

ANÁLISIS DE INUNDACIONES DE LA SUBCUENCA DEL RÍO TEUSACÁ MEDIANTE MODELACIÓN HIDRÁULICA EN HEC-RAS

FLOOD ANALYSIS OF THE TEUSACÁ RIVER SUB-BASIN BY HYDRAULIC MODELING IN HEC-RAS

Santiago Andrés Rodríguez Garzon - Universidad Santo Tomás
Sebastián Muñoz López - Universidad Santo Tomás

Directora: Dayam Calderón Rivera - Universidad Ecci

Codirectora: Ángela María Jaramillo Londoño - Universidad Santo Tomás

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en la subcuenca del Río Teusacá ubicada en los municipios de La Calera, Guasca y Sopó (noreste de Bogotá D.C.), en el cual se realizaron 4 muestreos en campo, que junto con información de fuentes secundarias, se ingresaron al software HEC-RAS, para así obtener las manchas de inundación asociadas a los diferentes periodos de retorno (2.5, 5, 10, 25, 50 y 100 años) obtenidos de los caudales máximos extraídos de la estación limnimétrica Pte. Adobes. El modelo fue validado con la información de campo y como resultado se presentaron inundaciones principalmente en la zona de la vereda El Salitre y en el casco urbano de la calera, lo que afectará fundamentalmente urbanizaciones, zonas de desarrollo agropecuario con y sin restricciones, vías principales y parcelaciones campestres, con una altura máxima de la lámina de agua equivalente a 27.24 cm y un área total de 1.7 km².

Palabras clave: Río Teusacá, HEC-RAS, periodos de retorno, manchas de inundación, modelación.

ABSTRACT

This work was done in the Teusaca river's subbasin located among La calera, Guasca and Sopo towns (North-East area of Bogota D.C.) where 4 saplings were done in field, which also with the information taken from secondary sources and analyzed in HEC-RAS software, the flood spots related to the different times of return points were obtained. (2.5, 5, 10, 25, 50 and 100 years) taken from the maximum flows got from the limnimetric site Pte. Adobes. The model was validated with the field information and, as a result there were floods mainly in the area of El Salitre village and in the urban area of La Calera town, aspect that will affect basically residential areas, agriculture development zones with and without restrictions, main streets and country plots, this, with a maximum high of the water sheet equivalent to 27.24 cm and a total area of 1.7 km².

Keywords: Teusacá river, HEC-RAS, return periods, flood spots, modeling.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, la estacionalidad climática (ciclo anual) permite determinar las temporadas de más y menos lluvias; de esta forma, se distinguen especialmente el ciclo bimodal que se evidencia en la mayor parte del país con dos periodos de lluvia y dos de menos lluvias, y uno monomodal (una vez al año), el cual es más característico de la mayor parte de Orinoquía-Amazonía con un pico de lluvias hacia mitad del año (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres UNGRD, 2020). Hasta el año 2020 se han identificado 190.935 km² de zonas vulnerables a inundaciones, siendo este el desastre natural más concurrido en el país con un 30% del total de eventos registrados, afectando cerca de 19.625.681 personas a lo largo del territorio nacional hasta la fecha (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2020).

Según el Atlas de Riesgo de Colombia, elaborado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD), la estimación de las pérdidas anuales esperadas

por inundaciones a nivel municipal para Bogotá, son de 26.840 millones de pesos, mientras que en los municipios de La Calera, Sopó y Guasca se encuentra entre valores de los 201 a los 800 millones de pesos (Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2021).

El Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER) durante los últimos 20 años, a través del Sistema de Información para la Gestión del Riesgo y Cambio Climático – SIRE, ha registrado los eventos asociados al fenómeno de inundación en la ciudad de Bogotá, identificándose que durante el año 2011 se registró la mayor cantidad de este tipo de eventos, es importante precisar que este alto número de registros durante el año 2011 se debió al fuerte fenómeno de La Niña que durante esta época afectó gravemente al país (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, 2021). Actualmente gracias a la tecnología existen diversas herramientas para llevar a cabo estos estudios probabilísticos, que facilitan diferentes procedimientos hidráulicos. Estimar las zonas con mayor amenaza de inundación cada vez más se ha convertido en una necesidad para las comunidades aledañas a los diferentes afluentes ubicados en el territorio, por lo cual el presente proyecto es utilizado para evidenciar las zonas con alta probabilidad de inundaciones y con esto facilitar la gestión del riesgo por parte de las entidades gubernamentales para así mismo disminuir los daños y pérdidas generados por estos eventos. Actualmente en Colombia existen herramientas políticas que establecen las condiciones y parámetros obligatorios que se deben tener en cuenta en la atención de desastres por inundaciones, como lo es la ley 1523 del 2012 donde se adopta la política nacional de gestión del riesgo y establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo en Desastres (El Congreso de Colombia, 2012), o también el decreto-ley 919 de 1989 por el cual se organiza el sistema nacional para la prevención y atención de desastres y se dictan otras disposiciones (El Congreso de Colombia, 2012).

Para analizar o evaluar la amenaza por inundación existen diferentes metodologías como por ejemplo, el sistema de modelado hidrológico (HEC-RAS), este software permite al usuario realizar cálculos de flujo estable unidimensional, flujo inestable unidimensional y bidimensional, cálculos de lecho móvil/transporte de sedimentos y modelado de temperatura/calidad del agua. (U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC)) El sistema de análisis permite realizar cálculos hidráulicos de ríos de flujo unidimensional constante y 1D y 2D inestable, gracias a que se representa la información obtenida por la corrida de los modelos en forma de mapas temáticos, se pueden representar las zonas vulnerables a riesgos por inundación.

El presente proyecto tuvo como fin establecer las zonas amenazadas por inundaciones a causa del desbordamiento del río Teusacá. Para ello se implementó el software para modelamiento hidráulico HEC-RAS. Se utilizaron datos hidráulicos como caudal y velocidad, y datos topográficos de batimetría, los cuales fueron obtenidos en campo por medio de 3 salidas técnicas a 4 puntos diferentes del afluente, otra parte de los datos de caudales históricos se extrajeron de fuentes bibliográficas y bases de datos en la Corporación Autónoma Regional (CAR), los datos de caudales obtenidos, fueron preparados estadísticamente para así junto con la información de alturas y caudales extraídas en campo, llevar a cabo las etapas de modelación, validación y análisis.

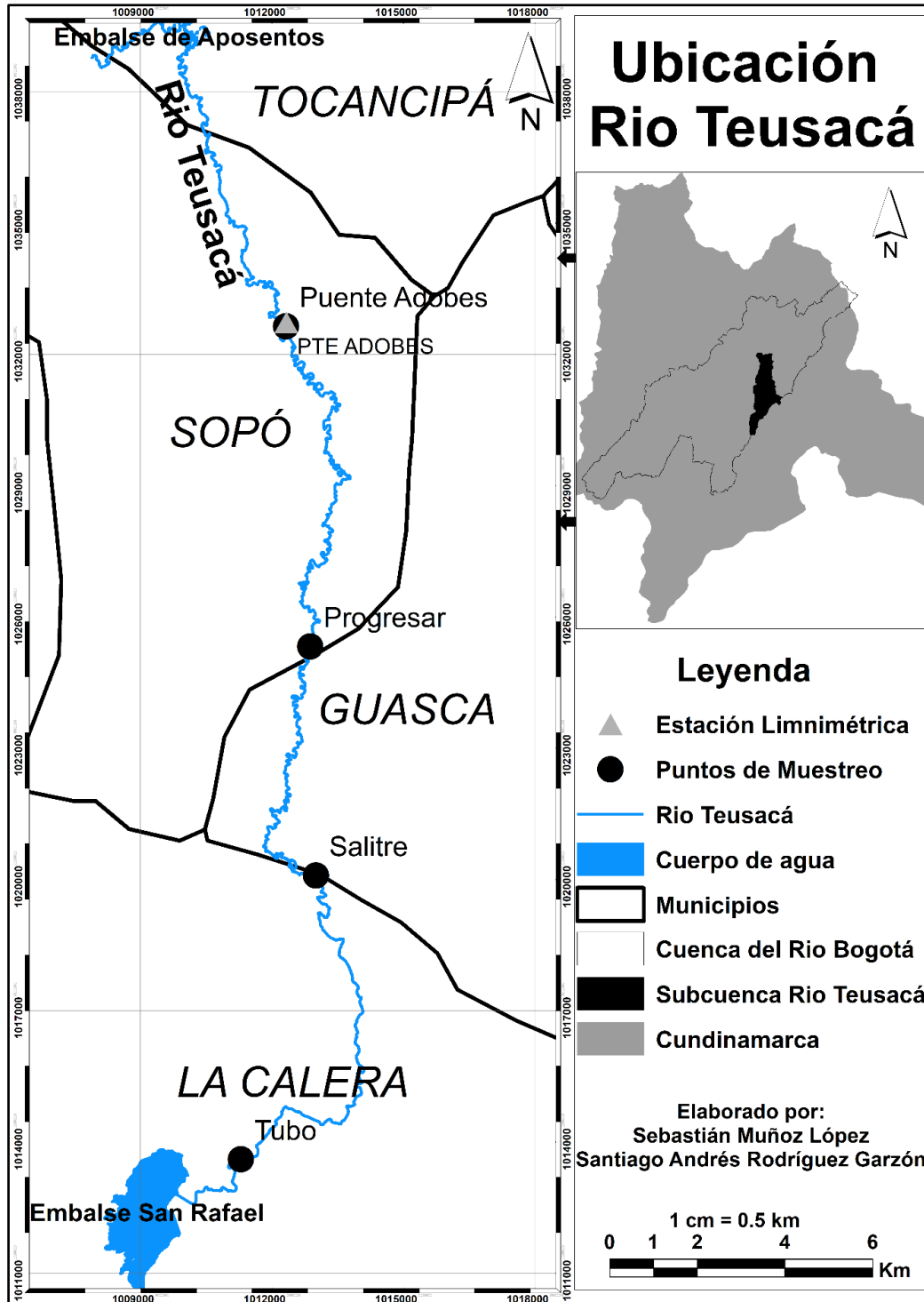
Área de estudio:

La subcuenca se encuentra ubicada en la parte alta de la cordillera Oriental y en el sector central del río Bogotá entre los municipios de La Calera, Sopó, Chía, Choachí, Guasca, Tocancipá y Ubaque, el cual presenta un gradiente de elevación entre los 2550 y 3650 m.s.n.m. A lo largo de la subcuenca se destacan sus relieves montañosos, ondulados a fuertemente quebrados y escarpados y el área total es de 35818,42 hectáreas (Planeación Ecológica Ltda. & Ecoforest Ltda., 2006). El río Teusacá abastece la mayor parte de municipios en los que se encuentra, incluyendo Bogotá D.C.

Además de ser uno de los principales sustentos para la agricultura de las zonas aledañas (Progresar E.S.P, 2021).

