

UNIVERSIDAD NACIONAL, COSTA RICA
SEDE REGIONAL CHOROTEGA
CAMPUS LIBERIA

INGENIERÍA HIDROLÓGICA

**“MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA PARA IDENTIFICAR EL RIESGO DE
INUNDACIÓN Y PROPUESTA DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN ANTE EVENTUALES DAÑOS
POR DESBORDAMIENTO EN UN TRAMO DEL RÍO LIBERIA, GUANACASTE, COSTA
RICA”.**

INFORME DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OBTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN INGENIERÍA HIDROLÓGICA

SUSTENTANTE:

LUIS ESTEBAN ZÚÑIGA FERNÁNDEZ
504260392

EQUIPO SUPERVISOR:

ING. RENÁN ZAMORA ÁLVAREZ
MUNICIPALIDAD DE LIBERIA

MSc. ERIK GERARDO OROZCO OROZCO
UNIVERSIDAD NACIONAL

LIBERIA, GUANACASTE

FEBRERO, 2023

**ACTA DE TRIBUNAL
INTEGRANTES JURADO EXAMINADOR**

A las 14:00 horas del día 17 del mes de febrero del año 2023, el jurado examinador del trabajo final de graduación denominado “Modelación hidrológica e hidráulica para identificar el riesgo de inundación y propuesta de medidas de mitigación ante eventuales daños por desbordamiento en un tramo del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica” fue integrado por los siguientes miembros:

MSc. Medardo Moscoso Vidal
Representante de Decanatura, Sede Regional Chorotega

Dr. Fernando Gutiérrez Coto
Representante de Dirección Académica, Campus Liberia

MSc. Erik Gerardo Orozco Orozco
Tutor

Dra. Andrea Suárez Serrano
Lectora

Dr. Christian Golcher Benavides
Lector

RESUMEN

El estudio fue orientado a un análisis hidrológico e hidráulico en un tramo de la subcuenca del río Liberia, Guanacaste, debido a que su respuesta hidrológica ha dado como resultado afectaciones en la zona urbana. A partir del uso de QGIS se delimitó la subcuenca hasta los puntos de aforo 1, 2 y 3 y se caracterizó morfológicamente; siendo una cuenca suspicaz a inundaciones. Así mismo, se realizó un análisis de precipitación en donde se encontró diferencias importantes entre el método sintético bloque alterno con ajuste y sin ajuste en comparación a la aproximación de un hietograma característico empleando la distribución porcentual de la estación Pavas y valores de lluvia de la estación Aeropuerto de Liberia y Hacienda Guachipelín; se utilizó el resultado de ambos métodos de cara a tener un análisis de sensibilidad. Los datos del comportamiento de la lluvia en el tiempo se introdujeron en el programa HEC-HMS para periodos de retorno de 5 y 100 años dando como resultado caudales que van desde los 140.879 m³/s hasta los 502.524 m³/s según punto de aforo, periodo de retorno y modelado de lluvia correspondiente.

Debido a que se completó tanto la información hidrológica como hidráulica únicamente del punto de aforo 1, solo a este se le realizó ambos análisis. Para ello se utilizó caudales máximos de 140.879 m³/s, 170.808 m³/s y 232.862 m³/s correspondiente al periodo de retorno de 5 años y 3 modelados de lluvia respectivamente mientras que el periodo de retorno de 100 años la modelación hidráulica se basó en caudales de 275.298 m³/s, 326.165 m³/s y 489.259 m³/s. Finalmente, con base en la información hidrológica e hidráulica se proponen algunas medidas mitigación como lo es el aumento de la altura del dique existente a 0.41 m, 0.86 m y 2.60 m según modelado de lluvia 1, 2 y 3 respectivamente. Así mismo se abordó aspectos como la instrumentación de la cuenca en el tema de hidrometría, reforestación, alturas de desfogue pluvial, remoción periódica de sólidos dentro del cauce entre otras labores que pueden resultar en la mitigación de afectaciones por posibles desbordamientos del río a futuro.

Palabras clave: afectaciones, análisis de precipitación, hidrológica, hidráulica, mitigación

ABSTRACT

This study was focused on a hydrological and hydraulic analysis in a section of the subbasin of the Liberia river, Guanacaste, due to the fact that its hydrological response has resulted in affectations in the urban area. Based on the use of QGIS program, the sub-basin was delimited up to gauging points 1, 2 and 3 and it was characterized morphologically; being a basin suspicious to floods. Likewise, a precipitation analysis was carried out where important differences were found between the synthetic alternate block method with adjustment and without adjustment compared to the approximation of a characteristic hyetograph using the percentage distribution of the Pavas station and rainfall values of the station. Liberia Airport and Hacienda Guachipelín; the result of both methods was used in order to have a sensitivity analysis. The data on the behavior of rain over time were entered into the HEC-HMS program for return periods of 5 and 100 years, resulting in flows ranging from 140,879 m³/s to 502,524 m³/s depending on the gauging point. return period and corresponding rainfall modeling.

Due to the fact that both the hydrological and hydraulic information was completed only for gauging point 1, both analyzes were carried out only at this point. For this, maximum flows of 140,879 m³/s, 170,808 m³/s and 232,862 m³/s were used, corresponding to the return period of 5 years and 3 rain modeling respectively, while the return period of 100 years, the hydraulic modeling was based on flows. of 275,298 m³/s, 326,165 m³/s and 489,259 m³/s. Finally, based on the hydrological and hydraulic information, some mitigation measures are proposed, such as increasing the height of the existing dike to 0.41 m, 0.86 m, and 2.60 m according to rainfall modeling 1, 2 and 3 respectively. Likewise, aspects such as the instrumentation of the basin on the subject of hydrometry, reforestation, heights of pluvial discharge, periodic removal of solids within the channel, among other tasks that may result in the mitigation of effects due to possible overflows of the river in the future, were addressed.

Keywords: affectations, precipitation analysis, hydrological, hydraulic, mitigation

DEDICATORIA

Esta dedicatoria es para Dios, quien supo guiarme por el buen camino, mantenerme con salud, darme las fuerzas y convicción para seguir adelante y no desvanecer ante las adversidades que se presentaron.

A mi familia; para mis padres por su comprensión, amor, brindarme apoyo, confianza y por haber enfatizado la importancia de la educación desde que era niño. Por haberme enseñado de valores, principios y a forjar mi carácter, empeño y perseverancia para alcanzar mis objetivos. A mi hermano por motivarme en todo momento a no bajar los brazos.

A Andrea Ramírez por darme su apoyo incondicional durante las etapas más difíciles, por potenciar mi deseo de superación y de triunfo en la vida. Gracias a quien tuvo las palabras indicadas para alentarme en los momentos de dificultad y que además se preocupó en todo momento por mi bienestar.

Por eso mismo, está dedicatoria a mis seres queridos por apoyarme durante todo el recorrido y en cada decisión que tomara, que tuvieron paciencia y entrega para conmigo, porque gracias a eso fue posible culminar esta etapa.

AGRADECIMIENTOS

Son muchos los sentimientos encontrados y que invaden mi ser al culminar este trabajo de graduación en la UNA, es por eso por lo que en primera instancia le agradezco a Dios quien lo hizo posible, así como a mi familia y novia quienes estuvieron a mi lado apoyándome.

Agradezco al Ing. Renán Zamora de la Municipalidad de Liberia por su acompañamiento y conocimiento compartido durante el desarrollo de este trabajo.

A la UNA por la formación académica que me brindó, en especial a los docentes que realmente enseñaron con verdadera vocación, capacidad de escucha, buena comunicación y quienes me motivaron a crecer profesionalmente.

A mis compañeros(a) y amigos(a) de la UNA, por compartir instantes agradables que hicieron ameno aquellos momentos difíciles.

Especialmente quiero agradecer al Ing. Erick Orozco el cual forma parte de mi equipo supervisor y me brindó apoyo y orientación en todas las actividades involucradas con el desarrollo del presente trabajo.

Gracias a cada persona que me orientó y motivó para continuar adelante, pero ante todo gracias por creer en mí, esto me permitió crecer de forma académica y personal.

Tabla de contenido

Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xi
Lista de siglas y acrónimos	xiii
Capítulo I - Introducción	14
1.1 Introducción	15
1.2 Declaración del problema.....	16
1.3 Justificación del proyecto	18
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo general	20
1.4.2 Objetivos específicos	21
1.5 Alcances y limitaciones	21
1.5.1 Alcances	21
1.5.2 Limitaciones.....	22
1.6 Resumen del informe	23
Capítulo II – Contexto del proyecto	25
2.1 Antecedentes	26
2.2 Descripción del área de estudio.....	27
2.2.1 Localización geográfica.....	27
2.2.2 Estudios previos	28
2.2.3 Actividades socioeconómicas	30
2.3 Caracterización biofísica de la cuenca.....	31
2.4 Conclusión del capítulo II	33
Capítulo III – Marco teórico.....	34
3.1 Hidrología.....	35
3.1.1 Cuenca hidrográfica y características morfométricas	35
3.1.2 Precipitación	40

3.1.3	Modelación hidrológica	42
3.2	Hidráulica de canales abiertos	45
3.2.1	Topografía en ríos	47
3.2.2	Modelación hidráulica mediante software IBER	48
3.3	Conclusión del capítulo III	50
Capítulo IV	– Estudios de prefactibilidad	51
4.1	Prefactibilidad técnica	52
4.2	Prefactibilidad legal	53
4.3	Prefactibilidad ambiental	56
4.4	Prefactibilidad financiera – económica	56
4.4.1	Prefactibilidad financiera	56
4.4.2	Prefactibilidad económica	59
4.5	Prefactibilidad social	61
4.6	Conclusión del capítulo IV	63
Capítulo V	– Metodología	64
5.1	Tipo de investigación	65
5.2	Metodología del proyecto	67
5.2.1	Hidrología y modelación hidrológica	68
5.2.2	Modelación hidráulica	77
5.3	Cronograma y presupuesto	79
5.3.1	Cronograma	79
5.3.2	Presupuesto	80
5.4	Conclusión del capítulo V	80
Capítulo VI	– Resultados y discusión	81
6.1	Resultados de índole hidrológico	82
6.1.1	Datos hidrometeorológicos	82
6.1.2	Caracterización de la subcuenca del río Liberia	84

6.1.3	Modelación hidrológica de caudales máximos	88
6.1.4	Métodos alternos de modelado de lluvia y estimación de caudales	99
6.2	Resultados hidráulicos	103
6.2.1	Datos topográficos	103
6.2.2	Correspondencia entre la magnitud de caudales máximos	106
6.2.3	Zonas de inundación.....	113
6.2.4	Propuestas de mitigación ante inundaciones.....	119
6.3	Principales hallazgos del proyecto.....	123
6.4	Sobre los objetivos planteados	128
6.5	Sobre la metodología planteada	130
Capítulo VII – Conclusiones y recomendaciones.....		133
6.6	Conclusiones	134
6.7	Recomendaciones.....	136
Bibliografía.....		139
Anexos.....		148

Lista de figuras

Capítulo I

Figura 1.1. Evidencia de desbordamiento del río Liberia.17

Capítulo II

Figura 2.1. Subcuenca media y alta del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica.28

Capítulo III

Figura 3.1. Ejemplo de curva Hipsométrica.....38

Figura 3.2. Geometría de la sección transversal de un canal natural (color rojo).45

Figura 3.3. Algunos procesos que puede considerar el módulo hidrodinámico de Iber.....49

Capítulo IV

Figura 4.1. Costos económicos asumidos por cada institución involucrada en el proyecto.59

Figura 4.2. Pérdida de electrodomésticos y línea blanca en viviendas por desbordamiento de ríos.60

Capítulo V

Figura 5.1. Resumen de metodología que se utilizará para el desarrollo del proyecto.68

Figura 5.2. Esquema de trabajo a seguir al momento de utilizar el software HEC-HMS.....76

Figura 5.3. Esquema de trabajo a seguir al momento de utilizar el software de modelación hidráulica IBER.....77

Capítulo VI

Figura 6.1. Ubicación espacial de estaciones compiladoras de datos hidrometeorológicos.83

Figura 6.2. Subcuenca alta y media del río Liberia con los nuevos puntos de aforo delimitados.86

Figura 6.3. Curva hipsométrica de la subcuenca río Liberia.....88

Figura 6.4. Uso de suelo y grupo hidrológico presente hasta el punto de aforo 3 en la subcuenca del río Liberia.....89

Figura 6.5. Serie de precipitación máxima anual en 24 horas estación 74019.92

Figura 6.6. Serie de precipitación máxima anual en 24 horas estación 74020.93

Figura 6.7. Hietograma por método de bloque alterno estación 74019 Tr 100 años.96

Figura 6.8. Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 100 años.96

Figura 6.9. Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia para un período de retorno de 100 años.....98

Figura 6.10. Levantamiento de puntos en las secciones transversales de los sitios en estudio.104

Figura 6.11. Modelo de elevación digital con las secciones transversales por evaluar.	105
Figura 6.12. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 25 TR 5 años.	107
Figura 6.13. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 53 TR 5 años.	108
Figura 6.14. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 126 TR 5 años.	108
Figura 6.15. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 143 TR 5 años.	109
Figura 6.16. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 251 TR 5 años.	109
Figura 6.17. Niveles de agua producto de tres modelados de lluvia distintos TR 5 años.	111
Figura 6.18. Velocidad promedio del agua producto de tres modelados de lluvia distintos TR 5 años.	112
Figura 6.19. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 25 TR 100 años.	113
Figura 6.20. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 53 100 años.	114
Figura 6.21. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 126 100 años.	114
Figura 6.22. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 143 100 años.	115
Figura 6.23. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 251 100 años.	115
Figura 6.24. Niveles de agua producto de tres modelados de lluvia distintos TR 100 años.	117
Figura 6.25. Velocidad promedio del agua producto de tres modelados de lluvia distintos TR 100 años.	118
Figura 6.26. Esquema de altura de desfogue pluvial sobre el perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 60 TR 5 años.	120
Figura 6.27. Evidencia de represamiento sobre una sección del cauce principal del río Liberia.	123

Lista de tablas

Capítulo II

Tabla 2.1. Documentos de referencia identificados dentro del cantón de Liberia.	29
Tabla 2.2. Resumen Sinóptico-Climático de la Subregión Central del Pacífico Norte (PN2).	32
Tabla 2.3. Parámetros morfométricos de subcuenca río Liberia hasta el punto de aforo 3.	33

Capítulo III

Tabla 3.1. Clasificación de tamaños de cuenca según su área.	36
Tabla 3.2. Forma de la cuenca según coeficientes de compacidad de Gravelius.	37
Tabla 3.3. Clasificación del tipo de pendiente en función de valores de pendiente media.	38
Tabla 3.4. Algunas funciones de distribución comúnmente utilizadas.	41
Tabla 3.5. Valores “n” de Manning para canales naturales.	46
Tabla 3.6. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos de suelo de la llanura de inundación.	47

Capítulo IV

Tabla 4.1. Requerimientos técnicos del proyecto.	52
Tabla 4.2. Marco de referencial legal aplicable al proyecto.	54
Tabla 4.3. Presupuesto global del proyecto.	57
Tabla 4.4. Costos ahorrados por familia afectada e instituciones públicas en la zona de estudio.	61
Tabla 4.5. Vinculación social del proyecto.	61

Capítulo V

Tabla 5.1. Operacionalización de la variable dependiente e independiente aplicado a este estudio.	65
Tabla 5.2. Estaciones con registros de precipitación y fluviográficas identificadas para la zona en estudio.	69
Tabla 5.3. Descripción de fórmulas y/o procedimiento que se aplicará para obtener los parámetros morfométricos de la subcuenca del río Liberia.	70
Tabla 5.4. Algunas medidas de control de inundaciones.	78
Tabla 5.5. Diagrama de Grant con las actividades por realizar en el proyecto.	80

Capítulo VI

Tabla 6.1. Resumen de datos brindados por parte del IMN.	84
Tabla 6.2. Parámetros de la subcuenca del río Liberia.	87

Tabla 6.3. Serie de precipitaciones diarias máximas anuales, para ambas estaciones de lluvia.	91
Tabla 6.4. Precipitaciones esperadas para distintos periodos de retorno.	95
Tabla 6.5. Caudales obtenidos para distintos periodos de retorno y sitios de aforo.	97
Tabla 6.6. Resumen de datos de precipitación según fecha de caudal registrado por estación fluviográfica.	99
Tabla 6.7. Comparativa de caudal obtenido por método alternativo y HEC-HMS.	101
Tabla 6.8. Caudales máximos estimados para períodos de retorno de 5 años en los distintos puntos de aforo.	102
Tabla 6.9. Caudales estimados para el aforo 1 según modelo de lluvia y período de retorno.	107
Tabla 6.10. Niveles de agua estimados en cada sección transversal TR 5 años.	110
Tabla 6.11. Niveles de agua estimados en cada sección transversal TR 100 años.	116

Lista de siglas y acrónimos

CNE: Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias

HEC-HMS: Sistema de Modelado Hidrológico Centro de Ingeniería Hidrológica

INDER: Instituto de Desarrollo Rural

MED: Modelo de elevación digital

MIDEPLAN: Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica

ONG's: Organizaciones No Gubernamentales

OT: Ordenamiento Territorial

PAACUME: Proyecto Abastecimiento de Agua para la Cuenca Media del Río Tempisque y Comunidades Costeras

PNGR: Plan Nacional para la Gestión del Riesgo

SIG: Sistemas de Información Geográfica

ZCIT: Zona de Confluencia Intertropical

1 Capítulo I - Introducción

Este capítulo refleja el primer acercamiento al contenido del proyecto. Contiene las secciones de: declaración del problema en la que se describe el contexto del problema de inundaciones en el cantón central de Liberia, Guanacaste, Costa Rica; así como la justificación que expone los argumentos en los que se sustenta el proyecto a nivel general. Así mismo, incluye los objetivos en los que se plasma lo que se pretende realizar para la conclusión del estudio y los alcances y limitaciones.

En el siguiente capítulo se desarrolla la introducción, declaración del problema, justificación, objetivos, alcances y limitaciones, los cuales ayudan a comprender la importancia del presente estudio.

1.1 Introducción

A nivel global, los seres humanos nos desenvolvemos de alguna forma u otra en torno a la relación e interacción con las cuencas hidrográficas, ya que la cuenca como unidad de gestión del territorio favorece la integración entre las actividades humanas siendo el agua un flujo importante en la agenda de crecimiento ecológico por medio de los servicios ecosistémicos que brinda; requisito esencial para la salud humana, desarrollo económico y sustentabilidad ambiental (Banco Mundial, 2012, p. 4; Del Moral & Herrera, 2015, p.10). Debido a la interacción directa que tenemos los seres humanos y sectores productivos en general con las cuencas hidrográficas es necesario conocer su capacidad de interrelación e influencia en los procesos de riesgo de inundación para lo que hace imperativo saber la disponibilidad, características, comportamiento o parametrización hidrológica e hidráulica, así como evaluar si se cuenta con infraestructura adecuada para poder manejar este recurso (Oreamuno & Villalobos, 2015; García & Rogel, 2015).

Costa Rica, además de formar parte de la franja intertropical del globo terrestre comprendida entre las masas oceánicas del Atlántico y Pacífico, está dentro del conocido cinturón de los vientos alisios por lo que la variabilidad climática es alta. Dicha región es vulnerable a fenómenos atmosféricos que pueden ser de origen tropical o extra tropical. Los primeros por su parte pueden estar constituido por huracanes, tormentas y depresiones (en efecto ciclones tropicales), las ondas del este o conglomerados nubosos que se desprenden de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) mientras que los segundos se puede mencionar los frentes fríos. Cada uno de estos sistemas ocasionan lluvias intensas que se traducen en inundaciones en periodos específicos y en áreas particulares donde las condiciones topográficas y de suelo que prevalecen sobre la zona de estudio hace que sea más vulnerable (Bonilla, 2014, p. 16).

La incidencia de fenómenos atmosféricos, registra en el país pérdida de vidas humanas y grandes daños a la infraestructura nacional asociados principalmente al crecimiento urbano sin planificación territorial basado además en contaminación ambiental, vulnerabilidad hídrica, colapso vial de vías principales y secundarias, desarrollo de anillos de pobreza y tugurios así como poca coordinación interinstitucional ya que no existe coordinación efectiva para el

ordenamiento territorial creando de ese modo escenarios ideales de riesgo asociados a falta de planificación. Estos eventos están asociados principalmente a tormentas tropicales, sistemas de baja presión e incluso ciclones tropicales, dependiendo de la respuesta de los sistemas hidrológicos así es la vulnerabilidad progresiva que representan las inundaciones que atentan contra el régimen socioeconómico de la zona afectada (Campos & Quesada, 2017, p. 441).

Bajo ese contexto, en el presente trabajo se realiza un estudio hidrológico e hidráulico en un tramo de la subcuenca del río Liberia para determinar los puntos críticos de desbordamiento a partir de variables requeridas del cauce principal y el llano de inundación e identificar las zonas vulnerables a inundación y proponer medidas de prevención y/o mitigación estructurales y no estructurales de cara a una eventual inundación. Adicionalmente este estudio pretende formar parte de un plan de gestión de la subcuenca del río Liberia focalizado en el casco urbano del cantón central, el cual es de interés expreso del gobierno local del cantón de Liberia.

1.2 Declaración del problema

El cantón de Liberia es atravesado por el río que lleva su mismo nombre por alrededor de 7 km de casco urbano. El desarrollo urbano en forma desordenada carente de planificación y al margen de las leyes que regulan el desarrollo urbano y forestal sumado al lanzamiento de desechos sólidos a los cauces redundan en la reducción de la capacidad de la sección hidráulica y provocan el desbordamiento de ríos y quebradas en dicho cantón (CNE, 2006). Masís & Vargas (2014) mencionan que el aumento en la recurrencia de eventos hidrometeorológicos en zonas urbanas está ligado a la ocupación de zonas inundables y el cambio de usos de suelo que alteran la respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica, especialmente a nivel de escurrimiento de aguas porque se potencia la impermeabilización, eliminan las infiltraciones y la retención que brinda el suelo para dar lugar a mayor volumen de agua que escurre.

En ese sentido, los tramos en estudio se asocian al tipo de desastre denominado inundación urbana cuya ocurrencia es el resultado de la combinación de eventos hidrometeorológicos y de actividades humanas en contextos urbanos. De esta manera, las precipitaciones en la cuenca saturan el suelo y potencian la esorrentía, misma que puede ocasionar aumento en el nivel de agua fluvial e incluso impactar los sistemas de drenaje pluvial (Aragón, 2014).

La Municipalidad de Liberia dentro de sus labores debe incluir normas y elementos básicos en el Ordenamiento Territorial (OT) con énfasis de prevención, control y regulación territorial para cumplir con la gestión municipal del riesgo de desastres, así lo establece el Plan Nacional para la Gestión del Riesgo 2021-2025, un instrumento de planificación estratégica que procura alcanzar una política adecuada de OT con el objetivo de garantizar la seguridad de los ciudadanos (CNE, 2014; 2016).

Los esfuerzos por parte de la Municipalidad de Liberia en cumplir con parte de lo establecido en el Plan Nacional de Gestión del Riesgo no han sido suficientes, pues en dicho cantón se han experimentado a lo largo de los últimos años problemas de inundación durante la época lluviosa producto del desbordamiento de ríos y quebradas. Durante eventos fuertes de precipitación, incluso de baja duración (gran intensidad) se dan afectaciones en zonas como: Urbanización Barrio Chorotega, Pueblo Nuevo, Capulín, Felipe Pérez, La Victoria, Barrio La Cruz, Daniel Oduber y Alaska. Uno de los registros más recientes tuvo lugar el 09 de septiembre del 2021 donde el río Liberia, superó el nivel de los bancos del cauce en la margen derecha ocasionando inundaciones en zonas aledañas producto del desbordamiento del río como se puede ver a continuación en la figura 1b.

Figura 1.1. Evidencia de desbordamiento del río Liberia.



Fuente: imagen facilitada por el comité de vecinos urbanización Barrio Chorotega del 9 de setiembre del 2021.

Las inundaciones comprometen la sustentabilidad local y regional al haber alta concentración de seres humanos en las márgenes de los ríos, bienes e infraestructura pueden ser afectadas a raíz del desbordamiento de ríos y quebradas. Al atender una emergencia de esta índole los daños materiales están presentes como se observa en la figura 1a y las personas deben atender de forma inmediata las consecuencias para continuar con el día a día de manera que deben utilizar sus fondos económicos y la emergencia se traduce en una necesidad de primer

nivel que no estaba contemplada dentro de los gastos económicos proyectados, desequilibrando e impactando en la mayoría de casos a las personas de más bajos recursos por no contar con una capacidad económica para resolver los daños causados por las inundaciones sin afectar el presupuesto familiar destinado para las otras actividades (alimentación, pago de servicios, atención médica etc).

Otro aspecto importante que surge para realizar este proyecto es que forma parte de los instrumentos de planificación estratégica establecidos en el PNGR ya que se pueden obtener capacidades fortalecidas para hacer una gestión integral del riesgo a través de estudios y estimaciones de las vulnerabilidades del sitio en estudio ya que se puede obtener insumos valiosos para mitigar y/o reducir el riesgo físico o material, operativo, socioeconómico y ambiental de manera que se logre planificar y abordar de manera adecuada las emergencias y los desastres con enfoque de derechos y perspectiva de género alcanzando una política adecuada de OT con el objetivo de garantizar la seguridad de los ciudadanos.

1.3 Justificación del proyecto

De acuerdo con la CNE el cantón de Liberia posee una red fluvial bien definida con presencia de ríos y quebradas que se pueden considerar como el punto focal de amenazas hidrometeorológicas, compuesta por ríos como: Tempisque, Liberia, Salto, Los Ahogados, Colorado y las quebradas Grande y Piches. Estos han disminuido el periodo de retorno (Tr) de inundaciones debido a cambios en el uso de suelo y ocupación de planicies de inundación. Aunado a estar en presencia de una subcuenca urbana cuyo río principal atraviesa la ciudad de noreste a suroeste, las condiciones topográficas destacan los barrios de Liberia y Capulín como vulnerables y con alto riesgo a sufrir inundaciones.

Los esfuerzos de la Municipalidad de Liberia en cumplir con parte de lo establecido en el PNGR se reflejan por ejemplo en el contrato número 2009-000029 para la elaboración de un “Estudio Hidrológico y Propuesta para el Control de Inundaciones en la Zona Urbana de Liberia, Guanacaste” a la empresa DEHC Ingenieros Consultores. El estudio realizado por parte de la empresa privada le permitió a la municipalidad tener un panorama más claro de la situación que se vive. Sin embargo, a la actualidad no han podido efectuar ninguna de las medidas propuestas y resulta imperativo una actualización dado los efectos que pueda acarrear la dinámica que se

ha dado respecto a la condición del cauce del río, así como posibles cambios en el uso de suelo, que acarrearía consigo la modificación en los valores de caudales estimados hasta ese período.

La recurrencia de áreas afectadas y aparición de nuevos sitios sin antecedentes pone de manifiesto las alteraciones antrópicas y fenómenos naturales presentes. Desde el 2000 hasta el 2006 se han reportado 5 menciones por inundación (Arrollo, 2011, p.117). Así mismo, la base de datos DesInventar entre el 2013 y 2017 registra afectaciones considerables por fuertes lluvias y condiciones atmosféricas adversas que ocasionan inundaciones en la ciudad asociadas al desbordamiento del río Liberia como la presencia de la tormenta Nate, que se tradujo en habitantes damnificados, pérdidas en fincas agrícolas, viviendas, escuelas, deformaciones en superficies de riego de suelo natural etc.

Las inundaciones son eventos naturales que están presentes a nivel mundial y a lo largo de la historia humana, paulatinamente han disminuido los periodos de recurrencia de estas propiciado por razones antropogénicas como cambios en el uso de suelo, calentamiento global y ocupación de planicies de inundación, así como por la magnitud de los fenómenos meteorológicos (Paniagua, 2016). Este estudio abordará la modelación hidrológica e hidráulica para visualizar y entender el fenómeno de la inundación antes que ocurra constituyendo un insumo valioso en la toma de decisiones. El presente trabajo además de abordar consideraciones hidrológicas e hidráulicas valorará también aspectos de mitigación de daños por desbordamiento.

En primer lugar, la modelación hidrológica permitirá obtener importantes variables que describen el comportamiento hidrológico de la cuenca durante el proceso de lluvia-escorrentía, así como el caudal respectivo en el punto de control, dato que será utilizado posteriormente en la modelación hidrológica. Conocer estas variables nos da un enfoque de perspectiva de gestión del riesgo integrado a nivel de cuenca hidrográfica, debido a que se pueden valorar medidas de prevención, protección y preparación lo que resultará en la reducción de afectaciones por inundación.

En segundo lugar, el análisis hidráulico permitirá conocer los niveles máximos, velocidades de flujo entre otros parámetros en relación con la topografía del terreno y por ende a la capacidad del cauce. Conocer estas variables hidráulicas representa para muchos profesionales una situación impostergable debido a que estos parámetros hidráulicos permiten garantizar el buen funcionamiento y la integridad de los cauces y estructuras presentes. Es

probable que la variabilidad climática aumente con el pasar de los años, es por esta razón que se vuelve imperativo conocer el comportamiento hidrodinámico en los ríos.

En tercer lugar, se sabe que las inundaciones desempeñan un papel integral para garantizar la productividad biológica y la diversidad en la llanura aluvial. Sin embargo, algunos casos pueden resultar en degradación ambiental impactando directamente la salud y el bienestar de la vida silvestre y animales que se sitúan en las riberas de los ríos por la erosión y posterior sedimentación, dispersión de nutrientes y contaminantes, destrucción de paisajes y hábitat locales, ahogamiento. Así mismo, representan consecuencias económicas y sociales como lo son pérdidas de bienes materiales y en el peor de los casos pérdidas de vidas humanas. Por estas razones es imponente identificar las zonas vulnerables a inundación y a partir de las variables hidrológicas e hidráulicas obtenidas proponer medidas de mitigación de daños por desbordamiento para la zona en estudio.

En resumen, se ha argumentado que la modelación hidrológica e hidráulica como parte del estudio de inundación supone un bien necesario. Se recomienda la elaboración del presente estudio ya que permitirá obtener información actualizada que puede ser utilizada como una guía para abordar la problemática ante las inundaciones, salvaguardando la población y la infraestructura emplazada sobre el cauce como lo son puentes y desfogues pluviales. Tener un panorama claro acerca de los sitios más vulnerables le puede permitir a las autoridades actuar de forma eficiente ya sea antes o durante una emergencia por lo que la toma de decisiones bajo fundamento técnico hidráulico son las principales ventajas de la realización de este estudio de cara a reducir los impactos negativos ocasionados por inundaciones en las zonas aledañas al río Liberia.

1.4 Objetivos

A continuación, se describe de forma general y específica la finalidad que se persigue con el presente estudio:

1.4.1 Objetivo general

Realizar una modelación hidrológica e hidráulica para identificar el riesgo de inundación y proponer medidas de mitigación ante eventuales daños por desbordamiento en un tramo del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica.

1.4.2 Objetivos específicos

1- Conocer las características físicas de la cuenca, área de drenaje y cauce principal para interpretar su funcionalidad hidrológica mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el río Liberia, Guanacaste, Costa Rica.

2- Estimar los hidrogramas de crecida en periodos de retorno de 25, 50 y 100 años a través del modelo hidrológico HEC-HMS para ser utilizados como datos de entrada en aplicaciones hidráulicas en la cuenca del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica.

3- Aplicar una modelación hidráulica mediante el uso del software IBER para obtener parámetros hidráulicos necesarios que definan las zonas vulnerables a inundación y medidas de mitigación en los tramos definidos en el río Liberia, Guanacaste, Costa Rica.

1.5 Alcances y limitaciones

A continuación, se describen los alcances y limitaciones de este estudio

1.5.1 Alcances

El presente estudio supone un aporte importante en términos de gestión adecuada, preventiva y sobre todo predictiva del riesgo específicamente a nivel de la subcuenca media y alta del Río Liberia hasta la confluencia con la Quebrada Piches, en las inmediaciones de la PTAR ante posibles escenarios de inundación a presentarse en una zona vulnerable que ha sido afectada con anterioridad por eventos de alta precipitación y que ha impactado la seguridad de los ciudadanos desde diferentes perspectivas. De manera explícita, sus principales alcances son:

- El estudio permite describir y caracterizar físicamente la subcuenca del río Liberia e interpretar su funcionalidad hidrológica.
- Mediante este trabajo se logra un análisis hidrológico que incluye datos de precipitación máxima en 24 horas obtenidas de las estaciones meteorológicas con influencia en el área de estudio y posterior obtención de caudales de diseño.
- El análisis hidráulico permite obtener información topográfica del cauce e identificar los sectores proclives a inundación por desbordamiento del río Liberia
- Con la realización del presente proyecto se generan propuestas de mitigación estructurales o no estructurales ante posibles inundaciones en la zona de estudio. Estas pueden suponer una alternativa para reducir impactos sociales, económicos y ambientales que surjan a consecuencia de las inundaciones.

1.5.2 Limitaciones

A continuación, se enlistan las limitaciones de este estudio:

- A nivel general, los análisis hidrológicos cuentan con una regionalización de los datos para poder ser utilizados en la zona en estudio. Por esa razón, el análisis es válido para las condiciones geográficas e hidrográficas de la zona en estudio y sus resultados son válidos mientras las condiciones como uso de suelo, cobertura vegetal y datos climáticos no varíen.
- No se consideró los efectos de la variabilidad climática en lo que respecta al análisis de datos de precipitación máxima en 24 horas en esta subcuenca.
- El mapa de uso de suelo se realizó mediante una clasificación supervisada, así como el uso de programas de cómputo utilizados y asociados a la modelación hidrológica e hidráulica están ligados a una incertidumbre del propio método.
- El análisis hidráulico en los tramos seleccionados sobre el cauce del río Liberia requirió de un levantamiento topográfico costoso en términos económicos y de ardua labor.
- El cauce atraviesa el casco urbano del cantón de Liberia, por lo que las condiciones del terreno y las construcciones emplazadas en las márgenes del río dificultó un levantamiento topográfico preciso que puede resultar en un modelado hidráulico limitado por errores en la medición de la sección hidráulica del cauce.
- Los estudios hidrológicos e hidráulicos requieren de profesionales especializados, así como uso de algunos softwares licenciados. Esto hace que sean costosos ocasionando que la periodicidad con la que se actualicen estos estudios sea baja.
- La adquisición de datos meteorológicos fue limitada, no disponible al público y en algunas ocasiones los datos tienen un valor económico, lo que conlleva a analizar en ciertas ocasiones la subcuenca con pocas estaciones.
- El hecho de no contar con una distribución temporal de lluvia característica de la zona provocó desarrollar estudio con hietogramas sintéticos, así como la distribución temporal de otra zona que no está ligado propiamente para la zona de estudio de manera que el grado de incertidumbre asociado aumenta, traduciéndose en estimaciones de caudal que pueden estar por debajo o encima de lo que sucede o puede suceder.

