de tiempo, así mismo el caudal del efluente será mayor, aumentando la vulnerabilidad al riesgo por inundación en la parte baja de la cuenca. A partir de lo anterior se concluye que existe un potencial de inundación en los periodos de retorno de 100 y 50, por ende se utiliza este análisis como criterio para generar alarmas de desbordamiento y caudal máximo en la cuenta con un caudal entre $11,4 \text{ m}^3/\text{s}$ y $12 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.5. Obtención de la curva de gasto

La curva de calibración se construyó a partir de los aforos realizados, para este caso la selección del punto de monitoreo fue Progresar E.S.P, el cual está ubicado en las coordenadas $4^{\circ}49'18,98018''$ Latitud y $73^{\circ}57'27,25409''$ Longitud y a una altura de 2.589 m.s.n.m. Este punto de monitoreo se debe a su ubicación aguas debajo de la subcuenca y su representatividad con respecto a las actividades agropecuarias en la parte superior de la subcuenca, aparte de ser un grupo de interés puesto que el sistema de alertas tempranas brinda apoyo al manejo del sistema de abastecimiento actual.

Imagen 5. Punto de muestreo Progresar



Fuente: elaboración propia

Para realizar esta actividad se realizaron cuatro visitas, la primera para realizar un reconocimiento del área de trabajo y las 3 visitas restantes para realizar los aforos con molinete, los instrumentos utilizados fueron el molinete, cinta métrica, y GPS como se observa a continuación.

Imagen 6. Instrumentos



Fuente: elaboración propia

Se realizaron tres visitas y tres mediciones en cada una, excepto en la última visita puesto que por niveles de contaminación del agua solo fue posible realizar una medición. En las siguientes imágenes se observan las visitas.

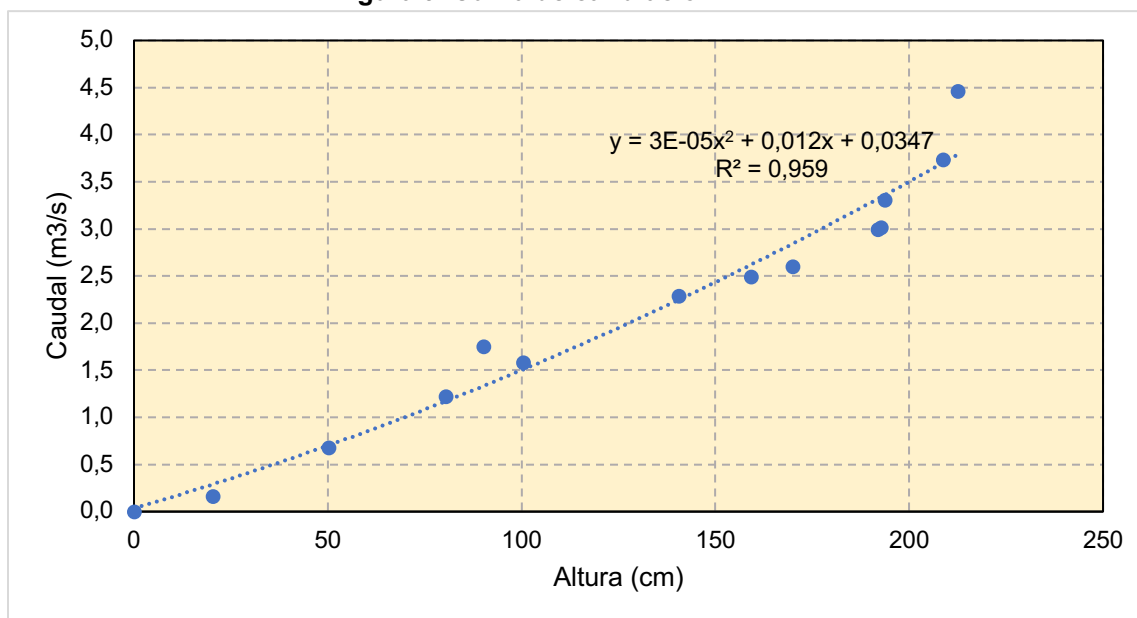
Imagen 7. Toma de mediciones



Fuente: elaboración propia

Una vez procesada la información y utilizando el método directo de aforo con molinete para calcular caudales, se construyó la curva de calibración, y se extrapolaron los datos a fin de obtener una ecuación ajustada a los datos. A continuación se observa la curva de calibración y la ecuación que mejor se ajusta.