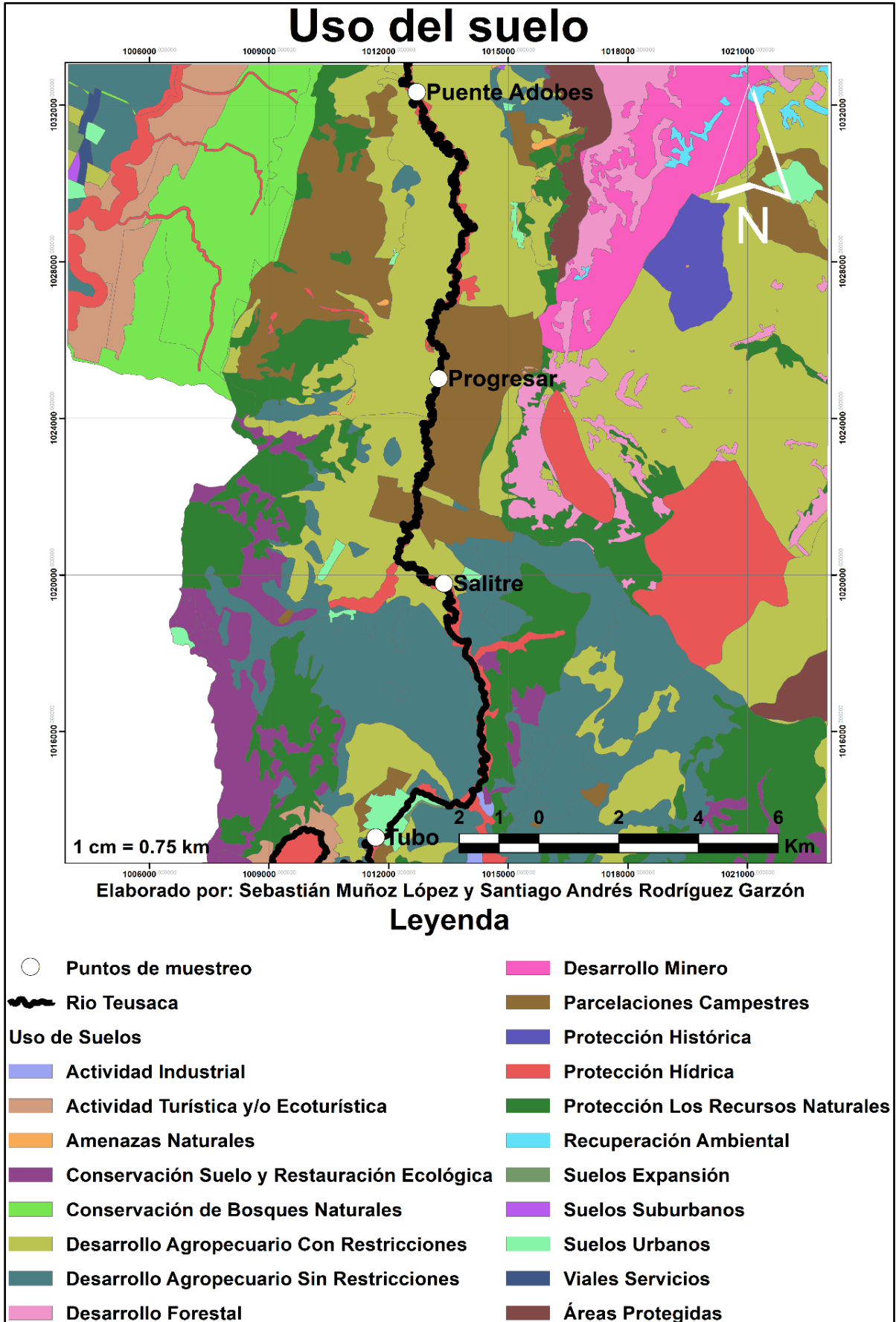
El cauce ha pasado por diversas intervenciones hidráulicas debido tanto a factores naturales, como a factores humanos, los cuales principalmente radican en los dragados y extracciones de diferentes materiales de su lecho, influyendo directamente en las características hidráulicas, así como también en la capacidad de almacenamiento de este, generando desbordamientos y pequeñas inundaciones afectando a la población cercana junto con su desarrollo económico y social, como también ambiental (CAR, 2017).

Ilustración 1. Ubicación Río Teusacá.



Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 2. Uso de suelos.



Fuente. Elaboración propia.

En la subcuenca se presenta el comportamiento bimodal en su precipitación, registrando períodos húmedos entre marzo y mayo y de octubre a diciembre con aproximadamente 90 a 95 mm mensuales, siendo octubre y noviembre los meses más húmedos del año, con un registro de 110 a 120 mm/mes aproximadamente. Los períodos de estiaje comprenden los meses entre diciembre y febrero y a mediados del año se extiende de junio a septiembre, siendo enero y septiembre los meses más secos, con un registro de 25 a 60 mm/mes (Carrillo et al., 2020).

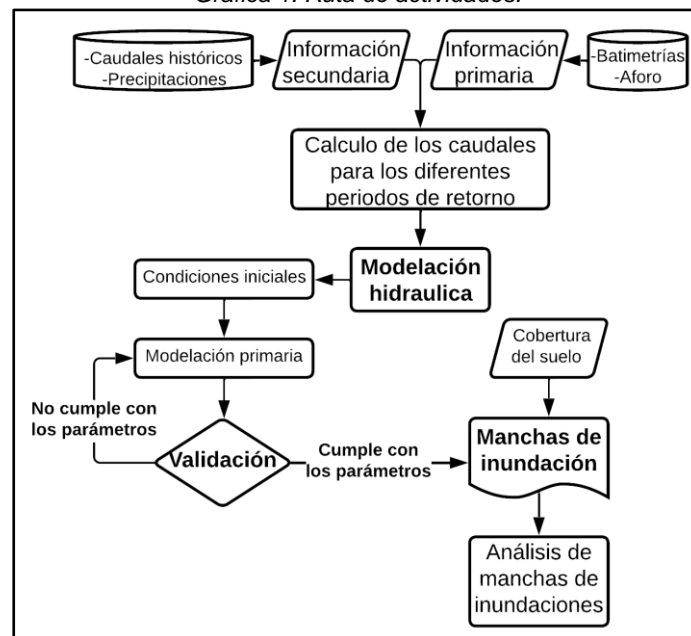
Aguas arriba de la parte media de la subcuenca se encuentra el embalse artificial de San Rafael, que cumple funciones de regulación de caudales, para la generación hidroeléctrica y el control de inundaciones en la Sabana de Bogotá, y almacenamiento para el abastecimiento del acueducto de Bogotá, en las épocas de mantenimiento del sistema de conducción Chingaza (Fajardo Patiño, 2015). Esto ha presentado varios problemas en la subcuenca, debido a que se desvían las aguas provenientes del Chingaza, hacia el embalse de San Rafael para atender las necesidades hídricas de Bogotá (Caleño & Toro, 2018).

Entre las principales actividades económicas que se presentan al interior de la cuenca, se encuentra la explotación de algunos minerales, principalmente material de construcción, hasta el 2018, se establecieron 11 explotaciones mineras de las cuales todas se encuentran activas dentro de la subcuenca (Agencia Nacional de Tierras, 2018). Por otro lado podemos encontrar la ganadería extensiva, cultivos especialmente de papa, hortalizas y flores junto con algunas grandes industrias como Alpina y Cemex. Sin embargo, gran parte de las construcciones campesinas, en los últimos años han sido reemplazadas por casas campestres destinadas para el recreo y el descanso (Carrero, 2012)

METODOLOGÍA

El presente proyecto se llevó a cabo en dos etapas principales, la primera consistió en una fase de campo la cual tuvo como finalidad la obtención de datos de caudal y alturas para la calibración, ésta se compone por 3 visitas, realizadas entre los meses de octubre y diciembre del 2021 y marzo del 2022, posteriormente en la segunda etapa se llevó a cabo el proceso de modelación hidráulica con base en HEC-RAS, con el fin de obtener las manchas de inundación para su posterior análisis, a continuación, se presenta el diagrama de flujo correspondiente a la metodología.

Grafica 1. Ruta de actividades.



Fuente. Elaboración propia.

Reconocimiento

Monitoreo en campo:

En las visitas técnicas se tomaron los datos de batimetría, aforo y coordenadas de cada punto de muestreo. En esta etapa se realizó la batimetría por medio de una mira y un nivel topográfico TOPCON AT-G6, en el cual se toman los niveles de la lámina de agua, las profundidades, las alturas del terreno y las distancias entre cada punto, adicional a esto se realizó la toma de velocidades mediante un molinete Global Water FP111, de acuerdo con los protocolos establecidos en la documentación del IDEAM aforos líquidos (IDEAM, 2008).

El punto del tubo (ilustración 3) se encuentra ubicado en 4°42'57" Latitud y 73°58'18" Longitud con una altura de 2.692 m.s.n.m, este punto de muestreo es el que contiene la menor altura de la lámina de agua, sin embargo el flujo del caudal es el más veloz y sus aguas se caracterizan por su transparencia y baja turbidez, además se observa un sustrato compuesto por rocas pequeñas o grava, junto con grandes rocas, se observa gran cantidad de árboles en la ribera sin embargo la ribera del río no es de gran altura, pero el cauce tiene gran anchura. En la ronda hídrica del río, se observaron mayormente viviendas.

El punto salitre (ilustración 4) se encuentra ubicado en las coordenadas 4°46'30" Latitud y 73°57'22" Longitud, con una altura de 2.573 m.s.n.m perteneciente al municipio de La Calera, este punto se caracteriza por contener gran cantidad de sacos de arena y gravilla, ubicados sobre la ribera del río con el fin de evitar la erosión, sin embargo algunas partes del muro de contención, el cual está hecho de lonas con arena a sufrieron daños, contaminando el efluente y aumentando los sedimentos. La presencia de varios deslizamientos de tierra es evidente en algunas zonas del río, principalmente en la margen izquierda, la ribera no supera 1.5 metros de altura, mientras que en la margen derecha presenta una ribera de cerca de 4 m de altura. Se observó la presencia de actividades ganaderas aledañas al río, además de la presencia de varias viviendas campestres y un puente sobre la carretera veredal sin pavimentar.

El punto progresar (ilustración 5) está ubicado en las coordenadas 4°49'20" Latitud y 73°57'27" Longitud y a una altura de 2.563 m.s.n.m, este punto se encuentra ubicado en la zona de captación de agua del acueducto Progresar E.S.P que realiza la potabilización y distribución de este recurso en los municipios aledaños, esta zona está dividida en dos partes, la primera se observa en la imagen, donde se construyó un canal en concreto para el paso del caudal permitiendo un mejor flujo del mismo, y aumentando la altura de la ribera, en la segunda parte se observa una ribera del río más baja, y se observan algunas zonas con vegetación al interior del afluente.

El último punto es puente adobes (ilustración 6) ubicado en las siguientes coordenadas: 4°51'52" Latitud y 73°57'15" Longitud, con una altura de 2.559 m.s.n.m, este punto se caracterizó por la presencia de alta vegetación en la ribera del río, además de observar gran cantidad de troncos o partes de árboles y arbustos caídos, también es evidente la alta turbidez del agua, es uno de los puntos donde se evidenció mayor contaminación, incluso se observaban pequeños parches de espuma contaminante. Se cuenta con una estación limnigráfica en este punto.

Ilustración 3. Punto de muestreo el Tubo.



Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 4. Punto de muestreo Salitre.



Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 5. Punto de muestreo Progresar.



Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 6. Punto de muestreo Puento Adobes.



Fuente. Elaboración propia.

Procesamiento de datos

Estimación de periodos de retorno de caudales:

Con base en la información de los caudales máximos mensuales anuales en un rango de 38 años (desde 1970 hasta 2008) obtenidos de la estación limnimétrica PTE ADOBES [2120788] perteneciente a la CAR, ubicada en las coordenadas 4°31'48" N y 73°34'48" W, se calcularon los caudales para los periodos de retorno de 2.5, 5, 25, 50 y 100 por medio de la distribución de probabilidad Gumbel para eventos extremos, la cual fue establecida por medio de una prueba de bondad de ajuste.

Ecuación 1. Distribución de Gumbel.

$$x = x_m + Dx = x_m + K \cdot S_{n-1}$$

Donde:

x : Valor máximo (caudal o precipitación) para un período de retorno T ; x_m : Media de la serie dada de valores máximos; Dx : Desviación respecto a la media, que se estima mediante el producto: $K \cdot S_{n-1}$; K : Factor de frecuencia, que indica el número de veces de desviación típica en que el valor extremo considerado excede a la media de la serie; S_{n-1} : Desviación estándar, desviación típica de los valores extremos.

Gracias a la prueba de bondad de ajuste, la cual arrojó como resultado un delta teórico equivalente a 0.0761, y ya que este es menor que el delta tabular 0.2617. Los datos se

ajustan a la distribución Gumbel, con un nivel de significación del 5%. Para la selección de la distribución adecuada se llevó a cabo un análisis de los datos, se tuvo en cuenta las más comunes y familiarizadas para eventos extremos, (Log Normal, Log Normal III, Log Pearson y Gumbel), para el caso de Log Normal III y Log Pearson, que son de 3 parámetros, se debe tener una serie de datos mínimo de 50 años, por ende no es apta. Por otro lado tenemos Log Normal y Gumbel, para definir cual se escogería, se calculó el coeficiente de asimetría, dando como resultado 0.98, y teniendo en cuenta que para Log Normal es recomendado coeficientes cercanos a 0, y Gumbel deben ser cercanos a 1.13, se eligió trabajar la distribución de Gumbel (Ortiz, 2015).