1.6 Resumen del informe

De acuerdo con Evans et al (2014) se adoptaron partes y capítulos que se describen a contaminación:

Capítulo I – Introducción

Este capítulo refleja el primer acercamiento al contenido del proyecto. Contiene las secciones de: declaración del problema en la que se describe el contexto del problema de inundaciones en el cantón central de Liberia, Guanacaste, Costa Rica, así como la justificación que expone los fundamentos en los que se sustenta el proyecto. Así mismo, incluye los objetivos en los que se plasma lo que se pretende realizar para la conclusión del estudio y los alcances y limitaciones.

Capítulo II – Contexto del proyecto

En este capítulo se aborda el contexto del proyecto iniciando con una breve mención de la información que antecede la problemática por eventos de inundación en el cantón central de Liberia, así como la descripción del área en estudio que comprende aspectos geográficos, socioeconómicos y de caracterización biofísica de la cuenca.

Capítulo III – Marco teórico

En esta sección, se aborda las consideraciones teóricas que constituyen la guía hacia la práctica y dan soporte conceptual sobre los temas en estudio además de contener las causas posibles para la explicación de los problemas que surjan.

Capítulo IV – Estudios de prefactibilidad

El objetivo de este capítulo es presentar un análisis de la fase inicial del proyecto descrito con anterioridad cuya metodología se enmarca en una rutina en general que se adapta casi a cualquier proyecto. El desarrollo del capítulo aborda información que se considera importante para el proceso de toma de decisiones concerniente a tema legal, ambiental, económico, social y técnico.

Capítulo V – Metodología

Esta sección del documento detalla las diferentes estrategias y métodos seguidos para lograr los objetivos planteados. Abarca aspectos referentes al tipo de investigación, caracterización física

de la cuenca, modelación hidrológica e hidráulica y por último el análisis de zonas vulnerables a inundación y mitigación de impactos ante eventos hidrológicos extremos.

Capítulo VI – Resultados y discusión

En este capítulo se presenta y se discute los principales resultados obtenidos a partir de la ejecución de la metodología propuesta en el capítulo V. Así mismo, se discuten los principales hallazgos como también se discute sobre los objetivos y la metodología donde se pone de manifiesto el alcance entorno al cumplimiento de los objetivos, uso de herramientas y oportunidades de mejora con relación a la metodología propuesta del capítulo V.

Capítulo VII – Conclusiones y recomendaciones

Finalmente, luego de considerar los datos resultantes y circunstancias del trabajo realizado se presenta la apreciación global, así como las recomendaciones derivadas de los hallazgos más relevantes en torno a las inundaciones en las márgenes de los tramos del río Liberia estudiados a nivel de hidrología e hidráulica.

2 Capítulo II – Contexto del proyecto

En este capítulo se aborda el contexto del proyecto iniciando con una breve mención de la información que antecede la problemática por eventos de inundación en el cantón central de Liberia, así como la descripción del área en estudio que comprende aspectos geográficos, socioeconómicos y de caracterización biofísica de la cuenca.

En el siguiente capítulo se desarrollan los antecedentes de forma breve en el que se expone la experiencia vivida por dos de los afectados a raíz de las inundaciones en la zona, así como la descripción del área en estudio incluida la subcuenca hidrográfica con los respectivos aspectos demográficos, socioeconómicos y una caracterización climática, además de una reseña del tramo en el que se enfoca el estudio hidráulico; aspectos que permiten contextualizar la realidad local.

2.1 Antecedentes

Por medio de evidencia científica ha quedado de manifiesto que durante los últimos 22 años se ha estado dando un proceso dinámico y complejo de desestabilidad medioambiental en Centroamérica que exagera la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos cada vez más numerosos e intensos. Este tipo de eventos afecta distintas dimensiones del desarrollo de manera que por medio de la ocurrencia de estos tienden a borrarse avances económicos y sociales logrados en una región aumentó la brecha del desarrollo sostenible (Bello et al., 2020, pp.15,22).

A nivel local el cantón de Liberia ha sufrido consecuencias a raíz de las inundaciones, mismas que han sido registradas por la CNE, noticieros y personas afectadas teniendo como uno de los escenarios más fuertes el pasado 09 de setiembre del año 2021 traducido en 17 reportes de inundación por parte de la CNE consecuencia de la persistencia de lluvias continuas y saturación de suelos.” Tengo 15 años de vivir en Barrio Chorotega de Liberia, es normal que tengamos problemas de anegamiento al menos una vez al año ya sea a consecuencia del alcantarillado pluvial, desbordamiento del río o ambas. Sin embargo, no habíamos vivido una situación como la del pasado 09 de setiembre del año 2021, muchas casas sufrieron daños porque el río superó el nivel máximo del dique (Figura 1.1); el agua alcanzó aproximadamente 1.5 metros desde el nivel de piso hacia el techo en algunas viviendas. Al igual que yo, muchos vecinos tuvimos pérdida de artículos de línea blanca que utilizábamos para solventar las necesidades domésticas y cotidianas” (Chaves M, comunicación personal, 01 de abril 2022).

Por otra parte, la señora Badilla, C manifestó que su madre vive en Pueblo Nuevo y que la vivienda estuvo inhabitable en lo que el nivel del río disminuía. La corriente del río desprendía lo que tenía a su paso por el patio, corredor y dentro de la vivienda, por lo que mi mamá perdió

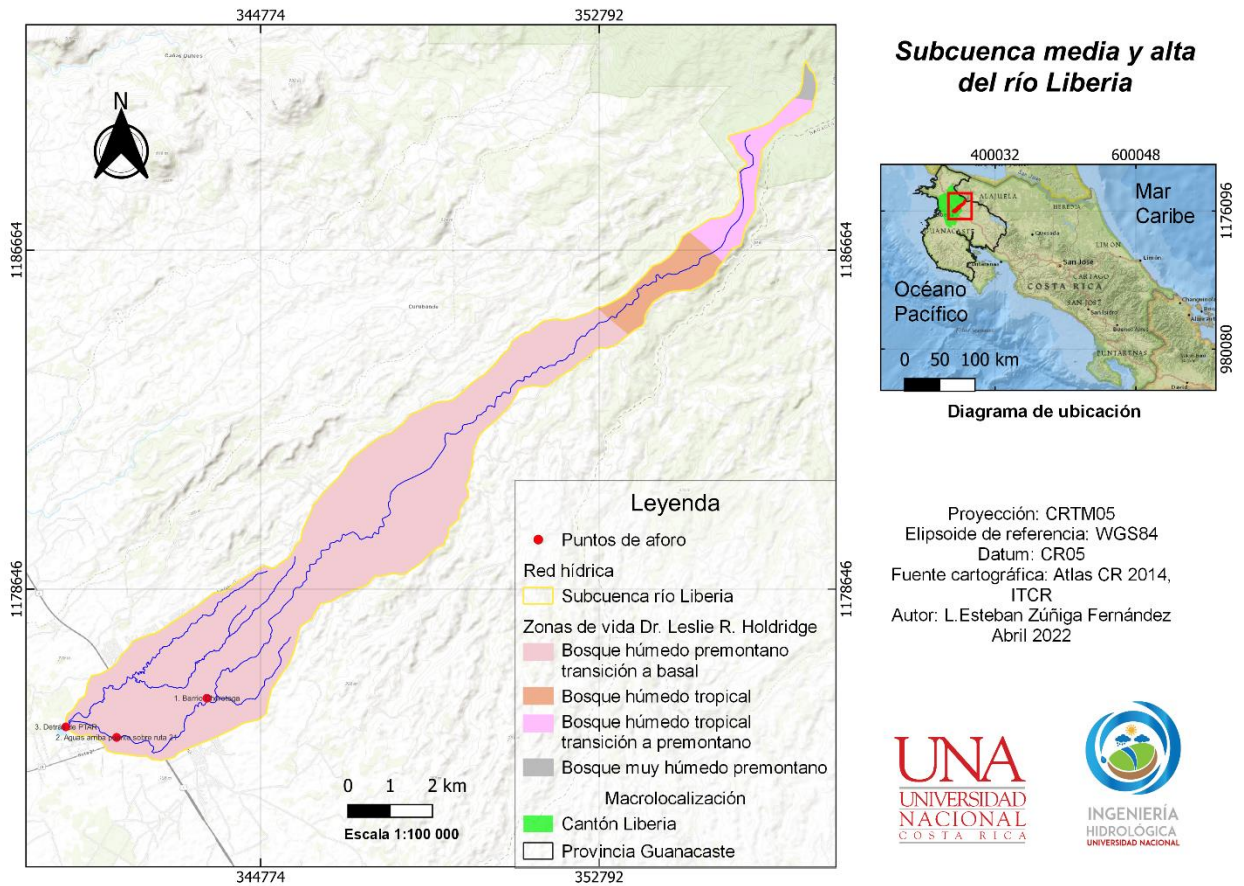
todo lo que tenía dentro del hogar como camas, refrigeradora, sillones, televisor entre otros (comunicación personal, 01 de abril 2022).

2.2 Descripción del área de estudio

2.2.1 Localización geográfica

La zona en estudio se ubica en la provincia de Guanacaste, cantón de Liberia. Específicamente se centra en parte de la subcuenca alta y media del río Liberia, que pertenece a la cuenca del río Tempisque. Esta subcuenca con cierre en el punto de aforo 3 detrás de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de Liberia (Figura 2.1) posee un área alrededor de 36.80 km² con una longitud del cauce principal de 27.92 km, el punto más alto se encuentra a una altura aproximada de 987 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m), además cerca del casco urbano de Liberia, en la comunidad de Capulín se sitúa su punto más bajo a 124 m.s.n.m a efectos de la delimitación espacial del presente estudio. Su red de drenaje está compuesta por Quebradas como Piches, Panteón, Carreta y otros; en conjunto posee una longitud de drenaje de 45.91 km (Tabla 2.3).

Figura 2.1. Subcuenca media y alta del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Se tienen tres puntos de aforo a los cuales se les realizará la modelación hidrológica e hidráulica y su respectivo procesamiento: 1. Cercanías de la urbanización barrio Chorotega; 2. Aproximadamente a 150 metros aguas arriba del puente sobre la ruta 21; 3. Detrás de la PTAR de Liberia en barrio Capulín. Cada punto de aforo define distinta área de drenaje, a efectos de hacer una descripción de general se consideró el cierre de la cuenca hasta el punto número 3.

2.2.2 Estudios previos

A lo largo del cantón de Liberia existen una serie de estudios, no obstante, luego de revisar la documentación disponible se encontró pocos estudios propiamente para el área de influencia de la subcuenca y se puede confirmar que a nivel de contenido y temática abordada dentro de estos únicamente un estudio brinda información explícita respecto a las inundaciones en la subcuenca del río Liberia y otro estudio que contiene información relevante en torno a análisis hidrológicos de los cauces de la cuenca del río Tempisque (incluida la subcuenca del río Liberia). A continuación, ver tabla 2.1 que resume algunos de los textos evaluados.

Tabla 2.1. Documentos de referencia identificados dentro del cantón de Liberia.

Nombre	Tipo	Enfoque más relevante
Sánchez, J., Vargas, E., & Campabadal, C. (1985). Contenido mineral de los forrajes y suero sanguíneo del ganado bovino en los cantones de Cañas, Bagaces y Liberia Guanacaste, durante época lluviosa.	Informe tesis de grado presentado a la escuela de Zootecnia, Universidad de Costa Rica.	Ganadería
Chiesa (1991). El Flujo de Pómez biotítica del Río Liberia (Guanacaste) Costa Rica, Revista Geológica de América Central.	Artículo de revista. Revista Geología de América Central	Geología
PNUD & FOMUDE (2009). Plan de Desarrollo Humano Local del Cantón de Liberia 2010-2020	Reporte de institución gubernamental (PNUD – FOMUDE)	Desarrollo humano
DEHC (2009). Estudio Hidrológico y Propuesta para el Control de Inundaciones en la Zona Urbana de Liberia, Guanacaste.	Informe de consultoría bajo contratación pública	Análisis hidrológico e hidráulico
Saborio, M., Saborio, J., & Valverde, R. (2013). Inclusión del concepto de riesgo al índice de fragilidad ambiental (IFA) aplicado en el cantón de Liberia, Guanacaste.	Consultoría Ambiental, grupo GeoSigAmbiental	Ordenamiento ambiental territorial.
INDER (2014). Caracterización del territorio Liberia-La Cruz.	Reporte de institución gubernamental	Planificación territorial
PRODUS (2015). Plan de Desarrollo Turístico Sostenible del distrito de Curubandé	Reporte de institución gubernamental	Turismo sostenible
Solís, L. (2016). Propuesta de modelo conceptual para el reservorio del Proyecto Geotérmico Borinquen, basado en análisis unidimensional de la técnica magnetotérmica. Liberia, Guanacaste.	Informe de tesis para optar por el grado académico de licenciado en Geología.	Geología
Zamora, J. (2018). Diseño del acueducto y sistema de riego por aspersión para el abastecimiento de 33.5 hectáreas de <i>Brachiaria Brizantha</i> de la Sociedad de Usuarios de Agua el Escobio, Liberia, Guanacaste.	Informe de trabajo final de graduación como requisito para optar por el grado de licenciatura en Ing. En Agronomía.	Hidráulica de sistemas cerrados (tuberías).
Barquero, G. (2019). Análisis hidrológico de cauces de la cuenca del río Tempisque involucrados en el proyecto abastecimiento de	Informe de trabajo final de graduación	Análisis hidrológico

agua para la cuenca media del río Tempisque y comunidades costeras (PAACUME).	presentado a Escuela Ingeniería Agrícola TEC	
Golcher, C., & Rojas, J. Índice Holandés en la cuenca media-alta del río Liberia entre 2013-2015 y del 31 de julio al 2 de febrero de 2021.	Informe final de institución gubernamental UNA – Sede Chorotega.	Calidad de agua superficial
Castro, J., Obando, M., Rodríguez, D., & Torres, Y. (2021) Valoración del cambio en la cobertura vegetal de la subcuenca del río El Salto, Guanacaste, Costa Rica.	Artículo de revista. Revista de educación ambiental BIOCENOSIS.	Cobertura vegetal en una subcuenca hidrográfica

Fuente: elaboración propia, 2022.

El estudio realizado por la empresa DECH Ingenieros Consultores (2009) tuvo como objetivo determinar los niveles máximos de agua en los principales ríos que drenan el casco urbano (quebrada Piches, Carreta, Panteón, La Arena, río Liberia, río Santa Inés y río Claro) de la ciudad de Liberia ante escenarios máximos de precipitación por medio de hidrogramas de crecida y el uso de herramientas de modelación hidrológica. Así mismo realizó un análisis hidráulico por medio del software computacional HEC-RAS que les permitió obtener los puntos críticos (zonas de potencial inundación) y finalmente con base en la información obtenida se dio la propuesta de soluciones en los puntos específicos que pudiere haber conflicto por desbordamiento de cauces.

Por otra parte, Barquero (2019) construyó los hidrogramas de crecida en los puntos de intersección de algunos cauces con el canal Oeste y el río Tempisque en el proyecto PAACUME con el que obtuvo el caudal máximo de agua que puede discurrir sobre ese punto de control, insumo valioso para diseñar obras hidráulicas capaces de operar ante una tormenta significativa. Las subcuencas estudiadas fueron: Liberia, Zopilota, Salto, Cabuyo, Palmas, Sardinal, Cañas y Diríá, debido a que en parte interceptan con el proyecto PAACUME.

2.2.3 Actividades socioeconómicas

Liberia forma parte del cantón donde se asientan las principales empresas agroindustriales; es el cantón con mayores servicios a nivel de sector terciario, como la accesibilidad a educación primaria, secundaria y universitaria, bancos públicos y privados, centros de salud públicos y privados, hoteles, restaurantes, instituciones públicas, templos religiosos, aeropuerto, infraestructura deportiva, ONG's entre otros aspectos que benefician no

solo a la población que aquí se emplaza sino también que a toda la región Chorotega (INDER, 2014). Sin embargo, indicadores reflejan la existencia de una estructura productiva especializada y vulnerable y un mercado de trabajo con debilidades estructurales traducido en problemas de pobreza y pobreza extrema (Arias et al., 2011).

En este sector del territorio se encuentra ubicado el río Liberia que constituye un servicio ecosistémico valioso para la población, ya que provee de agua a la principal ciudad de la provincia de Guanacaste y que además se ve presionada la calidad y cantidad del recurso hídrico por el desarrollo poblacional urbano precario. Se dan actividades como producción de carbón, ganadería de engorde, desarrollo y leche, cultivo de granos básicos, frutas y apicultura, agricultura, comercio y servicios. Por otra parte, se tiene que la inversión del estado para generar electricidad ha forjado puestos de empleo técnico y especializado (INDER, 2014). De acuerdo con el MIDEPLAN (2017) el distrito de Liberia posee un Índice de Desarrollo Social de 68.06 y una posición a nivel distrital de 191 del que básicamente se deduce que se encuentra en una posición de equilibrio con respecto al desarrollo humano.

2.3 Caracterización biofísica de la cuenca

El clima de la zona en estudio al igual que en el resto de la provincia de Guanacaste pertenece al régimen de precipitación del pacífico norte costarricense, conocido por la presencia de un período seco que abarca los meses de diciembre a abril y otro lluvioso que se prolonga de mayo a noviembre (Solano & Villalobos, 2000). Orozco et al., (2010) menciona que la confluencia de los vientos del hemisferio norte y sur en la zona de convergencia intertropical (ZCIT) y la posición de esta última con respecto al hemisferio norte dan lugar a estos dos regímenes estacionales bien definidos. En términos generales el pacífico norte costarricense se caracteriza por tener un promedio de temperatura media anual que oscila entre 26 grados Celsius en el istmo central de la región y tiende a ser mayor a 28 grados Celsius cuanto más se aproxima a las zonas costeras. Se registra una precipitación anual promedio máxima de 3000 mm en los sitios más lluviosos y menos de 1500 mm en los lugares más secos (IMN,2009).

Respecto a la división por subregiones para su descripción general, esta constituye la Subregión Central del Pacífico Norte (PN2) donde predomina el tipo de clima lluvioso con influencia monzónica y de sequía. Parte de sus características relevantes es la severidad del clima cuyos eventos meteorológicos impactan en sus escenarios máximos o de escasez, pues la

irregularidad es lo normal (Solano & Villalobos, 2000). Algunas características climáticas de la subregión PN2 se exponen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Resumen Sinóptico-Climático de la Subregión Central del Pacífico Norte (PN2).

Lluvia media anual (mm)	T. máxima media anual (°C)	T. mínima media anual (°C)	T. media anual (°C)	Promedio de días con lluvia	Duración período seco (meses)
1800	33	22	28	97	5

Fuente: Solano & Villalobos, 2000.

Por otra parte, según la caracterización del Dr. Leslie R. Holdridge, en la zona en estudio se localizan 4 zonas de vida: bosque muy húmedo premontano (bmh-P), bosque húmedo tropical transición a premontano (bh-T12), bosque húmedo tropical (bh-T), bosque húmedo premontano transición a basal (bh-P6). El bosque bh-P6 representa el 86% de superficie de la subcuenca (Figura 2.2) y constituye la zona de mayor presencia de asentamientos humanos y de servicios, con una biotemperatura que ronda entre los 18 °C a 24°C y un rango de precipitación promedio anual que varía de 1000 a 2000 mm.

De las características de forma obtenidas, según la clasificación propuesta por Villón (2004, pp.29-30) es considerada una cuenca de tamaño pequeño. Se considera que la forma de la subcuenca es alargada por su valor de índice de compacidad, así mismo se denota la influencia de la urbanización en la zona de estudio pues los valores de la densidad de drenaje son un tanto elevados reflejando la poca cobertura vegetal existente en la zona baja de la subcuenca donde se asienta una población considerable del cantón liberiano.

En relación con los parámetros de relieve, esta posee una pendiente ligera, con planicies en la parte baja que representan peligros de inundación aunado a la ocupación de llanuras aluviales y longitud del cauce potencian un aumento en el tiempo de concentración y la evacuación de aguas a lo largo del cauce se torna lenta, como se evidencia en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Parámetros morfométricos de subcuenca río Liberia hasta el punto de aforo 3.

Área (km ²)	36.80
Perímetro (km)	53.79
Longitud de drenaje (km)	45.91
Índice de compacidad	2.48
Longitud del cauce principal (km)	27.92
Densidad de drenaje (km ⁻¹)	1.25
Tiempo de concentración (h)	3.70
Tiempo de retardo (min)	2.22
Pendiente media de la cuenca (%)	12.22
Elevación máxima (m.s.n.m)	987.00
Elevación mínima (m.s.n.m)	124.00

Fuente: elaboración propia, 2022.

VARIABLES COMO ÁREA, TIEMPO DE CONCENTRACIÓN E ÍNDICE DE COMPACIDAD CONSTITUYEN DATOS DE ENTRADA QUE SERÁN UTILIZADOS MÁS ADELANTE EN LO QUE RESPECTA A LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y LA VALIDACIÓN DE DATOS RESPECTIVAMENTE.

2.4 Conclusión del capítulo II

EL CAPÍTULO CONTEXTUALIZÓ LOS ASPECTOS DE MAYOR RELEVANCIA PARA LA DESCRIPCIÓN DEL CANTÓN CENTRAL DE LIBERIA, ASÍ COMO LA EXPOSICIÓN DE LOS ANTECEDENTES EN TEMAS DE INUNDACIONES. ESTOS INSUMOS, EN CONJUNTO CON LO PRESENTADO EN EL CAPÍTULO UNO, PERMITEN DEFINIR LOS CONCEPTOS CLAVES REQUERIDOS PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO; ESTOS SERÁN EXPUESTOS EN EL CAPÍTULO TRES.

3 Capítulo III – Marco teórico

En esta sección, se aborda las consideraciones teóricas que constituyen la guía hacia la práctica y dan soporte conceptual sobre los temas en estudio además de contener las causas posibles para la explicación de los problemas que surjan.

Para abordar lo descrito en los objetivos, se siguen una serie de metodologías desarrolladas y basadas en las normas de ingeniería y el conocimiento científico, mismos que han sido validados internacionalmente con el fin de ser una guía para la solución de problemas. En ese sentido, se describe a continuación las bases teóricas en las que se fundamenta la aplicación para el presente estudio constituido en términos generales por tópicos de hidrología e hidráulica esencialmente.

3.1 Hidrología

La hidrología cubre todas las fases del agua en la tierra; su ocurrencia, circulación, distribución, propiedades físicas y químicas y su relación directa con el medio ambiente y los seres vivos. La hidrología para poder orientar sus análisis requiere de la colaboración de otras ciencias auxiliares como climatología, meteorología, hidráulica, geografía, topografía y otras diferentes disciplinas. Parte de sus aplicaciones prácticas se centran en la estimación de eventos de diseño de obras hidráulicas, obras de abastecimiento de agua, riego, drenaje, generación hidroeléctrica, control de inundaciones y otros. A partir del análisis de los problemas relacionados con estas labores, es posible percibir una guía para el planeamiento y el manejo de los recursos que tengan influencia sobre el agua (Villón, 2015, p.15; Gámez, 2020, pp.8-9).

3.1.1 Cuenca hidrográfica y características morfométricas

De acuerdo con Breña & Jacobo (2006, p.33) y Monsalve (1999, p.33) se conoce como cuenca hidrográfica a un área delimitada topográficamente por una línea divisoria de aguas, en la cual el agua que precipita se transfiere a las zonas más bajas por medio de un sistema de drenaje, de manera que el caudal efluente es descargado a otras cuencas aledañas o finalmente al océano. En caso de que la cuenca no tenga conexión con el mar y desemboque propiamente en lagos u otras masas de agua se conoce como cuenca endorreica (cerrada) caso contrario constituye una cuenca exorreica (abierta) y en casos cuando el agua de las cuencas se evapora o infiltra sin tener contacto con un lago o mar se conoce como arreica.

El funcionamiento de una cuenca depende de las condiciones climáticas y las características físicas de la misma por lo que se caracterizan por su morfología, naturaleza del suelo y tipo de cobertura vegetal. De estos depende la manera en que se comporte el sistema hidrológico sobre la transformación de la escorrentía al momento en que hay precipitación. A través de las propiedades morfométricas es posible describirlas física y espacialmente y al mismo

tiempo realizar comparaciones entre distintas cuencas hidrográficas de manera que sea posible generar conclusiones preliminares de las características ambientales del territorio o zona en estudio (Gaspari et al., 2013, p.48).

Los SIG constituyen una herramienta metodológica para la caracterización de las propiedades morfométricas de las cuencas. Estos son básicos en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua de lluvia. Algunos indicadores morfométricos se engloban en los parámetros de forma, relieve y red de drenaje (Gaspari et al., 2009; 2013).

- **Parámetros de forma**

a) Perímetro y área de drenaje

El perímetro (P) es la longitud de la línea envolvente delimitado por el parteaguas, cuya unidad de medida normalmente está dada en m o km. El área de drenaje (A) de la cuenca representa la superficie contenida dentro de la divisoria de aguas en km² o ha (Gaspari et al., 2013, p.51). Según su área se clasifican por tamaño como se observa en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Clasificación de tamaños de cuenca según su área.

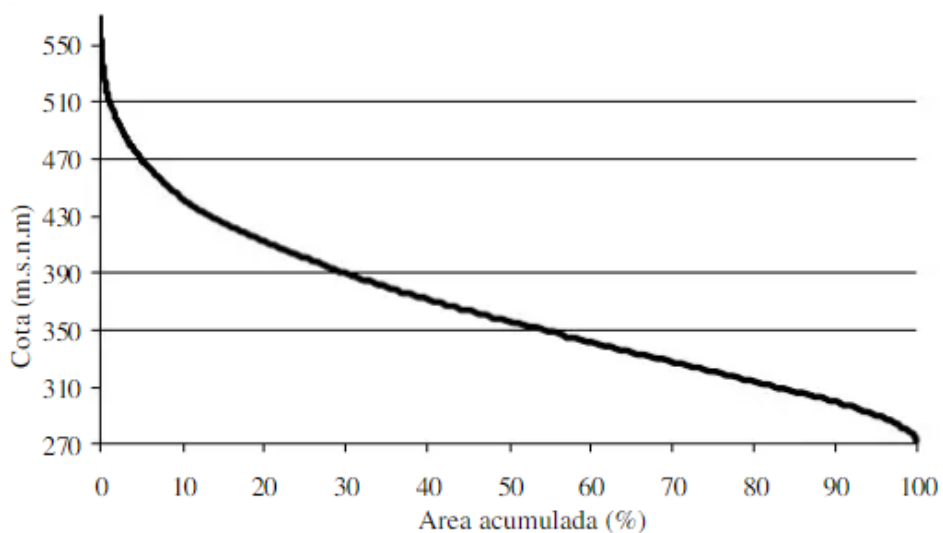
Rangos de área (km²)	Clasificación
< 25	Microcuenca
25 – 250	Pequeña
250 – 500	Intermedia
500 – 2500	Intermedia-pequeña
2500 – 5000	Grande
> 5000	Muy grande

Fuente: Ramírez, 2015, citado en Ortiz, 2021, p. 29.

b) Factor de forma y coeficiente de compacidad de Gravelius (Kc)

El factor de forma (IF) es adimensional y se expresa como el cociente entre el ancho promedio de la cuenca y la longitud axial (longitud del río desde su punto más alto), busca aproximar la forma de la cuenca a una forma geométrica a fin de estimar el comportamiento de la velocidad del agua y las crecientes la red hidrográfica. Cuando $IF > 1$ la forma de la cuenca es redondeada, mientras que $IF < 1$ representa una alargada. Las cuencas alargadas tienden a tener crecientes de menor magnitud (Ramírez, 2015, p.16).

Figura 3.1. Ejemplo de curva Hipsométrica.



Fuente: Gaspari, et al., 2013.

b) Pendiente media de la cuenca (PM)

El caudal máximo y el proceso de degradación en una cuenca están ligados a la configuración topográfica. Infiere en el tiempo de concentración de esta y la velocidad de la escorrentía superficial lo que a su vez potencia la erosión a medida que hay presencia de valores altos de pendiente. Normalmente se utiliza un mapa topográfico y el MED para determinar la pendiente (Gaspari et al., 2012, p.148). El tipo de relieve se asocia a esta, comprende valores descritos en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Clasificación del tipo de pendiente en función de valores de pendiente media.

Pendientes		Tipo de pendiente	Umbral geomorfológico
Grados	% aprox		
0 - 2	0 - 4.5	Horizontal	Erosión nula a leve
2 - 5	4.5 – 11.0	Suave	Erosión débil, difusa. Sheet wash. Inicio de regueras. Soliflucción fría.
5 - 10	11.0 – 22.0	Moderada	Erosión moderada a fuerte. Inicio erosión línea. Rill-wash o desarrollo de regueras.

Precipitación

Segerer & Villodas (2006, p.5) mencionan que todas las aguas meteóricas que caen sobre la superficie de la tierra en forma líquida o sólida (nieve, granizo) se conoce como precipitación. Así mismo, se dice que esta es el origen de todas las corrientes superficiales y subterráneas y bajo escenarios extremos repercute con avenidas máximas en las cuencas hidrográficas por lo que su estimación y conocimiento de distribución espacial y temporal resulta de interés hidrológico ya que constituye el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua.

- **Análisis de consistencia de datos de precipitación**

Los datos de precipitación constituyen un insumo base para la realización de estudios hidrológicos por lo que su procesamiento estadístico es muy importante. A través del tratamiento probabilístico de la información de una o varias estaciones meteorológicas es posible comprobar la calidad de los registros en cada estación y en primera instancia descartar los registros o años dudosos o bien realizar algún método para completar datos faltantes.

Cuando se tiene certeza del registro de datos con el que se pretende trabajar, sigue el proceso de selección para obtener la función de distribución de mejor ajuste. Para ello es posible hacer una selección visual de las funciones que mejor se adaptan mediante una representación gráfica. Así mismo, se hace una prueba de bondad de ajuste. Hay diferentes métodos estadísticos para determinar la bondad de ajuste en una serie de datos para cada estación y periodo de retorno establecidos, los más conocidos son el de Chi Cuadrado y el de Kolmogorov-Smirnov (Chetyrina, 2017, pp. 6-14).

Finalmente, el proceso de selección definitiva surge posterior a la valoración visual de las funciones de ajuste y los resultados de las pruebas de bondad y con base en esto se toma la decisión de seleccionar la función que mejor se ajuste a los datos reales. El nombre de algunas funciones de distribución se observa a continuación en la tabla 3.4:

Tabla 3.4. Algunas funciones de distribución comúnmente utilizadas.

Análisis de frecuencia	Función de distribución
Métodos no paramétricos	Weibull
	Gringorten
Métodos paramétricos	Normal
	LogNormal
	Pearson III
	Log Pearson III
	Gumbel (EV1)
	GEV Max
	Pareto
	Gamma
	Exponencial

Fuente: Chetyrina, 2017, pp. 7-8.

a) Precipitación media en una zona

El instrumento encargado de registrar la altura de la lluvia en función del tiempo es conocido como pluviógrafo, el cual permite determinar la intensidad de la precipitación (Villón, 2004). Contar con estos instrumentos dentro de la zona de estudio resulta poco usual, pero sí estaciones meteorológicas cercanas que poseen estos instrumentos con registros, lo que ha impulsado el desarrollo diversas metodologías para poder discernir entre varias estaciones cercanas a un área de estudio (Dannenberger, 2016).

Partiendo de que la precipitación no siempre se comporta uniforme a lo largo de una superficie o cuenca hidrográfica, se debe estimar en función del área de estudio considerando las estaciones meteorológicas con influencia en la zona, de tal forma que se abarque en totalidad la extensión superficial del terreno. En ese sentido a cada estación se le asigna un porcentaje de área el cual está debidamente influenciado según los valores de precipitación con los que se cuente. El método de polígonos de Thiessen e isoyetas son los más comunes para obtener la lluvia media en una zona (Segeber & Villodas, 2006, p.21).

3.1.3 Modelación hidrológica

Cabrera (2012) refiere que la hidrología tiene como base de estudio métodos y técnicas de medición de caudales y precipitaciones (tormentas) mismas que han evolucionado en el tiempo. No obstante componentes del ciclo hidrológico en una cuenca como infiltración, percolación profunda, flujo subsuperficial, subterráneo, entre otros, implican una fuerte incertidumbre respecto al funcionamiento del ciclo hidrológico.

Bajo este marco, la modelación hidrológica se presenta como una necesidad y herramienta poderosa a fin de analizar, simular y predecir con relación al comportamiento o fases relevantes de los componentes del ciclo hidrológico y su impacto en el medio circundante en el momento en que la precipitación se traduce en escurrimiento (Bocel, 2016, pp.14-15).

En lo que respecta al estudio de avenidas y caudales máximos la modelación hidrológica constituye un elemento importante ya que a partir de sus resultados es posible realizar análisis y prevención en el tema de inundaciones con un grado de confianza aceptable pues las hipótesis que genera son suficiente realistas o previsibles para la toma de decisiones, ya sean en ordenamiento territorial entorno a ríos, criterio de diseño de obras e infraestructuras resilientes al cambio climático o incluso para establecer protocolos de alerta ante situaciones de peligro por lluvias intensas (Díaz et al., 2017, 14).

Existe variedad de modelos hidrológicos conceptuales disponibles, cuya selección depende esencialmente del objetivo último del estudio, uno de ellos es el HEC-HMS.

- **Software HEC-HMS**

El HEC-HMS es un programa de simulación hidrológica que se enfoque en estimar la esorrentía producto de una precipitación a lo largo de una cuenca como sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos. La representación de cada uno de estos componentes necesita de una serie de parámetros que especifiquen específicamente las características del componente y las relaciones matemáticas que describen el proceso físico. Estos componentes son abstraídos y seleccionados directamente del área de trabajo de HEC-HMS: modelos de cuenca, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. Una vez definidos estos componentes se corre la simulación y se calcula la respuesta

de la relación de precipitación escurrentía y por ende la obtención del dato de caudal máximo (Villón, 2004).

El modelo HEC-HMS sobresale en estudios de inundación y ha sido ampliamente aplicado en Costa Rica por el hecho de que se presentan regímenes de precipitación de alta intensidad y corta duración que imparten condiciones óptimas de inundación súbita sobre todo en cuencas de tipo urbano (Umaña, 2014).

Para llevar a cabo las simulaciones se le debe suministrar al programa información básica como: información morfológica de la cuenca, método de pérdidas por infiltración y función de transformación de precipitación escurrentía. En ese sentido, se aborda el método denominado SCS número de curva y SCS hidrograma unitario respectivamente y se tratan de explicar de manera resumida a continuación.

a) Método número de curva

Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos, cuyo parámetro de mayor importancia de la lluvia generadora es la altura de ésta, su intensidad pasa a segundo plano. El derivado del método genera una serie de curvas con número N, que varía de 1 a 100. Cuando N=100, toda la lluvia escurre, mientras que para un N=1, toda la lluvia se infiltra por lo que los números de curva están ligados a diferentes prácticas agrícolas (uso y tratamiento de la tierra), diferentes condiciones hidrológicas, grupos hidrológicos de suelos y condición de humedad antecedente (CHA) (Villón, 2004).