Figura 9. Curva de calibración

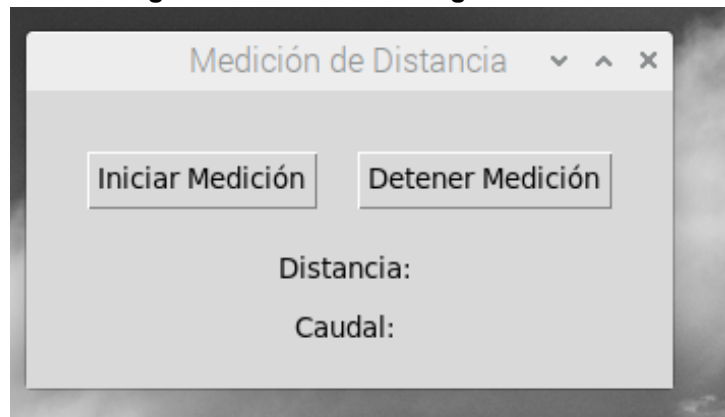


Fuente: elaboración propia

6.1. Descripción general – Interfaz gráfica

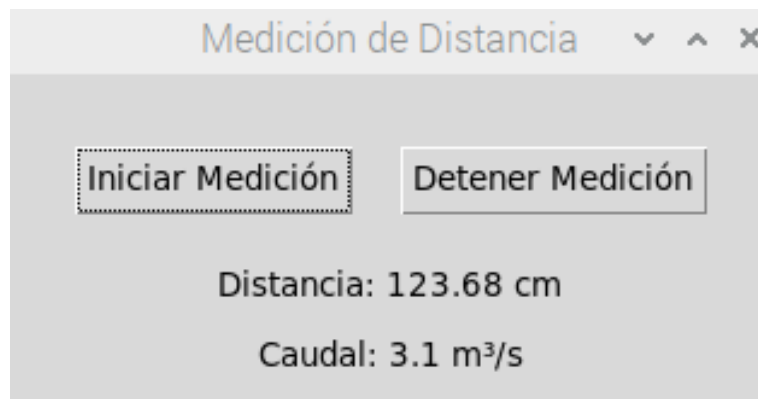
La interfaz gráfica del sistema de sensado se desarrolló con la única intención de que sea lo más minimalista, e intuitivamente posible, es por ello que al ejecutar el programa este abre una ventana la cual posee dos posibles acciones: Iniciar medición, y detener Medición. A la inicial medición en cada iteración del flujo las variables de interés (Nivel de agua, y Caudal) se visualizan constantemente, por otro lado al oprimir el botón de detener medición el programa se interrumpe con el único propósito de guardar los datos en un directorio. Es importante mencionar que en todo momento el usuario final tendrá certeza de que hacer con los archivos recolectados.

Imagen 8. Inicio de interfaz gráfica



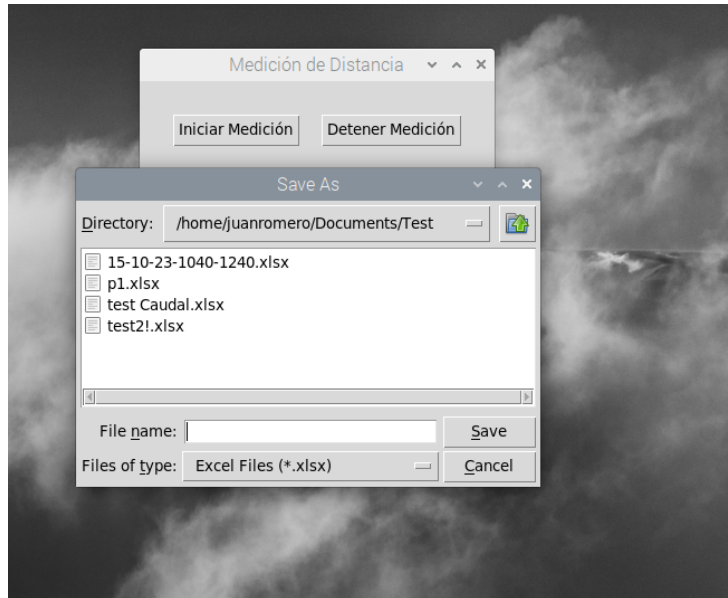
Fuente: elaboración propia

Imagen 9. Inicio de medición con parámetros en tiempo real.