Modelo hidráulico

Para la aplicación del modelo hidráulico se hace uso del software HEC-RAS 5.0.3. y su aplicativo para sistemas de información geográfica HEC-geoRAS desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y su sección del Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center, por sus siglas HEC) Para el cálculo de las variables como altura de lámina de agua y área de afectación de las manchas de inundación, haciendo uso del módulo de flujo estacionario (Hydrologic Engineering Center, 2022).

Pre procesamiento de datos:

Para la obtención de las secciones transversales se utilizaron los datos de la batimetría registrados en campo. Por medio del Modelo Digital de Elevación (DEM) con una resolución de 12.5 m, se obtuvo el modelo TIN (Red de Triangulación Irregular), para establecer las condiciones topográficas iniciales de la zona de estudio, en el cálculo de la pendiente media del cauce, se obtuvo el valor de $0.047 \frac{m}{m}$. Estas condiciones topográficas fueron exportadas como geometrías al interfaz principal y mediante el modelo de flujo constante se ingresaron los valores de los caudales con el fin de evaluar la respuesta a los volúmenes y tiempos de retorno especificados.

El modelado se realizó por medio de *perfiles de superficie de agua de flujo constante*, su procesamiento computacional se basa en la ecuación de energía unidimensional. Las pérdidas de energía por fricción son evaluadas por la ecuación de Manning y las pérdidas por contracción/expansión por el coeficiente multiplicado por el cambio en la cabeza de velocidad (Hydrologic Engineering Center, 2022).

Ecuación 2. Manning.

$$Q = \frac{1}{n} A \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{S}$$

Donde:

Q : Caudal ($\frac{m^3}{s}$); n : Rugosidad; A : Área (m^2); R : Radio hidráulico ($\frac{m^2}{m}$); S : Pendiente de la línea de energía ($\frac{m}{m}$).

Para la modelación 2D se implementan las ecuaciones de Saint - Venant que han demostrado ser un modelo matemático útil con amplia gama de aplicaciones en diferentes ramas de la ingeniería, este se basa en el desarrollo de ecuaciones diferenciales que modelan la variación del caudal y nivel de un flujo en un espacio unidimensional y el tiempo de manera permanente en canales abiertos (Amarís et al., 2015).

Ecuación 3. Saint-Venant continuidad.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0$$

Donde:

Q : Caudal ($\frac{m^3}{s}$); A : Área (m^2).

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(s_0 - s_f) = 0$$

Donde:

y : Profundidad (m); s_0 : Pendiente de canal ($\frac{m}{m}$); s_f : Pendiente de fricción ($\frac{m}{m}$); g : Gravedad ($\frac{m}{s^2}$).

Por otra parte, para la obtención del número de Manning en campo se tuvieron en cuenta el tipo de sustrato y las características del río (Hydrologic Engineering Center, 2022), también se llevó a cabo el proceso de calibración manual, para ello se establecieron los niveles de la lámina de agua obtenidos en campo y por medio de diferentes iteraciones, se obtuvieron los niveles del modelo, para así poder establecer el número de Manning que mejor se ajusta al modelo y obtener mejores resultados.

Se implementó el coeficiente de Nash y el error cuadrático medio para evaluar la confiabilidad del modelo, se afirma que el error cuadrático medio (RMSE) mide en promedio qué tan alejados están los datos observados de los estimados, entre menor sea el valor del RMSE, mayor confiabilidad tendrá el modelo (Soto & González, 2019). Por otra parte, el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación, y puede ser utilizado para cualquier escala de tiempo, si la simulación es perfecta el valor de $E=1$ (Cabrera, 2017).

Ecuación 4. Nash-Sutcliffe (NSE).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{Y})^2}$$

Ecuación 5. Error cuadrático medio (RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}}$$

Donde:

y_i : Valor observado; \hat{Y}_i : Valor calculado; \bar{Y} : Promedio de los datos observados; N : Número de datos observados.

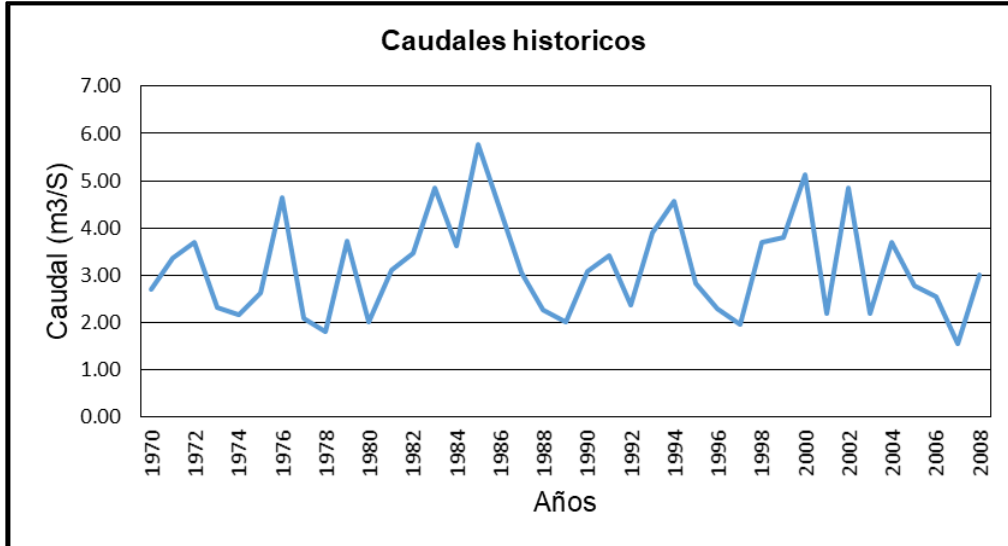
Una vez se obtuvieron los resultados del modelado en 2D, por medio de la extensión RAS Mapper, se visualizaron los resultados en un formato de mapa, que permite evaluar la profundidad y el área, para ello implementa imágenes satelitales, las cuales muestran la geografía de un territorio específico, dando a conocer estructuras o ambientes naturales, permitiendo establecer así cuales son las posibles afectaciones en los ámbitos urbanos y rurales de las inundaciones, por último se elaboró el mapa de usos del suelo, de las zonas cercanas al cauce principal, para realizar un contraste y definir las posibles afectaciones.

RESULTADOS

Análisis de caudales y periodos de retorno:

La subcuenca del río Teusacá presenta una gran variación en los caudales históricos, siendo los años 1985, 2000 y 2002 los de mayor caudal transitado, equivalente a $5.77 \text{ m}^3/\text{s}$, $5.09 \text{ m}^3/\text{s}$ y $4.88 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente, mientras que para los años 2007, 1978 y 1997 se presenta el mínimo caudal transitado igual a $1.54 \text{ m}^3/\text{s}$, $1.85 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.98 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. Se puede observar un comportamiento muy variable, ya que la curva llega a zonas bajas y altas de manera alternada, esto se debe a los fenómenos del niño y de la niña que afectan a la zona trópica.

Grafica 2. Caudales históricos.



Fuente. Elaboración propia.

Los caudales ingresados se encuentran en un rango de 3.35 a $12.44 \text{ m}^3/\text{s}$, para los años registrados (1970 - 2008), con base en esto se calcularon los caudales por medio de la distribución Gumbel para cada periodo de retorno, dando como resultado lo siguiente:

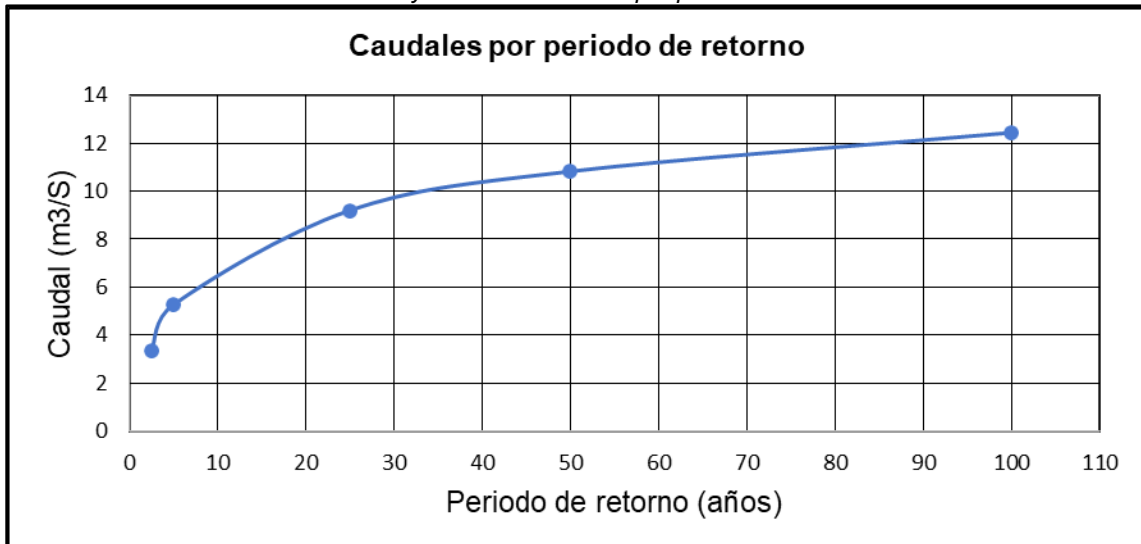
Tabla 1. Caudales para cada periodo de retorno.

| T (años) | 2.5 | 5 | 25 | 50 | 100 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|
| Q(T) (m^3/s) | 3.357 | 5.272 | 9.201 | 10.827 | 12.442 |

Fuente. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 2, se obtuvo la siguiente gráfica que representa su comportamiento:

Grafica 3. Proyección de caudales por periodo de retorno.



Fuente. Elaboración propia.

Se observa la variación de los caudales que se pueden presentar para cada periodo de retorno de manera exponencial. A mayor periodo de retorno, mayor será el caudal.

Calibración:

Tabla 2. Calibración.