De acuerdo con Umaña (2014) el modelo se basa en la siguiente relación:

$$P_e = \frac{[CN(P + 50.8) + 5080]^2}{CN[CN(P - 203.2) + 20320]} \dots \dots \dots Ecuación 4$$

Donde, P_e es la precipitación en exceso o neta (mm), P es la precipitación de la tormenta (mm), y CN es el número de curva (-). Si la cuenca en estudio está compuesta por varios tipos de suelos y con usos, el CN se debe ponderar, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$CN_{pond} = \frac{\sum_{1=1}^n CN \times A_i}{\sum_{1=1}^n A_i} \dots \dots \dots Ecuación 5$$

Donde, CN corresponde al número de curva ponderado (-), representa el número de curva para cada tipo o uso de suelo (-), es el área de cada tipo o uso de suelo (m^2), es el índice para

cada tipo o uso de suelo, y es la cantidad total de tipos o usos de suelo que se encuentran en la cuenca.

b) Hietograma

Una tormenta de diseño está dada como un patrón determinado con el fin de ser empleada en el diseño de un sistema hidrológico, cuyos datos de precipitación representan la entrada de la información del sistema simulado y los caudales resultados se calculan empleando la función de lluvia escorrentía (Umaña, 2014).

De acuerdo con Maroto (2011) el proceso de transformación de precipitación - escorrentía surge luego de una serie de procesos. De manera general, cuando la lluvia hace contacto con la superficie se infiltra, una vez que las capas superiores del suelo se saturan el agua escurre sobre la superficie hacia los cauces luego que se han llenado las depresiones. En el trayecto del agua hacia los cauces más cercanos continúa el proceso de infiltración y también se da la evaporación en pequeñas cantidades. Una vez que el agua llovida llega a un cauce se produce el escurrimiento en corrientes, esto sumado a que el agua ha fluido sobre el terreno se le llama escurrimiento superficial. En una cuenca hidrográfica la magnitud de las crecientes en los cauces depende de la capacidad o rapidez con la que la cuenca responde a una tormenta, que a su vez esta influenciado por las características morfométricas, usos y tipos de suelo presente.

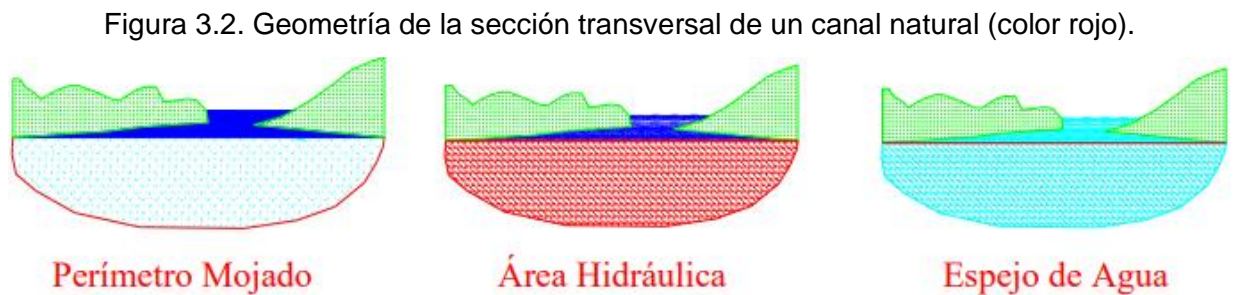
En ese sentido, la parte inicial y final del proceso de escurrimiento de la lluvia la compone el hietograma y el hidrograma de caudal respectivamente (Maroto, 2011). Un hietograma es la representación gráfica de la distribución temporal de una determinada tormenta (precipitación) y se puede confeccionar basándose en métodos directos e indirectos. Dentro de los métodos indirectos o sintéticos más utilizados están los que parten de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) como: hietograma de bloques alternos, hietograma triangular, hietograma de Chicago entre otros, donde las curvas IDF pueden estar representadas tanto por un gráfico como por una ecuación. Respecto al método directo o hietogramas característicos se dice que se obtienen a través de características generales de precipitación donde se identifica un patrón temporal de comportamiento con base en series anuales o parciales de lluvia (Umaña, 2014).

Finalmente, el agua de lluvia que llega a los cauces de los ríos puede ser explicada mediante el hidrograma de caudal. El hidrograma de caudal es un gráfico que relaciona el volumen de agua que pasa por determinada sección de un cauce en el tiempo (Maroto, 2011).

3.2 Hidráulica de canales abiertos

El fenómeno de flujo con superficie libre probablemente es el que con más frecuencia se da en la superficie de la tierra. Ejemplos que suceden en la naturaleza vienen dados por la corriente de los ríos y escorrentía producto de lluvias. Sin embargo, otros escenarios inducidos por el hombre como flujos en canales y alcantarillas, escurrimiento sobre materiales impermeables tienen como característica principal la interfaz entre el aire y la capa superior del agua conocida como superficie libre (Rodríguez, 2008). En la ingeniería los canales abiertos son el antecedente o punto de referencia más directo para entender un río, desde la perspectiva de la hidráulica del régimen en lámina libre y las obras hidráulicas para transporte en lámina libre, sumado a ello el fluido que la mayoría de los canales abiertos transporta es el agua (Martín, 2002, p.21).

En los canales abiertos intervienen una serie de parámetros hidráulicos como la presión de flujo. La superficie libre del líquido al estar en contacto con la atmósfera tiene una presión constante; presión atmosférica y el agua circula por acción de la gravedad (Rodríguez, 2008). Así mismo, la geometría de la sección transversal de un canal natural está constituida por un perímetro mojado, área hidráulica, espejo de agua, pendiente, entre otros (Segura y Casasola, 2011), como se puede apreciar en la figura 3.2.



Fuente: Segura & Casasola, 2011.

El tirante en un canal natural viene dado por la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre, es decir la profundidad máxima del agua en el canal (Rodríguez, 2008). Otro parámetro relevante es la velocidad, en la que se dan varias interacciones donde la velocidad no está distribuida uniformemente en su sección. La resistencia ofrecida por las paredes y por el fondo del canal, reduce la velocidad. En la superficie libre, la resistencia ofrecida por la atmósfera y por el viento (aunque este último tiene muy poco efecto) también influye sobre la velocidad. La velocidad máxima medida en canales será encontrada en

la vertical, por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad. La distribución de velocidades en una sección de canal depende también de otros factores, entre ellos la forma inusual de la sección, la presencia de curvas a lo largo del canal, etc. En una curva, la velocidad se incrementa de manera sustancial en el lado convexo, debido a la acción centrífuga del flujo (Chow, 1959, citado en Rodríguez, 2008).

En ese sentido la rugosidad en un canal abierto se define físicamente como la resistencia al escurrimiento que posee el mismo debido a una velocidad de flujo entrante, está además depende de diferentes factores que afectan la velocidad del flujo como la vegetación, pendiente, irregularidad, obstrucciones entre otros. Los valores de rugosidad de Manning para un cauce están ampliamente ligados a lo descrito anteriormente y puede tomar valores como los que se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Valores “n” de Manning para canales naturales.

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
Natural Streams			
Main Channels			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes, and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as “d” but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150

Fuente: US Army Corps of Engineers (2010).

No obstante, también hay pérdidas de carga por fricción de manera que la rugosidad en la llanura de inundación depende fundamentalmente de los usos del suelo presentes en la misma. La información relativa a los usos del suelo debe ser representada cartográficamente de tal forma que se puedan asignar los valores del coeficiente de rugosidad a los polígonos que definen los usos y así asignarlos de forma automática mediante el uso de los SIG para agilizar el proceso

(Sánchez & Lastra, 2011). Los valores de rugosidad de Manning ligados a la llanura de inundación pueden tomar valores como los que se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. Valores del coeficiente de rugosidad de Manning asignados a los usos de suelo de la llanura de inundación.

Tipo de uso de suelo	Valor
Bosques	0.07
Cultivos	0.06
Espacios con vegetación escasa	0.03
Pastizales naturales	0.035
Praderas o pastos en tierras abandonadas	0.035
Zona urbana	0.09

Fuente: Sánchez & Lastra (2011)

Así mismo, para continuar con la descripción general de canales naturales y conocer la forma en cómo se comportan es necesario determinar la geometría de su sección transversal, para lo cual se requiere de una ciencia geométrica dedicada a la representación gráfica de la superficie terrestre como lo es disciplina de la topografía, misma que se describe a continuación.

3.2.1 Topografía en ríos

La topografía, es la ciencia que emplea un conjunto de procedimientos para hallar la posición de los objetos sobre la superficie de la tierra, determinando su distancia, dirección y elevación, estos tres parámetros son conocidos como los elementos del espacio. La planimetría usa la distancia y dirección, con coordenadas X y Y, mientras que en altimetría se utiliza las coordenadas tridimensionales X, Y y Z. La topografía describe las formas circunstanciales de la superficie de la tierra, también conocido como accidentes ya sean naturales o artificiales permitiendo que posterior a ello se represente la posición de los puntos en un plano o gráfico lo que se le conoce levantamiento (Cely, 2017).

Una batimetría se refiere al levantamiento topográfico del relieve de superficies del terreno cubierto por el agua, sea este el fondo del mar o el fondo de los lechos de los ríos, ciénagas, humedales, lagos, embalses, etc. es decir, la cartografía de los fondos de los diferentes cuerpos de agua. Al igual que en los levantamientos topográficos convencionales, se determinan las coordenadas X, Y y Z, esta última corresponde a las profundidades de los cuerpos de agua levantados y así se puede describir los fondos y el relieve de los cuerpos de agua inclusive

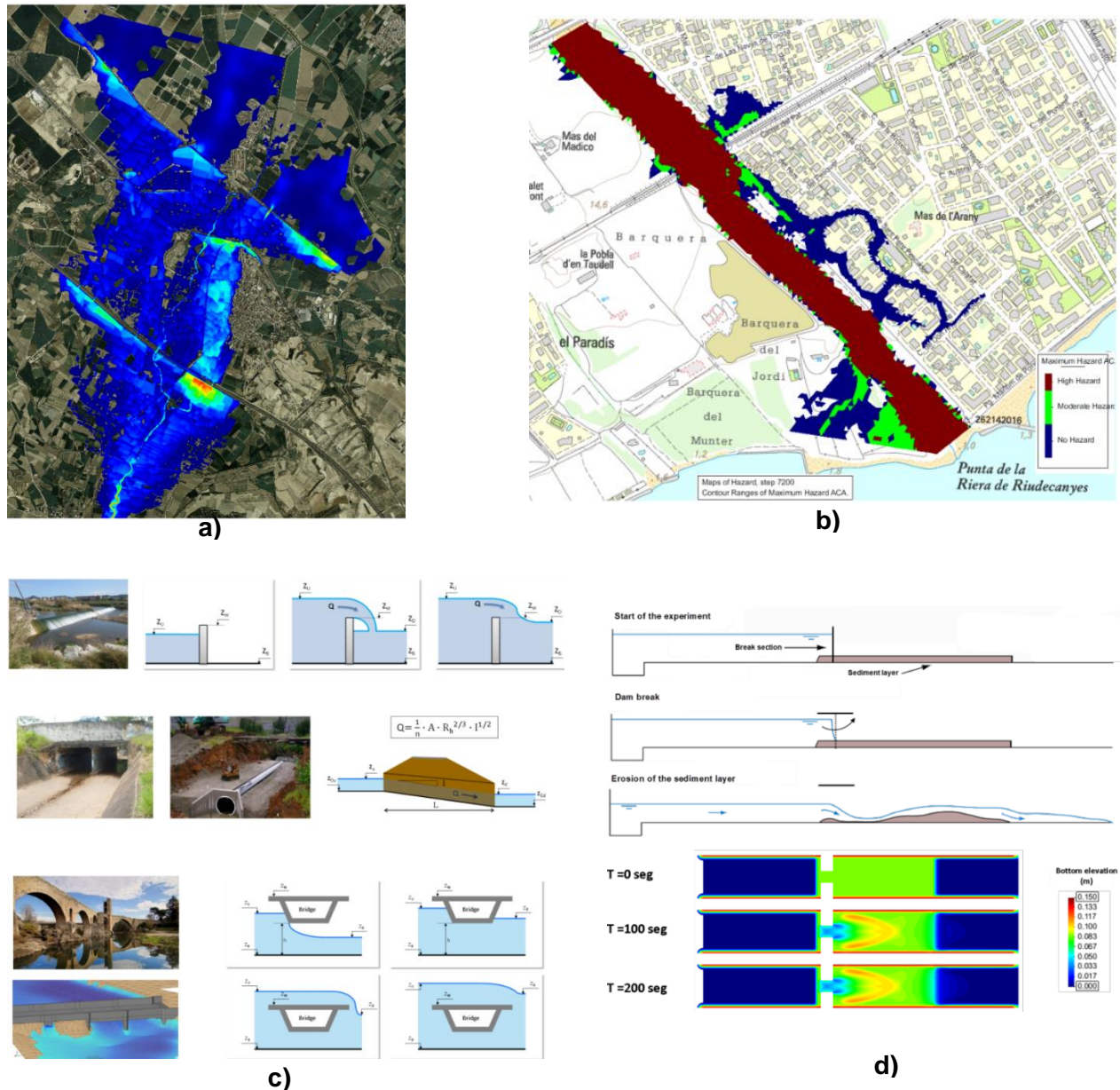
algunas anomalías que en ellos pueda existir. Particularmente los levantamientos batimétricos son insumo indispensable para aplicar cualquier software de modelación hidráulica lo cual permite evaluar el tránsito de crecientes con fines de pronóstico hidrológico. (Abadia, 2010, citado en Rodríguez et al 2017).

3.2.2 Modelación hidráulica mediante software IBER

Iber es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios. Ha sido desarrollado y diseñado para ser especialmente útil a las necesidades técnicas específicas de las confederaciones hidrográficas en materia de aguas. De entre los desarrollos específicos para el preproceso destaca la importación desde un archivo georreferenciado de la rugosidad de Manning asociada a usos del suelo y su asignación automática a los elementos de la malla a través de SIG, así como la incorporación de MED. De igual forma, permite modelar incorporando estructuras hidráulicas como puentes y calcular zonas inundables en un tramo del río. Los esquemas numéricos utilizados en IBER se han integrado en una potente interfaz de preproceso y postproceso como es SIG, constituyendo el conjunto una herramienta efectiva para dar respuesta a los requerimientos actuales, en cuanto a modelización numérica de procesos fluviales para la resolución de problemas ingenieriles (Bladé et al., 2014).

El módulo hidrodinámico de Iber resuelve las ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas (SWE) promediadas en profundidad, también conocidas como ecuaciones 2D de Saint Venant lo que permite considerar procesos como los que se observan en la figura 3.3:

Figura 3.3. Algunos procesos que puede considerar el módulo hidrodinámico de Iber.



Fuente: Bladé et al. (2014).

En la figura anterior se refleja parte de los procesos cuyo resultado surge del uso del software de modelado hidráulico Iber. En primera instancia es posible analizar corrientes de agua poco profundas (figura 3.3a), evaluar el riesgo de inundación (figura 3.3b), modelado de estructuras como puentes, compuertas, vertederos y alcantarillas (figura 3.3c) así como el análisis de la evolución del lecho debido al transporte de sedimentos considerando tanto el lecho como las cargas suspendidas (figura 3.3d).

3.3 Conclusión del capítulo III

Finalmente, este capítulo permitió exponer las bases teóricas en las que se sustenta la aplicación del presente estudio conforme constituyó una guía hacia la práctica. En el capítulo siguiente se desarrolla información importante para el proceso de toma de decisiones concerniente a temas legales, ambientales, económicos, sociales y técnicos.

4 Capítulo IV – Estudios de prefactibilidad

El objetivo de este capítulo es presentar un análisis de la fase inicial del proyecto descrito con anterioridad cuya metodología se enmarca en una rutina en general que se adapta casi a cualquier proyecto. El desarrollo del capítulo aborda información que se considera importante para el proceso de toma de decisiones concerniente a tema legal, ambiental, económico, social y técnico.

Este capítulo pretende contestar la interrogante de si es o no conveniente la realización del proyecto. Esta recomendación será posible si se dispone de los elementos de juicio necesarios para la toma de decisiones por lo que se toma como referencia la metodología propuesta por Sapag et al., (2014).

El mismo autor asegura que la realización de un proyecto debe responder a un estudio previo de las ventajas y desventajas asociadas a su implementación por medio de estudios particulares de viabilidad comercial, técnica, legal, organizacional, de impacto ambiental, financiera (inversionista privado) o económica (estructura económica del país), vial, ética y social. No obstante, por la naturaleza del proyecto se aplica un análisis de viabilidad técnica, legal, ambiental, financiera-económica y social.

4.1 Prefactibilidad técnica

De acuerdo con Sapag et al., (2014) el estudio técnico hará posible cuantificar las necesidades de mano de obra por especialización, conocer las materias primas e insumos restantes que demandará el proyecto. En este deben aplicarse procedimientos y tecnologías modernas considerando la optimización financiera. Con base en la naturaleza del proyecto se generó la tabla 4.1 en la que se desglosa los componentes (insumos, equipos y otros) requeridos.

Tabla 4.1. Requerimientos técnicos del proyecto.

Insumos	Cantidad
Datos climáticos	9
Levantamiento topográfico	1
Equipos	
Computadora	1
GPS de bolsillo Garmin	1
Herramientas de procesamiento	
Microsoft Excel	1
QGIS	1
Hydrognomon	1
HEC-HMS	1
AutoCAD	1
IBER	1
Otros	

Materiales de campo	1
Transporte y alimentación (Giras)	6
Servicio telefónico	1
Servicio de internet	1
Ingeniero Hidrológico	1
Asistente de ingeniería	1

Fuente: elaboración propia, 2022.

Cabe destacar que se cuenta con el conocimiento técnico que demandan las herramientas de procesamiento descritas anteriormente, pues forman parte del perfil profesional de un Ingeniero Hidrológico integral y así como el conocimiento de la totalidad de los insumos correspondientes. De esta manera se tiene certeza que este estudio cuenta con viabilidad técnica para la ejecución de este.

4.2 Prefactibilidad legal

En este apartado se hace mención del estudio legal que, según Sapag et al., (2014) considera los aspectos de institucionalidad, organismos fiscalizadores o por un marco regulatorio. En la realización de un proyecto se debe satisfacer con cada una de ellas ya que por aspectos legales se pueden restringir diversas actividades que terminan generando más costos al proyecto porque influye sobre la cuantificación de sus desembolsos.

Para garantizar la legalidad en la ejecución del presente proyecto, se realiza una revisión documental acerca del marco regulatorio legal de Costa Rica, y su vinculación con la gestión de riesgos por inundaciones, en aras de identificar los principales lineamientos legales en los que se sustenta la ejecución de este tipo de proyectos.

Las leyes, forman parte de un sistema jurídico. Una forma de representar gráficamente ese sistema es la llamada Pirámide de Kelsen que trata de una jerarquía normativa, por lo tanto, implica la existencia de un orden. En el caso costarricense, la Pirámide de Kelsen incluye la siguiente jerarquía normativa que se aplica al análisis de los estudios hidrológicos e hidráulicos en cuerpos de agua en relación con la gestión de riesgo por inundaciones. En la cima de la pirámide se encuentra la Constitución Política de la República de Costa Rica, seguido de Tratados y Convenios Internacionales, leyes, decretos, reglamentos y normas (Castillo, 2021), ver tabla 4.2.

Tabla 4.2. Marco de referencial legal aplicable al proyecto.

Marco legal	Artículo	Descripción
Constitución Política de Costa Rica	50	El Estado procurará el mayor bienestar a todos los habitantes del país. Toda persona tiene derecho a un ambiente sano y ecológicamente equilibrado. Por tal razón, este estudio pretende generar información que pueda ser utilizada para minimizar riesgos que puedan suponer una afectación por inundaciones.
Ley Nacional de Emergencias y Prevención del Riesgo N°8488	14	Se reconoce a la CNE como la entidad rectora en la prevención de riesgos y atención de situaciones de emergencia, así como de promoción de la articulación del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo y de sus componentes e instrumentos asociados basados en criterios técnicos y científicos tendientes a orientar acciones para prever, reducir y evitar el impacto y daños de posibles sucesos de desastre.
Ley Orgánica del Ambiente N° 7554	15	El Estado y sus instituciones promoverán permanentemente la realización de estudios e investigaciones sobre el ambiente.
Ley Orgánica del Ambiente N° 7554	30	Se enmarcan una serie de criterios de OT dentro de los que se encuentra las características del ecosistema, usos de suelo, efecto de las actividades humanas y los fenómenos naturales sobre el ambiente etc. Estos se vinculan a nivel de hidrología modificando las tasas de escorrentía e hidráulica reduciendo la capacidad del cauce lo que redundo en condiciones que aumentan el riesgo de inundaciones.
Ley Forestal N° 7575	33	Se declara áreas de protección de ríos, quebradas y arroyos como una franja de quince metros en zona rural y de diez metros en zona urbana, medidas horizontalmente a ambos lados, en las riberas de los ríos, quebradas o arroyos, si el terreno es plano, y de cincuenta metros horizontales, si el terreno es quebrado. Se refleja en este proyecto que la ocupación de las áreas de protección son zonas de alto riesgo inundable donde ponen en peligro las pérdidas de bienes materiales e incluso la vida humana.
Ley de Planificación Urbana N° 4240	25	Para garantizar la seguridad, comodidad y bienestar de las comunidades en el reglamento figuran zonas especiales

		como las áreas demarcadas como inundables, peligrosas o necesarias al propósito de contener el crecimiento urbano periférico. Parte de los resultados de este proyecto es poner a disposición una cartografía con la ubicación espacial de las zonas inundables.
Ley de Creación del Instituto Meteorológico Nacional N° 5222	3	El IMN actúa como organismo técnico especializado encargado de brindar servicio meteorológico a todo el país. Constituye una institución de gran importancia con la vinculación del presente proyecto por el hecho de que recopila toda la información climatológica y meteorológica en la zona de estudio.
Código Municipal N°7794.		La municipalidad posee autonomía política, administrativa y financiera que la confiere la constitución política y dentro de sus atribuciones se incluye la de promover un desarrollo local participativo e inclusivo, que contemple la diversidad de las necesidades y los intereses de la población. La población muestra un interés importante en la ejecución de este proyecto ya que durante los últimos años las afectaciones han aumentado su magnitud.
Resolución N° 1462-2018-SETENA	5	Los estudios o actividades necesarios, para obtener información en la elaboración de herramientas o instrumentos de evaluación de impacto ambiental forman parte de las actividades, obras o proyectos que no requieren de una EIA. De manera implícita se infiere que las modelaciones hidrológicas e hidráulicas forman parte de estas actividades que no requieren de un EIA.

Fuente: elaboración propia, 2022.

De acuerdo con el marco legal que involucra la propuesta de ejecución del estudio de modelación hidrológica e hidráulica para identificar el riesgo de inundación y proponer medidas de mitigación ante eventuales daños por desbordamiento en un tramo del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica, no existe ninguna normativa que prohíba o que impida ejecutar acciones como las que requiere el proyecto. Por el contrario, se encontró que varios artículos (tabla 4.2), potencian este tipo de proyectos de cara a reducir y prevenir desastres naturales como las inundaciones. Por esa razón, se concluye que el proyecto cuenta con viabilidad legal.

4.3 Prefactibilidad ambiental

En la evaluación de un proyecto debe incluirse consideraciones de carácter ambiental con el fin de no ocasionar alteración en ecosistemas tanto terrestres como marinos. La naturaleza de este proyecto en cuestión no involucra ninguna alteración al ambiente, sino que pretende ser una alternativa que genere insumos valiosos que le permitirán a la Municipalidad de Liberia, beneficiados directos e indirectos evaluar las medidas de mitigación de daños por desbordamiento que se propongan y tener la información respectiva para en el momento en que consideren pertinente intervenir la problemática puedan ser tomadas en cuenta.

Para sustentar lo descrito anteriormente se toma de referencia lo expuesto por la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA) órgano encargado armonizar el impacto ambiental con los procesos productivos, así como el de analizar las evaluaciones de impacto ambiental en el artículo 4 y 5 de la Resolución N° 1462-2018-SETENA donde se infiere que la modelación hidrológica e hidráulica se excluye de realizar un EIA dado que no se trata de una actividad, que produce cambio de uso del suelo, no se invade la zona de protección de cuerpos de agua superficial y mucho menos alteración al ambiente producto de esta actividad. A razón de lo anterior, se concluye que el proyecto en cuestión es viable ambientalmente.

4.4 Prefactibilidad financiera – económica

4.4.1 Prefactibilidad financiera

Una vez identificado lo descrito en la prefactibilidad técnica es posible ordenar y sistematizar la información de carácter monetario, considerando un tiempo de ejecución aproximado según la naturaleza del estudio de dos meses (Castillo, 2020). En ese sentido, este apartado evalúa la rentabilidad del presente estudio, mediante la integración de los costos generados por las actividades, insumos, equipos, herramientas de procesamiento u otros con relación a la ejecución del proyecto, lo cual se muestra a continuación en la tabla 4.3:

Tabla 4.3. Presupuesto global del proyecto.

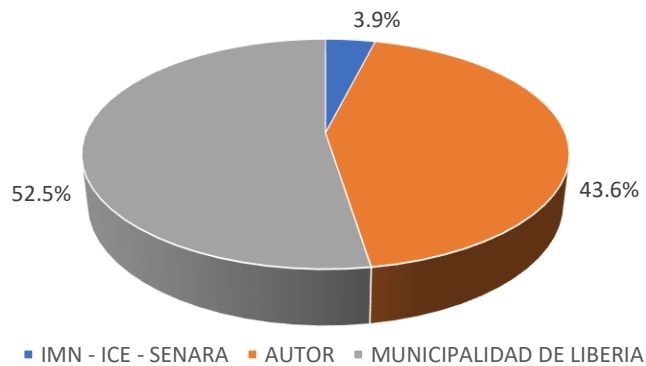
Categoría de costo	Rubro	Cantidad	Costo total	Observaciones
Directo	Datos hidrometeorológicos	9	€ 108 000	Estaciones con registro histórico de precipitación máxima en 24 horas y estaciones medidoras de caudal máximo mensual.
	Levantamiento topográfico	1	€ 823 000	Incluye el pago por servicios profesionales con equipo propio por parte del encargado del levantamiento.
	Computadora	1	€ -	Tratamiento de información por medio de programas informáticos.
	GPS bolsillo Garmin	1	€ -	Datos de puntos georreferenciados de los sitios considerados potencialmente inundables.
Indirecto	Microsoft Excel	1	€ -	-
	QGIS	1	€ -	Sistema de información geográfica
	Hydrognomon	1	€ -	Procesamiento de datos climáticos.
	HEC-HMS	1	€ -	Software de modelación hidrológica permite obtener caudales máximos.
	AutoCAD	1	€ -	Herramienta de dibujo, perfiles topográficos y otros.

	IBER	1	₡ -	Software de modelación hidráulica.
Directo	Materiales de campo	Varios	₡ 38 490	Estacas, varillas, martillo, machete, casco, chaleco, cinta métrica, cinta de marcaje.
	Giras de campo	9	₡ 105 400	Alimentación, transporte, hospedaje.
Indirecto	Servicio telefónico	1	₡ 10 315	Servicio telefónico
	Servicio internet	1	₡ 24 500	Se requiere de conexión estable a internet para el adecuado procesamiento de datos.
Directo	Profesionales	2	₡ 1 161 416	Ing. Hidrológico
		1	₡ 474 041	Asistente de ingeniería
Subtotal			₡ 2 745 162	
Imprevistos		5%	₡ 137 258	
IVA		13%	₡ 356 871	
Total			₡ 3 239 291	

Fuente: elaboración propia, 2022.

Cabe destacar que la computadora y el GPS de bolsillo que se mencionan en el cuadro anterior no representan un valor económico, pues es un equipo y/o herramienta con la que el autor ya cuenta. Así entonces de acuerdo con la naturaleza del estudio, los costos asociados al proyecto son financiados por instituciones compiladoras de datos pertenecientes al estado (IMN, ICE, SENARA), el autor responsable de ejecutar el proyecto y Municipalidad de Liberia. La distribución porcentual en términos económicos se observa en la figura 4.1.

Figura 4.1. Costos económicos asumidos por cada institución involucrada en el proyecto.



Fuente: elaboración propia, 2022.

De la figura 4.1 vemos como el autor de este proyecto es responsable de financiar gran parte del costo del proyecto, en el que se destaca el haberse hecho cargo del pago por servicios telefónicos, de internet y los respectivos honorarios profesionales correspondientes a su persona (Ing. Hidrológico). Seguidamente la Municipalidad de Liberia vela por el levantamiento topográfico, compra de materiales de campo, pago por conceptos de giras de campo y los honorarios profesionales del asistente de ingeniería. Por último y no menos importante se encuentran instituciones como IMN, SENARA e ICE que son entidades que posee a cargo estaciones compiladoras de datos hidrológicos como precipitación y caudales para la zona en estudio.

En virtud del análisis anterior, se concluye que el estudio presenta viabilidad financiera puesto que, los gastos son cubiertos en su totalidad.

4.4.2 Prefactibilidad económica

El hecho de evaluar el impacto en la estructura económica del país, en este caso bajo el gobierno local del Cantón de Liberia (Municipalidad de Liberia), la Comisión Nacional de Emergencias y los habitantes de la zona le confiere a la prefactibilidad económica, en la que se pueden percibir ventajas sobre la implementación de este proyecto a través de un componente denominado costos ahorrados. Estos comprenden básicamente una estimación de los montos de inversión realizados por estas dos entidades del estado para intervenir ante situaciones de emergencia ocurridas post inundación y por parte de las personas del cantón en subsanar pérdidas ocasionadas por el impacto de eventos hidrometeorológicos extremos de inundación.

En primera instancia la CNE y el gobierno local son de las entidades que da respuesta inmediata a las necesidades de un cantón en situaciones de este tipo y es bien sabido que cuando ocurren inundaciones invierten fondos económicos para en la atención de desastres por inundaciones que se traducen en entrega de alimentos, y otros suplementos a ciudadanos, habilitación de albergues, atención de deslizamientos con maquinaria, habilitación de caminos, limpieza de ríos con maquinaria por sedimentación del fondo y depósito de sólidos de gran tamaño como troncos de árboles entre otros. De momento no fue posible cuantificar monetariamente los costos acarreados por parte de la CNE y la Municipalidad de Liberia ante escenarios de eventos hidrometeorológicos extremos o lluvias torrenciales.

Por otra parte, a través de una visita de campo y por medio de entrevistas se constató con algunos vecinos de Pueblo Nuevo y Urbanización Barrio Chorotega de Liberia acerca de las afectaciones y principales actividades de rehabilitación por las que ellos optan una vez que el río se desborda. Con base en estas entrevistas y evidencia mostrada por parte de los vecinos (Figura 4.2) se realizó una estimación que utiliza como referencia los posibles costos derivados de estas actividades que involucra la compra de objetos materiales (Tabla 4.4).

Figura 4.2. Pérdida de electrodomésticos y línea blanca en viviendas por desbordamiento de ríos.



Fuente: Comité de vecinos urbanización Barrio Chorotega, Liberia, 2021.

En la figura 4.2 se puede observar básicamente la pérdida parcial de un menaje por parte de una familia, de manera que para su estimación monetaria en función de lo descrito por los habitantes en la entrevista se recurre a la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Costos ahorrados por familia afectada e instituciones públicas en la zona de estudio.

Reinversión	Cantidad	Costo unitario por familia
Cocina	1	₡ 379 990
Refrigerador	1	₡ 369 735
Mueble	1	₡ 257 900
Colchón matrimonial	2	₡ 84 900
Colchón individual	1	₡ 69 900
Reparaciones y otros	1	₡ 45 000
TOTAL		₡ 1 277 325

Fuente: elaboración propia, 2022 y valores promedio según el mercado nacional.

Cabe destacar que durante la visita a campo y entrevistas realizadas al menos 9 personas miembros de distintas familias han sufrido la pérdida de por lo menos 1 de los 5 artículos descritos anteriormente, y cerca de 3 familias han perdido en su totalidad el menaje completo de su hogar lo que representa un monto total de familias objetivo de aproximadamente ₡ 3 831 975. Así entonces, el proyecto puede mantenerse en marcha, el mismo posee prefactibilidad económica ya que genera un impacto positivo en la estructura económica del país a través de costos ahorrados para las familias que potencialmente se ven afectadas por los desbordamientos del río e instituciones del estado que invierten fondos económicos para solventar esta problemática.

4.5 Prefactibilidad social

En esta etapa se estructura la identificación de involucrados y la participación de estos actores con relación a la percepción de la situación problemática y la valoración de las propuestas de ejecución e intervención del proyecto cuyas actividades cotidianas y de residencia se relacionan por múltiples circunstancias de manera directa e indirecta ante la ejecución del proyecto (Sobrero, 2019). A razón de lo anterior, en la tabla 4.5 se muestran los actores sociales:

Tabla 4.5. Vinculación social del proyecto.

Relación con el proyecto	Actores sociales
Directo	Municipalidad de Liberia.
	Viviendas y habitantes que se sitúan en llanura de inundación del río.
Indirecto	Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE)

Fuente: elaboración propia, 2022.

Así mismo se explica la prefactibilidad social de este proyecto con base en distintos argumentos. En primer lugar, como beneficiario directo se reconoce a la Municipalidad de Liberia, puesto que se prevé que los insumos generados mediante la ejecución del presente proyecto le permitirán a la institución mejorar su capacidad de prevención, control y regulación territorial con énfasis de gestión municipal del riesgo de desastres establecidos en el Plan Nacional para la Gestión del Riesgo cuyo objetivo es garantizar la seguridad de los ciudadanos.

En segundo lugar, la percepción social por parte de los habitantes que se sitúan en la llanura de inundación del río revela el interés por contar con información que sea de utilidad y de fácil comprensión tanto para ellos en general como para el gobierno local y que le permita a estos últimos atender de la mejor manera la problemática que se vive en torno a las inundaciones cada vez que un evento extremo de lluvia ocurre, principalmente fundamentado bajo un estudio riguroso de hidrología e hidráulica de manera que los resultados den información y sirvan de línea base para mitigar y/o resolver dicha situación.

En tercer lugar, se sabe que la CNE es rectora en lo referente a la coordinación de las labores preventivas de situaciones de riesgo inminente, de mitigación y de respuesta a situaciones de emergencia tal es el caso de las inundaciones. A lo largo y ancho del país la CNE ha invertido miles de millones de cólonos en escenarios de riesgo, en el que se incluyen acciones como generación de estudios hidrológicos, hidráulicos y de riesgo de inundación para plantear soluciones técnicas acorde a la dinámica de la amenaza entre otros. Este estudio supone un insumo importante para el CNE en cuanto a la toma de decisiones ya que aborda en su totalidad una de las acciones que ellos comúnmente desempeñan.

En cuarto lugar, en la sección de la prefactibilidad económica se abordó el tema de costos ahorrados, que básicamente obedecen a una serie de gastos que las personas incurren como consecuencia negativa derivada de la exposición a las inundaciones. En ese sentido, Gómez (1994) menciona que los costos ahorrados sólo pueden emplearse para prevenir riesgos evitables en la escala en que se reúna la información, misma que será derivada del presente proyecto. Los costos ahorrados constituyen una variable de gran importancia ya que ninguna familia por lo general contempla dentro de su presupuesto salarial (o no es posible contemplarlo porque la situación económica no lo permite) la atención de una emergencia como esta, que representa reinvertir en el mejor de los casos al menos 1 material mueble de los descritos en la tabla 4.4, de la prefactibilidad económica. El pensamiento crítico permite aterrizar en un contexto en el que las

familias más vulnerables puedan incluso debatir entre si comprar algún material para sustituirlo o atender otras necesidades básicas más prioritarias y con carácter de urgencia.