Fuente: elaboración propia

Imagen 10. Fin de medición con opción de guardar el archivo en formato de excel.



Fuente: elaboración propia

Como se puede apreciar en las imágenes 8, 9 y 10, la interfaz gráfica proporciona a los usuarios la capacidad de visualizar información crucial, como la distancia, el nivel del agua y el caudal calculado mediante la fórmula modelada. Además, los datos se almacenan en formato Excel, lo que facilita la realización de un análisis estadístico exhaustivo a lo largo del histórico de mediciones, en caso de ser necesario. Esto permite la exploración de tendencias y patrones significativos en los datos recopilados.

Alerta de sequía, 0,15, se define en alerta de sequía – alerta roja, 1,58 – alerta moderada de caudal bajo, 1,22 – notificación de caudal considerablemente bajo.

6.2. Alertas generadas

Es importante resaltar que la generación de alertas es un componente esencial de nuestro sistema previamente desarrollado. Su función principal radica en proporcionar a los suscriptores información oportuna sobre las condiciones hídricas de la cuenca. Estas alertas se generan tras un minucioso análisis de un histórico local de mediciones, cumpliendo con las condiciones predefinidas. A continuación, presentaremos los mensajes estructurados para el envío de correos electrónicos.

Imagen 11. Alerta Sequia - Nivel Crítico.

Alerta de Sequía - Nivel Crítico



Alertas Caudal Cuenta Teusaca <alertas.caudal.subcue... 19:58 (hace 6 minutos)
para juliana.parra@corpoema.net ▾



Estimado suscriptor,

Le informamos que se ha activado una alerta de sequía en su área. El caudal actual es extremadamente bajo, marcando $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que corresponde a una alerta de sequía de nivel rojo. Le recomendamos tomar medidas inmediatas para gestionar eficazmente los recursos hídricos en su zona. Si necesita más información o asistencia, no dude en ponerse en contacto con nuestro equipo de soporte.

Atentamente, Sistema de Alertas tempranas - SATUSTA

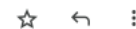
Fuente: elaboración propia

Imagen 12. Caudal considerablemente bajo.

Notificación de Caudal Considerablemente Bajo



Alertas Caudal Cuenta Teusaca <alertas.caudal.subcu... 20:00 (hace 5 minutos)
para juliana.parra@corpoema.net ▾



Estimado suscriptor,

Hemos detectado que el caudal actual es de $1.22 \text{ m}^3/\text{s}$, lo que indica una notificación de caudal considerablemente bajo. Aunque no se trata de una situación crítica, le recomendamos estar atento a la disponibilidad de agua en su área. Mantener un uso eficiente de los recursos es esencial. Si tiene preguntas o necesita orientación adicional, estamos aquí para ayudar.

Saludos, Sistema de Alertas tempranas - SATUSTA

Fuente: elaboración propia

Imagen 13. Posible Riesgo de inundación.

Posible Riesgo de Inundación



Alertas Caudal Cuenta Teusaca <alertas.caudal.subcue... 20:01 (hace 4 minutos)
para juliana.parra@corpoema.net



Estimado suscriptor,

Hemos registrado un aumento significativo en el caudal, alcanzando los 10.7 m³/s. Aunque aún no estamos en una situación de inundación, esta cifra indica un riesgo potencial. Le recomendamos estar preparado y mantenerse informado sobre las condiciones locales. Por favor, no dude en contactarnos si necesita más información o consejos sobre seguridad.

Atentamente, Sistema de Alertas tempranas - SATUSTA

Fuente: elaboración propia

En la imagen 11, 12, y 13 vemos en el cuerpo de texto de las notificaciones emitidas mediante difusión de correo electrónico, estas notificaciones serán enviadas a las personas que estén suscritas y autoricen el procesamiento de datos personales. Estos mensajes tienen como objetivo de informar mediante difusión masiva sobre las condiciones hídricas de la subcuenca de Teusacá.

7. Impacto social y humanístico del proyecto

Este proyecto tiene un gran impacto social y humanístico, ya que busca proteger a las comunidades aledañas a la subcuenca de Teusacá de posibles eventos extremos relacionados con el recurso hídrico. Al implementar un sistema de alerta temprana ante inundaciones y sequías, se estaría salvaguardando la vida y los medios de subsistencia de los habitantes, al permitirles prepararse y responder a tiempo ante emergencias.