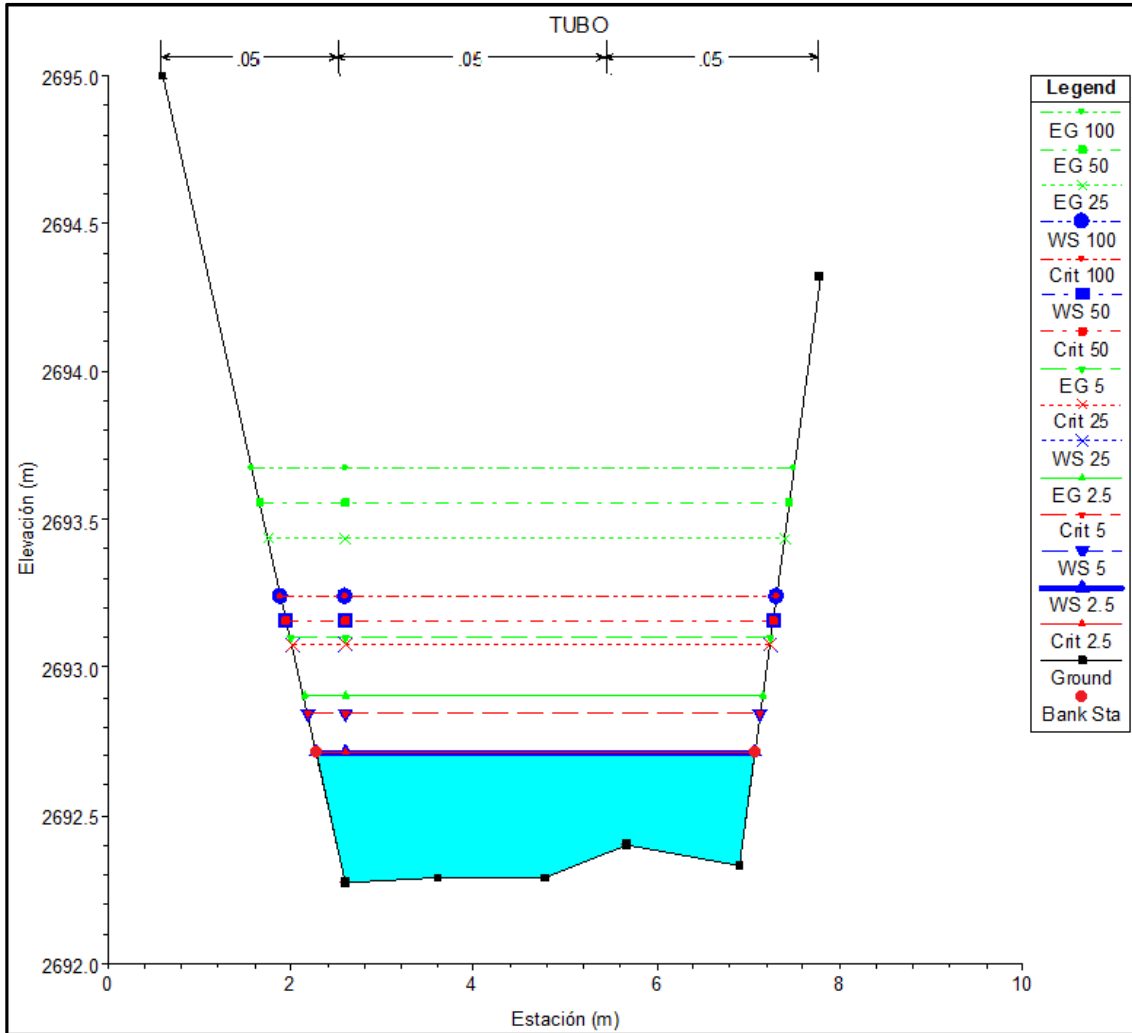
| PUENTE | | | | | |
|--------------------------|-----------------|----------------------|---------------|----------------|-------------------------|
| Numero de manning | ID | ALTURA LAMINA | | C. NASH | ERROR CUADRATICO |
| | Zona | Banco izquierdo | Banco derecho | | |
| 0.05 | Valor Observado | 2559.1 | 2559.02 | 0.99999986 | 0.480468521 |
| | Valor modelado | 2559.72 | 2559.71 | | |
| 0.15 | Valor Observado | 2559.1 | 2559.02 | 0.99999986 | 0.475157869 |
| | Valor modelado | 2559.69 | 2559.69 | | |
| 0.001 | Valor Observado | 2559.1 | 2559.02 | 0.99999997 | 0.208026441 |
| | Valor modelado | 2559.33 | 2559.33 | | |
| PROGRESAR | | | | | |
| 0.05 | Valor Observado | 2565.03 | 2565.04 | 0.999999737 | 0.991778705 |
| | Valor modelado | 2565.63 | 2565.63 | | |
| 0.15 | Valor Observado | 2565.03 | 2565.04 | 0.99999809 | 1.99048361 |
| | Valor modelado | 2567.38 | 2567.38 | | |
| 0.001 | Valor Observado | 2565.03 | 2565.04 | 0.99999995 | 0.625259946 |
| | Valor modelado | 2565.28 | 2565.28 | | |
| SALITRE | | | | | |
| 0.05 | Valor Observado | 2634.48 | 2634.47 | 0.999999886 | 0.444043917 |
| | Valor modelado | 2634.73 | 2634.73 | | |
| 0.15 | Valor Observado | 2634.48 | 2634.47 | 0.99999968 | 0.740641614 |
| | Valor modelado | 2634.27 | 2634.27 | | |
| 0.001 | Valor Observado | 2634.48 | 2634.47 | 0.99999965 | 0.780864905 |
| | Valor modelado | 2634.26 | 2634.26 | | |
| TUBO | | | | | |
| 0.05 | Valor Observado | 2694.11 | 2694.13 | 0.999999357 | 1.078424777 |
| | Valor modelado | 2693.15 | 2693.15 | | |
| 0.15 | Valor Observado | 2694.11 | 2694.13 | 0.99999985 | 0.527612547 |
| | Valor modelado | 2694.14 | 2694.14 | | |
| 0.001 | Valor Observado | 2694.11 | 2694.13 | 0.99999888 | 1.425447298 |
| | Valor modelado | 2692.71 | 2692.71 | | |

Fuente. Elaboración propia.

La tabla 3, representa el proceso que se llevó a cabo en la calibración manual, donde podemos observar algunas de las iteraciones que se realizaron por medio del software para la obtención del número de manning. De acuerdo con el coeficiente de Nash y el error cuadrático, se estableció que se usaría el manning de 0.05 a lo largo del cauce.

En la fase de la modelación hidráulica, los resultados correspondientes a la cota máxima de la lámina de agua de cada uno de los caudales modelados, se basan teniendo en cuenta las secciones transversales tomadas en campo, en cada uno de los puntos de control se evidencian a continuación:

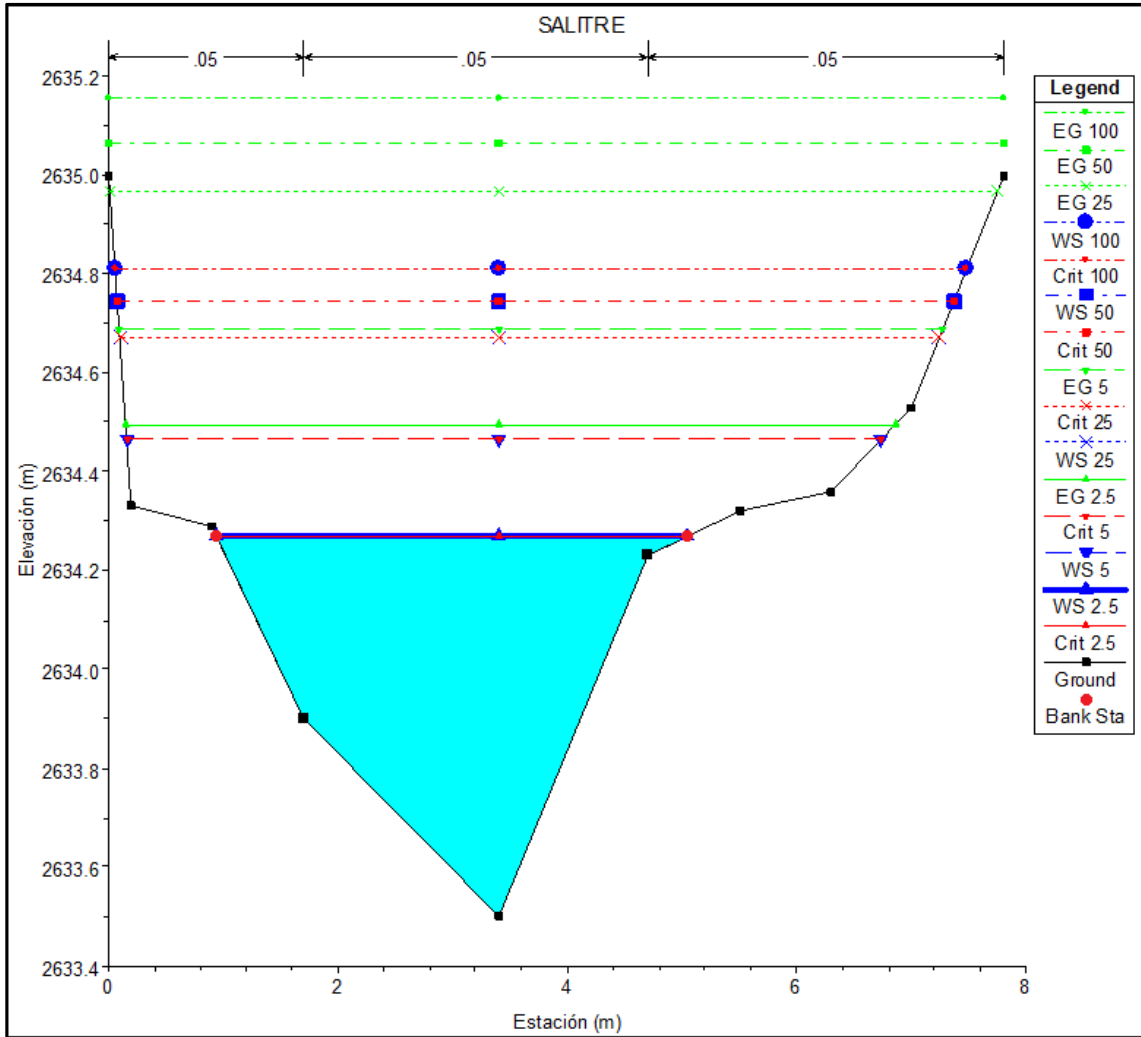
Ilustración 7. Sección transversal Tubo.



Fuente. Elaboración propia.

Esta sección transversal corresponde al punto el tubo el cual se encuentra ubicado en la parte alta del cauce principal, se observa que aun con el periodo de retorno de 100 años, no evidencia algún desbordamiento, incluso teniendo en cuenta la línea de energía, ya que en esta zona la ribera del río es considerablemente alta, ya que alcanza aproximadamente 3 metros de altura, desde el fondo del efluente.

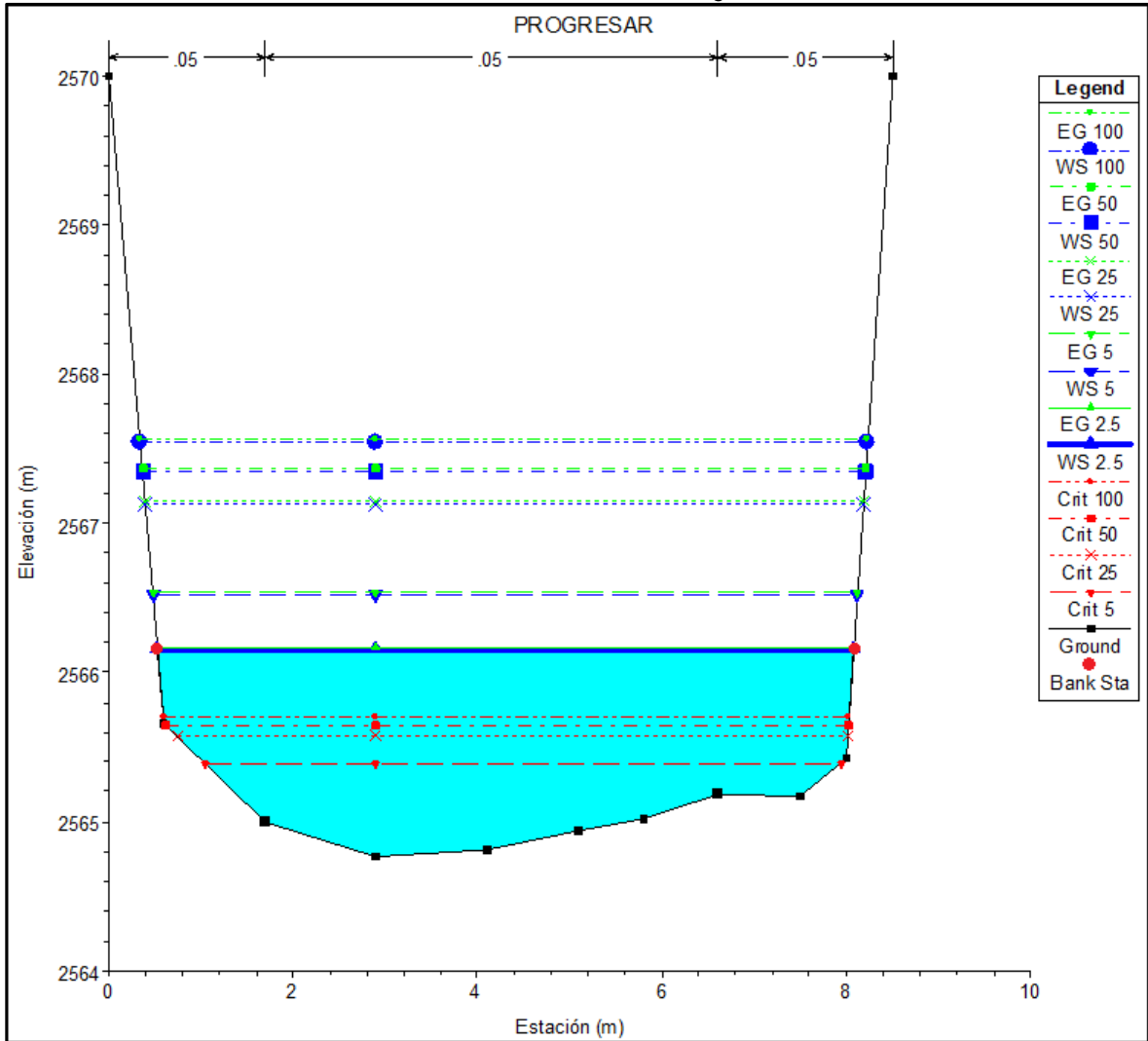
Ilustración 8. Sección transversal Salitre.