Considerando la percepción social por parte de los entrevistados más las expectativas de los costos evitados se concluye que este proyecto es socialmente aceptado.

4.6 Conclusión del capítulo IV

Con base en los análisis prefactibilidades técnica, legal, ambiental, financiera – económica y social descritas en el presente capítulo, se concluye que el proyecto es viable en cada uno de estos estudios particulares, por lo anterior, es posible continuar con el desarrollo de este. Así mismo, en el capítulo siguiente se presenta la metodología propuesta para el cumplimiento de los objetivos del trabajo en cuestión, fundamentado a partir de la viabilidad de ejecución del proyecto.

5 Capítulo V – Metodología

Esta sección del documento detalla las diferentes estrategias y métodos seguidos para lograr los objetivos planteados. Abarca aspectos referentes al tipo de investigación, caracterización física de la cuenca, modelación hidrológica e hidráulica y por último el análisis de zonas vulnerables a inundación y mitigación de impactos ante eventos hidrológicos extremos.

Retomando lo mencionado en la conclusión del capítulo IV, en el presente apartado se procedió a desglosar y describir la estrategia metodológica definida para la realización del proyecto. Se especifica el tipo de investigación, las fuentes básicas de información empleadas, las etapas del procesamiento metodológico, y la metodología propia del estudio.

5.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación que se realizará es aplicada, por el hecho de estar orientada a mejorar las condiciones y funcionamiento de la dinámica poblacional entorno a un sistema socioecológico complejo como una cuenca hidrográfica urbana. Así mismo, es llamada tecnológica porque sigue procedimientos a la luz de los avances de la ciencia y tecnología mediante el procesamiento de datos con software, por tanto, este tipo de investigación no se presta para una calificación de verdadero o falso, sino que dependerá de la eficiencia con la que se realice (Nicomedes, 2018).

Por otra parte, integra un enfoque cuantitativo experimental pues se manipulará las variables independientes de manera intencionada y programada para establecer la relación con la variable dependiente (Pérez y Müggenburg, 2007), ver tabla 5.1.

Tabla 5.1. Operacionalización de la variable dependiente e independiente aplicado a este estudio.

Nombre	Tipo de variable	Indicador	Unidades
Inundación	Dependiente	Altura del agua	Metros (m)
Crecida del río	Independiente	Hidrograma	Metros cúbicos por segundo por hora (m ³ /s-hora).

Fuente: elaboración propia, 2022 a partir de Oyola & Medina (2019).

Cabe destacar que para establecer la relación entre estas dos variables de la tabla 5.1, es necesario considerar las siguientes etapas fundamentales:

- 1) Recopilación de información
- 2) Estimación de parámetros hidrológicos
- 3) Estimación de parámetros hidráulicos e identificación de zonas de inundación y análisis de propuestas de mitigación

La primera etapa requiere de la recopilación de datos de precipitación máxima anual en 24 horas, así como del registro de caudales máximos medidos en las estaciones fluviográficas cercanas a la zona en estudio. Para ello se solicitará la información correspondiente al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Así mismo una serie de instrumentos y recursos tales como:

❖ *Atlas Digital de Costa Rica (CR 2014)*

Desarrollado por un equipo de investigadores del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC), está disponible para las personas interesadas y dirigido a profesionales con conocimientos en Sistemas de Información Geográfica (SIG) que requieren hacer análisis espaciales en Costa Rica o generar sus propios mapas. La versión 2014 incluye alrededor de 120 capas temáticas con datos espaciales y geográficos de Costa Rica en formato *shape* o *grid* de ESRI y en coordenadas CRTM05. Incluye datos geoespaciales de elevación, zonas de vida, ríos, suelos, división político-administrativa etc (Ortiz, 2014). En efecto, los datos por utilizar para el presente estudio se centran en shapes de ríos, suelos y división político-administrativa.

❖ *Google Earth Engine*

De acuerdo con Perilla & Mas (2020) esta plataforma le permite a los usuarios realizar análisis complejos involucrando grandes cantidades de datos y expandiendo la frontera de la ciencia en percepción remota. Está ligado a varios programas satelitales lo que permite una visualización de conjuntos de datos geoespaciales. Los conjuntos de datos incluyen: datos climáticos y meteorológicos, modelos digitales de elevación y otros datos del terreno, cobertura del suelo, tierras de cultivo, imágenes de satélite. No obstante, de esta plataforma se obtendrá únicamente lo relacionado a modelos digitales de elevación e imágenes de satélite.

❖ *Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT)*

El SNIT es un portal de datos geográficos oficiales mediante el cual se publica la información geográfica fundamental de forma estandarizada y siguiendo las normas técnicas utilizadas en la generación de información a nivel nacional, liderado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) del Registro Nacional de Costa Rica (Orozco & Cedeño, 2018). De los Servicios OGC que brinda el SNIT se extraerá información relacionada con elementos hidrográficos, relieve, así como un nodo local denominado IGN Ráster.

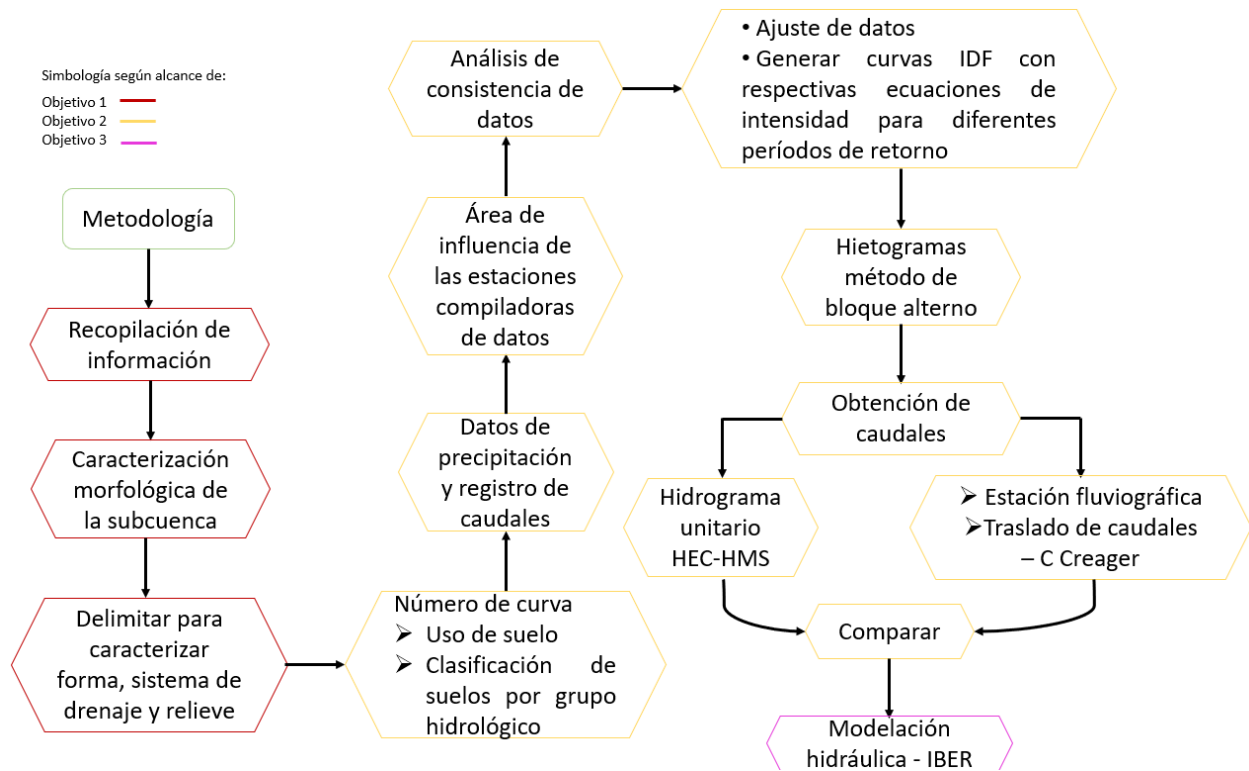
Por otra parte, para la segunda etapa se realizará una caracterización de los parámetros morfométricos de la subcuenca del río Liberia, así como un análisis a los datos de precipitación para obtener distintos periodos de retorno que permitan generar las curvas IDF y posteriormente determinar los hietogramas por el método de bloque alterno. Estas variables estimadas constituyen los datos de entrada que se le suministrarán al programa de modelación hidrológica HEC-HMS cuyo resultado se traduce en el hidrograma de crecida para distintos periodos de retorno.

La etapa tres contempla que los caudales máximos estimados se modelarán en el software hidráulico bidimensional IBER. Para esta etapa se debe contar con un MED el cual será generado con trabajo de campo a partir del levantamiento topográfico de la sección hidráulica del cauce del río Liberia en los tramos seleccionados a cargo de la Municipalidad. A partir de lo descrito anteriormente se conocerá el comportamiento hidráulico del cauce del río Liberia en los tramos seleccionados ante los caudales estimados y generar una base que permita identificar zonas vulnerables a inundación y proponer medidas de mitigación ante escenarios de desbordamiento del río.

5.2 Metodología del proyecto

La metodología del proyecto comprende varios procesos, ya que primeramente se debe realizar una caracterización morfológica de la cuenca para seguidamente obtener un análisis de precipitación que permita un ajuste de datos correcto y con ello determinar caudales mediante una modelación hidrológica, además de métodos alternos de modelado de lluvia y por ende obtención de caudal para comparar los resultados y finalmente realizar el proceso de modelación hidráulica a partir de los resultados obtenidos en la parte hidrológica; dicho procedimiento en forma de resumen se muestra en la figura 5.1.

Figura 5.1. Resumen de metodología que se utilizará para el desarrollo del proyecto.



Fuente: elaboración propia, 2022.

En la figura anterior se observa que los datos de entrada corresponden a la delimitación de la cuenca y al análisis de precipitación, determinando el punto de partida para lograr estimar los caudales de la cuenca en estudio. Las metodologías para cada uno de los apartados se describirán a continuación:

5.2.1 Hidrología y modelación hidrológica

La hidrología como ciencia multidisciplinaria y multiusuario, en este caso bajo el enfoque de control e identificación de zonas inundables tiene como esencia la estimación de caudales máximos mediante el uso de software de modelación pero que requiere previamente de la obtención de parámetros asociados que están estrechamente vinculados al comportamiento de la cuenca como unidad hidrológica por lo que se sistematizan a continuación.

- **Recopilación de datos**

Se recolectó información hidrológica de lluvias máximas en 24 horas y caudales máximos del registro histórico de estaciones meteorológicas y fluviográficas cercanas al área de estudio.

Las estaciones con medición de lluvia y caudal identificadas con influencia dentro de la zona de estudio se muestran en la tabla 5.2:

Tabla 5.2. Estaciones con registros de precipitación y fluvigráficas identificadas para la zona en estudio.

Estación		Coordenadas geográficas		Variables	Propiedad
Código	Nombre	Latitud / Norte	Longitud / Oeste		
74023	Santa María	357854	1189000	Datos de precipitación	ICE
74057	La Perla	344145	1191022		IMN
74019	H. Guachipelín	349058	1189032		ICE
74063	Mangarica, Llano La Cruz, Liberia	341052	1173090		IMN
74020	Llano Grande	332566	1172514		
74051	Aeropuerto Liberia, Oeste 07	330137	1171309		
741902	Colorado	338076	1180232	Datos de caudales máximos	ICE
741903	Liberia	342094	1174989		
741907	El Salto	348579	1170135		

Fuente: elaboración propia, 2022 a partir de Ortiz, 2014; Torres, 2021; ICE, 1990.

En lo que respecta a los datos de precipitación se realizó polígonos de Thiessen para obtener el porcentaje de influencia según la ubicación espacial de cada estación a lo largo de la subcuenca que ha sido previamente delimitada. Los datos de precipitación resultan esenciales, pues es el componente principal en el que se traducen los caudales de los ríos propiamente. Por otra parte, el hecho de recolectar datos de caudales máximos registrados en las estaciones fluvigráficas sigue un proceso para comparar resultados de modo que los caudales que se obtengan por el método de hidrogramas se pueden cotejar con datos reales medidos en campo por una estación, así como también con el cálculo por el método de traslado de caudal por C de Creager que se profundizará más adelante.

- **Características morfométricas de la cuenca**

Para determinar los parámetros morfométricos de la cuenca inicialmente se realizó la selección y descarga del modelo de elevación digital (MED) de la plataforma geomática de Google Earth Engine llamado ALOS World 3D - 30m (AW3D30) el cual es un conjunto de datos de modelo

digital de superficie (DSM) global con una resolución horizontal de aproximadamente 30 metros (malla de 1 arcsec). Con el programa Sistema de Información Geográfica Cuántico (QGIS), se delimitará la cuenca y es posible obtener los parámetros de forma de la cuenca, sistema de drenaje o red hidráulica y los parámetros de relieve para describir las características que presenta la subcuenca del río Liberia.

Antes de obtener los parámetros de la cuenca se preparó el MED eliminando posibles errores que contenía el ráster debido a deficiencias que pudieron generarse en el proceso de creación del modelo, para ello se aplicará el Module Fill Sinks de Wang & Liu (2006) en SAGA GIS. Este módulo utiliza un algoritmo propuesto para identificar y rellenar depresiones superficiales en MED. El método se mejoró para permitir la creación de modelos de elevación de sonido hidrológico, es decir, no solo para llenar las depresiones sino también para preservar una pendiente descendente a lo largo de la trayectoria del flujo.

Se conoció las coordenadas (X, Y) del punto de aforo de la subcuenca y con el MED cargado al área de trabajo de QGIS se delimitará la subcuenca del río Liberia, ver tabla 5.3.

Tabla 5.3. Descripción de fórmulas y/o procedimiento que se aplicará para obtener los parámetros morfométricos de la subcuenca del río Liberia.

Tipo de parámetro	Variable	Descripción
Forma	Área	Delimitación digital y uso de calculadora de campos de QGIS versión 3.22.6
	Perímetro	A partir de calculadora de campos en QGIS versión 3.22.6
	Índice de compacidad	Ecuación (1) sección: <u>Cuenca hidrográfica y características morfométricas</u>
Sistema de drenaje	Longitud del cauce principal	A partir de calculadora de campos en QGIS 3.22.6
	Longitud de drenaje	A partir de calculadora de campos en QGIS 3.22.6
	Densidad de drenaje	Ecuación (2) sección: <u>Cuenca hidrográfica y características morfométricas</u>

	Tiempo de concentración	Ecuación (3) sección: <u>Cuenca hidrográfica y características morfométricas</u>
Relieve	Pendiente media de la cuenca	A partir de análisis de capa ráster en QGIS 3.22.6
	Elevación máxima	A partir de análisis de capa ráster en QGIS 3.22.6
	Elevación mínima	A partir de análisis de capa ráster en QGIS 3.22.6

Fuente: elaboración propia, 2022.

Se utilizó el índice de compacidad de la tabla 2.3, de la caracterización biofísica de la cuenca, para aplicar un factor de ajuste al momento en que se empleó el método de estimación de caudal máximo por traslado. Así mismo, las variables como área y tiempo de concentración constituyen datos de entrada del modelo HEC HMS para el cálculo del caudal máximo con el hidrograma correspondiente, mismo que se describe a continuación:

- **Modelación hidrológica de caudales máximos**

La metodología empleada para el cálculo del caudal a partir del software HEC-HMS requirió una serie de datos de entrada como lo son:

- 1) Área y tiempo de concentración
- 2) Número de curva
- 3) Modelado de precipitación
- 4) Ingreso de datos al HEC HMS para el cálculo del caudal máximo

A continuación, se describen los procesos de forma separada para una mejor comprensión, a excepción del **1) área y tiempo de concentración**; cuya obtención se asocia a los parámetros morfométricos descritos en la sección de características morfométricas de la cuenca.

2) Número de curva del SCS

El número de curva está ligado a diferentes prácticas agrícolas (uso de la tierra), diferentes condiciones y grupos hidrológicos de suelos mismos que se obtendrán a partir de la interpolación de la tabla 6.8 del libro de Hidrología Villón (2004) lo que finalmente permitió obtener el número de curva ponderado según las áreas asociadas a cada uso de suelo, condición y grupo hidrológicos de suelos. A partir de la tabla presentada por el SCS se obtuvo el número de curva para condición de humedad antecedente II, de la siguiente manera:

2.1) Caracterización del uso de la tierra

Para cuantificar el uso de suelo o cobertura presente a lo largo de la subcuenca del río Liberia con su respectiva área afluente, se usó una imagen satelital Sentinel 2A y se recortó el área en estudio con los archivos shapes generados anteriormente con el fin de disminuir el requerimiento computacional trabajando a menor escala. Con ayuda del software Quantum GIS y su herramienta Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) se realizó una clasificación supervisada de la subcuenca para lo que se le asignó una clase a cada polígono para la definición de firmas espectrales características de la cobertura del suelo (ROIs) según lo descrito para la metodología número de curva por Villón (2004).

2.2) Clasificación de suelos por grupo hidrológico

A partir del trabajo realizado por Bogantes et al. (2002), denominado Zonificación geotécnica general de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos, se recortó la capa en QGIS para extraer información relevante de las características de suelo presentes a lo largo de la subcuenca. Una vez extraída la información, según la tabla de atributos, se agrupó según las clases A, B, C, y D, del SCS expuesta en el libro de Villón (2004) y basándose en el trabajo de Ferrer et al. (1995) como se expone a continuación: Entisoles, constituidos por aluviones; forman el grupo de suelos A. Inceptisoles, suelos de débil desarrollo; forman el grupo de suelos B. Alfisoles, suelos jóvenes, pero con horizonte B arcilloso enriquecido por eluviación; forman el grupo de suelos C. Vertisoles, suelos ricos en arcilla; forman parte del grupo de suelos D.

Así mismo, para la clasificación del grupo hidrológico de suelos se tomó en cuenta lo expuesto por Villón (2004):

- Grupo A. Tiene bajo potencial de escorrentía, con alta tasa de infiltración y constituido mayoritariamente por arenas o gravas profundas o excesivamente drenadas.
- Grupo B. Tiene un moderado bajo potencial de escorrentía, tasas de infiltración moderadas cuando están poco mojados con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas y moderada transmisión del agua.
- Grupo C. Tiene un moderado alto potencial de escorrentía, tasas de infiltración bajas cuando están completamente mojados, textura moderadamente fina a fina y baja tasa de transmisión del agua.
- Grupo D. Tiene un alto potencial de escorrentía, tasas de infiltración muy bajas cuando están completamente mojados y están formados por suelos arcillosos con alto potencial de esponjamiento y suelos sobre material casi impermeable además de poseer una tasa de transmisión de agua muy baja.

3) Modelado de precipitación

La precipitación esperada en la cuenca considera el análisis estadístico de las series de precipitación máxima anual en 24 horas, que se tradujo en un gráfico que expresa la lluvia caída en intervalos regulares de tiempo, lo que se conoce como hietogramas por el método de bloque alterno. Esta información se toma del registro histórico de las estaciones de precipitación cercanas de la subcuenca del río Liberia (tabla 5.2). A esta serie de datos fue necesario realizarle un tipo de preprocesamiento antes de obtener el hietograma, el mismo se describe a continuación:

3.1) Área de influencia de las estaciones meteorológicas

A partir del área delimitada de la subcuenca río Liberia, se cargó en el software QGIS la capa de estaciones meteorológicas descritas en la tabla 5.2, y se filtró considerando las estaciones que posean mayor cercanía al área de interés para posteriormente utilizar la herramienta “Polígonos Voronoi”, misma que determinó luego de extraer la capa el porcentaje de influencia en unidad de área que abarca cada una de las estaciones analizadas. Con base en el porcentaje que se obtuvo para cada estación y tomando en cuenta el dato de la estación se cuantificó la precipitación media para la zona en estudio.

general de la intensidad máxima de lluvia para la zona de estudio. Los datos de precipitación máxima en 24 horas se sometieron a una corrección por medio de un factor de 1.13 ya que estudios de miles de años-estaciones de datos pluviométricos indican que, al multiplicar las cantidades máximas de lluvia diaria u horaria, para un solo intervalo fijo de observación de una a 24 horas por el factor 1.13, se producirán valores que se aproximan mucho a los que se obtendrían de un análisis de los máximos reales (García, 2017).

Cubillo (2015) asegura que en el modelo de Dyck y Peschke las lluvias de corta duración, P_D , están en función de la precipitación de 24 horas, es decir, este criterio es aplicable a precipitaciones máximas de 24 horas, de acuerdo con la ecuación (7) que se muestra a continuación:

$$P_D = P_{24h} \times \left(\frac{D}{1440} \right)^{0.25} \dots \dots \dots \text{Ecuación 7}$$

Donde: P_D = Precipitación máxima de duración D, en mm

P_{24h} = precipitación máxima de 24 horas, en mm

D = duración de la precipitación, en horas

De igual forma, se tiene presente la ecuación general de las curvas IDF, ecuación (8):

$$I_{\text{máx}} = \frac{K \times T^a}{D^b} \dots \dots \dots \text{Ecuación 8}$$

Donde: K, a y b son constantes que se calculan mediante un análisis de regresión lineal múltiple.

$I_{\text{máx}}$ = intensidad máxima de lluvia, en mm/h

T = período de retorno, en años

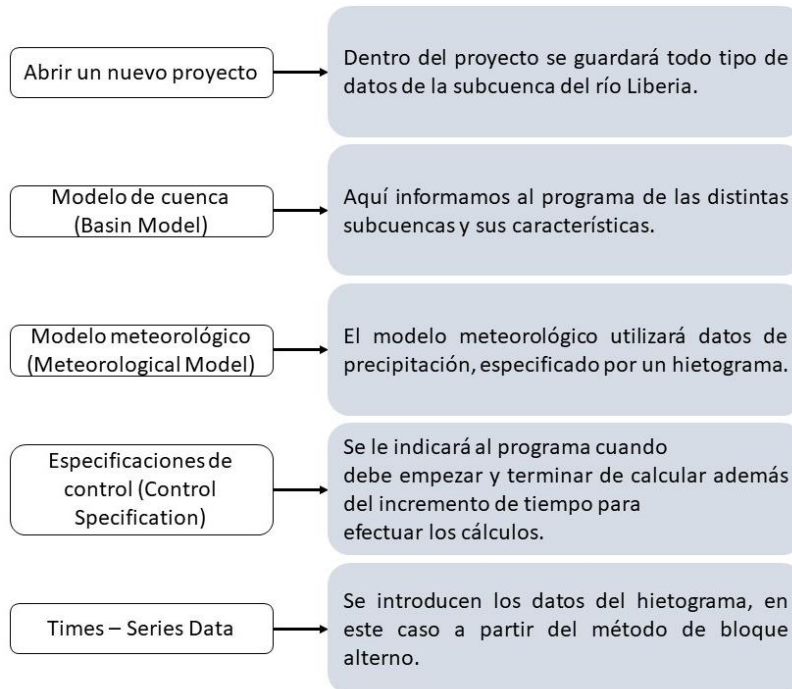
D = duración, en minutos

Con base en las curvas IDF, períodos de retorno de 5, 10 y 25 años y una duración de la tormenta igual al tiempo de concentración de la cuenca, se estimaron los hietogramas.

4) Ingreso de datos al HEC HMS para el cálculo de caudales máximos

Finalmente, con base en los hietogramas generados, tiempo de concentración de la cuenca, número de curva y el área asociada a cada cuenca se realizó el cálculo de los caudales máximos mediante el uso del software HEC-HMS, ver esquema en figura 5.2.

Figura 5.2. Esquema de trabajo a seguir al momento de utilizar el software HEC-HMS.



Fuente: elaboración propia, 2022.

- **Métodos alternos de obtención de caudales**

Para validar los caudales estimados en la modelación hidrológica se utilizó métodos alternos como el traslado de cuencas, así como el registro de estaciones fluviográficas cercanas a la zona en estudio.

Creager et al. (1945) citado en Zucarelli & Hammerly (2013) luego de reunir aproximadamente mil caudales máximos instantáneos de magnitudes excepcionales observados en ríos de Estados Unidos y de otras partes del mundo, propusieron la siguiente expresión:

$$Q = 1.30 \times C_c \times \left(\frac{A}{2.59}\right)^{0.936 \times A^{-0.048}} \dots \dots \dots \text{Ecuación 9}$$

Donde Q es el caudal máximo en m³/s, A es el área de la cuenca en km² y C_c es el parámetro empírico que define la curva envolvente.

A los datos de caudales máximos registrados en las estaciones fluviográficas ubicadas cerca de la subcuenca río Liberia propiedad del ICE se les aplicó un factor de ajuste en función

del área de drenaje que estas posean o índice de compacidad, así como en el número de curva según el año respectivo para caracterizar el potencial de escorrentía, de esta forma se asegura aproximar el dato aguas arriba o aguas abajo según la localización de estas en comparación con el sitio de aforo seleccionado para la subcuenca del río Liberia. El caudal máximo que se obtuvo en la modelación hidrológica se comparó con los caudales de la estación fluviográfica el Salto posterior a realizar el traslado para la subcuenca río Liberia luego de aplicar C Creager con los respectivos ajustes mencionados.

5.2.2 Modelación hidráulica

El modelado hidráulico se realizó con el software IBER en su versión 3.1. El uso de este modelo permite analizar diversos escenarios propensos a sufrir en la subcuenca del río Liberia, propiamente en el cauce que la compone. Las herramientas computacionales son muy bien vistas debido a su eficacia para el análisis lo que permitirá proponer alternativas de corto y largo plazo entorno a la planeación de obras variadas (Ramos & Pacheco, 2017). Un esquema general acerca del proceso que se seguirá al momento de realizar la modelación hidráulica se evidencia a continuación en la figura 5.3:

Figura 5.3. Esquema de trabajo a seguir al momento de utilizar el software de modelación hidráulica IBER.



Fuente: elaboración propia, 2022.

La figura anterior muestra el esquema que siguió la modelación hidráulica. Al cabo de esta etapa ya se contaba con datos de caudal y uso de suelo obtenidos de la sección de modelación

hidrológica de caudales máximos, por lo que la información relevante por conseguir se trata del MED del tramo del cauce en estudio para completar los requerimientos para la corrida del programa.

5.2.2.1 Zonas de inundación

La estimaciones de inundación tomó como base la precipitación y el uso de modelo de lluvia-caudal descritos previamente. A partir de los resultados obtenidos en los apartados de caudal máximo método hidrograma unitario del SCS y software HEC-HMS y modelación hidráulica se generó una cartografía con las marcas de inundación. Una vez identificadas estas zonas con probabilidad o riesgo de inundación se propuso medidas de mitigación. La literatura sugiere una serie de medidas de control de inundaciones como las que se observan en la tabla 5.4:

Tabla 5.4. Algunas medidas de control de inundaciones.

Tipo	Nombre
Estructural	Laguna de control de crecidas
	Diques o pólderes
No estructural	Modificaciones del río
	Control de la erosión del suelo
	Sistemas de pronóstico y alerta temprana
	Recuperación de zonas de protección
	Gestión de residuos sólidos

Fuente: Tucci, 2006.

Cabe mencionar, que las medidas de control de inundaciones mencionadas en la tabla anterior no siguen un dimensionamiento y diseño universal, de manera que según las condiciones donde se pretendan implementar como ancho del cauce del río, cantidad de superficie donde se pretende realizar la laguna de control etc, se dimensionarán sus componentes. En ese sentido, luego que se identificó las zonas de riesgo de inundación o inundables se analizó de qué forma abordarlo y que tan eficiente resulta su aplicación. Para determinarlo, se explicó estas posibles medidas en el capítulo VI.

5.3 Cronograma y presupuesto

El cronograma y el presupuesto si bien son dos conceptos distintos se consideran en este caso como un solo componente integrado debido a que son dos procesos fundamentales para el éxito de un proyecto partiendo de que si el proyecto se atrasa en el cronograma inmediatamente habrá un sobregiro en el presupuesto; aumentan costos operativos, personal y otras variables. Así entonces en la mayoría de los casos estos dos elementos tienen esta tendencia en común por lo que se describen a continuación:

5.3.1 Cronograma

A continuación, se presenta el cronograma del proyecto:

Tabla 5.5. Diagrama de Grant con las actividades por realizar en el proyecto.

Actividades por realizar en el proyecto	DIAGRAMA DE GANT																																						
	Tiempo de redacción en meses																																						
	feb-22				mar-22				abr-22				may-22				jun-22				jul-22				ago-22				sep-22				oct-22				nov-22		
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4			
Parte I. Introductoria																																							
Sección premilinar																																							
Capítulo 1. Introducción																																							
Parte II. Background																																							
Capítulo 2. Antecedentes																																							
Capítulo 3. Marco Teórico																																							
Capítulo 4. Estudios de prefactibilidad																																							
Parte III. Diseño Metodológico																																							
Capítulo 5. Metodología																																							
Entrega de Reporte de Anteproyecto																																							
Defensa oral ante tribunal																																							
Parte IV. Resultados y Síntesis																																							
Capítulo 6. Resultados y Discusión																																							
Capítulo 7. Conclusiones y recomendaciones																																							
Redacción de informe final																																							

Fuente: elaboración propia, 2022.

El cronograma de la tabla anterior muestra las actividades requeridas para construir los entregables del proyecto. Actualmente, el cronograma ha sido abordado según lo previsto por lo que siguiendo lo descrito se abordará a continuación el capítulo 6 y 7 que tomará un tiempo de ejecución que abarca desde el mes de julio a noviembre del presente año (2022).

5.3.2 Presupuesto

Por otra parte, el presupuesto muestra cuánto dinero requerirá el proyecto para producir dichos entregables, para lo que se estimó en un valor de ₡ 4 693 007 aproximadamente. El presupuesto se encuentra distribuido según lo presentado en el apartado de Prefactibilidad financiera del Capítulo IV – Estudios de prefactibilidad.

5.4 Conclusión del capítulo V

El capítulo expuso los dos ejes principales y requeridos por el proyecto para el cumplimiento de sus objetivos. Considerando lo mencionado, el capítulo seis procederá a desglosar los resultados derivados de la aplicación de la metodología.

6 Capítulo VI – Resultados y discusión

En este capítulo se presenta y se discute los principales resultados obtenidos a partir de la ejecución de la metodología propuesta en el capítulo V.

En este capítulo se presentan los resultados del estudio y su respectiva discusión, cuyo orden se estructura de la siguiente manera:

- Resultados de índole hidrológico
- Resultados de índole hidráulico

Cabe resaltar que en el apartado de anexos se presentan algunos resultados complementarios tanto de variables hidrológicas como hidráulicas.

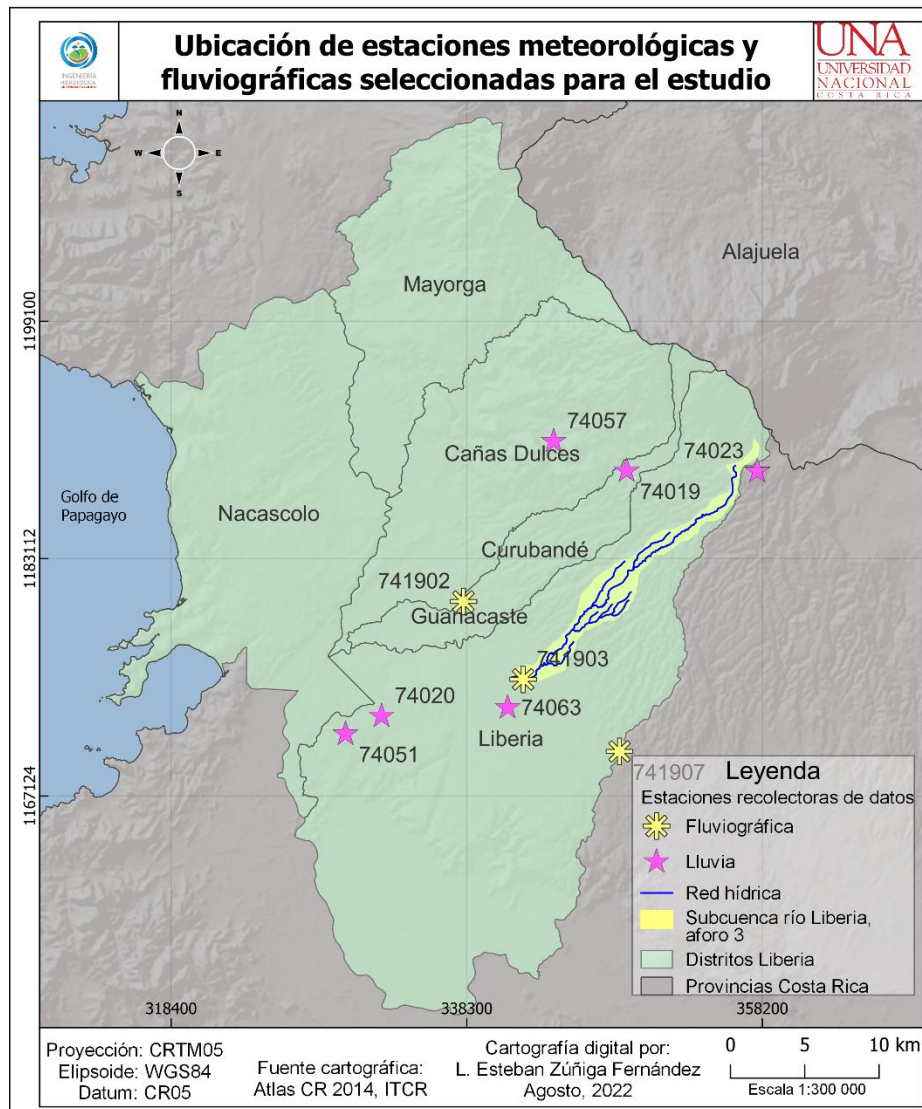
6.1 Resultados de índole hidrológico

En adelante se presentan resultados con relación a las características morfológicas de la subcuenca del río Liberia, información referente a las propiedades del suelo y su respuesta hidrológica, datos históricos de precipitaciones máximas en 24 horas, modelado de precipitación y por último los hidrogramas de crecida para distintos períodos de retorno.

6.1.1 Datos hidrometeorológicos

Las instituciones compiladoras de datos de lluvia y caudal que se identifican con influencia dentro la zona en estudio corresponden al IMN e ICE. A continuación, en la figura 6.1, se presenta la ubicación espacial de las mismas.

Figura 6.1. Ubicación espacial de estaciones compiladoras de datos hidrometeorológicos.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Se reconoce la importancia de contar con información completa respecto a lluvia y caudal dado que a partir de la primera se asegura una buena simulación del comportamiento de esta bajo situaciones semejantes a lo que ocurre realmente. Con el registro de caudales de las estaciones fluviográficas se hace posible comparar la información estimada según la metodología descrita anteriormente de modo que se asegure que no se va a magnificar o minimizar los resultados obtenidos y tener mayor certeza que estos son fiables. A la fecha de agosto 2022, se obtuvo el registro de precipitación máxima mensual en 24 horas brindado por el IMN y el ICE (ver tabla 6.1).