Asimismo, el proyecto fomenta la participación comunitaria en la gestión del recurso hídrico, involucrando a la población local en el monitoreo y toma de decisiones. Esto crea conciencia sobre la importancia del cuidado del agua y propicia la organización social en torno a este objetivo común. De esta manera, se promueve la corresponsabilidad y el trabajo colaborativo por el bienestar colectivo.

Finalmente, al proteger la subcuenca se preserva un ecosistema clave que sustenta actividades económicas fundamentales para la región, como la agricultura y la ganadería. El buen manejo del recurso hídrico es indispensable para asegurar medios de vida dignos y progreso a largo plazo. En síntesis, este proyecto representa un avance en términos de desarrollo humano sostenible para las comunidades aledañas.

8. Conclusiones

A partir del análisis de caudales medios diarios históricos obtenidos de la estación Puente La Calera y la construcción de la curva de duración se definió que el caudal ambiental o de sequía aguas debajo de la subcuenca de Teusacá es de $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$, y con tal valor de caudal se construyeron los intervalos para generar la alertas en el sistema de alertas tempranas. También se puede concluir que al estar el punto de monitoreo aguas debajo de la subcuenca, los niveles bajos del nivel del agua y por ende de caudal podrán indicar que posiblemente algunas actividades ya sean industriales o agrícolas están afectando el cauce principal de la subcuenca de Teusacá considerablemente.

Seguido a lo anterior también se definió el caudal de inundación mediante la modelación del perfil de la subcuenca en HEC-RAS y los caudales a periodos de retorno determinados y se obtuvo que aguas abajo los caudales causantes de desbordamiento se encuentran entre $11,4 \text{ m}^3/\text{s}$ y $12 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto último también indica que ciertas actividades aguas arriba puedan estar incrementando los niveles de agua peligrosamente.

El diseño e implementación del prototipo de un sistema de sensores basado en una tarjeta embebida y un sensor de ultrasonido ha demostrado ser una opción altamente viable para la recolección, almacenamiento y procesamiento de datos en la medición de los niveles de agua. Este enfoque tecnológico representa un avance significativo en la eficacia y economía de la monitorización de recursos hídricos en la subcuenca Teusacá.

La implementación del algoritmo para el almacenamiento de datos utilizando bases de datos no relacionales proporciona una solución flexible y escalable para la gestión de información a medio y largo plazo. Esta versatilidad asegura que los datos recopilados estén disponibles para una variedad de propósitos, lo que aumenta su utilidad y relevancia.

La capacidad de procesar los datos almacenados y construir un modelo que emite alertas tempranas representa un logro destacado. Este proceso tiene el potencial de anticipar eventos críticos, lo que, a su vez, disminuye significativamente el riesgo de daños materiales y humanos en la subcuenca Teusacá. La seguridad y preparación ante situaciones de emergencia se ven fortalecidas gracias a esta funcionalidad.

La interfaz gráfica proporciona una interacción intuitiva y amigable con el sistema de sensores. El uso de esta interfaz garantiza que la información se almacene y gestione de manera eficiente, asegurando que esté disponible para su uso y análisis. La experiencia del usuario se optimiza, lo que facilita la toma de decisiones informadas y una mejor gestión de los recursos hídricos en la subcuenca.

La implementación del sistema de sensado en la subcuenca Teusacá se destaca no solo por su eficacia en la gestión de recursos hídricos, sino también por su contribución a la adopción de tecnologías limpias. Al utilizar sensores de bajo consumo energético y al proporcionar alertas tempranas que previenen eventos críticos, este sistema promueve un enfoque más sostenible y ecológico en la monitorización de recursos hídricos, ejemplificando cómo la innovación tecnológica puede converger con la responsabilidad ambiental para beneficio de comunidades y ecosistemas.

9. Recomendaciones

Si bien el sistema de alerta temprana propuesto en este documento corresponde a un solo punto de monitoreo aguas debajo de la subcuenca de Teusacá, se recomienda instalar más puntos de monitoreo a lo largo del cauce principal con el fin de robustecer el sistema y beneficiar con mayor precisión a la comunidad que se abastece del recurso hídrico, tanto para sus labores domésticas como agrícolas.

También se propone incluir a la comunidad en el desarrollo de este proyecto, puesto que se pretende que sea de fácil acceso y que mediante capacitaciones la misma comunidad sea capaz de manejar el sistema en el caso que se requiera. Por otro lado, es importante crear una red de respuesta entorno al Sistema de Alertas Tempranas, así sería más eficaz el manejo o respuesta de las alertas generadas.