Fuente. Elaboración propia.

En la zona de muestreo el salitre hay probabilidad de desbordamiento para los periodos de retorno de 50 y 100 años, donde se observa que la línea de energía sobrepasa el margen del río, a pesar de encontrar una pequeña llanura que ayuda a contener el flujo, la sección transversal tiene zonas profundas, pero angostas, lo que provoca gran aumento de la lámina de agua, en muy poco tiempo de lluvia.

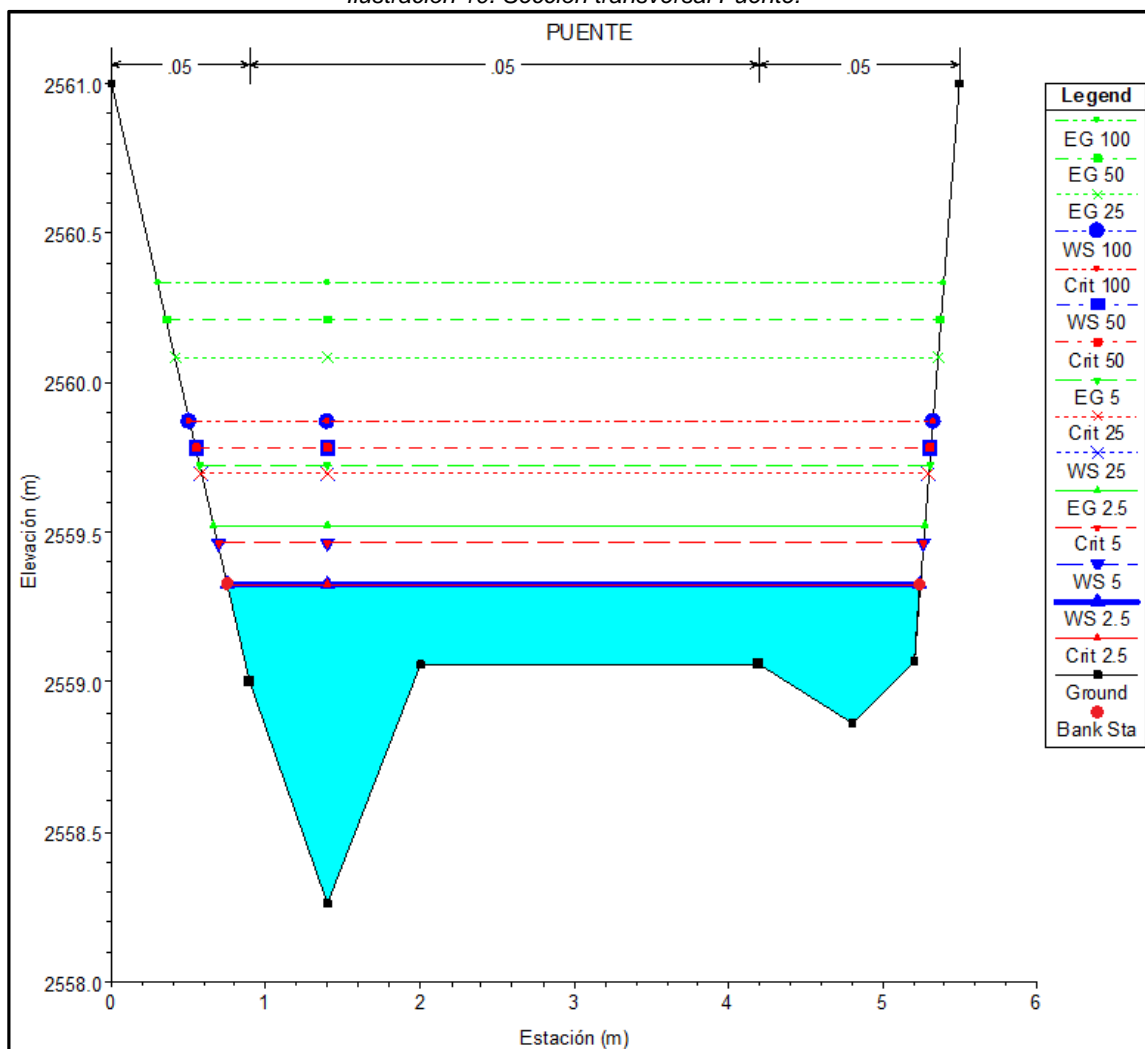
Ilustración 9. Sección transversal Progresar.



Fuente. Elaboración propia.

En este punto se encuentra el acueducto de Progresar E.S.P., lo que representa una captación de agua para su respectiva potabilización y distribución en los municipios aledaños, por esta misma razón, se construyó un canal trapezoidal. Por ende los niveles de la lámina de agua disminuyen, como podemos observar en la ilustración 9. Teniendo también en cuenta que parte de ese caudal es desviado hacia la planta Progresar, para realizar la captación de agua para su posterior tratamiento y distribución a los municipios aledaños, disminuyendo los niveles de la lámina de agua en zonas más bajas del río, esto puede presentar un peligro, ya que 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.

Ilustración 10. Sección transversal Puente.



Fuente. Elaboración propia.

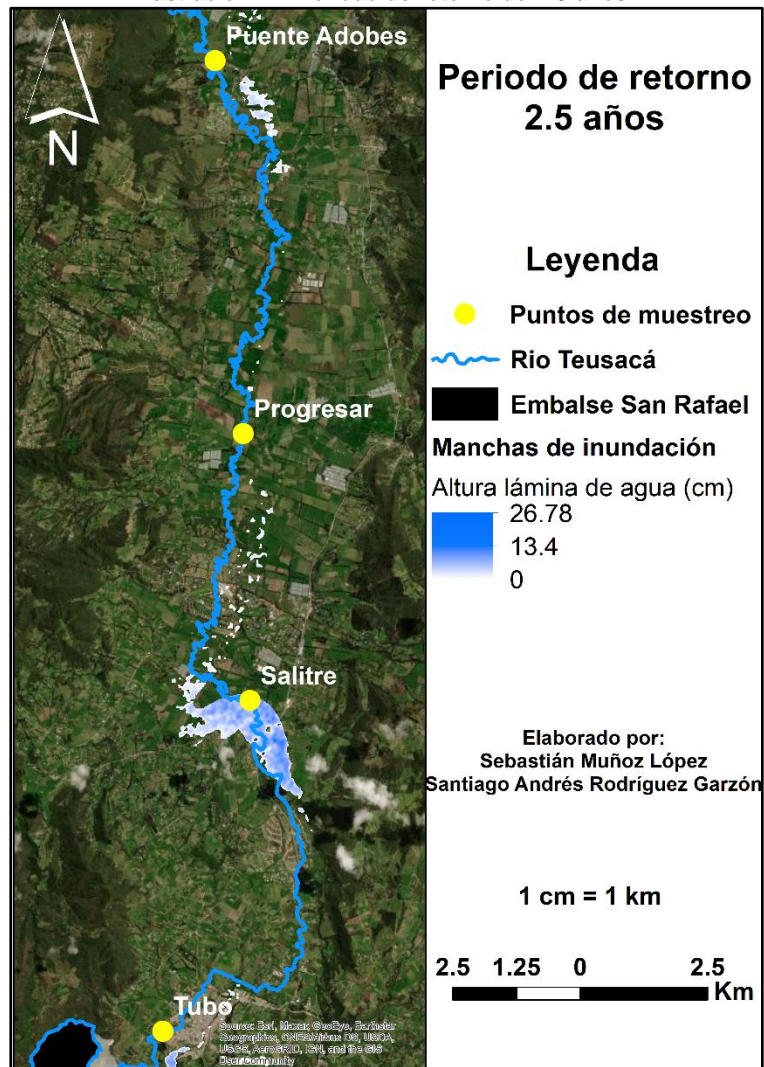
El puente es el último punto de muestreo aguas abajo, siendo la zona de muestreo con una menor anchura (5.5 m) en comparación a las anteriores, pero con una mayor profundidad, soportando así el caudal para los diferentes periodos de retorno, además cuenta con una ribera muy alta, lo cual según lo modelado es un punto el cual tendría pocas probabilidades de desbordamientos, además, este punto se caracterizó por su gran vegetación en la orilla del río.

Estimación y análisis de las manchas de inundación:

La fase hidráulica permitió mostrar los posibles caudales y valores de altura de lámina de agua para cada tiempo de retorno, sin embargo la fase en 2D proporcionan representaciones hidráulicas realistas, menos suposiciones y menos juicios de valor por parte de los lectores, y por último representa condiciones complejas tales como llanuras de inundación, canales sinuoso, canales múltiples, curvas, confluencias entre muchas otras, a lo largo de todo el efluente (Imasgal, 2022). Para la obtención de las manchas de inundación, se tomaron los resultados de la fase de modelado en 2D, y se insertó una cobertura de suelo satelital, que permitió identificar más a detalle el comportamiento del cauce con sus respectivos desbordamientos para los diferentes periodos de retorno, como también las afectaciones a los bienes y a la salud.

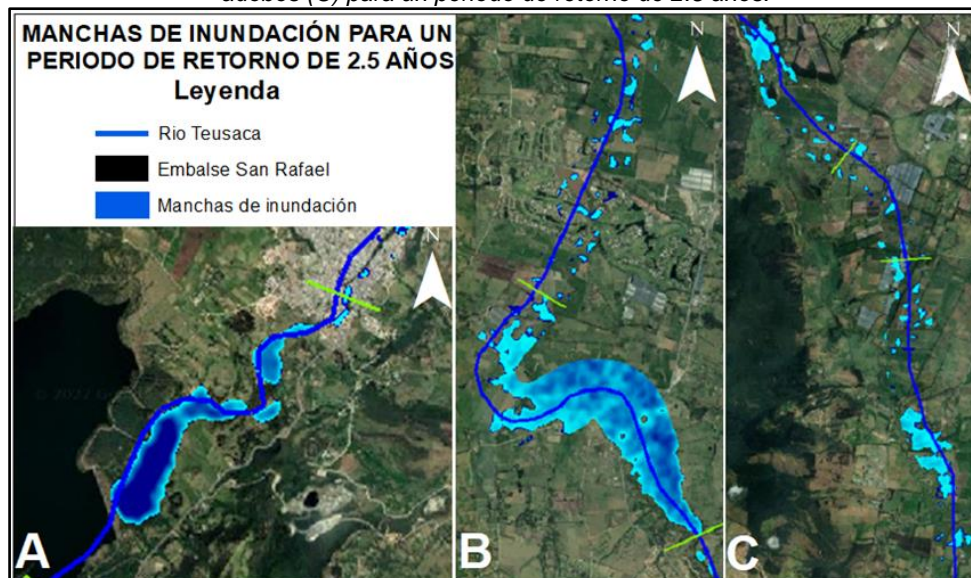
- Periodo de retorno de 2.5 años:

Ilustración 11. Periodo de retorno de 2.5 años.



Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 12. Manchas de inundación de zonas críticas, aguas arriba del tubo (A), el salitre (B) y puente adobes (C) para un periodo de retorno de 2.5 años.