Tabla 6.1. Resumen de datos brindados por instituciones compiladoras de datos

Estación	Período		Registro (años)	Propiedad
	Inicio	Fin		
74019	06/1976	12/2021	46	ICE
74020	01/01/1957	21/07/2017	58	IMN
74023	01/1981	12/1991	11	ICE
74051	04/11/1998	10/07/2022	25	IMN
74057	01/02/2007	30/11/2015	9	
74063	07/03/2012	08/05/2022	11	
741902	04/07/1965	13/04/1970	6	ICE
741903	14/5/1971	23/4/1975	5	
741907	1/5/1976	1/4/1996	21	

Fuente: elaboración propia, 2022 a partir de IMN e ICE, 2022

De los datos suministrados por las entidades correspondientes, se eligió las estaciones tomando en consideración la cercanía con la zona en estudio, la periodicidad de los datos y la uniformidad en cuanto al registro proporcionado. De esta forma, la estación 74019 y 74020 cumplen con estos criterios, permitiendo establecer un periodo uniforme en la que ambas poseen registro desde 1976-2017. La primera, representa principalmente las partes altas de la cuenca, la segunda la parte media y baja y por ende todo el casco urbano.

La estación 74063 está más cercana a la zona en estudio, no obstante, no se tomó en cuenta porque los años de registro son cortos lo que modifica sustancialmente los datos estadísticos, por ejemplo, precipitaciones extremas para períodos de retorno sumamente cortos que se deben a fenómenos extremos que no definen el comportamiento habitual de lluvia de la zona. Por otra parte, las estaciones pluviográficas ponen de manifiesto la limitante que se tiene para obtener datos actualizados de esta variable específicamente para las tres estaciones solicitadas de la zona en estudio. Los años de registro son cortos a excepción de El Salto y aunado a esto, hay meses en los que no se tiene registro.

6.1.2 Caracterización de la subcuenca del río Liberia

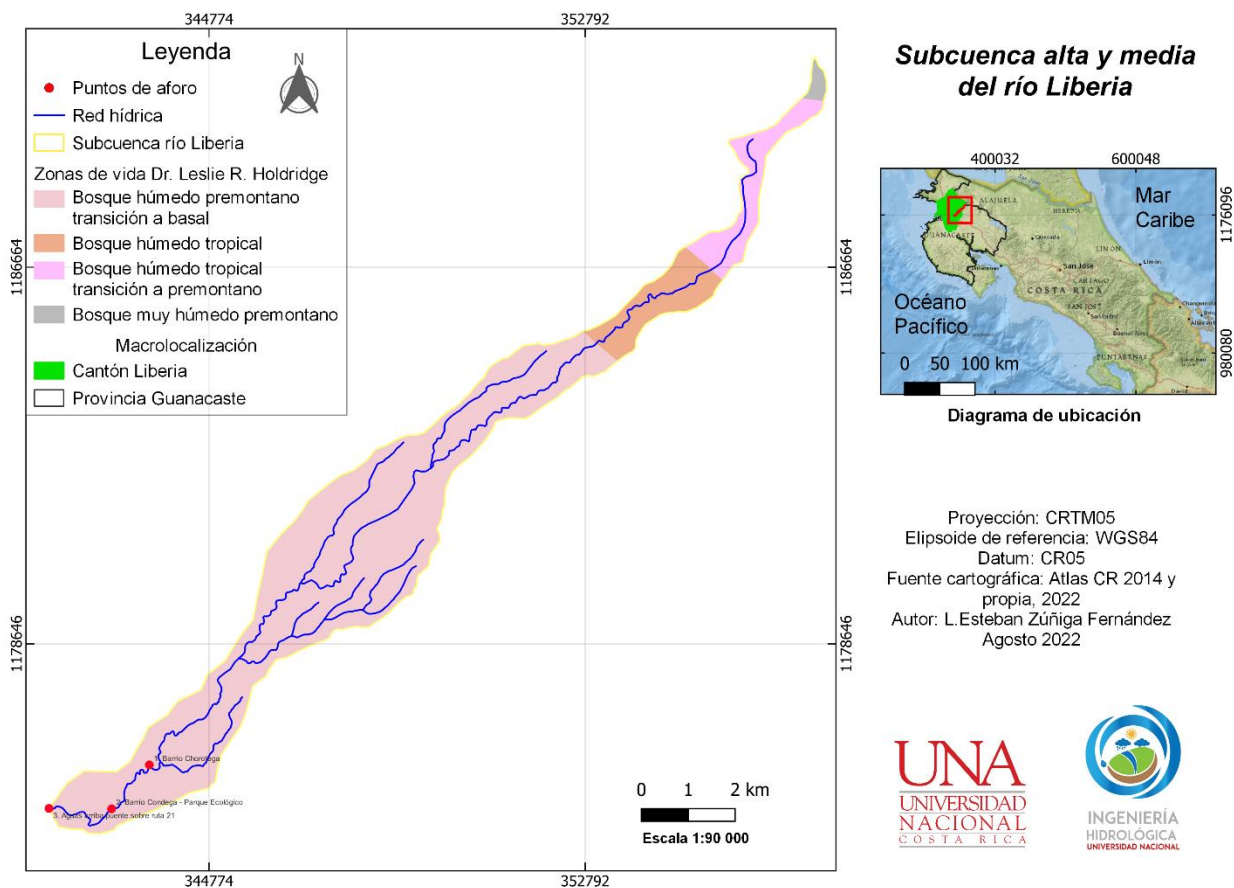
Con la finalidad de conocer algunos parámetros importantes que evidencian el comportamiento como cuenca hidrológica de la zona en estudio y tomando de referencia los sitios que se consideran vulnerables a inundaciones según lo expuesto por vecinos, la experiencia y

criterio del ingeniero coordinador del departamento de Proceso de Desarrollo y Control Urbano de la Municipalidad de Liberia se realizó la delimitación hasta 3 puntos de aforo distintos, en el cual 1 de ellos difiere de los planteados previamente en la sección de descripción del área de estudio.

El cambio se sustenta partiendo de que en el punto 3 anterior, descrito como “detrás de la PTAR de Liberia en barrio Capulín”, la magnitud de las crecidas y afectaciones al área urbana es menor en comparación al de ahora en adelante punto de aforo 2; barrio Condega en las márgenes del parque ecológico y considerando que se tienen limitantes en cuanto a recursos para el levantamiento topográfico se prioriza este nuevo punto aunado a la posibilidad de generar información base que pueda ser tomada en cuenta ante una eventual construcción de laguna de control de inundaciones en el área del parque ecológico.

En la figura 6.2 se muestra la delimitación de la subcuenca del río Liberia con sus respectivos puntos de aforo actualizados, en dirección aguas abajo se tiene: 1. punto de control urbanización barrio chorotega, con evidencia de la presencia de meandros en sus márgenes; 2. barrio Condega en las márgenes del parque ecológico donde se prevé la construcción a futuro de una laguna que podría ser utilizada para controlar el flujo del río ante crecidas extremas; 3. aguas arriba del puente sobre ruta 1 donde los vecinos de la zona se han visto en la obligación de hacer muros con gaviones.

Figura 6.2. Subcuenca alta y media del río Liberia con los nuevos puntos de aforo delimitados.



Fuente: elaboración propia, 2022.

A continuación, en la tabla 6.2 se muestra las características morfológicas obtenidas hasta la delimitación de cada punto de aforo, en la misma se han establecido parámetros de forma, sistema de drenaje y relieve.

Tabla 6.2. Parámetros de la subcuenca del río Liberia.

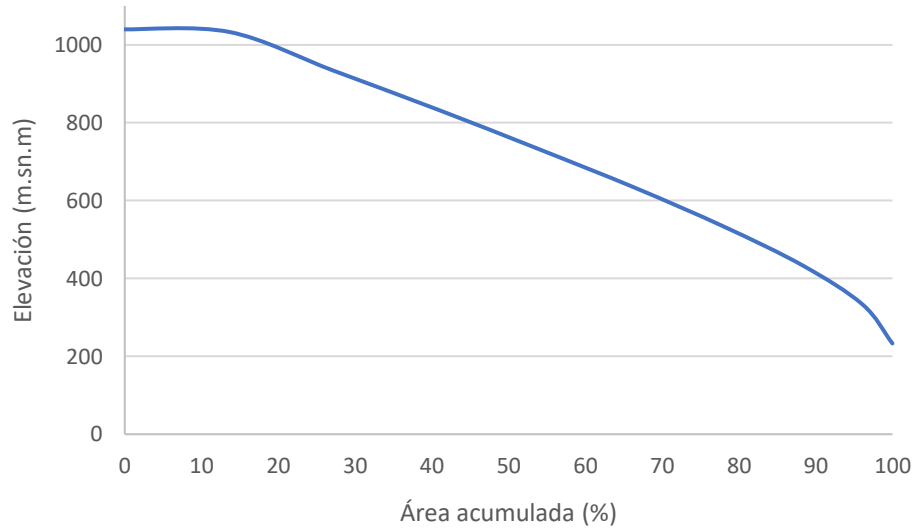
Parámetro	Punto de aforo		
	1	2	3
Área (km ²)	26.01	27.36	28.78
Perímetro (km)	47.37	49.43	51.9
Índice de compacidad	2.60	2.65	2.71
Factor de forma	0.05	0.05	0.04
Longitud de drenaje (km)	42.83	44.47	46.28
Longitud del cauce principal (km)	23.03	24.64	26.48
Densidad de drenaje (km ⁻¹)	1.65	1.63	1.61
Tiempo de concentración (h)	3.01	3.24	3.50
Tiempo de retardo (min)	108.21	116.49	125.89
Pendiente media de la cuenca (%)	15.61	14.92	14.31
Elevación máxima (m.s.n.m)	987.00	987.00	987.00
Elevación mínima (m.s.n.m)	148.00	142.59	133.00

Fuente: elaboración propia, 2022

La delimitación de las secciones estudiadas del río Liberia personifican a una subcuenca de tamaño pequeña, de forma alargada como lo refleja el índice de compacidad y según el factor de forma es rectangular revelando que se trata de una cuenca de menor suspicacia o magnitud a crecidas y a precipitaciones intensas. Así mismo, dentro de los parámetros morfométricos obtenidos se tiene una densidad de drenaje regular con valores cercanos a 1.60 km⁻¹ lo que denota que hay pocos cursos de agua importantes lo cual hace que la zona en estudio sea más susceptible a crecidas que se traduzcan en afectaciones a lo largo de los márgenes del cauce principal aunado a que se tienen tiempos de concentración que alcanzan las 3.5 horas hasta el punto de aforo más alejado.

Los parámetros de forma no necesariamente garantizan que la cuenca por si sola sea menos vulnerable a ser afectada por las crecidas partiendo de que aspectos como la densidad de drenaje, tiempo de concentración y bajas pendientes en algunos sectores modifican la respuesta de la cuenca. Como se mencionó anteriormente, el área, tiempo de concentración y tiempo de retardo intervienen en el proceso de la generación de hidrogramas por lo que su correcta estimación toma mayor relevancia a efectos de asegurar los cálculos posteriores. Como parte del estudio de esta subcuenca se consideró importante conocer la etapa de madurez de esta, para lo cual se generó la curva hipsométrica, ver figura 6.3.

Figura 6.3. Curva hipsométrica de la subcuenca río Liberia.



Fuente: elaboración propia, 2022.

De manera implícita se evidencia que al menos el 50% de la subcuenca presenta altitudes por encima de los 730 m.s.n.m. La forma de la curva refleja una cuenca con potencial erosivo debido a su fase de juventud (Guerra & González, 2002), de manera que la correcta evaluación, análisis y seguimiento de las obras que puedan plantearse con relación a esta subcuenca no deben despreciar posibles pérdidas de sección hidráulica por procesos de erosión.

6.1.3 Modelación hidrológica de caudales máximos

Para realizar la modelación hidrológica se contó con variables como el área tributaria, tiempo de concentración y retardo de cada punto de aforo y se estimó las pérdidas por infiltración y función de transformación de precipitación escurriente, en adelante número de curva y hietogramas.

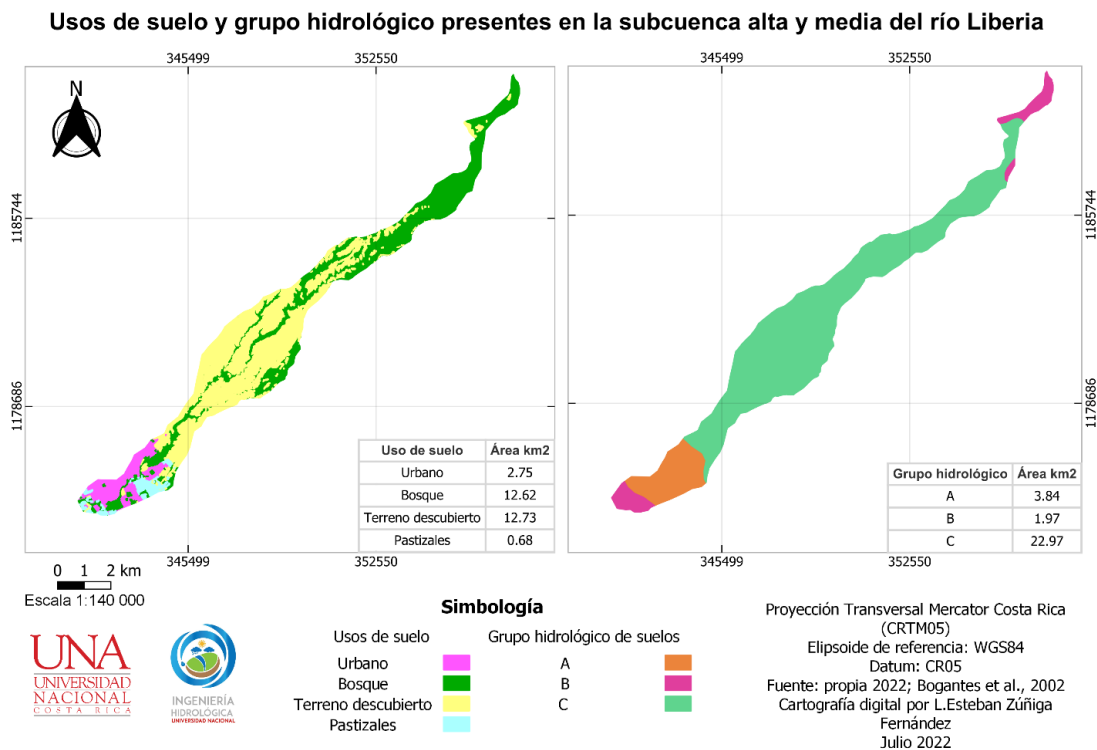
- **Número de curva**

A partir de la imagen satelital Sentinel del mes de abril 2022 se obtuvo el uso actual de la subcuenca hasta el último punto de control. A continuación, se pueden observar los parámetros obtenidos para la clasificación de uso de suelo los cuales consistieron en: Urbano; donde se asienta la población que habita en el área en estudio, principalmente en la parte más baja de la subcuenca y al margen de la red hídrica abarcando un 4% del uso total. Bosque (primario y

secundario); mostró un 46% que consideró toda aquella vegetación densa, montañosa o pequeños grupos de árboles emplazados en la zona urbana en, incluida, la vegetación ribereña. Terreno descubierto; zonas donde predominan los suelos desnudos sea por intervención del hombre o por procesos naturales, localizados principalmente en la zona media de estudio en 49%. Pastizales; zonas con terrenos donde resalta la presencia de pasto producto de la intervención humana con fines ganaderos, así como de origen natural constituyen un 1%.

Así mismo, se presenta la distribución espacial del grupo hidrológico de suelos presentes en la zona de estudio, ver figura 6.4. A grandes rasgos se observa que predomina el grupo tipo C característico por poseer moderado alto potencial de escorrentía, tasas de infiltración bajas cuando están completamente mojados.

Figura 6.4. Uso de suelo y grupo hidrológico presente hasta el punto de aforo 3 en la subcuenca del río Liberia.



Fuente: elaboración propia, 2022

A nivel general se evidencia que la subcuenca en términos de uso de suelo el de mayor presencia es el de terrenos descubiertos mientras que por parte del grupo hidrológico le compete al de tipo C. Estas dos variables potencian la escorrentía por lo que es de esperarse que en las zonas donde se interceptan o hay presencia de ambas tanto a nivel de uso de suelo como grupo

hidrológico aumente considerablemente el caudal del río ante eventos de precipitación. Caso contrario sucede en las partes altas con el mismo tipo de suelo C la escorrentía se ve contrarrestada por el efecto de los bosques que reducen la escorrentía y por ende benefician la infiltración.

Otro aspecto importante es el hecho que casi toda la lluvia que cae en los 2.75 km² de zona urbana tiende a formar parte del caudal del río por el efecto impermeabilizante que generan las construcciones, carreteras entre otros, mismo volumen de agua que es conducido a través de sistemas de alcantarillado pluvial con desfuegos a lo largo del cauce principal.

Finalmente, para una condición de humedad antecedente *CHA-II* y una práctica predominante de siembra en contorno o curvas de nivel según el censo nacional agropecuario del año 2014 realizado por INEC y con base en la información expuesta en la cartografía anterior se determinó el número de curva para cada punto de aforo, comportándose de la siguiente manera: aforo 1; $NC_{(II)}$ 80.19, aforo 2; $NC_{(II)}$ 79.25 y aforo 3; $NC_{(II)}$ 78.87.

- **Modelado de precipitación**

Se realizó el proceso para completar datos a las dos estaciones seleccionadas por medio del método de los promedios descrito por Aliaga (1983, p.89 citado en Baltodano, 2020) esto debido a que no fue posible establecer una correlación significativa entre ambas que permitiera utilizar el método de regresiones múltiples mencionado previamente en la metodología. Se tomó en cuenta el hecho de determinar el promedio de los años típicos para completar los datos faltantes. Así mismo, se basó en los registros de los medios de comunicación, reportes del IMN y estaciones vecinas para constatar que el dato que se incorporó estuviera asociado lo más similar posible a las condiciones reales que se presentaron y en los casos en los que no se tenía certeza se completó con el promedio del mes anterior o posterior según se consideró pertinente. En el caso particular de la estación 74020 en su mayoría estaban completos, a excepción del año 2017 en el que los meses de julio-diciembre se completaron con la estación 74051. Así mismo como se observa en la tabla 6.1 la estación 74020 se asume que dejó de operar en el año 2017 y que en su lugar desde años atrás se había instalado la estación 74051 por lo que para conseguir una buena uniformidad y comprender un período más largo se extendió la 74020 a partir de los datos 74051, esto porque la separación entre cada estación es de aproximadamente 2 km y comparten un área de influencia y altitud prácticamente iguales.

El resumen de los valores de precipitación máxima para cada año luego de haber completado los datos correspondientes se muestra a continuación en la tabla 6.3.

Tabla 6.3. Serie de precipitaciones diarias máximas anuales, para ambas estaciones de lluvia.

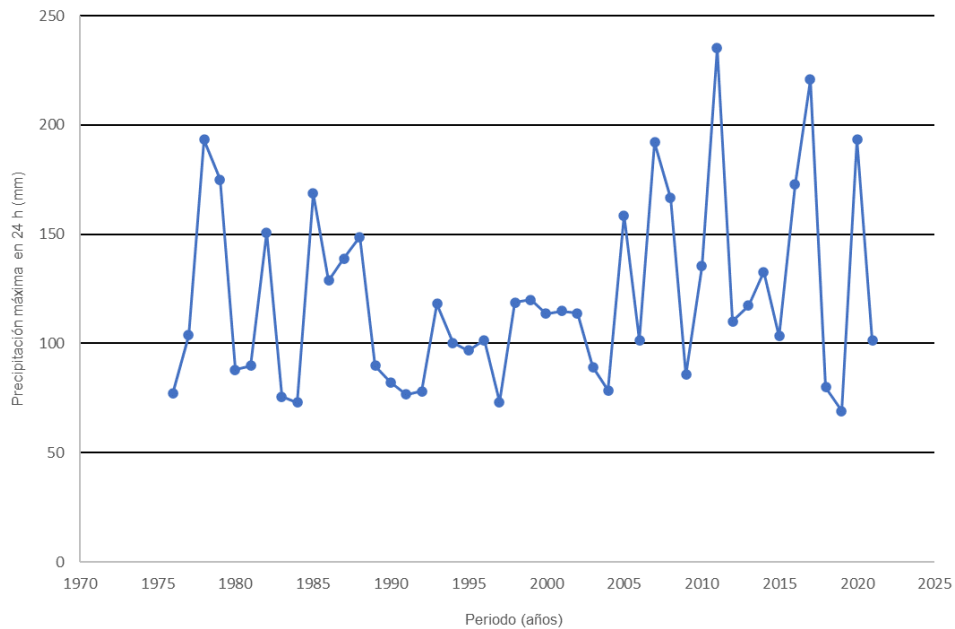
Año	Estación		Año	Estación		Año	Estación		Año	Estación	
	74019	74020		74019	74020		74019	74020		74019	74020
1976	77.1	61.7	1988	148.7	96.7	2000	113.7	173.7	2012	110.2	97.0
1977	103.8	101.4	1989	89.8	102.3	2001	114.8	144.4	2013	117.3	144.7
1978	193.2	83.6	1990	82.3	56.2	2002	113.8	163.3	2014	132.8	70.8
1979	174.9	196.7	1991	76.6	84.7	2003	89.2	68.0	2015	103.4	56.2
1980	87.9	99.0	1992	78.2	119.6	2004	78.5	86.1	2016	172.7	117.1
1981	89.9	110.6	1993	118.1	114.7	2005	158.5	133.0	2017	220.7	252.6
1982	150.8	139.6	1994	100.2	74.1	2006	101.5	115.7	2018	80.0	117.8
1983	75.7	127.3	1995	96.8	123.7	2007	192.0	104.2	2019	69.0	61.0
1984	73.0	101.9	1996	101.5	125.3	2008	166.6	184.2	2020	193.3	127.0
1985	168.7	103.5	1997	73.1	84.0	2009	85.8	95.5	2021	101.3	73.4
1986	128.9	203.0	1998	118.8	116.0	2010	135.4	127.8			
1987	138.9	75.5	1999	120.0	294.3	2011	235.2	145.5			

Fuente: elaboración propia, 2022 a partir de IMN e ICE, 2022.

Asociando el resumen de los datos de precipitación utilizados en ambas estaciones con lo acontecido el pasado 09 de setiembre del año 2021, coincide en que las precipitaciones máximas se presentaron en setiembre, pero los valores de lluvia de 101.3 mm y 73.4 mm registrados ese mes y año no superan los máximos de lluvia del año 2020. A raíz de lo anterior, se puede mencionar que tuvo que haber más de una causa para el desbordamiento del río sobre el dique y no únicamente por la cantidad de lluvia. El relato de los vecinos de la zona expone la gran cantidad de sólidos que había aguas arriba del punto de aforo en la urbanización barrio Chorotega, específicamente por el puente Felipe Pérez y se especula de un aporte extra de agua por la apertura de compuertas en la planta potabilizadora del AyA, sin embargo, no fue posible afirmar o desmentir este supuesto.

Previo a identificar cuál distribución de probabilidad se ajusta mejor a la serie de datos, se detectó datos dudosos altos aplicando la fórmula expuesta por Rojas (2011) esto para discutir la posibilidad de mantenerlos o eliminarlos. Los datos responden a una serie de datos temporal, ver figura 6.5

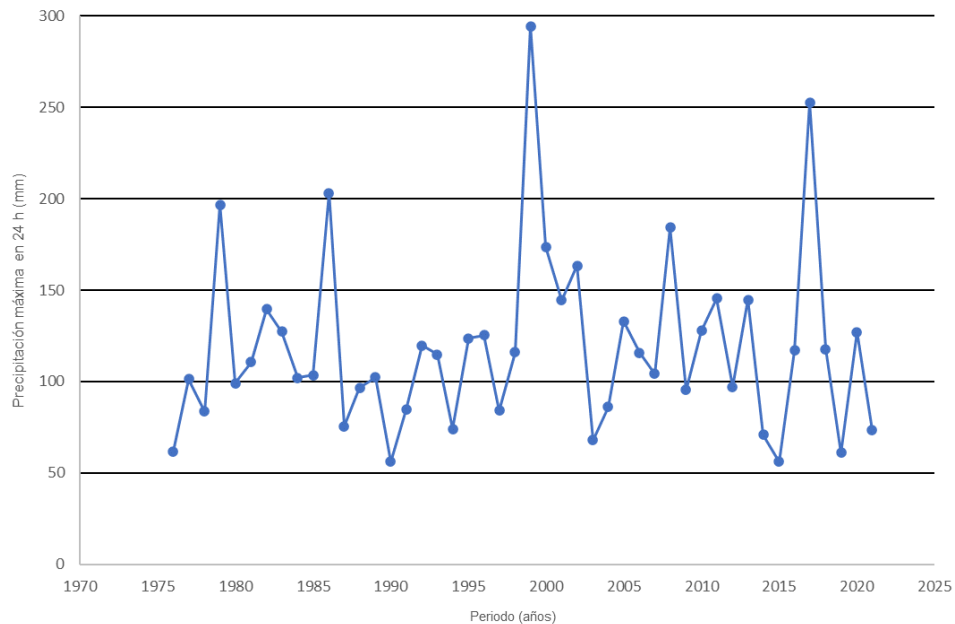
Figura 6.5. Serie de precipitación máxima anual en 24 horas estación 74019.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Luego de aplicar la fórmula se estimó que para la serie de datos en cuestión el umbral valor extremo superior de la muestra es de 236.5 mm por lo que los registros de la estación que poseen valores por encima de estos son considerados datos dudosos altos. Para sustentar esto, de la figura anterior se identifican dos datos pico, sin embargo, solo uno de estos está muy próximo a alcanzar el umbral valor extremo; año 2011 con 235.2 mm, pero sigue estando por debajo del mismo.

Figura 6.6. Serie de precipitación máxima anual en 24 horas estación 74020.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Similar a la estación anterior, se tienen dos valores pico, sin embargo, solo uno de estos supera el umbral extremo superior; el del año 1999 con una precipitación de 294.3 mm. Otro valor muy próximo al umbral extremo fue el dato que se presentó en octubre del año 2017 con 252.6 mm de lluvia en 24 horas, pero que no superó el extremo dudoso de 253.9 mm.

Analizando estos umbrales extremos vemos que el dato dudoso alto de la estación 74019 correspondiente a 235.2 mm en 24 horas en mes de octubre del 2011 coincide con el paso de la depresión tropical 12-E en Centroamérica. En Costa Rica, la región del país con mayor afectación fue la vertiente del Pacífico, Guanacaste registró montos que superaron los 1000 mm durante el período del 9 al 20 de octubre según datos de la estación La Perla (CEPAL., et al 2012).

En ese sentido, para la estación 74020 cuyo valor superó el umbral se le atribuye al huracán Floyd con afectaciones en la vertiente pacífica en el que incluso se declaró estado de necesidad y urgencia por calamidad pública a través del Decreto de Emergencia No. 28130-MOPT por afectaciones a lo largo del país, incluida la provincia de Guanacaste (Vallejos et al., 2012). Por otra parte, el dato próximo a alcanzar el umbral correspondió al del año 2017, durante los primeros días del mes de octubre se formó la tormenta tropical Nate que propició abundantes lluvias en el pacífico, principalmente en Guanacaste, siendo uno de los fenómenos

meteorológicos que más daños ha dejado en las últimas décadas (Naranjo, 2017). Para ese año, la estación 74019 también registró un dato próximo a alcanzar el umbral de su registro, con un valor de lluvia en 24 horas de 220.7 mm.

Debido a lo anterior, se decide mantener los datos de cara a estudiar periodos de retorno elevados pues son los recomendados para el manejo de inundaciones ante eventos hidrometeorológicos extremos, mientras que, respecto a los datos dudosos bajos, estadísticamente no se encontró ninguno, pero de la figura 6.6 podemos ver que para el año 1990 y 2015 hubo dos picos bajos con el mismo valor de 56.2 mm.

El análisis de los datos por métodos estadísticos, en este caso la distribución de frecuencia se limitó al método de Gumbel y Log Pearson III. Se utilizó estos métodos ya que, debido a las condiciones de nuestro país, son los que tienen mejor aceptación (Rojas, 2004 citado en Rojas, 2011). Para la estación 74019 el test Kolmogorov Smirnov brindó la mejor función; Log Pearson III, con un ajuste de 94.51% mientras que Gumbel presentó 92.69%. Por otro lado, el test de bondad Chi Cuadrado proporciona el mejor resultado para la función de Gumbel y Log Pearson III en ese orden respectivo.

Tras la valoración visual de las funciones de ajuste y los resultados de las pruebas de bondad se procedió a seleccionar la función que mejor se ajustó a los datos en estudio y se tomó en cuenta todos los resultados obtenidos para seleccionar el mejor ajuste global. En este caso la función LogPearson III presentó mejor ajuste visual, una diferencia marcada con lo observado para Gumbel. La prueba de Chi Cuadrado le da un mejor ajuste visual a Gumbel además de tener 92.69% en la prueba de Kolmogorov-Smirnov, con una diferencia de 1.82% de la función de Log Pearson III. Así entonces partiendo de que el ajuste visual no difiere en gran medida y que, si hay una diferencia considerada en el test de Chi Cuadrado, pero no así en el de Kolmogorov-Smirnov se optó por ajustar los datos a la distribución Gumbel. En lo que respecta a la estación 74020 se seleccionó utilizando el mismo criterio; para Kolmogorov-Smirnov, el test de Chi Cuadrado y el ajuste visual Log Pearson III brindó la mejor función.

Entonces, a partir de lo analizado se concluye que los datos disponibles se ajustan adecuadamente a la distribución de probabilidad de Gumbel (74019) y Log Pearson III (74020). En consecuencia, se procede a realizar el análisis de los datos con esta distribución para cada

estación y obtener las precipitaciones máximas esperadas para distintos períodos de retorno (ver tabla 6.4).

Tabla 6.4. Precipitaciones esperadas para distintos periodos de retorno.

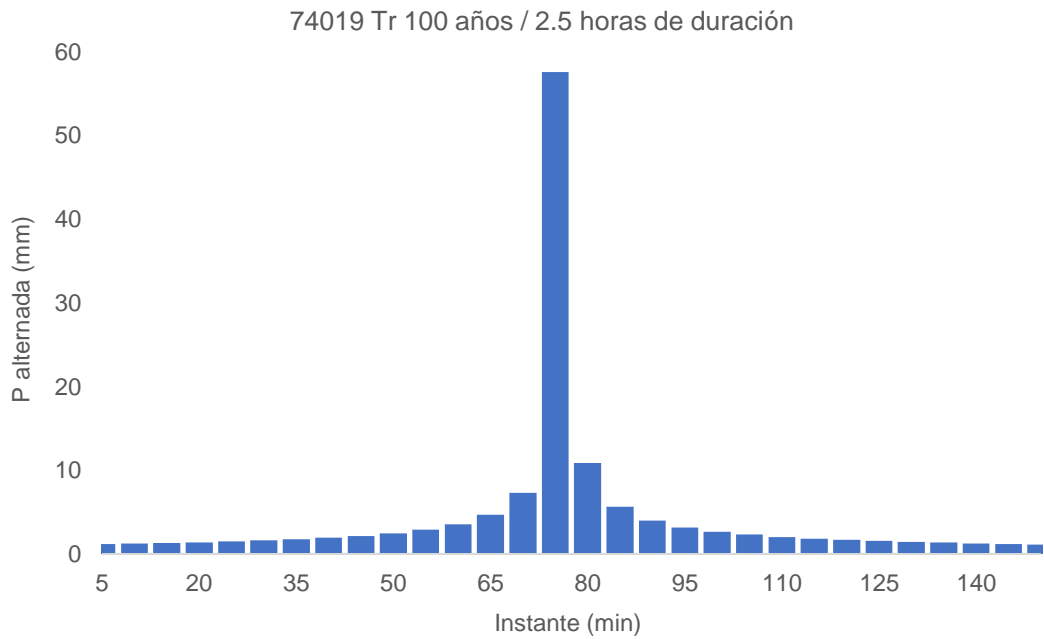
Estación	74019	74020
Distribución	GUMBEL	LOG PEARSON III
T (años)	Hydrognomon	
	P esperada (mm)	
2	113.754	107.981
5	151.169	149.958
10	175.941	180.376
25	207.241	221.868
50	230.461	255.047
100	253.509	290.214

Fuente: elaboración propia, 2022.

a) Hietogramas método de bloques alternos

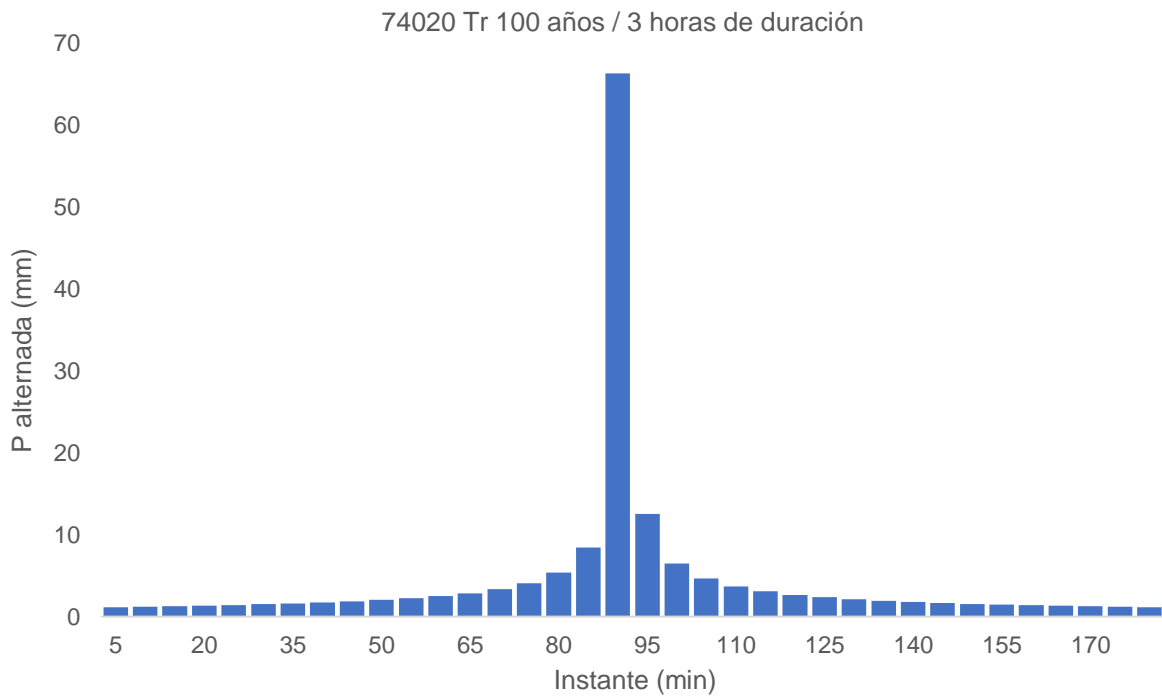
La hoja de cálculo de Excel estimó las CIDF así mismo se obtuvo la ecuación general de la intensidad máxima de lluvia para la zona de estudio. Con base en las curvas IDF, periodos de retorno de hasta 100 años y una duración de la tormenta igual al tiempo de concentración de la cuenca hasta cada punto de aforo, se generó los hietogramas sintéticos como los que se muestran a continuación de las estaciones 74019 y 74020, ver figura 6.7 y 6.8.

Figura 6.7. Hietograma por método de bloque alterno estación 74019 Tr 100 años, 2 horas de duración.