Se recomienda considerar la sustitución del modelamiento de la función que calcula el caudal por un sistema de Aprendizaje Automático (Machine Learning). Esta alternativa puede ofrecer una mayor flexibilidad y precisión en la estimación de los niveles de agua, permitiendo una adaptación continua a las condiciones cambiantes de la subcuenca y mejorando la capacidad de predicción a largo plazo.

10. Referencias

- Anónimo, (s,f). Capítulo 7. ANÁLISIS DE CAUDALES. Colombia. Recuperado de: <http://www.ingenieroambiental.com/4018/hidrologia%20-%20caudales%282%29%282%29.pdf>
- Cantera Kintz, J. R. Carvajal, Y. ; Castro, L. M. Caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. ed. Cali: Programa Editorial Universidad del Valle, 2009. 327 p. Disponible en: <https://elibro.net/es/ereader/usta/129508?page=10>. Consultado en: 05 Nov 2023
- CAR. (s.f.). *Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del río Teusacá.*
- Cruz, A. (2009). Sistema de alerta temprana desde la perspectiva del sistema nacional de protección civil. 37.
- Domínguez, E., Lozano, S. (2014). *Estado del arte de los sistemas de alerta temprana en Colombia.* Universidad Javeriana de, Colombia.
- Ideam & Invemar. (2021). *Protocolo de monitoreo y seguimiento del agua.*
- Ideam. (2017). *Guía Metodológica para la estimación del caudal ambiental.*
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático. (2023). *Sistema de Alerta Bogotá.* Recuperado de: <https://www.sire.gov.co/web/sab/informacion-hidrologica>.
- Gamba, J, & Gonzalez, J. (2015). Curvas de rendimiento de caudales máximos instantáneos asociados a diferentes periodos de retorno en Colombia, caso de estudio Río Magdalena. Universidad Tecnológica de Bolívar.
- Ochoa, C., Euscátegi, C., & Martínez, S. (2021). *Sistemas de Alertas temprana, un paso para la adaptación al cambio climático.*
- Maroneze, M. M., Zepka, L. Q., Vieira, J. G., Queiroz, M. I. & Jacob-Lopes, E. (2014). *A tecnologia de remoção de fósforo: Gerenciamento do elemento em resíduos industriais. Revista Ambiente e Agua, 9, 445-458.* <https://doi.org/10.4136/1980-993X>.

Metropolitana Valle de Aburrá. (2023). *Sistemas de Alertas Tempranas Comunitarios Monitorean Lluvias en el Valle de Aburrá*. Recuperado de: <https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/sistemas-de-alertas-tempranas-comunitarios-monitorean-lluvias-en-el-valle-de-aburra.aspx#:~:text=Los%20Sistemas%20de%20Alertas%20Tempranas%20Comunitarios%20se%20encuentran%20en%202021,decisiones%20en%20momentos%20de%20emergencia.>

Molina, D., Hernández, L. (2018). *Propuesta del Ajuste de las Curvas de Gasto de la Cuenca del Río Chicamocha a una Ecuación Matemática*. Universidad Militar Granada.

NGRD. (2016). Guía para la implementación de sistemas de alerta temprana.

Pinilla, G., Eramos, A., & Camacho, L. (2014). *Propuesta metodológica preliminar para la estimación del caudal ambiental en proyectos licenciados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS)*. Universidad Nacional de Colombia.

Prieto, A. & Velásquez, L. (2016). *Análisis de Caudales Específicos Mínimos, Medios y Máximos en la Cuenca del Río Negro, Cundinamarca*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Puerta, G. A., Chaparro, M. F., Álvarez, F. & Fonseca, P. U. (s.f.). *Monitoreo y pronóstico de nivel en afluentes, como herramienta para sistemas de alertas tempranas basados en redes de sensores inalámbricos (WSN)*

SIATA. (2022). *Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá*. Bogotá D.C. Recuperado de: https://siata.gov.co/sitio_web/index.php/quienesSomos#:~:text=El%20proyecto%20SIATA%20se%20fundamenta%20en%20cuatro%20pilares%3A,externas%20al%20valle%20de%20Aburr%C3%A1.%20More%20items

Viedma, E. H. (2016). *Introducción a los Sistemas de Recomendaciones (Tesis Doctoral)*. Universidad De Granada.