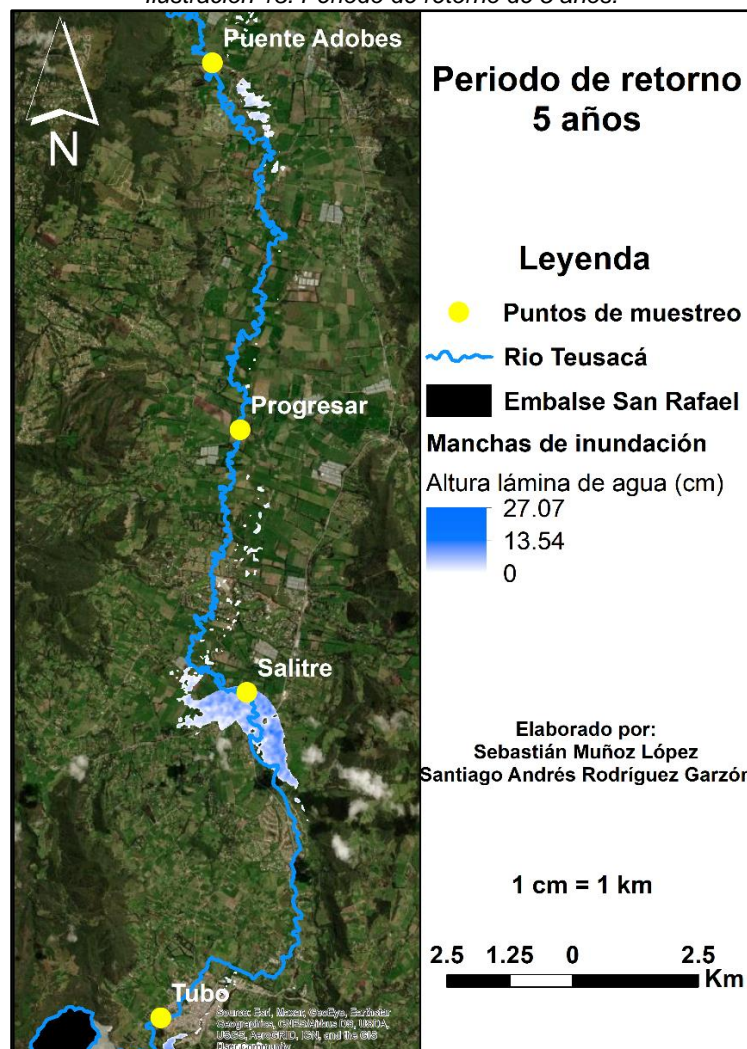
Fuente. Elaboración propia.

Gracias a lo presentado en el mapa donde se evidencian las manchas de inundación más representativas encontramos tres zonas en las cuales se presentan inundaciones considerables para un tiempo de retorno de 2.5 años, demostrando que para este periodo de retorno el cauce del río no soporta un caudal de $3.357 \text{ m}^3/\text{s}$; estas manchas de inundación se ubican aproximadamente en los siguientes puntos, el tubo (imagen A), el salitre (imagen B) y puente adobes (imagen C) abarcando un área total aproximada de 1.42 km^2 y una altura de la lámina de agua máxima de 26.78 cm .

Al realizar el levantamiento de los datos en campo, se observó la zona la cual se ve principalmente afectada por las inundaciones, gracias a esto, se evidenció una relación directa entre la topografía del sitio y las inundaciones presentadas ya que son principalmente zonas de planicie, es decir, con poca pendiente y baja capacidad para evacuar caudales, las cuales son más propensas a que se presenten inundaciones. Dichas zonas mencionadas son de desarrollo agropecuario con y sin restricciones (D.A.C.S.R.), vías principales (V.P.), parcelaciones campestres (P.C.) y una pequeña urbanización (P.U.), donde de los 1.42 km^2 afectados, el 75% corresponde a D.A.C.S.R., un 10% a V.P., 10% a P.U. y 5% a P.C.

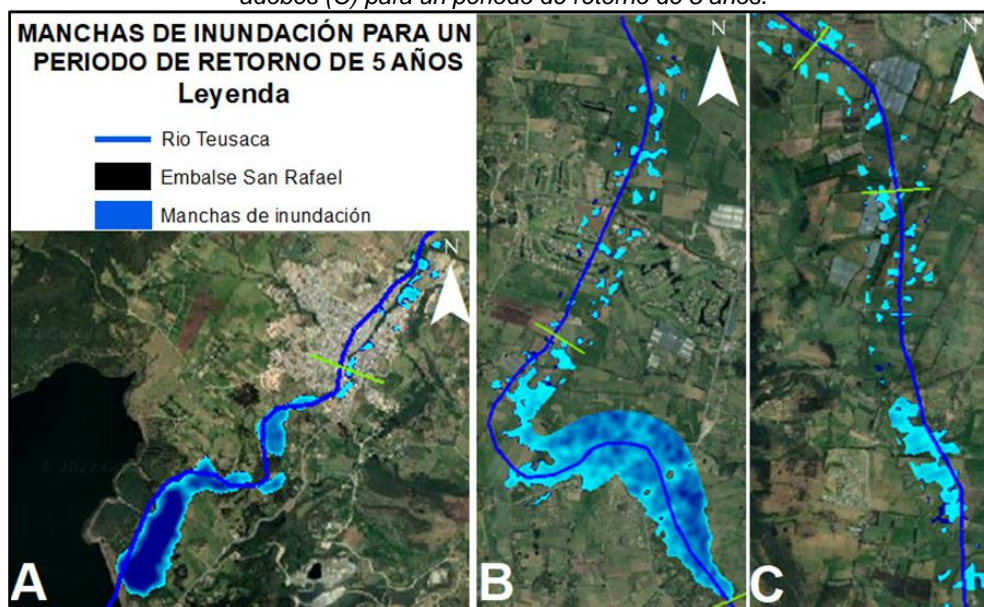
- Periodo de retorno de 5 años:

Ilustración 13. Periodo de retorno de 5 años.



Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 14. Manchas de inundación de zonas críticas, aguas arriba del tubo (A), el salitre (B) y puente adobes (C) para un periodo de retorno de 5 años.



Fuente. Elaboración propia.

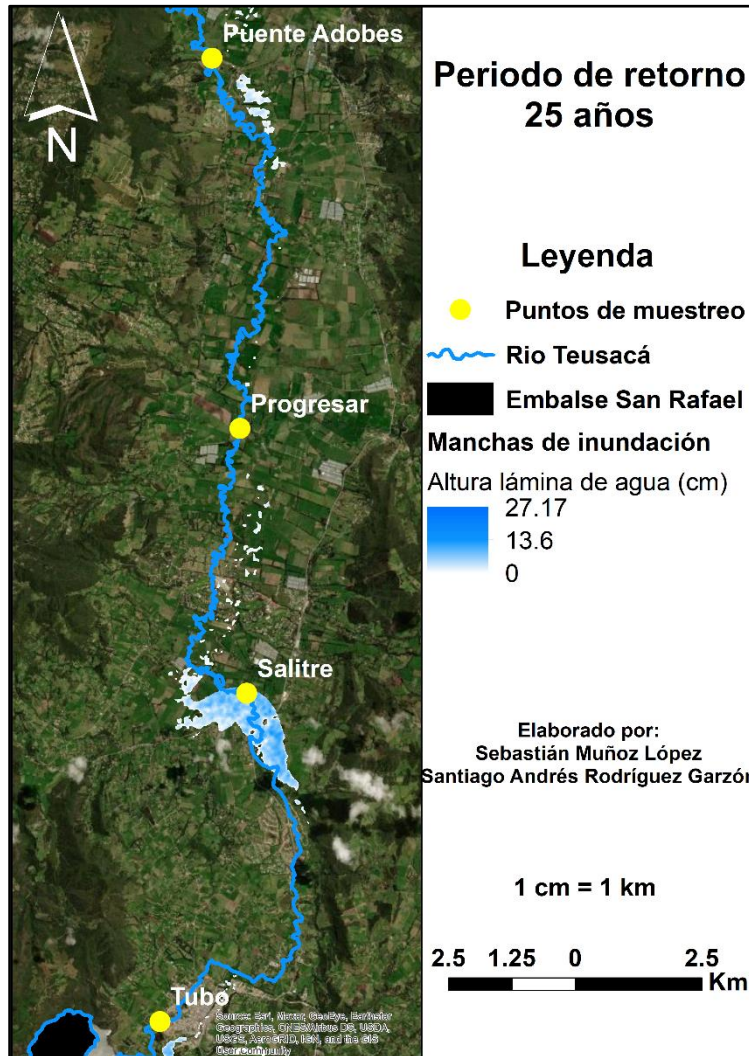
Para un periodo de retorno de 5 años, el cual tuvo un cálculo de caudal equivalente a $5.272 \text{ m}^3/\text{s}$, permite inferir que el río no soporta dicho caudal en este tramo en específico, generando así desbordamientos similares a los simulados en el periodo de retorno de 2.5 años, con la diferencia que acá se empieza a presentar nuevos desbordamientos en la zona urbana de la Calera (imagen A) y en zonas aledañas al punto de muestreo de puente adobes (imagen C).

Como se evidencia en la ilustración, el municipio de la Calera ya empieza a correr riesgo por inundaciones, las cuales se presentan ya que la zona aledaña al río es una planicie con un suelo asfaltado, un factor por el cual se genera la acumulación del agua. Además de esto, no se acata la ronda hídrica del río Teusacá, la cual es de 30 metros de ancho alrededor de este (Murillo et al., 2018), al no respetarla, la población se atiene a que esto pueda suceder, afectando las diferentes infraestructuras presentes en el lugar.

En base a lo arrojado por el modelo 2D, se contempló una zona afectada de 1.58 km^2 con una altura de la lámina de agua correspondiente a 27.07 cm , afectando en un 78% zonas de desarrollo agropecuario con y sin restricciones, 8% vías principales, 8% a una pequeña urbanización, 3% a parcelaciones campestres y en un 3% al municipio de la Calera.

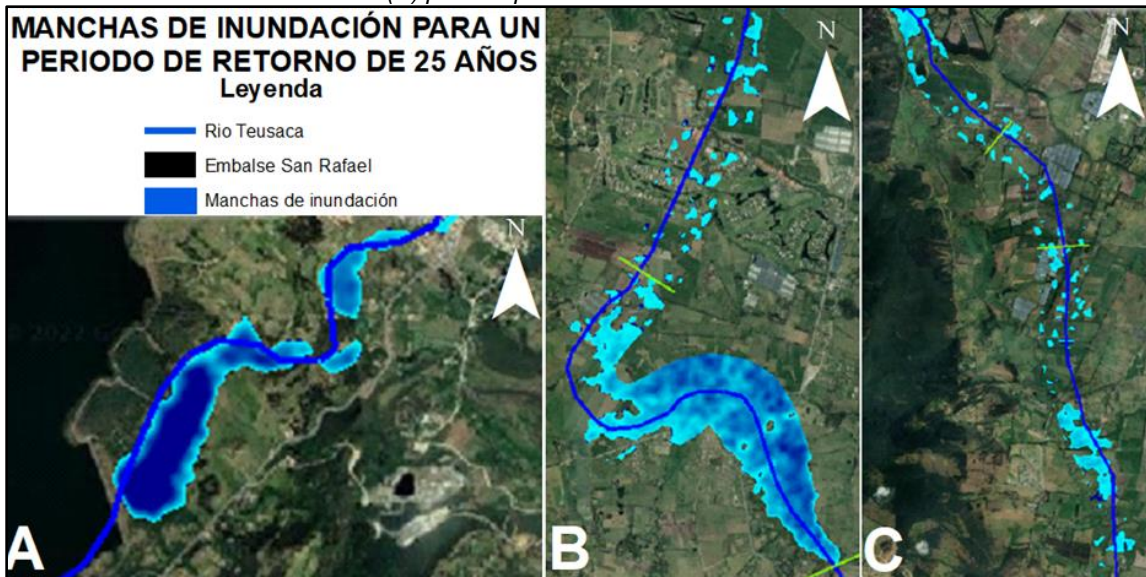
- Periodo de retorno de 25 años:

Ilustración 15. Periodo de retorno de 25 años.



Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 16. Manchas de inundación de zonas críticas, aguas arriba del tubo (A), el salitre (B) y puente adobes (C) para un periodo de retorno de 25 años.