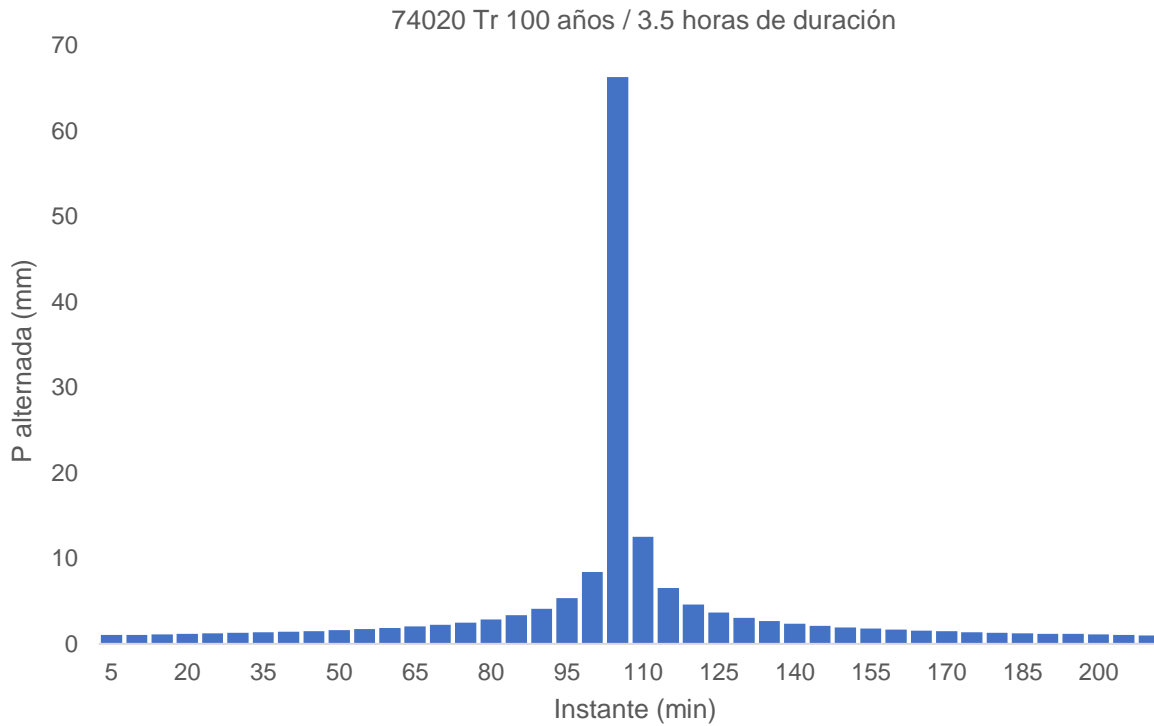
Fuente: elaboración propia, 2022.

Figura 6.8. Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 100 años, 3 horas de duración.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Figura 6.9. Hietograma por método de bloque alterno estación 740 74020, 3.5 horas de duración.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Así mismo se elaboraron hietogramas para los periodos de retorno de 25 y 50 años con base en la información de ambas estaciones. Ver anexos 1,2 y 3.

- **Caudales máximos para distintos periodos de retorno**

Con base en la información anterior se realizó las modelaciones hidrológicas en HEC-HMS para cada uno de los periodos de retorno, obteniendo el siguiente resultado de la tabla 6.5.

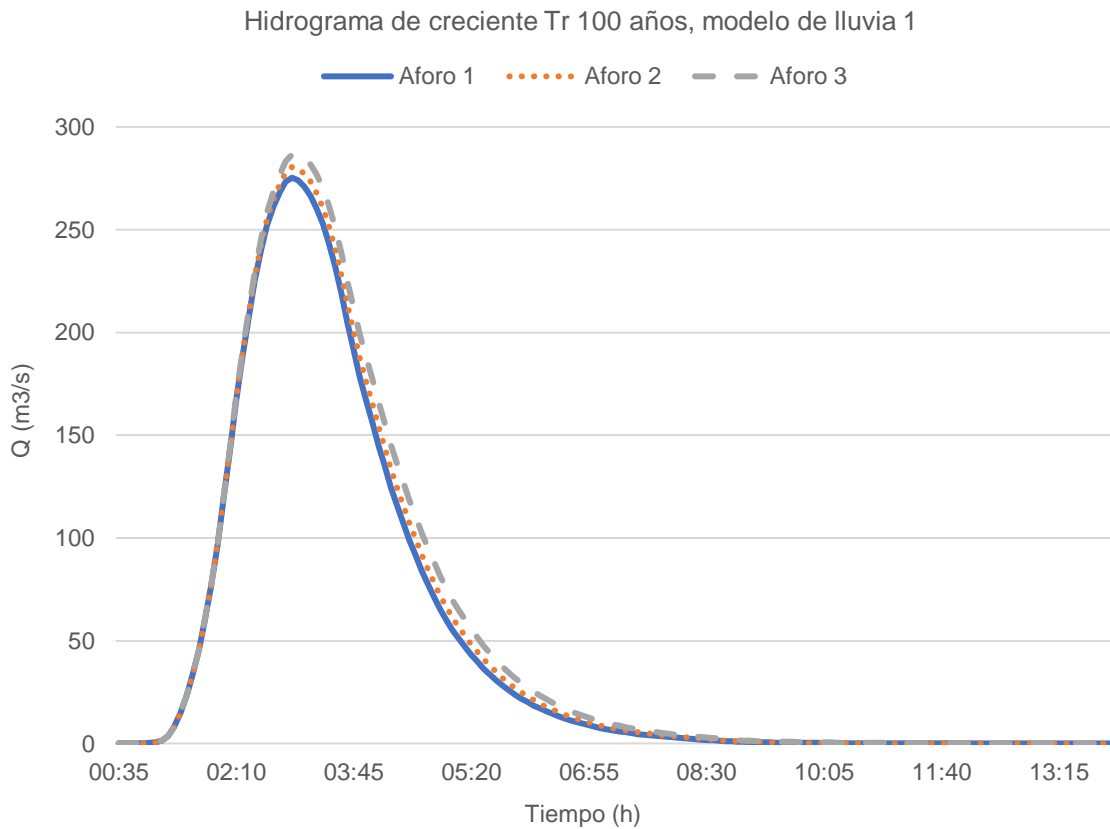
Tabla 6.5. Caudales obtenidos para distintos periodos de retorno y sitios de aforo.

Nombre	Periodos de retorno (años)					
	25		50		100	
	Q _{máx} (m ³ /s)	V (m ³)	Q _{máx} (m ³ /s)	V (m ³)	Q _{máx} (m ³ /s)	V (m ³)
Aforo 1	203.961	1719.5	237.430	2004.7	275.298	2328.1
Aforo 2	206.960	1778.4	241.417	2081.1	280.511	2425.7
Aforo 3	210.874	1865.0	246.408	2189.2	286.805	2559.3

Fuente: elaboración propia, 2022.

El período de retorno de 100 años es el más usual para delimitar zonas de inundación (Porrás, 2020), así como para realizar obras de protección según la Legislación de Obras de Protección de cauces en Costa Rica (Gómez & Monge, 2019), por lo que se adoptarán los resultados para los caudales de dicho periodo de retorno. Los hidrogramas de caudal se pueden observar seguidamente en la figura 6.9

Figura 6.10. Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia para un período de retorno de 100 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Hidrogramas de creciente para los períodos de retorno de 25 y 50 años se pueden observar en el anexo 4. Por otra parte, asegurar un dato de caudal máximo que de una estimación aceptable es de gran importancia debido a que constituye el dato de entrada para la modelación hidráulica, y la base para la identificación de zonas inundables y posibles propuestas para la mitigación de estas. Es por ello por lo que a continuación se buscará encontrar los datos de caudal de mayor aceptación con base en distintos criterios hidrológicos para finalmente realizar la modelación hidráulica y sus derivados.

6.1.4 Métodos alternos de modelado de lluvia y estimación de caudales

De acuerdo con el registro de caudales de las estaciones fluviográficas, se evidenció que no se cuenta con datos recientes, situación que puede deberse a que las estaciones hayan salido de operación desde hace ya varios años. En ese sentido la que comprende mayor cantidad de registro es El Salto por lo que se aplicó el método de traslado de caudales desde la subcuenca el Salto hasta la subcuenca río Liberia basado en que comparten características hidrológicas muy similares por su cercanía. Se identificó el caudal máximo instantáneo registrado para distintas fechas de manera que, ese mes y año en las estaciones medidoras de lluvia se registró la siguiente información (ver tabla 6.6).

Tabla 6.6. Resumen de datos de precipitación según fecha de caudal registrado por estación fluviográfica.

Fecha	Est. fluviográfica El Salto $Q_{\text{máx inst}}$ (m^3/s)	P registrada est. 74019 (mm)	P registrada est. 74020 (mm)
Set 1979	165	121.5	196.7
Oct 1979	271	66.9	28.8
Jun 1982	269	65.9	92.2
Jun 1986	319	128.9	140.9
Oct 1994	198	89.2	74.1

Fuente: elaboración propia, 2022.

Se revisó el resultado del análisis de consistencia y pudo identificarse que estos valores de precipitación están asociados a períodos de retorno que van desde 1 a casi 3 años para la estación 74019 mientras que de 1 a casi 15 años en la estación 74020. Se utilizó el hietograma en función del período de retorno respectivo y duración de la tormenta igual al tiempo de concentración hasta el punto de aforo o cierre 3 que posee un área de 28.78 km^2 .

Por otra parte, a efectos de valorar cual es el dato estimado que puede representar mejores condiciones también se aplicó un factor de ajuste a los datos de la tabla 6.6 según lo mencionado por la OMM (1994) en que los estudios de miles de años indican que, al multiplicar las cantidades máximas anuales de lluvia diaria u horaria, para un solo intervalo fijo de observación de una a 24 horas por el factor 1.13, se producirán valores que se aproximan mucho a los que se obtendrían de un análisis de los máximos reales.

Adicionalmente, se adoptó por realizar una aproximación inicial de la distribución temporal de precipitación para la zona de Liberia pues no se cuenta con este tipo de información para las estaciones 74019 y 74020. Así entonces, se utilizó la distribución de precipitación desarrollada por Murillo (1994), para la estación Pavas 84074 ya que en términos generales tras consultas realizadas a personas de la zona de Liberia coinciden en que los eventos de lluvia pueden alcanzar hasta 2 horas de duración y que además son típicamente convectivas aunado a que comparten el mismo clima tropical lluvioso y seco. De acuerdo con Oreamuno (2022), experto en hidrología en Costa Rica, el hecho de utilizar distribuciones de precipitación del país, aunque no sean de la misma zona dan una aproximación aceptable en comparación a utilizar distribuciones sintéticas de precipitación ya que estas no fueron diseñadas para Costa Rica y en algunos casos, no todos, los resultados de estas difieren en gran medida. Al usar la distribución temporal de otra zona se debe contemplar como mínimo la duración típica de las lluvias y su comportamiento sea estratigráfica o convectiva para asociarla a la zona en estudio.

De la estación Pavas 84074 se utilizó únicamente la distribución porcentual más no así, los valores de lluvia como tal. Para ello se utilizó los máximos de precipitación de las estaciones 74019 y 74020 que se muestra en la tabla 6.3 y se obtuvo el promedio de lluvia para obtener una aproximación de la distribución temporal de lluvia en la subcuenca del río Liberia en función de los períodos de retorno de interés.

Así entonces, se muestra a continuación el resultado de la modelación hidrológica considerando la precipitación del año de registro de la estación pluviográfica basado en el hietograma sintético de bloques alternos sin el factor de ajuste de 1.13 y con la aplicación de este, así como también los resultados del modelado de precipitación con el hietograma característico para los años de análisis asociados a un valor específico de lluvia según el mes (ver tabla 6.7).

Tabla 6.7. Comparativa de caudal obtenido por método alternativo y HEC-HMS.

Traslado de estación el Salto hacia subcuenca río Liberia		Hietograma por método de bloques alternos				Empleando distribución porcentual estación Pavas	
Año	$Q_{\text{máx inst}}$ (m^3/s)	Q (m^3/s) sin ajuste	Diferencia	Q (m^3/s) con ajuste	Diferencia	Q (m^3/s)	Diferencia
set-79	79.77	89.971	13%	111.696	40%	214.189	169%
oct-79	131.01	58.357	-55%	73.532	-44%	49.989	-62%
jun-82	130.04	62.235	-52%	78.543	-40%	73.185	-44%
jun-86	154.22	82.875	-46%	102.927	-33%	199.397	29%
oct-94	95.72	73.144	-24%	91.382	-5%	100.584	5%

Fuente: elaboración propia, 2022.

Es menester reconocer la lluvia como principal generadora de escorrentía y por ende aumento de caudales en los cuerpos de agua superficiales. Al realizar esta comparación se identifica un aspecto importante; la estación fluviográfica está muy cerca de la subcuenca del río Liberia sin embargo cabe la posibilidad que las estaciones meteorológicas no representen al 100% el comportamiento de la subcuenca el Salto, partiendo de que en la tabla 6.7 se observa que set 1979 y oct 1994 son quizás los más representativos debido a que el caudal registrado en la estación fluviográfica se vincula a la cantidad de lluvia medida mientras que en los otros años hay caudales mucho más elevados con volúmenes de lluvia incluso menor a los dos años mencionados anteriormente. Esto puede deberse a la distribución de la lluvia de manera que no haya una simultaneidad muy marcada entre el caudal medido de esa zona con relación a la lluvia caída dentro de la subcuenca el Salto contra la registrada para ese periodo en las estaciones 74019 y 74020.

Ahora específicamente relacionado con la comparación de caudal, si buscamos encontrar una estimación que se asemeje a lo medido por la estación fluviográfica y el trasladado a la subcuenca río Liberia la que nos da la mejor diferencia es la del hietograma de bloque alternativo, pero aplicando un factor de ajuste de 1.13 a las precipitaciones para los distintos periodos de retorno. Debido a lo anterior se descarta utilizar los datos de caudal de las estaciones fluviográficas por la inconsistencia en su registro.

Sin embargo, para tener datos hidrológicos más amplios y un análisis de sensibilidad (por rangos) se buscará contrastar 3 modelados de lluvia: 1) bloque alternativo sin ajuste, 2) bloque

alternos con factor de ajuste de 1.13 y 3) uso de información de distribución temporal de zona distinta que tiene patrones de precipitación similar: estación Pavas. Los hietogramas obtenidos de los 3 modelados de lluvia se pueden observar en los anexos 1-3, 5-7 y el anexo 9, estos generan a su vez 3 caudales distintos por punto de aforo y período de retorno. A continuación, se presenta un resumen de los caudales estimados para un período de retorno de 5 años con el fin de valorar el comportamiento del cauce ante crecidas que se consideran habituales por su recurrencia y el período de retorno de 100 años por ser el recomendado al momento de trabajar con temas de inundación (ver tabla 6.8).

Tabla 6.8. Caudales máximos estimados para períodos de retorno de 5 y 100 años en los distintos puntos de aforo.

Período de retorno	Nombre	Hietograma por método de bloques alternos				Empleando distribución porcentual estación Pavas	
		Q (m ³ /s) sin ajuste	V (m ³)	Q (m ³ /s) con ajuste	V (m ³)	Q (m ³ /s)	V (m ³)
5 años	Aforo 1	140.879	1184.1	170.808	1434.7	232.862	2799.2
	Aforo 2	142.301	1214.2	172.743	1474.4	237.626	2886.1
	Aforo 3	144.429	1263.7	175.423	1536.5	244.199	3006.9
100 años	Aforo 1	275.298	2328.1	326.165	2758.1	489.259	5539
	Aforo 2	280.511	2425.7	332.73	2878.8	502.524	5748.1
	Aforo 3	286.805	2559.3	340.289	3039.5	518.105	6009.8

Fuente: elaboración propia, 2022.

Los hidrogramas de creciente que muestran la variación del caudal en el tiempo según los 3 modelados de lluvia y distintos periodos de retorno se pueden apreciar en los anexos 4, 8 y 10 respectivamente. Hasta este punto no se cuenta con la certeza de cual dato o metodología de caudal tiene mejor aceptación por parte del autor para ser empleados como datos de entrada en la modelación hidráulica, no será hasta que se corra el programa HEC-RAS y se asocien los caudales de tabla 6.8 con relación a lo que sucede habitualmente en el cauce en estudio por medio de visitas en campo y evidencias que lo demuestren tales como: consultas a los stakeholders, manchas de crecidas en las paredes del cauce, basura etc. A continuación, se presentan los resultados de la modelación hidráulica.

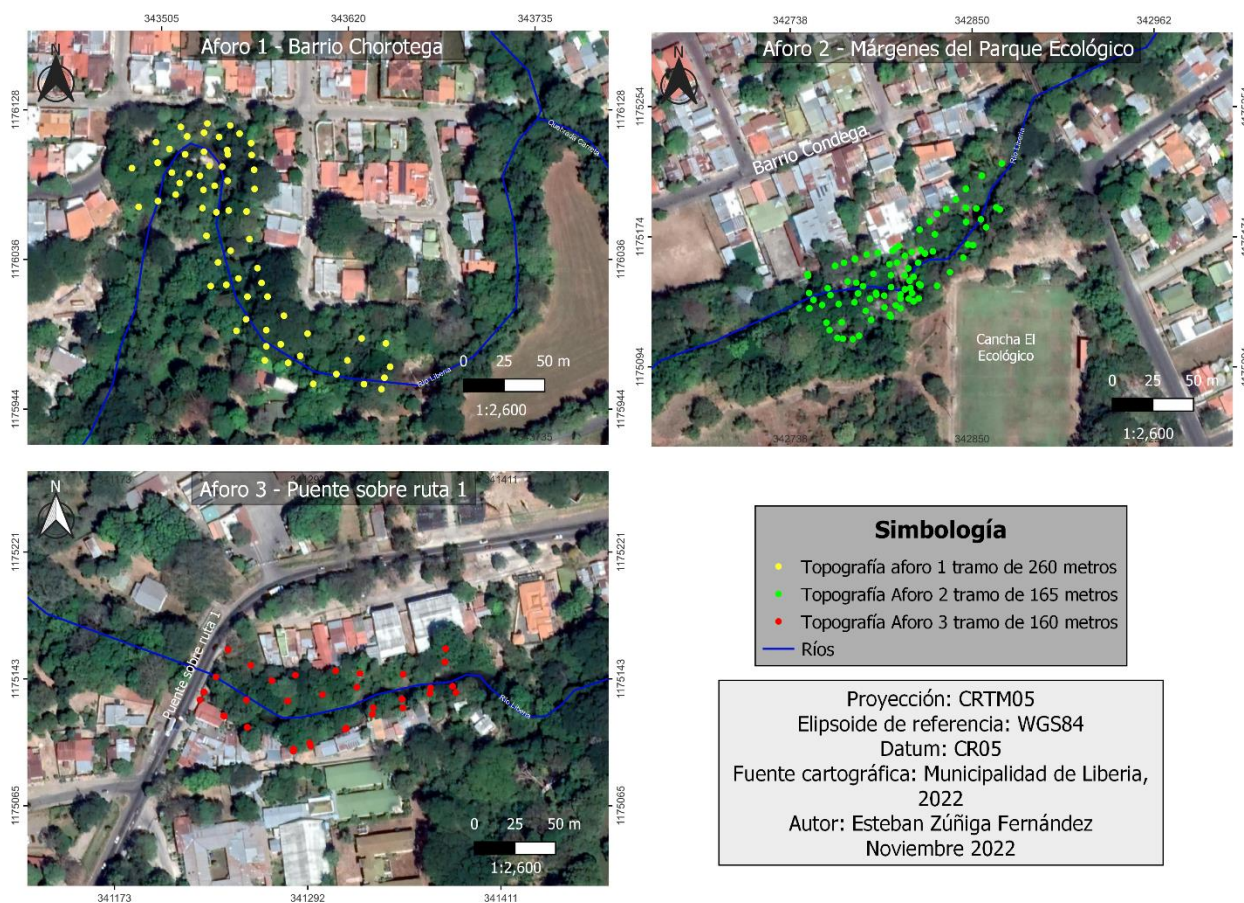
6.2 Resultados hidráulicos

En adelante se presentan resultados con relación a la modelación hidráulica de los puntos de aforo seleccionados, información referente a la correspondencia entre la magnitud de las crecientes reportadas en la cuenca para períodos de retorno de 5 años y los 3 modelos de precipitación, zonas de riesgo de inundación y por último propuestas de mitigación ante inundaciones según los parámetros hidráulicos que generan los caudales máximos para período de retorno 100 años y basado en las condiciones topográficas reflejadas del levantamiento en campo. Cabe mencionar que para la modelación hidráulica se utilizó el software HEC-RAS y no IBER como se había propuesto en la metodología, esto por un tema de limitantes computacionales y tiempo de corrida del programa, donde finalmente el que se ajustó mejor fue HEC-RAS permitiendo llevar a cabo el objetivo asociado a la hidráulica de manera oportuna.

6.2.1 Datos topográficos

Uno de los insumos esenciales para la correcta modelación hidráulica consiste en los datos topográficos. El levantamiento de las secciones transversales lo realizó la Municipalidad de Liberia y la información contenida dentro de cada punto observado en la figura 6.10 contiene valores de elevación.

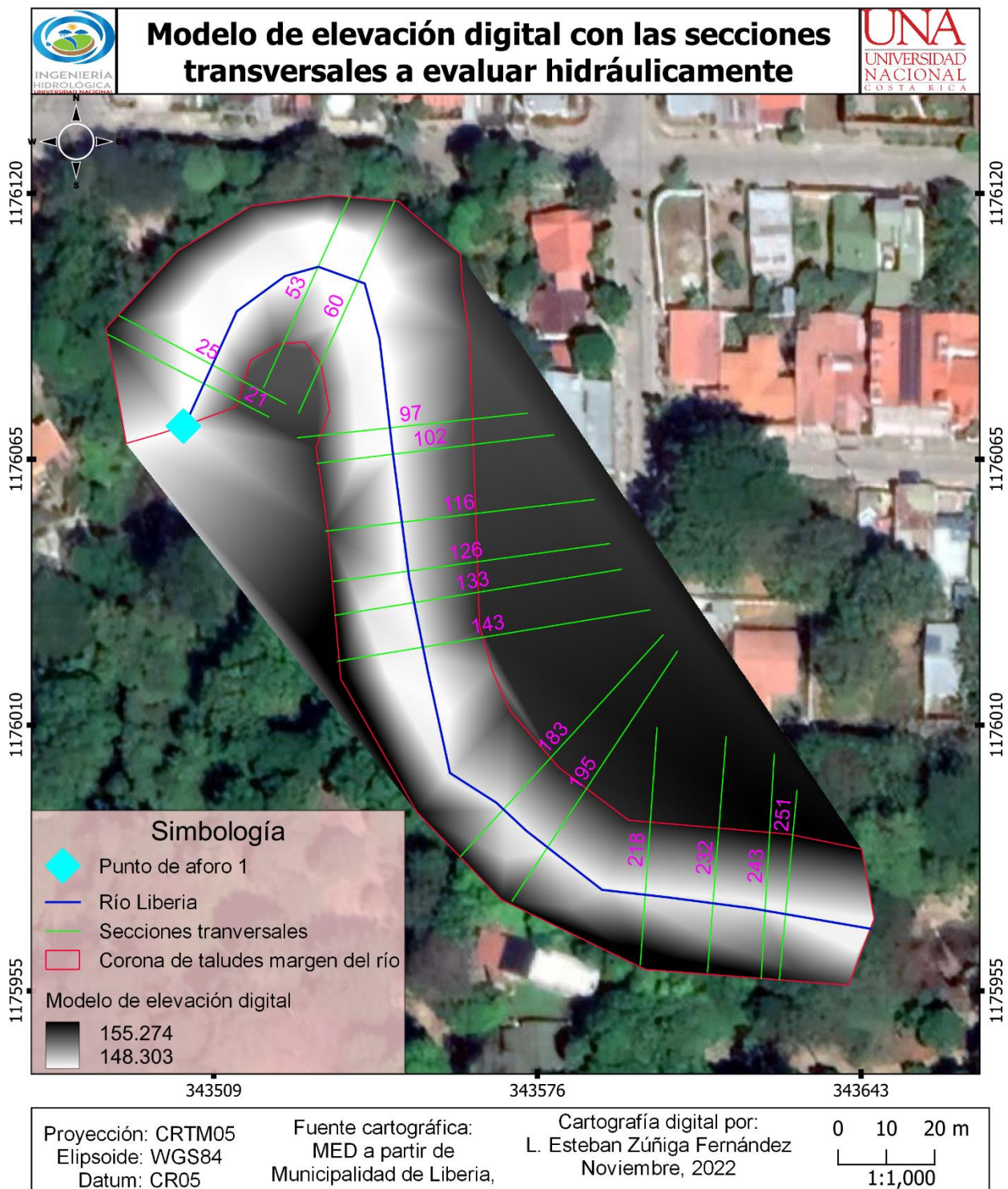
Figura 6.11. Levantamiento de puntos en las secciones transversales de los sitios en estudio.



Fuente: elaboración propia, 2022 a partir de Municipalidad de Liberia, 2022.

A partir de la información georreferenciada obtenida del levantamiento se generó el modelo digital de terreno para cada sitio en estudio. Cabe destacar que no se tiene claridad del perfil del cauce en los sitios aforo 2 y 3 y no se pudo complementar la información con otra visita de campo de manera que se decidió analizar únicamente en términos de modelación hidráulica al sitio aforo 1, ver figura 6.12.

Figura 6.12. Modelo de elevación digital con las secciones transversales por evaluar.



Fuente: elaboración propia, 2022 a partir de Municipalidad de Liberia, 2022.

El modelo fue ampliado principalmente hacia la margen derecha basado en la extensión del levantamiento de puntos, esto con la finalidad de poder observar de mejor forma las manchas de inundación que se generan. Como se mencionó anteriormente, la margen derecha es la que registra afectaciones principalmente, por tanto, en la margen izquierda se identificó que hay una buena altura entre el cauce y la corona del talud natural que existe, en ciertos sectores específicos se pudo observar alturas que van desde los 4.5 metros, esto por topografía del terreno natural sin dique, ver anexo 11.

En la sección transversal a aproximadamente 60 metros aguas arriba de donde está el límite de frontera del MED, se ubica un desfogue pluvial (sin cabezales). La altura de salida de la alcantarilla está a penas encima del nivel de flujo que mantiene el río en condiciones normales por lo que es muy común que durante las crecidas la salida del desfogue quede por debajo del nivel de agua del río, ver anexo 12.

6.2.2 Correspondencia entre la magnitud de caudales máximos

Se ha hecho mucho énfasis en la importancia de contar con hidrogramas representativos de la cuenca en estudio, por ende, este proceso de analizar la correspondencia entre la magnitud de los caudales máximos estimados supone un aspecto muy importante. Con base en los datos topográficos, coeficientes de rugosidad de la zona de interés y los caudales máximos de la tabla 26, se corrieron las modelaciones correspondientes, dando como resultado una serie de parámetros hidráulicos que pueden ser revisados en campo para complementar dicha información y tener mejor criterio en caso de asumir un modelo de lluvia de referencia.

Cabe destacar que los resultados de este proceso no se completaron según lo previsto por un factor de complejidad donde el tiempo no permitió realizar la labor como se tenía planeado y se modeló únicamente el aforo 1 a nivel hidráulico. En vista de ello, se presentan los resultados considerando un análisis de sensibilidad en función del cambio en el modelo de lluvia y los rangos que pueden tomar las variables hidráulicas ante estos tres escenarios y no específicamente para uno solo. Los datos de caudal para el punto de aforo 1 se obtuvieron de los 3 modelados de lluvia mencionados y a 2 períodos de retorno específicos; 5 años para reflejar el comportamiento habitual del cauce y 100 años mapear zonas de inundación y para proponer medidas de mitigación según la Legislación de Obras de Protección de cauces en Costa Rica (Gómez & Monge, 2019), ver tabla 6.9.

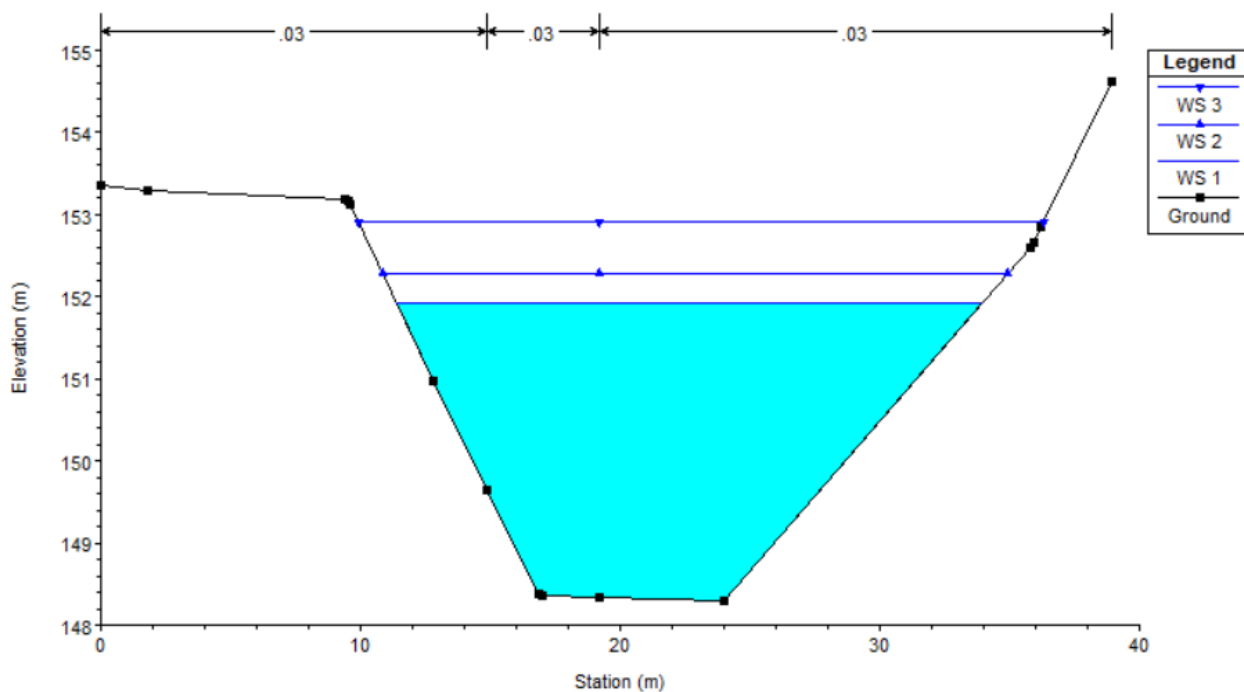
Tabla 6.9. Caudales estimados para el aforo 1 según modelo de lluvia y período de retorno.

Modelado de lluvia	1. Hietograma por método de bloques alternos sin ajuste		2. Hietograma por método de bloques alternos con factor de ajuste de 1.13		3. Empleando distribución porcentual estación Pavas	
	Q (m ³ /s)	V (m ³)	Q (m ³ /s)	V (m ³)	Q (m ³ /s)	V (m ³)
5 años	140.879	1184.1	170.808	1434.7	232.862	2799.2
100 años	275.298	2328.1	326.165	2758.1	489.259	5539.0

Fuente: elaboración propia, 2022.

La información anterior se utilizó como dato de entrada para la modelación hidráulica, los resultados de esta para el período de retorno de 5 años se muestran a continuación. Para una mejor comprensión las secciones transversales se mencionarán según la distancia de separación que existe desde el punto de aforo 1, marcado en la figura 6.12, hacia aguas arriba del mismo y aquellas secciones que estén muy cerca una de otra se considerará la más propensa a desbordarse. A efectos de tener un mejor orden, ver secciones de las figuras 6.13 – 6.17 para las restantes, ver anexo 13.

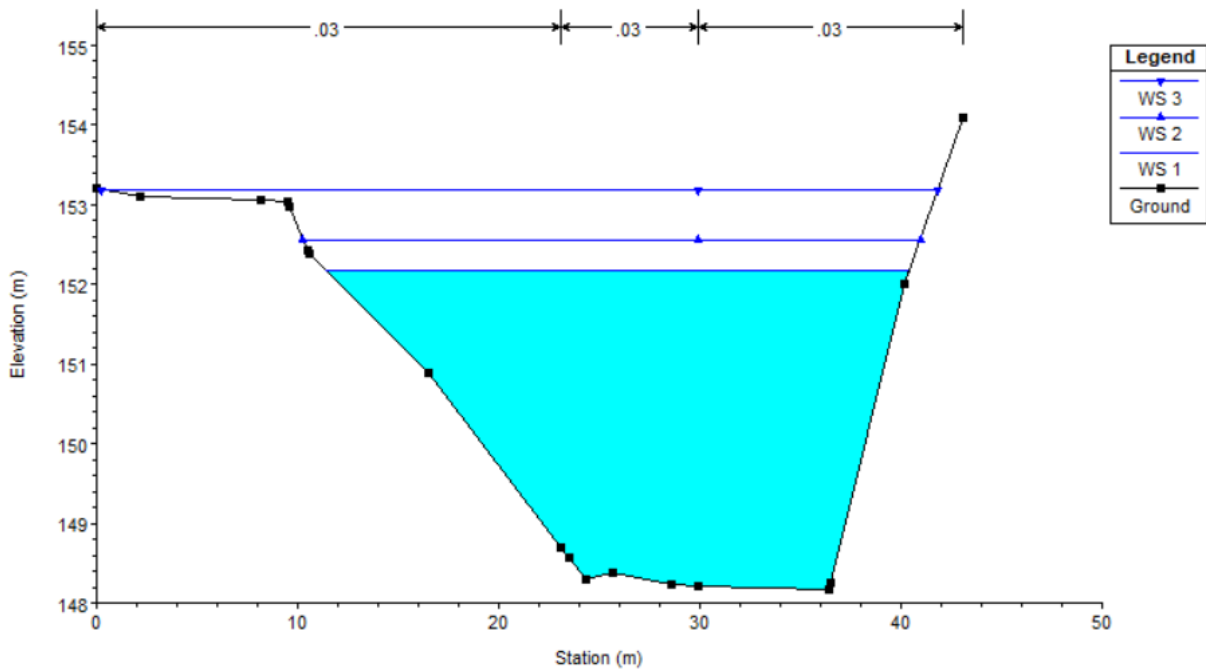
Figura 6.13. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 25 TR 5 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

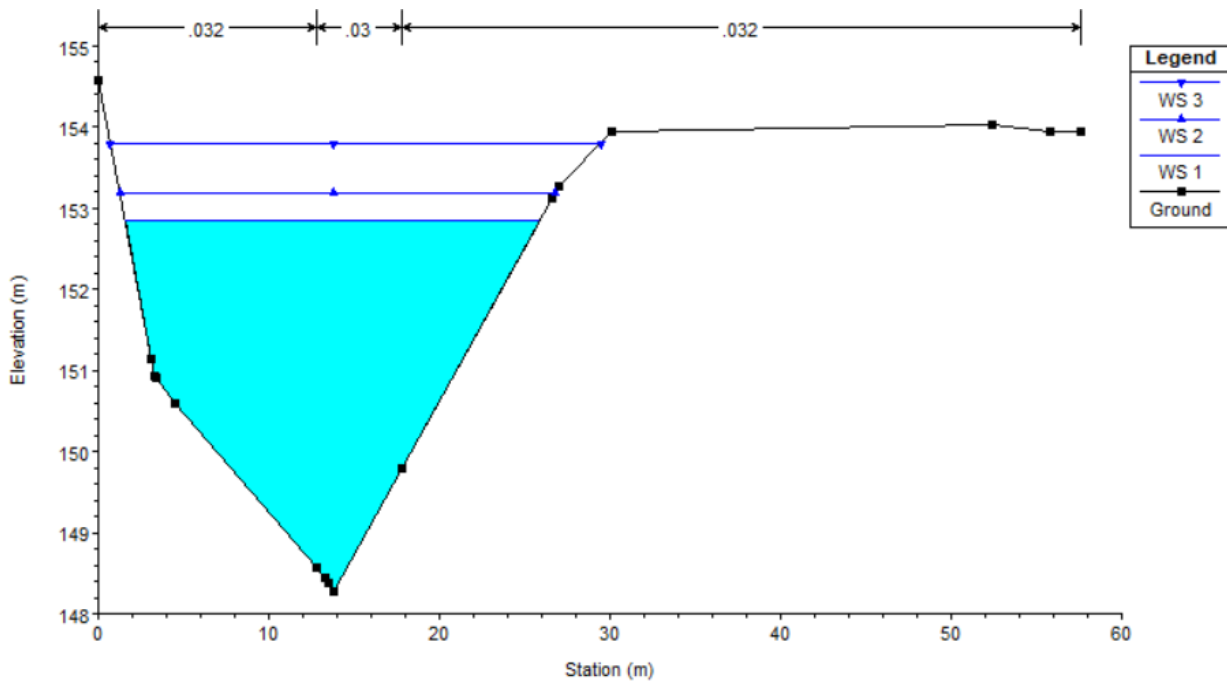
Figura 6.14. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 53 TR 5 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

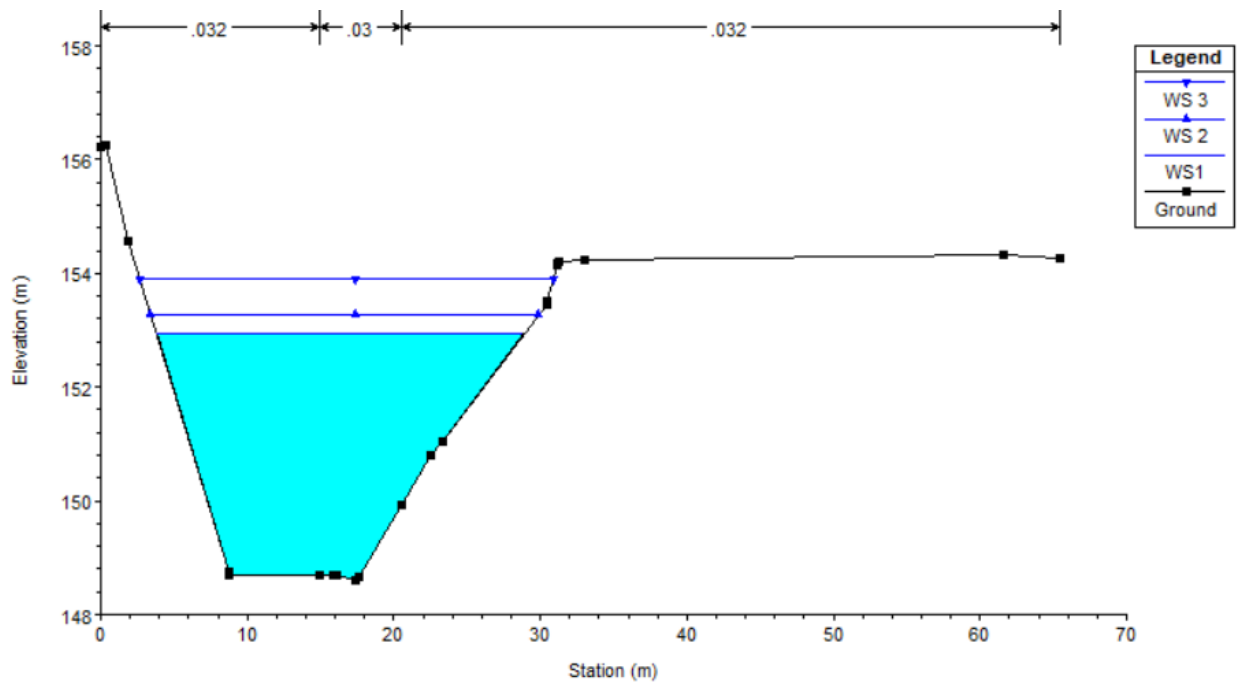
Figura 6.15. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 126 TR 5 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

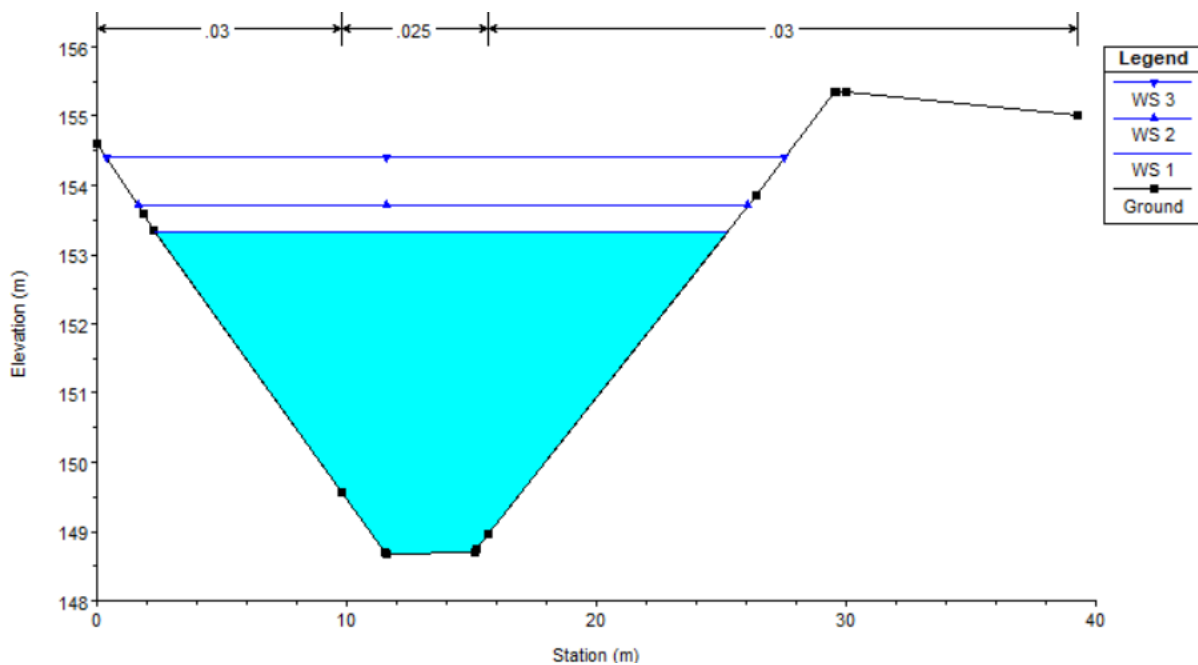
Figura 6.16. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 143 TR 5 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

Figura 6.17. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 251 TR 5 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

Es importante mencionar que estos resultados de la modelación hidráulica poseen un grado de incertidumbre acumulada desde el proceso estadístico en la hidrología, precisión del levantamiento topográfico, software y que la simulación en este sitio de aforo no incluye obras hidráulicas como puentes ubicados aguas arriba de manera que se asume que el flujo ingresa sin ningún tipo de restricción cuando en la vida real no sucede de esta manera.

No obstante, de este estudio el cauce tiene la capacidad de mantener el flujo de agua producto de una tormenta con período de retorno de 5 años indistintamente del modelo de lluvia que se emplee, dando como resultado profundidades del flujo o tirantes con valores que van desde los 3.63 metros hasta 5.73 metros, ver tabla 6.10.

Tabla 6.10. Niveles de agua estimados en cada sección transversal TR 5 años.

Sección transversal	Modelado de lluvia	Q (m ³ /s)	Nivel de agua (m)
km 0+25	1	140.879	3.63
	2	170.808	3.98
	3	232.862	4.62
km 0+53	1	140.879	4.02
	2	170.808	4.39
	3	232.862	5.03
km 0+126	1	140.879	4.57
	2	170.808	4.91
	3	232.862	5.53
km 0+143	1	140.879	4.34
	2	170.808	4.69
	3	232.862	5.32
km 0+251	1	140.879	4.67
	2	170.808	5.05
	3	232.862	5.73

Fuente: elaboración propia, 2022.

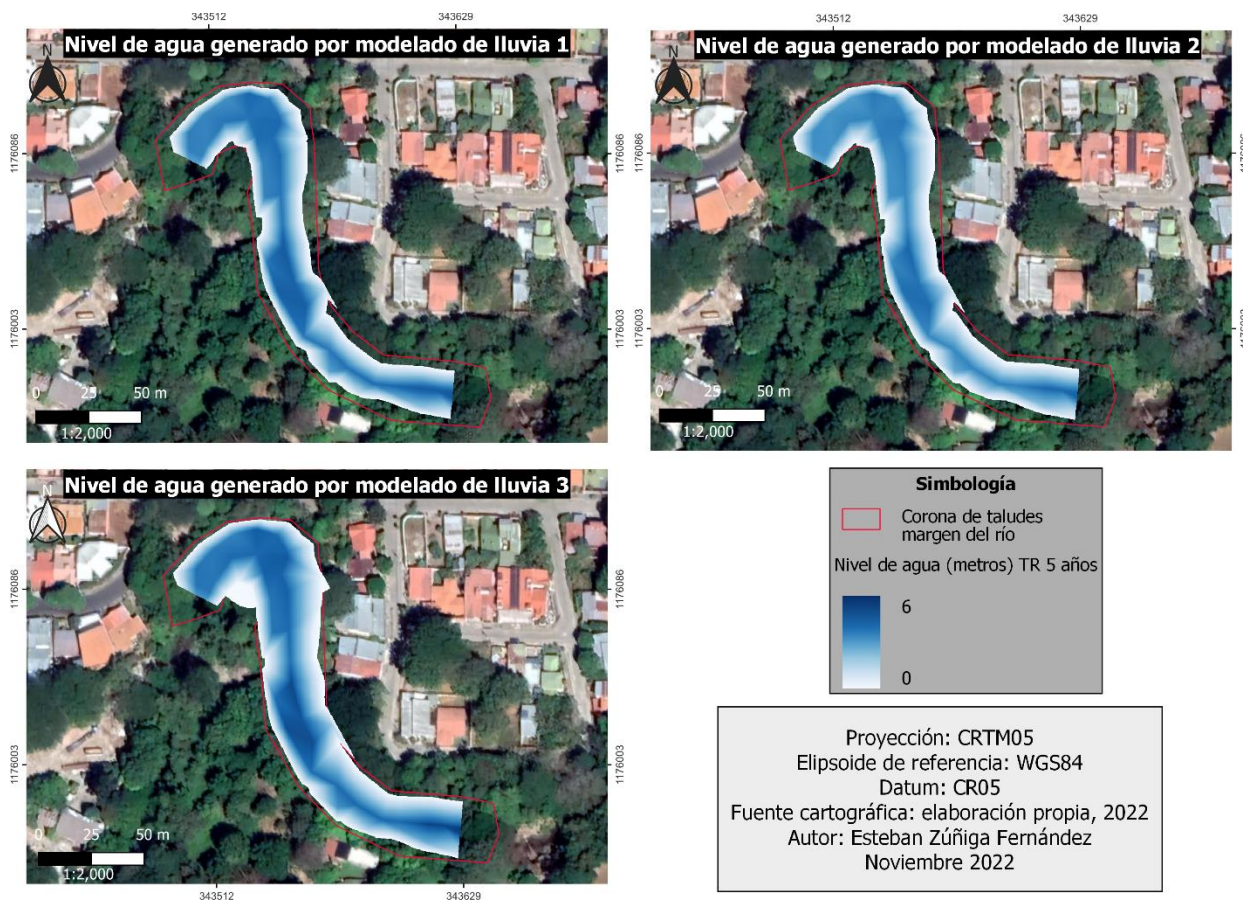
Los vecinos de la urbanización barrio chorotega manifiestan que es habitual que año con año producto de la lluvias el nivel de agua en las calles supere los 25 cm. Sin embargo, los caudales que genera el río Liberia en ese tramo para un período de retorno de 5 años se considera que no es la causa de ese escenario en específico y se cree que se debe

principalmente al efecto de taponamiento que se produce en el desfogue pluvial mencionado anteriormente ya que los resultados de los tirantes en el río superan por mucho la altura a la que se ubica la alcantarilla de desfogue pluvial que existe cerca del km 0+60.

La altura de la lámina de agua que se genera para tormentas con períodos de retorno de 5 años y tomando en cuenta los 3 modelados de lluvia, no es capaz de sobrepasar el dique existente en la margen derecha, sin embargo, se pudo observar que la margen izquierda (sin dique) se puede ver comprometida a un período de retorno un poco mayor dado que el borde libre que se genera no es significativo en comparación a la altura de agua, ver figura 6.14 y 6.17.

La altura que alcanzan los niveles de agua producto de los 3 modelados de lluvia no supera las márgenes del río delimitadas según lo observado en campo a la altura de la urbanización barrio Chorotega, ver figura 6.18.

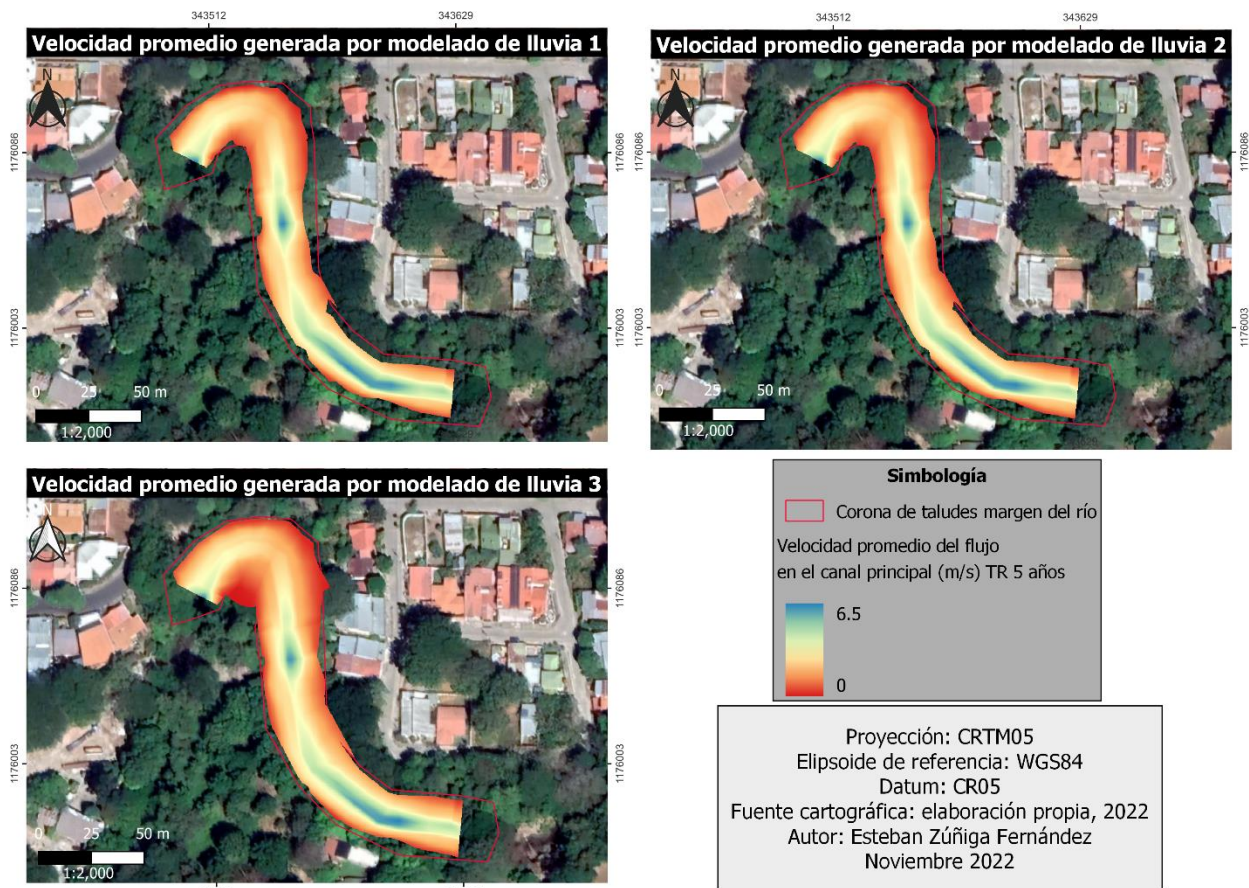
Figura 6.18. Niveles de agua producto de tres modelados de lluvia distintos TR 5 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

En términos de velocidad de flujo, las velocidades promedio con las que fluye el agua en el tramo del cauce en estudio, hay sectores en los que se alcanzan los 6.5 m/s. Note que las velocidades del centro del cauce pueden alcanzar los 6.5 m/s mientras que conforme se desplaza hacia los márgenes esta disminuye con valores que rondan de 5-2 m/s siempre sobre el cauce, ver figura 6.19.

Figura 6.19. Velocidad promedio del agua producto de tres modelados de lluvia distintos TR 5 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Es importante mencionar que las tasas de erosión y socavación que genere el flujo de un líquido dependen de las características de los materiales presentes en los taludes que tienen los márgenes del río. INSUMA S.A (2009) asegura que, desde el punto de vista de suelos, el ambiente geológico en el que se desarrolló esta urbanización es totalmente volcánico, y específicamente en este sitio existe tobas pumíticas de color blancuzco. Los materiales sobre los que el río Liberia ha excavado su cauce se pueden catalogar como rocas blandas con un

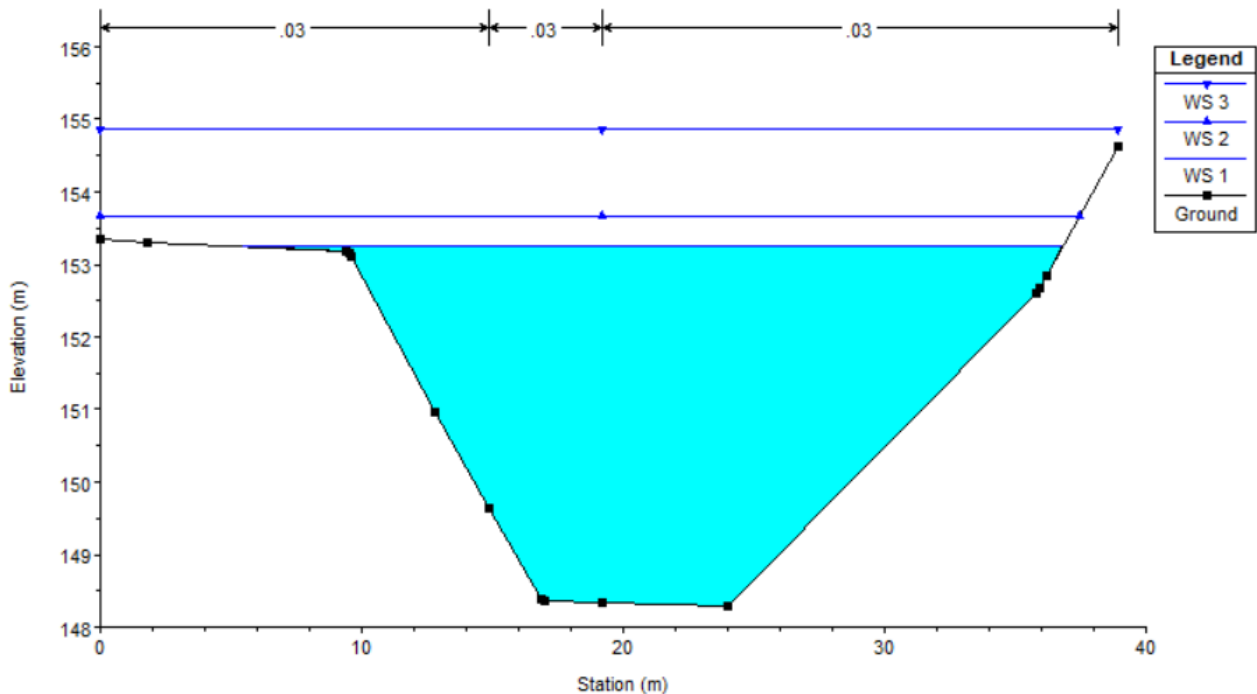
comportamiento mecánico relativamente bueno. A razón de ello, se puede inferir en que las velocidades del agua a los cuales se erosionan estos materiales van desde los 3.5 – 4.5 m/s (Sanabria, 2010), lo que denota que las velocidades presentes no pueden ser despreciables.

Finalmente se expuso la respuesta hidráulica del cauce para los tres modelados de lluvia distintos a un período de retorno de 5 años. A continuación, se presentan las zonas inundación y sus respectivas variables hidráulicas generadas basados en el análisis de un período de retorno de 100 años.

6.2.3 Zonas de inundación

Una vez que se realizó el análisis de los regímenes de flujo, se obtuvo la mancha de inundación sobre el punto de aforo 1, producto de los hidrogramas de creciente generado en los tres modelados de lluvia para el periodo de retorno de 100 años. Los parámetros de mayor relevancia están compuestos por un perfil longitudinal de la inundación mostrada, niveles de profundidad y velocidades debido a la inundación.

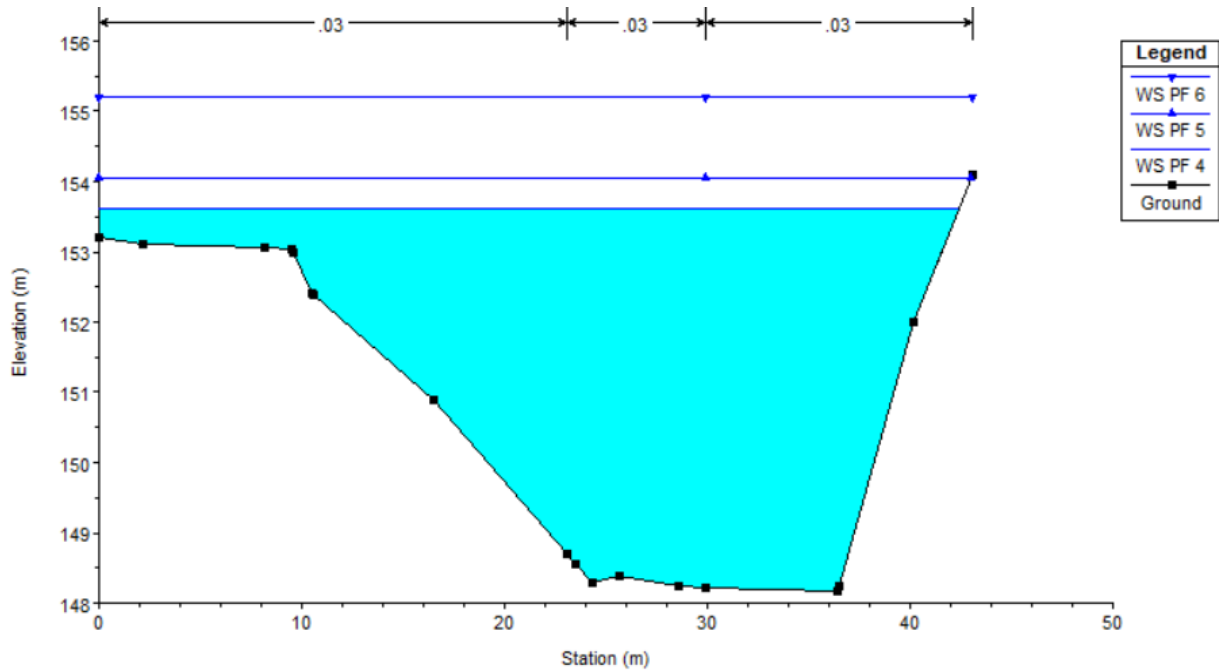
Figura 6.20. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 25 TR 100 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

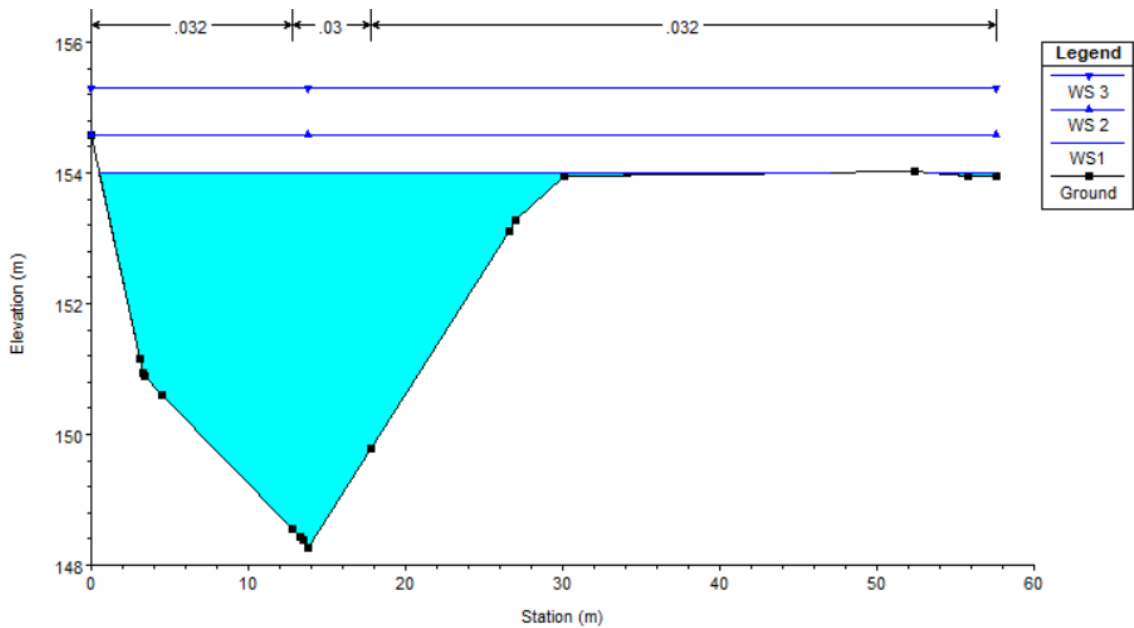
Figura 6.21. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 53 100 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

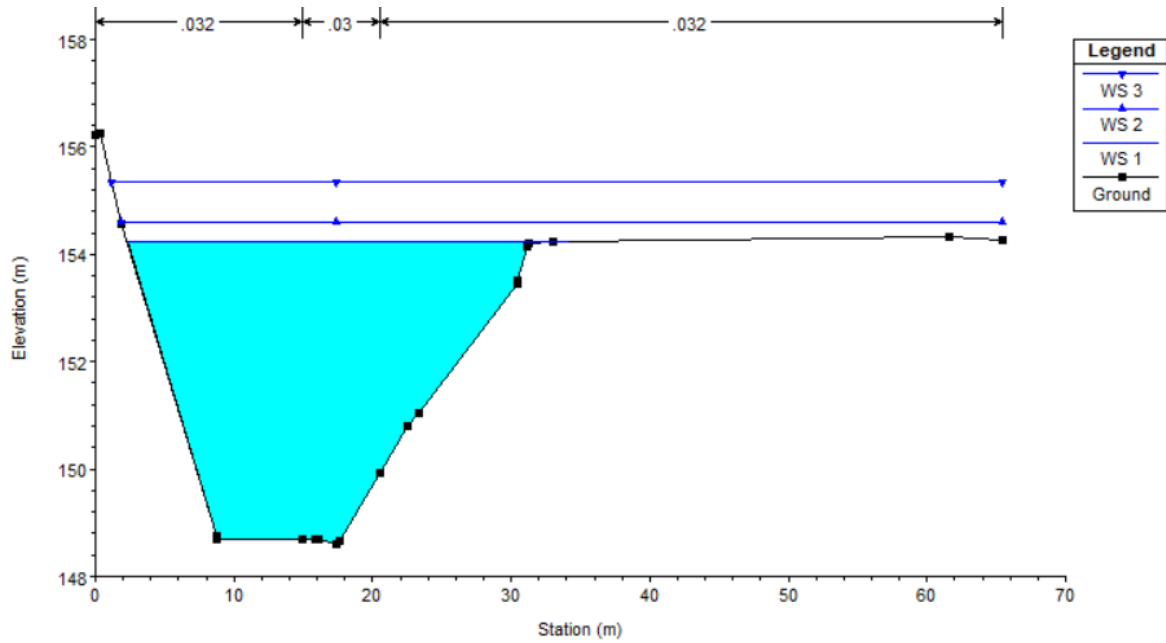
Figura 6.22. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 126 100 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

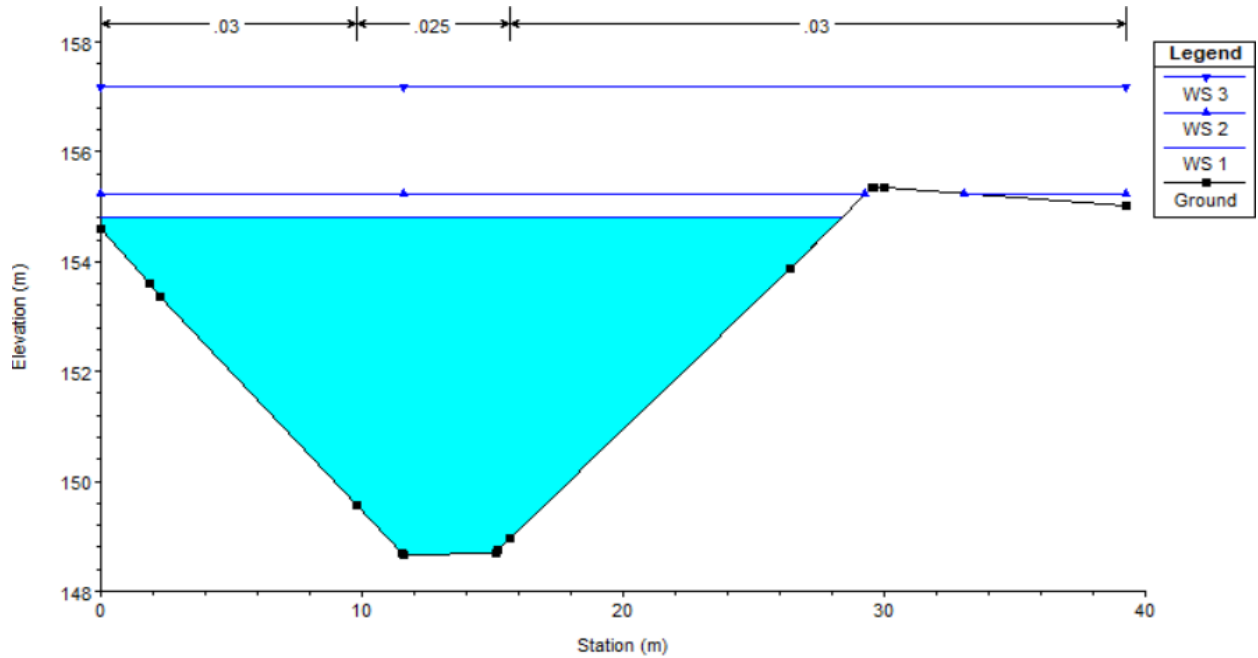
Figura 6.23. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 143 100 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

Figura 6.24. Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 251 100 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

De este estudio, según las secciones transversales presentadas anteriormente se observó que el cauce no tiene la capacidad de mantener el flujo de agua producto de una tormenta con período de retorno de 100 años indistintamente del modelo de lluvia que se emplee como era de esperarse, dando como resultado profundidades del flujo o tirantes con valores que van desde los 4.95 metros hasta 8.5 metros en transeptos específicos (ver tabla 6.11).

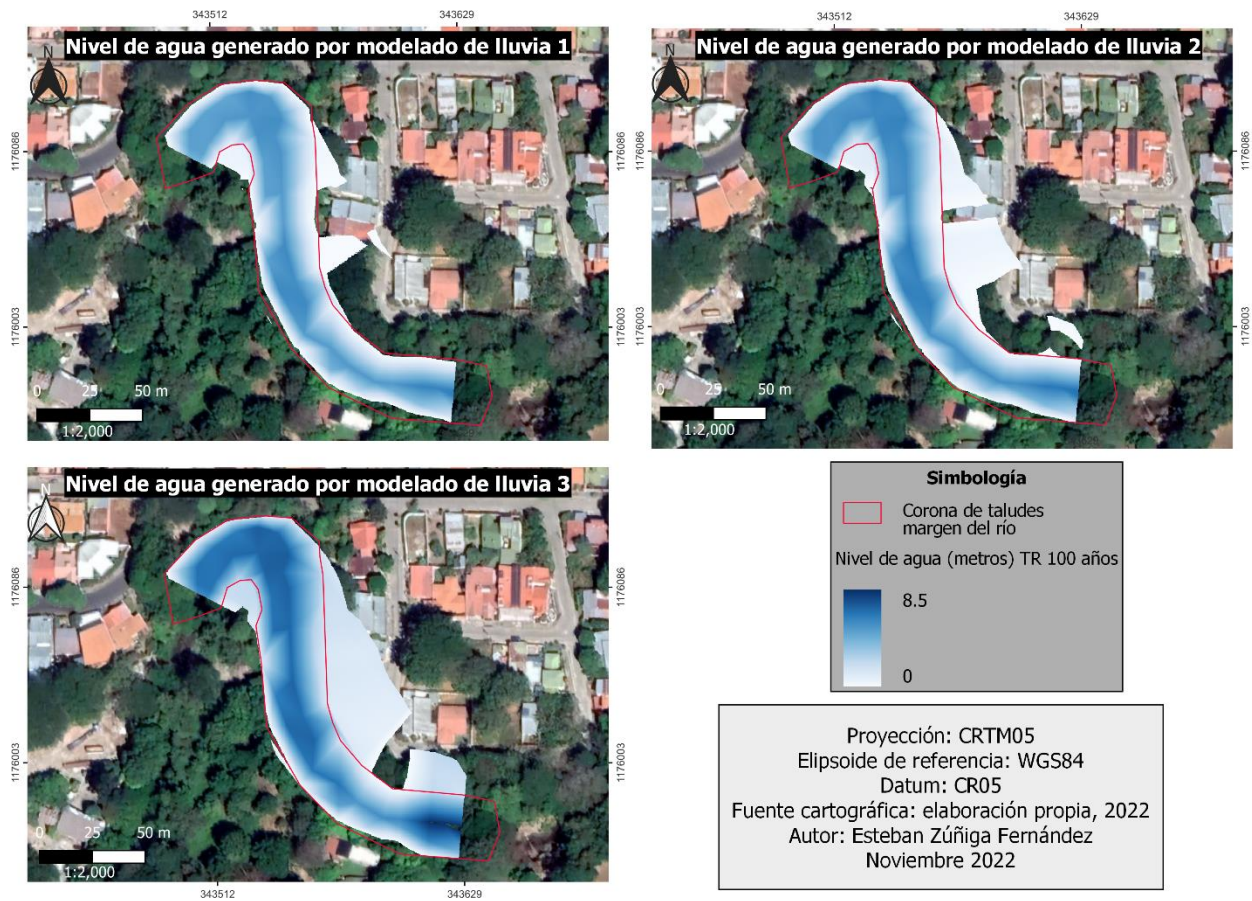
Tabla 6.11. Niveles de agua estimados en cada sección transversal TR 100 años.