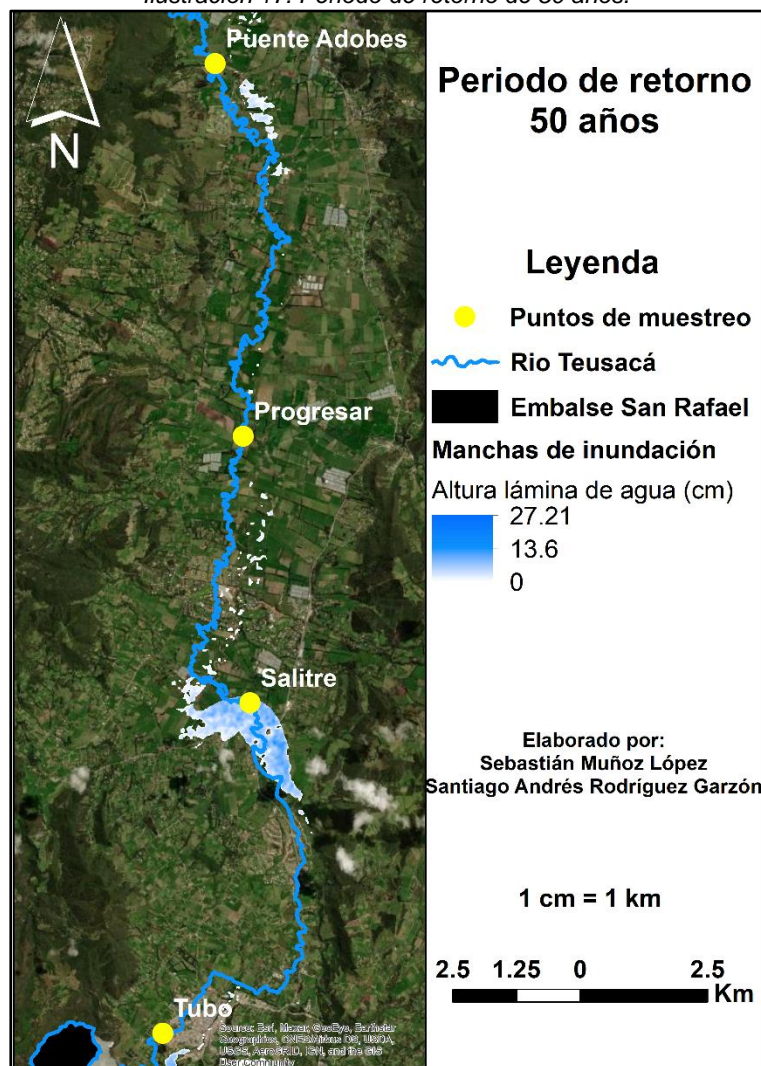
Fuente. Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por el software HEC-RAS, se demuestra amplitud en las manchas de inundación presentadas en las aproximaciones de puente adobes (imagen C) dejando afectaciones mayormente a zonas de desarrollo agropecuario con y sin restricciones; además de esto se evidencia en la imagen B, zonas de inundación dispersas las cuales afectan directamente a un prestigioso club social llamado la pradera el cual está ubicado en la planicie adena al punto de muestreo del salitre.

Nuevamente se identifica que el cauce del río no soporta un caudal de $9.201 \text{ m}^3/\text{s}$ generando así las inundaciones presentadas en la ilustración 11, dejando un área total afectada de 1.63 km^2 con una profundidad de la inundación de 27.07 cm , afectando directamente zonas de desarrollo agropecuario con y sin restricciones en un 80%, parcelaciones campestres antes mencionado como el club social en un 3%, al municipio de la Calera en un 5%, a una pequeña urbanización en un 7% y a vías principales en un 5% con respecto al área total afectada.

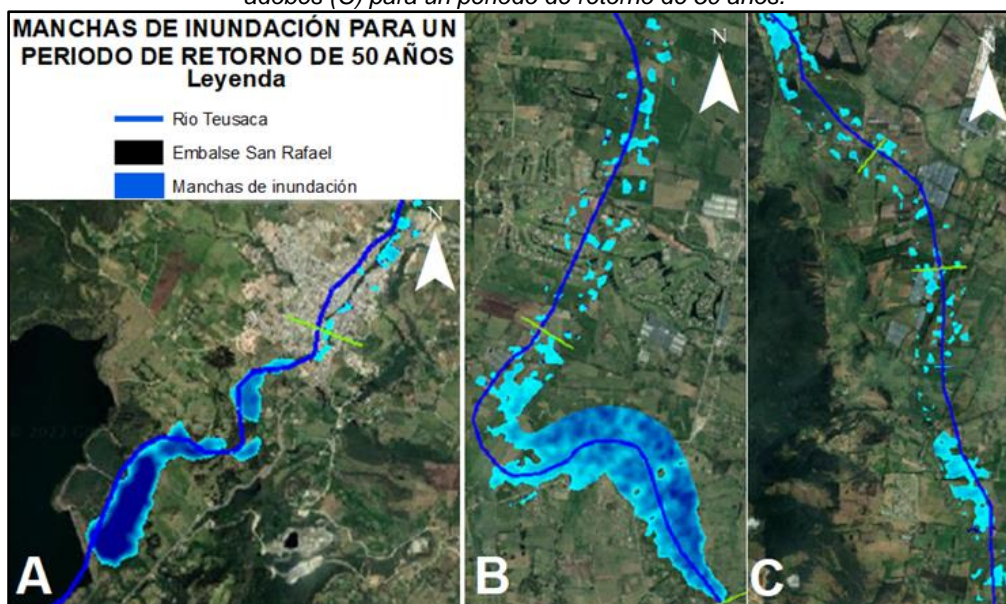
- Periodo de retorno de 50 años:

Ilustración 17. Periodo de retorno de 50 años.



Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 18. Manchas de inundación de zonas críticas, aguas arriba del tubo (A), el salitre (B) y puente adobes (C) para un periodo de retorno de 50 años.



Fuente. Elaboración propia.

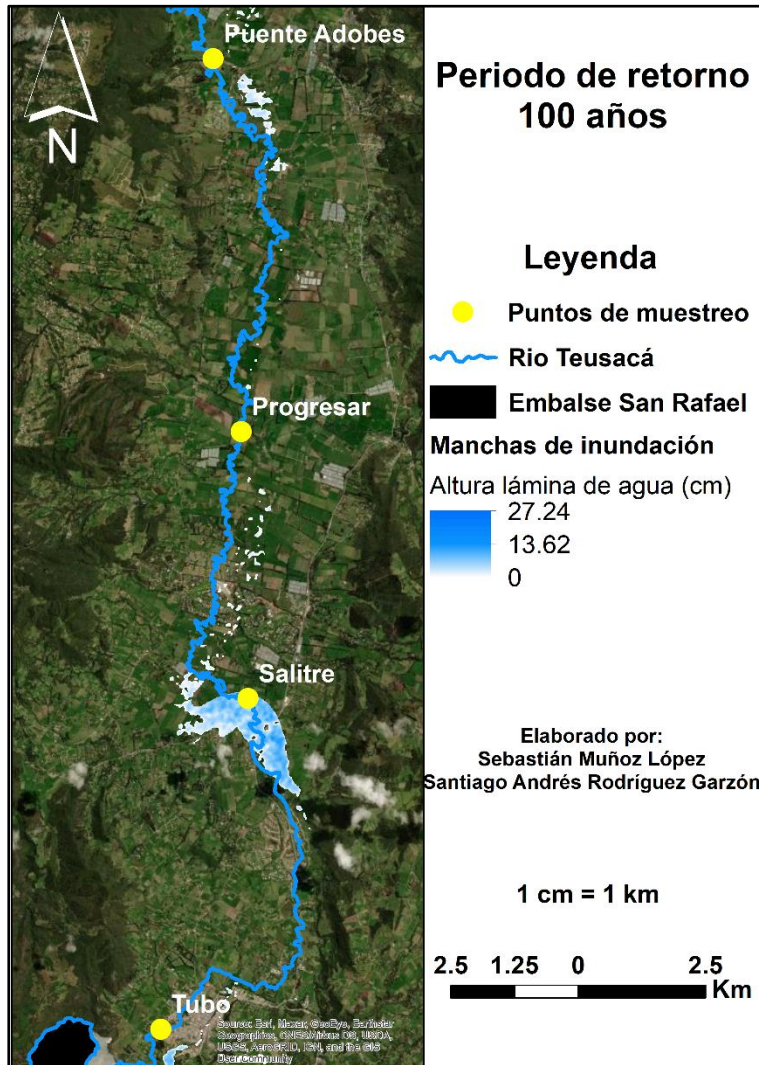
Para este periodo de retorno encontramos manchas de inundación similares a las anteriores, pero con la ampliación de estas en el centro urbano del municipio de la Calera afectando un 6%, además de las zonas antes mencionadas.

Esto indica un gran riesgo frente a la población presente en el lugar, ya que el río tiene su cauce que transcurre por la mitad del pueblo afectando así a viviendas, infraestructura comercial, además de vías públicas principales, lo cual permite demostrar que para un periodo de retorno de 50 años el cauce del río Teusacá no alcanza a transportar un caudal de $10.83 \text{ m}^3/\text{s}$.

Siendo las zonas afectadas las mismas que en los periodos anteriores, se puede demostrar que la altura de la lámina de agua es mayor y por ende el área afectada también presenta un incremento, aunque es mínimo, este se evidencia en el modelo 2D, el cual tiene valores de 27.21 cm de profundidad para la lámina de agua y de 1.66 km^2 , donde además de presentar las afectaciones al municipio de la Calera, también se encuentran impactos a zonas de desarrollo agropecuario con y sin restricciones en un 78%, vías principales en un 6%, parcelaciones campestres en 4% y una pequeña urbanización en un 6%.

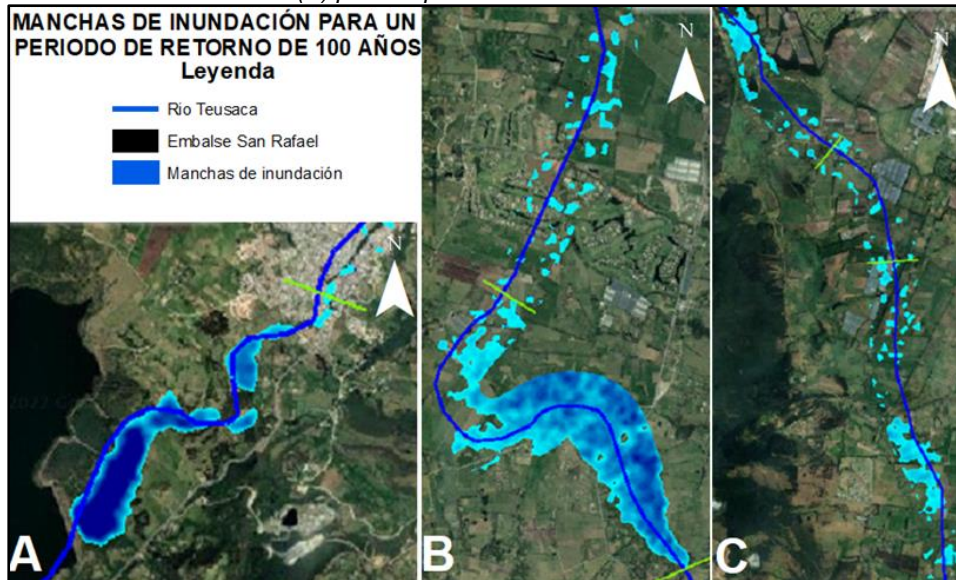
- Periodo de retorno de 100 años:

Ilustración 19. Periodo de retorno de 100 años.



Fuente. Elaboración propia.

Ilustración 20. Manchas de inundación de zonas críticas, aguas arriba del tubo (A), el salitre (B) y puente adobes (C) para un periodo de retorno de 100 años.



Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo con la información topográfica y la verificación en campo que se realizó durante el periodo de trabajo se verificó que el río no soporta un caudal correspondiente a $12.44 \text{ m}^3/\text{s}$ el cual se ve efectivo ya que se ha inundado para este periodo de retorno una gran parte de la zona del salitre (imagen B) superando el nivel máximo soportado por el canal, afectando así a zonas de desarrollo agropecuario con y sin restricciones en un 50%, vías principales en un 6%, parcelaciones campestres en 4% y una pequeña urbanización en un 3%, igualmente cómo se representa en la imagen A, zona perteneciente al municipio de la Calera, se ve afectada en un 6%.

Finalmente encontramos pequeñas manchas de inundación en la imagen C, perteneciente a las zonas aledañas al punto de muestreo puente adobes, donde al no ser de gran tamaño como las anteriores, se tiene en cuenta ya que en la zona se presenta pequeñas urbanizaciones las cuales se ven afectadas en un 3%, además de esto, también predominan actividades económicas como el desarrollo agropecuario con y sin restricciones donde este se ve afectado en un 29%. Todo esto fue calculado gracias a los resultados obtenidos en el modelo 2D, donde se presenta una altura máxima de la lámina de agua de 27.24 cm para las zonas inundadas y un área de afectación de 1.7 km^2 .

La presencia de vegetación ribereña en el río es importante para la disminución de las inundaciones en la parte baja del cauce, gracias a las raíces presentes en el suelo, que son acumuladoras de agua y de sedimentos, además de funcionar como zonas de recarga de aguas subterráneas (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2012). Esto se puede evidenciar en su mayoría en el punto de puente adobes, el cual presenta gran cantidad de vegetación ribereña la cual ayuda a prevenir desbordamientos como se indica en la sección transversal modelada. El río cuenta con sustrato arenoso y grava, pero también arrastra mucho material de gran tamaño como rocas o troncos gracias a la gran cantidad de caudal que transita, que en algunos tramos del cauce puede provocar la obstrucción considerable del caudal, aumentando el régimen y la altura de la lámina de agua, dando como consecuencia mayores probabilidades de desbordamiento (Rodgers & Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente, 1993).

También se ha evidenciado un crecimiento poblacional a nivel nacional, en la subcuenca del río Teusacá los municipios con mayor crecimiento poblacional, según el censo del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) del 2018, son Tocancipá con 2,76%, Sopó con 2,27% y Guasca con 1,68% (DANE, 2018). El crecimiento de las poblaciones, representa un riesgo ambiental para los cuerpos hídricos, la incidencia del desplazamiento poblacional a las zonas rurales es evidente, mayores vertimientos de contaminantes y mayor uso del agua, pero también significa el no respeto a la ronda hídrica, por consiguiente el aumento de la vulnerabilidad a las inundaciones (CAR & CORPOGUAVIO, 2019). Esto representa mayores niveles de alerta a la población, ya que al existir dicho crecimiento, es notoria la invasión de la ronda hídrica, como ya se observa en algunos tramos del río como salitre y el tubo.

En la actualidad se han presentado fuertes lluvias, las cuales han sobrecargado el río Teusacá generando así inundaciones en los mismos sitios donde se presentan las manchas de inundaciones, esto se puede evidenciar gracias a la siguiente noticia. En la noche de este jueves ya se encuentra controlada la emergencia que se desató en el club de La Pradera, de Potosí, en La Calera. Motobombas trabajan en el sector para controlar la inundación que se registró por los fuertes aguaceros. Las autoridades reportaron una persona lesionada y daños materiales (Revista Semana, 2022).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se evidencia en la elaboración de este estudio, los riesgos por inundaciones se presentan principalmente en la parte alta de la zona de estudio, zona la cual se caracteriza por presentar bajas pendientes, alcanzando en el peor de los casos una altura de la lámina de agua equivalente a 26 cm en un área total aproximada de 1.42 km², siendo la zona de la cuenca en la cual se debe dar prioridad a la hora de poner en práctica estrategias para mitigar riesgos e implementar mayores medidas de prevención. La subcuenca se caracteriza por amplios pastizales además de zonas agrícolas como agropecuarias, donde estas son la mayor fuente de ingresos económicos de la comunidad aledaña, al presenciar esto, claramente se presentan afectaciones a la economía de la población a causa de las inundaciones.

Se recomienda que las entidades territoriales o alcaldías profundicen en sistemas de alertas tempranas por inundación, además se debe respetar la ronda hídrica establecida por el ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible, junto con la delimitación de las áreas con alta probabilidad de crecientes, ya que a lo largo del cauce, existe un riesgo para la salud de la comunidad y para los bienes materiales. La ganadería extensiva y los monocultivos, son dos actividades económicas que representan grandes cantidades de agua para su desarrollo, así que la comunidad realiza estas actividades cerca de los cuerpos de agua, siendo el río Teusacá el de mayor caudal, y así mismo el más explotado por estas labores, los pobladores asumen los altos riesgos al no tener otras oportunidades que no representen un gran capital para su desarrollo, siendo así una problemática social que requiere atención por parte del estado.

Teniendo en cuenta los resultados de las secciones transversales y las manchas de inundación, la subcuenca del río Teusacá tiene alta probabilidad de desbordamiento, principalmente en las zonas cercanas al punto de control de salitre. El cauce presenta algunos problemas de capacidad en zonas específicas para los caudales superiores o iguales al periodo de retorno de 2.5 (3.357 m³/s), por otra parte la diferencia entre la altura de la lámina de agua entre 2.5 y 100 es de 0,46 cm, un valor no muy alarmante sin embargo la diferencia de área es de 0.28 km²(280000 m²), que representa un aumento del 19,71%, implicando mayores afectaciones a zonas agrícolas, ganaderas o urbanas.

De acuerdo con los valores de la lámina de agua y el área afectada en las inundaciones se debe realizar alguna medida de prevención en el río. La construcción de un jarillón se considera la mejor opción en este caso, ya que su construcción permitiría retener al flujo del agua y no afectará en gran medida las condiciones bióticas a lo largo del cauce del río, en las zonas con mayor vulnerabilidad, además de ser una opción económica, ya que si se construye un muro de contención o alguna otra estructura, deberá ser grande y amplia además de ser construido en varios tramos largos del efluente, y se tendrá una mayor inversión en materia prima. Otra opción viable sería la construcción de un embalse de regulación en la zona baja del cauce, ya que el embalse existente se encuentra en el punto el tubo (parte alta de la cuenca), además que su principal función es el suministro de agua a los municipios cercanos y a la ciudad capital. El embalse de regulación permitirá el almacenamiento de agua directamente del Río Teusacá, con el fin de regular los caudales del mismo, y así evitar la saturación del cauce, disminuyendo posibles afectaciones por inundaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Nacional de Tierras. (2018). *Títulos Mineros 2018*
- Alcántara Boza, A., & Castro Tenorio, A. (2021). Determinación de zonas inundables con HEC-RAS en zonas de la Cordillera Central de los Andes. Microcuenca del río Saraus-río La Llanga. Celendín. *Revista Del Instituto De Investigación De La Facultad De Minas, Metalurgia Y Ciencias Geográficas*, 24(48), 181-187. 10.15381/iigeo.v24i48.19852
- Amarís, G., Guerrero, T., & Sánchez, E. (2015). Comportamiento de las ecuaciones de Saint-Venant en 1D y aproximaciones para diferentes condiciones en régimen permanente y variable. *Tecnura*, 19(45) <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a06>
- Ben Khalfallah, C., & Saidi, S. (2018). Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS - GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 142, 44-51. 10.1016/j.jafrearsci.2018.03.004
- Cabrera, J. (2017). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Universidad Nacional de Ingeniería. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Caleño, L., & Toro, W. (2018). *Evaluación de la huella hídrica del río Teusacá, subcuenca de la cuenca alta del río Bogotá*. Universidad Distrital Francisco José De Caldas.
- Carrero, L. (2012). *Reconstrucción histórica e interpretación de los procesos de transformación en el uso y manejo del paisaje en la cuenca alta del río Teusacá*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Carrillo, S., Gómez, X., & Montes, O. (2020). *Modelación hidrológica de la subcuenca del río Teusacá, para determinar las posibles causas en la disminución del caudal captado por el acueducto Acualcos E.S.P.* Universidad Piloto de Colombia.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR. (2017). *Informe Técnico Adecuación Hidráulica Río Teusacá*.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, & CORPOGUAVIO. (2019). *Plan de ordenamiento del recurso hídrico-porh de las unidades hidrográficas del nivel I embalse de Tominé y río Teusacá que hacen parte de la subzona hidrográfica del río Bogotá*.
- DANE. (2018). *Censo nacional de población y vivienda 2018*. Colombia.
- El Tiempo. (2016,). Cuenca del río Teusacá enfrenta una posible sequía. *El Tiempo* <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16631519>

- El Tiempo. (2022, Oct 27,). Estas fueron las emergencias por lluvias en Cundinamarca del fin de semana. <https://www.eltiempo.com/bogota/cundinamarca-13-municipios-afectados-por-las-lluvias-el-fin-de-semana-712177>
- Fajardo, A. (2015). *Acotamiento de zonas de ronda rio Teusacá análisis componente ecosistémico*.
- Hydrologic Engineering Center. (2022). *Introduction to HEC-RAS*.
- IDEAM. (2008). *AFOROS LIQUIDOS*. Bogotá D.C.
- Imasgal. (2022). Ventajas de los modelos hidráulicos bidimensionales. Ene 09,2023 <https://imasgal.com/ventajas-modelos-hidraulicos-bidimensionales/>
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. (2021). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Inundación*. Bogotá D.C.
- Ley 1523 de 2012, (2012).
- Lluén, W. (2015). *Aplicación de la nueva herramienta hec-ras 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins (Universitat Politècnica de Catalunya)*
- Lujano, A., Quispe, J., Lujano, E., & Tapia, B. (2017). Regionalización de Caudales Mensuales en la Región Hidrográfica del Titicaca, Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 19(2), 219-230. <https://doi.org/10.18271/ria.2017.281>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2012). Caracterización de la vegetación de ribera. Madrid, España.: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/delimitacion-y-restauracion-del-dominio-publico-hidraulico/caracterizacion-vegetacion-ribera/funciones.aspx>
- Monsalve, M. (2016, Mar 02,). Salvar un río con las propias manos. <https://www.elespectador.com/ambiente/salvar-un-rio-con-las-propias-manos-article-619876/>
- Moya, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Application of 2D numerical simulation for the analysis of the February 2014 Bolivian Amazonia flood: Application of the new HEC-RAS versión 5. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana Del Agua*, 3(1), 25-33. 10.1016/j.riba.2015.12.001
- Muñoz, S., & Beltrán, D. (2010). *Perfil ambiental de la subcuenca del Río Teusacá de la cuenca alta del Río Bogotá. Universidad de La Salle*
- Murillo, L., Guevara, W., Díez, J., Rey, C., Buitrago, C., Salazar, S., Carvajal, C., & Castellanos, H. (2018). *Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia*. Bogotá D. C. (p. 21).
- Organización Meteorológica Mundial. (1994). *Guía de prácticas hidrológicas* (1994th ed.)

- Ortiz, P. (2015). Distribución de variables aleatorias continuas: Distribuciones de Gumbel y Fréchet, Universidad de Cuenca.
- Pérez, J., & Barbosa, C. (2018). *Aplicación de modelo de simulación hidrológica e hidráulica hec-hms y hec-ras para la estimación de manchas de inundación a una escala de 125.000 en la cuenca del río chicú. Universidad Santo Tomás*
- Piñero, A., Vélez, O., Hernández, J., Collazo, F., & Soto, E. (2014). *MODELAJE Y DISEÑO HIDRÁULICO USANDO HEC-RAS, Universidad de Puerto Rico*
- Planeación Ecológica Ltda., & Ecoforest Ltda. (2006). *Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá Subcuenca del río Teusacá – 2120-13.*
- PROGRESAR E.S.P. (2021). *Pacto por la Restauración y la Vida del Río Teusacá.* <https://progresaresp.com/la-gran-cuenca-del-rio-teusaca-2/>
- Revista Semana. (2022, Oct 27,). Controlada la emergencia por inundación en el club de La Pradera, de Potosí; a esta hora hay motobombas trabajando en el sector. <https://www.semana.com/nacion/articulo/atencion-grave-emergencia-en-la-pradera-de-potosi-por-inundaciones-las-imagenes-son-impactantes-vecinos-piden-auxilio/202258/>
- Rodgers, K., & Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. (1993). *Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado.*
- Tamiru, H., & Dinka, M. O. (2021). Application of ANN and HEC-RAS model for flood inundation mapping in lower Baro Akobo River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 36, 100855. 10.1016/j.ejrh.2021.100855
- Soto, F., & González, M. (2019). *Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas.* Universidad de Costa Rica.
- Torres, J., & Vivas, J. (2018). *Modelación de una estructura hidráulica de confluencia de canales urbanos. (Caso estudio: río arzobispo, Bogotá D.C.). Universidad Católica De Colombia*
- U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center (HEC). *HEC-RAS.* <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, ESRI, & INGENIAR: Risk Intelligence. (2021). *Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes páginas*
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2020). *¿Cuál es el riesgo por inundaciones en Colombia?*