Sección transversal	Modelado de lluvia	Q (m ³ /s)	Nivel de agua (m)
km 0+25	1	275.298	4.95
	2	326.165	5.38
	3	489.259	6.58
km 0+53	1	275.298	5.45
	2	326.165	5.90
	3	489.259	7.05
km 0+126	1	275.298	5.73
	2	326.165	6.30
	3	489.259	7.02
km 0+143	1	275.298	5.65
	2	326.165	6.02
	3	489.259	6.75
km 0+251	1	275.298	6.14
	2	326.165	6.57
	3	489.259	8.53

Fuente: elaboración propia, 2022.

La altura que alcanzan los niveles de agua producto de los 3 modelados de lluvia supera las márgenes del río delimitadas según lo observado en campo a la altura de la urbanización barrio Chorotega, de manera que las zonas inundadas producto de estos caudales se pueden apreciar en la figura 6.25.

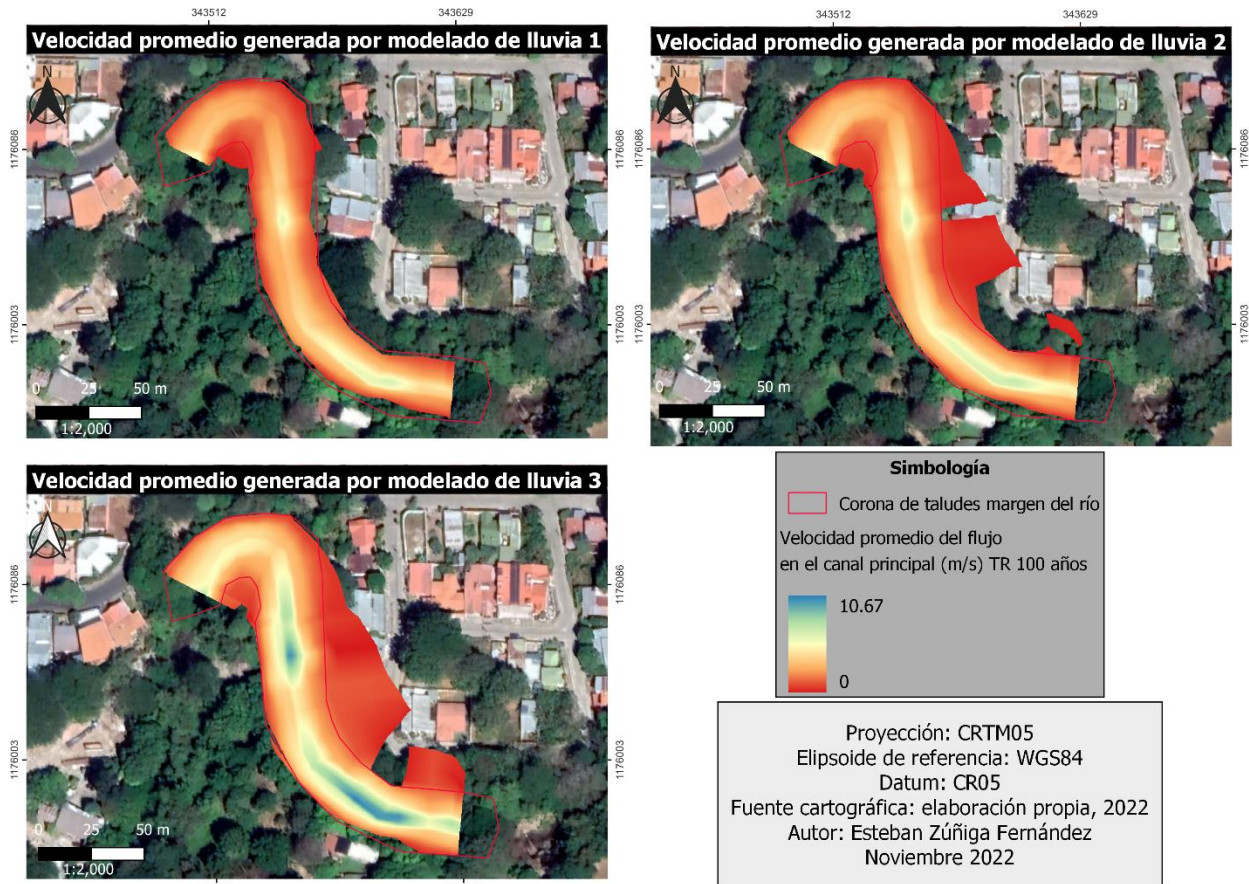
Figura 6.25. Niveles de agua producto de tres modelados de lluvia distintos TR 100 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

En términos de velocidad de flujo, las velocidades promedio con las que fluye el agua en el tramo del cauce en estudio, hay sectores como en el centro del cauce que pueden alcanzar los 10.7 m/s mientras que conforme se desplaza hacia los márgenes se identifican valores que rondan de 8.31-6.61 m/s en los tramos más críticos como los del km 0+116 y km 0+195 (ver figura 6.26).

Figura 6.26. Velocidad promedio del agua producto de tres modelados de lluvia distintos TR 100 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Finalmente se expuso la respuesta hidráulica del cauce para los tres modelados de lluvia distintos, a un período de retorno de 100 años. A continuación, se presentan algunas propuestas que integran tanto medidas estructurales como no estructurales basado en el análisis de los resultados hidráulicos de los niveles que puede alcanzar el agua, las velocidades promedio que se generan y de acuerdo con las experiencias que han tenido los vecinos acerca de posibles causas que ocasionaron afectaciones como la del pasado 09 de setiembre del 2021 en el que el nivel del agua superó la altura del dique existente en la margen derecha del río a la altura de la urbanización.

6.2.4 Propuestas de mitigación ante inundaciones

Para mitigar el impacto de futuras inundaciones sobre las márgenes estudiadas del río Liberia, se proponen medidas estructurales como no estructurales.

- **Medidas estructurales**

- a) *Rectificación del dique existente*

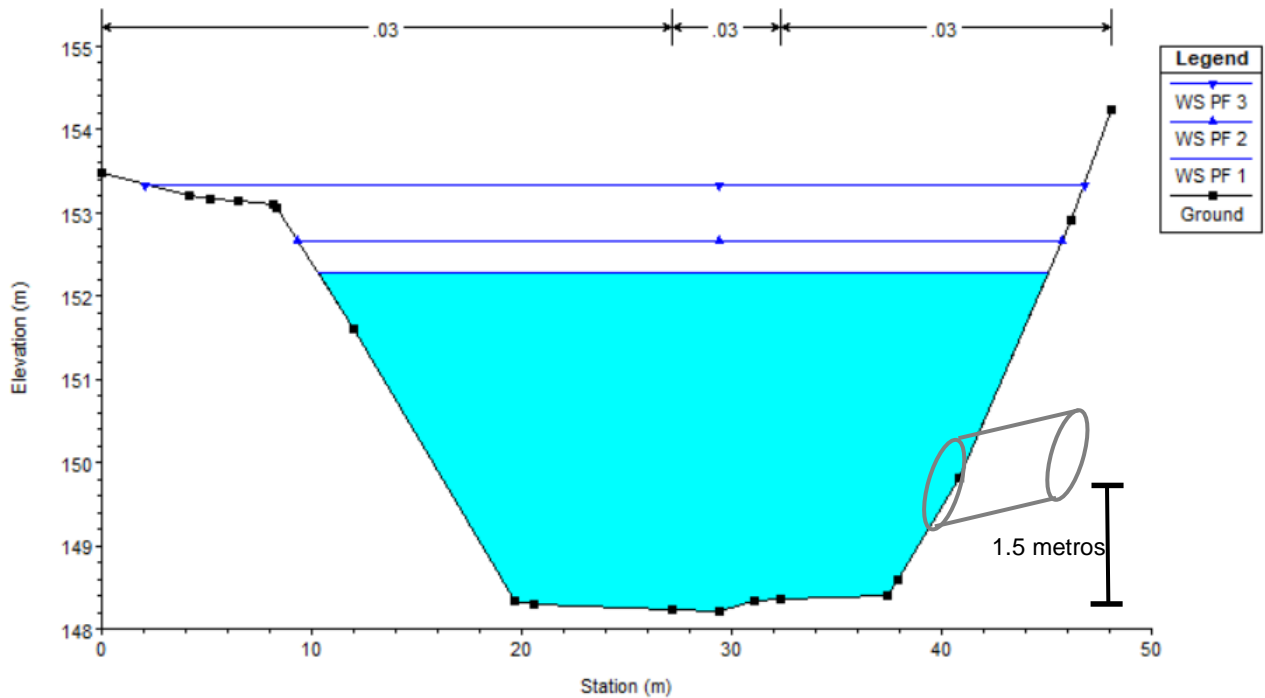
Anteriormente se mencionó acerca de que en la margen derecha del río Liberia existe un dique, los resultados de la modelación hidráulica permitieron identificar las elevaciones que puede alcanzar el agua producto de 3 distintos modelados de lluvia siendo el tercero el que genera más caudal. No obstante, se presentan los tres escenarios de manera tal que permita establecer una sensibilidad y margen de trabajo, ver anexo 15. En ese sentido se recomienda rectificar el dique a tal punto de aumentar como mínimo 0.41 m a ambas márgenes según el modelado de lluvia 1, 0.86m a ambas márgenes según modelado de lluvia 2, y 2.6m a ambas márgenes según modelado de lluvia 3. En resumen, se requiere aumentar el muro en un rango que va de 0.41m hasta 2.6m para hacerle frente a las crecidas que producen los 3 modelados de lluvia distintos. Si bien es cierto, podemos deducir que el modelado de lluvia a cómo puede aumentar el costo de las obras puede reducirlo de manera que los tirantes que se generan en función de estos aumentan o disminuye según sea. Sin embargo, debido a que no se cuenta con hidrogramas de crecida del río medidos con estaciones fluviográficas ni con hietogramas característicos de la zona en específico es importante mantener un umbral de diseño y recopilar mayor información que pueda sustentar el criterio de selección de uno de los 3 métodos de forma definitiva y basar las medidas de protección sobre los resultados hidráulicos que genere, mismos que pueden ser consultados en los resultados presentados en este informe así como en los anexos, por el momento, se mantiene el hecho de trabajar con umbrales de sensibilidad como se mencionó anteriormente.

De intervenir el dique basado en los resultados hidráulicos del modelado de lluvia 1 y 2, se puede pensar que basta con reconstruir el dique considerando el mismo material que se ha desprendido, para lo que se sugiere el uso de una retroexcavadora. En caso de basarse en el modelado de lluvia 3, se debe aumentar la altura hasta aproximadamente 2.6m por lo que se deberá realizar una recava del cauce y utilizar el mismo material para compactar los taludes ya que las propiedades mecánicas de las tobas son relativamente buenas.

b) Rectificación de altura del desfogue pluvial

El desnivel que existe actualmente entre el cauce y la altura del desfogue pluvial ronda 1.5 m por lo que caudales máximos con períodos de retorno incluso inferiores a 5 años ya representan una condición desfavorable que produce taponamiento y por ende las aguas pluviales producidas en la parte urbana no pueden ser desalojadas (ver figura 6.27).

Figura 6.27. Esquema de altura de desfogue pluvial sobre el perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 60 TR 5 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

Fuente: elaboración propia, 2022.

Se recomienda aumentar el nivel de la altura del desfogue pluvial al menos 2.36 metros para evitar inconvenientes en tormentas con períodos de retorno de 5 años. Este escenario beneficia solo ante tormentas que posean un comportamiento temporal al modelado de lluvia 1 y para que pueda ser útil en los 3 escenarios debe aumentarse al menos a 3.36 metros de la condición actual. Sin embargo, no se omite indicar que es necesario un estudio topográfico para caracterizar el sistema pluvial existente y determinar si se le pueden realizar cambios asegurándose de no afectar la funcionalidad para lo cual fue diseñado el sistema en primera instancia. Como medida a corto plazo mientras se inician los estudios correspondientes se puede

implementar un sistema de válvula antiretorno en la salida del pluvial. Adicionalmente, se identificó que el desfogue no cuenta con cabezales de descarga o al menos no a simple vista, por lo que se debe construir a fin de proteger la salida del desfogue y evitar que algún derrumbe o acumulación de tierra sobre este comprometa la salida del desfogue.

- **Medidas no estructurales**

- a) Limpieza de ríos y gestión de residuos sólidos en el casco urbano*

Los desechos sólidos en el cauce de los ríos suponen una disminución en la sección hidráulica del mismo, por lo que objetos como basura y árboles caídos afectan considerablemente el comportamiento del cauce del río aumentando el riesgo a sufrir inundaciones. Los vecinos de la urbanización Chorotega durante las visitas en campo manifestaron que una de las causales por las que se vieron afectados el pasado 09 de setiembre del 2021 fue que el puente de barrio Felipe Pérez estaba obstruido de basura y otros residuos sólidos aunado a los fuertes aguaceros. A pesar de que este año 2022 las lluvias fueron predominantes en la zona, no se volvió a vivir una situación similar en el que el río a la altura de la urbanización superó la altura del dique, situación que alegan fue porque la Municipalidad este año 2022 antes del inicio de las lluvias realizó una campaña de limpieza a lo largo del cauce del río Liberia (ver figura 6.28).

Figura 6.28. Evidencia de los trabajos de corta y extracción de troncos secos y árboles caídos en el cauce del río Liberia por parte de la Unidad de Gestión Ambiental.



Fuente: Municipalidad de Liberia, 2022.

La institución mencionó que estas labores las realizaron con el fin de minimizar el riesgo de inundaciones por taponamiento del río Liberia por troncos secos y árboles caídos, además se replicarían estas labores hacia otras zonas ya detectadas cuya intervención es prioritaria. Se recomienda promover un programa de limpieza como mínimo una vez cada año, antes de la transición de la época seca a lluviosa no solo en el cauce del río sino también en los sistemas pluviales del casco urbano y zonas circundantes, con la participación de la comunidad, teniendo como meta generar conciencia de los beneficios que trae consigo el hecho de ser un poco más responsables con los residuos que genera cada individuo.

b) Reforestación de la cuenca

En las partes altas de la subcuenca del río Liberia hay un área considerada de terreno natural/descubierto que posee poca vegetación densa de manera que una buena práctica para reducir los aportes de escorrentía de ese tramo es reforestar con especies de árboles nativos de la zona y ojalá con una profundidad radicular favorable para que se aumenten las tasas de infiltración. En caso de que los desarrolladores impulsen obras en la parte alta se debe tener mucho cuidado con el tema de la escorrentía que genere cada proyecto por la impermeabilización, de lo contrario las afectaciones aguas abajo incrementarían considerablemente.

c) Sistemas de monitoreo de lluvia y caudal

Los problemas de inundación deben estudiarse de manera integral mediante la participación de diversos actores como la Municipalidad, Comisión Nacional de Emergencia, participación comunitaria y otros. Debido a la complejidad de los fenómenos que intervienen en el proceso de lluvia y generación de escorrentía y la forma en que esta se comporta cuando viaja a lo largo de un cauce o terreno, se deben realizar mediciones más precisas por lo que los métodos de estimación presentan mayor grado de incertidumbre en comparación del uso de elementos técnicos o sistémicos que identifican la posibilidad de amenazas ante una emergencia. Se recomienda incorporar estaciones medidoras de lluvia y caudal (como mínimo poner a operar la estación fluviográfica ya existente propiedad del ICE) en puntos estratégicos y enlazar la comunicación de las estaciones a una estación base que permita monitorear los niveles de agua alcanzados producto de una lluvia y así determinar tiempos de respuesta que tienen los habitantes de una zona para tomar medidas que garanticen mantenerlos a salvo y salvaguardar aquellos elementos o electrodomésticos que consideren.

6.3 Principales hallazgos del proyecto

En esta sección se describirá los principales hallazgos del proyecto teniendo como marco de referencia los objetivos, prefactibilidades, metodología y ética profesional, en adelante se mencionarán para cada hallazgo las que se considere que tienen alguna influencia sobre el desarrollo de esta, de lo contrario es porque se cree que no generan discrepancia ante tal aspecto.

6.3.1 Represamiento del cauce por sólidos de gran tamaño

Durante las visitas en campo se identificó al menos un tramo con material sólido de gran tamaño constituido por árboles que en determinado momento cayeron al cauce del río Liberia y no fueron removidos, esto a la altura del punto de aforo 3, escasos 150 metros aguas arriba del puente sobre la ruta 1 como se observa en la figura 6.27.

Figura 6.29. Evidencia de represamiento sobre una sección del cauce principal del río Liberia.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Esta situación acrecienta la problemática de las inundaciones porque se disminuye la capacidad hidráulica del cauce del río en ese tramo, es decir, se impide que el agua fluya con normalidad ocasionando un represamiento y por ende el aumento del nivel del agua, de ahí que haya mayor riesgo a que el río se desborde durante la época lluviosa por lo que no se está aplicando la política inherente destinada a reducir las causas de desastres y atención de emergencias como lo dicta el Plan Nacional de Gestión del Riesgo 2021-2025.

Bajo este escenario la prefactibilidad técnica enfrenta restricciones por los inconvenientes que se dan en el levantamiento topográfico y sus derivados para esa zona. Así mismo, se asocia al objetivo 3 por el hecho de las limitantes que ocasiona al momento de la modelación hidráulica específicamente para esa sección, pues representar las condiciones de flujo resulta laborioso de manera que las variables hidráulicas resultantes se modifican sustancialmente ante la presencia de estas obstrucciones en el cauce.

6.3.2 Ubicación de desfogues pluviales a una altura de descarga inapropiada

Con base en el trabajo de campo se logró identificar un desfogue pluvial en las márgenes del cauce del río Liberia en la urbanización barrio Chorotega. El mismo cuenta con cabezal de salida y a una altura de descarga desfavorable ya que al momento de las crecidas se presenta un efecto de taponamiento y la escorrentía producto de la zona urbana no puede ser desfogada.

Si bien es cierto el proyecto caracteriza la cuenca hidrológica y los riesgos asociados a eventos de lluvia que se traducen en inundaciones sobre la parte urbana según la capacidad hidráulica del cauce. El río puede no desbordarse, pero si alcanzar un tirante de agua que sobrepase la altura del desfogue de manera que impide la salida de agua por ese conducto lo que provoca que las calles y aceras colapsen a tal punto que se genere inundación en las casas. La población afectada le adjudica este tipo de inundación al río, sin embargo, la afectación en su totalidad surge de la mala ubicación del desfogue pues al momento de su diseño y construcción se debió considerar el tirante de agua que se origina producto de crecidas sin dejar de lado la limitante topográfica en zonas tan planas.

No obstante, se pone de manifiesto que de producirse un taponamiento del desfogue pluvial y que exista la posibilidad que el agua del río llegue hasta las viviendas por medio de la tubería de desfogue pluvial es un tema ajeno a la respuesta hidrológica de la subcuenca del río

Liberia. En este tipo de obras se le debe considerar la hidrología e hidráulica básica del cauce y con ello adaptar las obras para no tener inconvenientes como el mencionado anteriormente. Que la población confunda y le atribuya esta afectación al río como tal es incorrecta y podría magnificar la problemática original con relación a los objetivos del proyecto y a las prefactibilidades de este por lo que se consideró importante exponer este hallazgo.

6.3.3 Comportamiento de la cuenca ante avenidas y relación suelo-lluvia

Los resultados de los parámetros morfométricos dejan al descubierto que la forma rectangular de la cuenca brinda beneficios ante crecidas y precipitaciones intensas. No obstante, son mayores las variables que potencian la vulnerabilidad a que la cuenca sea afectada por crecidas como una densidad de drenaje regular, tiempos de concentración, bajas pendientes y una cuenca con potencial erosivo.

Cabe destacar que hasta los sitios de aforo del presente estudio no hay confluencia de quebradas importantes que atraviesan el casco urbano como Panteón y Piches. Por otra parte, se identifica el grupo hidrológico de suelos tipo C que posee tasas de infiltración bajas cuando está completamente mojado, así como cobertura mayormente de terreno descubierto, natural o sin cultivo y por último un efecto impermeable en los 2.75 km² de área urbana. La asociatividad entre el grupo de suelos y la cobertura es esencial ya que puede ser que el grupo hidrológico potencie la escorrentía, pero la cobertura presente contrarreste ese efecto como sucede en las partes altas de la subcuenca río Liberia que hay suelos tipo C, pero una cobertura boscosa importante.

Desde el punto de vista de prefactibilidades supone un hallazgo considerable, ya que esta respuesta de la cuenca debe ser analizada como posibilidad material al momento de las recomendaciones que desean generarse con el proyecto y que en caso de ser tomados en cuenta al momento de ejecutar alguna acción se valore el hecho de posibles pérdidas de sección hidráulica por procesos de erosión así como de que las características de la cuenca propicia por sí mismo las inundaciones por los factores descritos anteriormente.

6.3.5 Limitantes en la recolección de información hidrometeorológica

Se determinó que hay una cantidad de estaciones meteorológicas considerables dentro de la zona en estudio, a pesar de esto, solamente 2 cuentan con un registro histórico conservador. A nivel de la naturaleza de este estudio lo ideal es contar con más número de estaciones que posean uniformidad y buena serie de años de registro para caracterizar mejor el comportamiento de la lluvia dentro de la cuenca en estudio y por ende una estimación con menor incertidumbre. También se identificó que el registro de las estaciones medidoras de caudal es bastante deficiente ya que ninguna de las 3 estaciones fluviográficas cercanas alcanza tan siquiera los 20 años de registro y el mismo es incompleto, aunado a que la información más próxima a la actualidad data de 1995.

En ambos tipos de información la obtención de los datos presenta limitantes importantes, en este caso al ser un estudio que no se encuentra dentro del marco de ventas de bienes y servicios y está asociado a la Municipalidad del cantón se obtuvo de manera gratuita, luego de una serie de cumplimiento de requisitos como cartas, compromisos de confidencialidad etc. En caso de un estudio como ejercicio profesional remunerado supone un costo para obtener la información.

En términos de prefactibilidades hay al menos dos aristas que mencionar. En la parte técnica la calidad de los datos puede alterar servicio que desea generarse con el proyecto, mientras que en términos financieros puede afectarse por los tiempos de espera en que la institución compiladora dé datos entrega los resúmenes hidrometeorológicos solicitados y por ende pueden retrasos en las fechas estipuladas del proyecto traduciéndose en gastos de profesionales u otros.

6.3.6 Necesidad de estudios de distribución temporal de precipitación

La distribución temporal de precipitación o hietograma se entiende por la forma en cómo se comporta la lluvia en el tiempo cuando se presentan tormentas a lo largo de una zona de estudio. Es un componente esencial para la generación de los hidrogramas para distintos periodos de retorno debido a que permite utilizar el tiempo para una modelación del fenómeno lluvia-escorrentía de lo cual se obtienen grandes beneficios en temas de diseño de obras de ingeniería.

Para las estaciones meteorológicas 74019 y 74020 no se encontró información puntual de hietogramas característicos, por lo que en aras de realizar una estimación de hidrograma representativa de la zona en estudio se generó información de modelado de lluvia con los siguientes métodos: 1) método bloque alterno sin ajuste, 2) método bloque alterno con ajuste de 1.13, 3) uso de información de distribución temporal de zona distinta que tiene patrones de precipitación similar: estación Pavas.

No obstante, no se pudo constatar cual método se adecua mejor a las características de la zona y para ello se debe seguir la modelación hidráulica cuyo criterio de elección será basado a partir de otra visita en campo. En cuanto a las prefactibilidades si puede representar una afectación en la parte técnica, dado que al usar hietogramas sintéticos y característicos de una zona distinta para la que se realizó inicialmente, puede llegar a aumentar la incertidumbre de los resultados o que estos constituyan un poco discrepancia en torno a la realidad de la cuenca y el efecto de la lluvia sobre esta. El diseño metodológico no se ve afectado por esta situación, ya que se enfoca más bien en el uso de la información con la que se cuenta y para contrarrestar las incertidumbres por métodos alternos se busca la elección que mejor lo represente considerando las variables hidráulicas. Por otra parte, la ética profesional no se ve afectada por este hallazgo, debido a que más bien se reconoce y se trabaja con las limitantes que existen en la provincia de Guanacaste acerca de este tipo de información aplicando métodos comúnmente utilizados en el ámbito de la ingeniería con el fin de ser una guía para la solución de problemas.

6.3.7 Velocidades y cotas de lámina de agua estimadas

Los tirantes o cotas de lámina de agua que se producen en el periodo de retorno de 5 años no superan la altura del dique en ninguno de los 3 escenarios de modelado de lluvia, sin embargo, si superan por mucho la altura a la que se encuentra el pluviál de descarga hacia el río, lo que pone de manifiesto que las calles adquieren hasta 25 cm de lámina de agua producto del taponamiento que se da en la salida del pluviál en el km 0+60 y no porque el cauce no tenga capacidad de mantener los caudales generados en ese periodo de retorno y para esos 3 modelados de lluvias diferentes.

Por otra parte, las velocidades estimadas para un periodo de retorno de 5 años en el centro del cauce pueden alcanzar los 6.5 m/s mientras que hacía las márgenes los valores

alcanzan los 5-2 m/s, esto comprende los tres escenarios de modelado de lluvia, lo que implica que no son despreciables ya que los materiales del sitio en estudio pueden soportar sin erosionar ni socavar los taludes de las márgenes cuando hay velocidades del agua entre 3.5-4.5 m/s.

Analizando a un periodo de retorno de 100 años se identificó que los tirantes que se generan van desde los 0.01 hasta los 8.5 m según los escenarios de lluvia modelados. Algunas secciones tienen la capacidad de conducir el flujo incluso en los 3 modelados de lluvia como es el caso de la sección del km 0+195 y km 0+ 218 (ver anexo 6), sin embargo, algunas son capaces de mantener 2 escenarios de modelado de lluvia como km 0+21, km 0+116 y km 0+183 (ver anexo 6), los restantes a lo sumo tienen capacidad para conducir caudales producto del modelado de lluvia 1 e incluso secciones que no poseen capacidad para ninguno.

Finalmente, el cálculo del diferencial de alturas producidas por distintas láminas de agua tanto en la margen izquierda como derecha según cota de terreno implica que el muro debe aumentar su altura a 0.41m, 0.86m y 2.60m según modelado de lluvia 1, modelado de lluvia 2 y modelado de lluvia 3 respectivamente, ver anexo 7.

6.4 Sobre los objetivos planteados

Para el cumplimiento del presente trabajo, se estableció como objetivo general “Realizar una modelación hidrológica e hidráulica para identificar el riesgo de inundación y proponer medidas de mitigación ante eventuales daños por desbordamiento en un tramo del río Liberia, Guanacaste, Costa Rica.” Por lo que se instauraron cuatro objetivos específicos:

6.4.1 Objetivo específico primero

El primer objetivo establecido en este proyecto acerca de conocer las características físicas de la cuenca, área de drenaje y cauce principal para interpretar su funcionalidad hidrológica, se logró completar gracias al uso de software libre como QGIS y visitas en campo donde se pudo establecer los puntos de control según se consideró conveniente. En ese sentido, el proceso de estimación de las variables en cuestión marca el punto de partida que permite comprender a grandes rasgos, la respuesta de la cuenca frente a crecidas, así como la línea base para cálculos posteriores. Como resultado se pudo obtener los parámetros morfométricos de la

subcuenca hasta los puntos de aforo seleccionados tal como se muestra en la sección [6.1.2](#), en la tabla 6.2 así como la frecuencia de altitudes presentes de la figura 6.3.

6.4.2 Objetivo específico segundo

El segundo objetivo se cumplió a cabalidad, por tanto, con base en los parámetros morfométricos, pérdidas por infiltración y función de transformación de precipitación escurriente y modelado de lluvia se estimaron los hidrogramas de crecida para distintos períodos de retorno, siendo el período de retorno de 100 años el más representativo para delimitar zonas de inundación, así como para realizar obras de protección. Los caudales máximos esperados para períodos de retorno de 25, 50 y 100 años se observan en el apartado de modelación hidrológica de caudales máximos, específicamente en la tabla 6.5 mientras que el hidrograma para 100 años en la figura 6.9, en cuanto a los restantes se detallan en el anexo 2. No se omite indicar que los hietogramas generados por bloque alterno le competen también a este objetivo y se pueden apreciar tanto en las figuras 6.7 y 6.8 como en el anexo 1.

En el proceso de desarrollo se discutió la importancia de los caudales máximos estimados ya que serán parte de los datos de entrada para el correcto cumplimiento del objetivo tercero por lo que en aras de efectuar también de forma fiable el objetivo segundo se complementó la información con distintos métodos de modelado de lluvia traduciéndose en estimaciones alternas de datos de caudal máximo, los resultados se pueden observar en la tabla 6.8 de la sección [6.1.4](#).

6.4.3 Objetivo específico tercero

Finalmente, el tercer objetivo al día 21 de febrero del año 2023 se logró completar de manera parcial ya que para poder aplicar la modelación hidráulica y obtener los parámetros necesarios que definan las zonas vulnerables a inundación y medidas de mitigación en los tramos definidos en el río Liberia, se requiere en términos generales de valores del coeficiente de rugosidad de Manning, valores de caudales máximos e información topográfica del cauce. De la información topográfica de los puntos de aforo 2 y 3 no se tuvo claridad del perfil del cauce que se generó producto del levantamiento por lo que se consideró al menos 2 visitas más a campo para completar los datos que se tienen. Estas visitas no pudieron efectuarse por cuestiones de tiempo, por lo que se presentó únicamente los análisis y resultados hidráulicos obtenidos del aforo 1 que si cumplía con estas características descritas. Los resultados generados a partir de la

modelación hidráulica pueden observarse en la figura 6.17, 6.18, 6.24 y 6.25 así como en los anexos 6 y 7.

Con base en la información que se generó producto de la realización de los objetivos descritos anteriormente, la Municipalidad de Liberia tendrá información técnica puntual de la problemática para que pueda ser analizada y se valore la ejecución de las propuestas de mitigación plasmadas en el presente trabajo. Cabe destacar que el plazo de ejecución, así como cual medida pueden implementar dependerá del presupuesto que tengan destinado para tal fin y el tiempo que demore los procesos administrativos y legales que sean necesarios.

6.5 Sobre la metodología planteada

El diseño metodológico que se planteó fue funcional para el cumplimiento de los objetivos de este estudio. Aun así, se identificó una oportunidad de mejora, en relación con las estimaciones de caudal de la zona en estudio y se modificó un aspecto de la metodología planteada en la figura 5.1 de la sección 5.2.

El cambio surge en primer lugar, por la limitante identificada en lo que respecta al registro de caudales de la estación fluviográfica río Liberia, el periodo de registro no pudo ser comparado con los datos de lluvias existentes.

En segundo lugar, se aplicó un traslado de caudal de la subcuenca el Salto hacia la subcuenca río Liberia bajo la premisa de su cercanía y condiciones climáticas similares. No obstante, se observaron diferencias significativas al momento de comparar los resultados del modelado de lluvia por bloqué alterno, a raíz de esto a los datos de lluvia se les aplicó un factor de ajuste de 1.13 presentando mejoras importantes en la estimación final del caudal máximo y comparación entre los caudales obtenidos del traslado por C Creager.

En tercer lugar, a efectos de asegurar que los resultados representan correctamente a la cuenca y el modelado de lluvia, se optó por utilizar la distribución temporal de precipitación de la estación Pavas ya que según consulta a expertos puede brindar resultados aceptables si se toman en cuenta aspectos como tipo de lluvia (convectiva, orográfica etc) y duraciones de tormenta características de nuestra zona en estudio aunque esta información del comportamiento

de la lluvia sea de una zona distinta puede arrojar mejores resultados que el uso de hietogramas sintéticos que no fueron originados en el territorio nacional.

En cuarto lugar, el uso de información de otros lugares, si bien es una adecuada opción para cuando no se cuenta con información puntual del área de estudio, esto puede acarrear incertidumbre es los resultados por lo que para disminuir el grado de dispersión de esta y tener un rango o análisis de sensibilidad de los resultados se optó por considerar los tres métodos de modelado de lluvia correspondientes a 1) bloque alterno sin ajuste, 2) bloque alterno con factor de ajuste de 1.13 y 3) uso de información de distribución temporal de zona distinta que tiene patrones de precipitación similar: estación Pavas. Así mismo, existe la posibilidad de que en caso de que se quiera optar por 1 único método, se puede realizar una evaluación de correspondencia entre la magnitud de las crecientes reportadas en la cuenca y aquellas generadas por estos modelos de precipitación tomando de referencia parámetros hidráulicos obtenidos de la modelación hidráulica para periodos de retorno habituales como el de 5 años.

En resumen, se ha argumentado la oportunidad de mejora identificada de manera que se pueden considerar los resultados de los 3 escenarios de modelado de lluvia de cara a tener un rango de estimación o bien se pueden verificar por la evaluación de correspondencia cuáles caudales se adaptan mejor a las características de lo registrado en la cuenca basado en análisis visual de los stakeholders. Después de la experiencia con relación a las actividades de este proyecto se aconseja verificar los caudales máximos directamente con la modelación hidráulica tomando de referencia un periodo de retorno que represente avenidas habituales en la zona de estudio para tener una idea sobre el criterio de las medidas que pretendan proponerse.

Por otra parte, se modificó el software mediante el cual se realizó la modelación hidráulica. En primera instancia se planteó el uso de IBER, luego de configurar el modelo según las características de la zona en estudio y ejecutar la modelación transcurrió un tiempo mayor a 8 horas donde el proceso no se completó tan siquiera en un 50%, esto para 1 único escenario y el estudio requiere de al menos 12. IBER no resulta ser una herramienta suficientemente asertiva para todos los casos, dado que en este la obtención de resultados finales demanda una computadora con muchas características tecnológicas costosas y que además el tiempo es desmedido para efectos del proyecto por lo que se acudió al uso del programa HEC-RAS porque el mismo está facultado para el cálculo de los perfiles de agua y de los parámetros hidráulicos del cauce, siendo la mejor alternativa de uso por la simplicidad en la introducción de datos,

proporcionando resultados confiables en un menor tiempo Rincón et al. (2017), aunado a que las secciones del río Liberia estudiadas tienen geometría simple.

Así mismo, Rincón et al. (2017), Sanabria (2021) y Guzmán et al. (2017) coinciden en que la modelación bidimensional de los softwares IBER y HEC-RAS es similar desde la configuración del modelo pero que las diferencias significativas se identifican en la plataforma, opciones de simulación y el tiempo computacional requerido de manera que los resultados alcanzados por ambos son relativamente razonables, por lo que para eventos de amenaza de inundación en cauces con geometría simple se recomienda el uso de HEC-RAS debido al bajo coste computacional, organización de los elementos, información de errores y actualización constante. Finalmente, el flujograma del diseño metodológico actualizado se presenta en el anexo 8.

Se presentó las discusiones de resultados derivadas del proyecto según lo esperado por los objetivos y la metodología. Con esto se concluye la sección de resultados y discusión, en la siguiente sección se van a derivar las conclusiones y recomendaciones para los resultados de mayor relevancia.

7 Capítulo VII – Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se derivan las conclusiones y recomendaciones según los principales hallazgos de la investigación.

A continuación, se enlistan las principales conclusiones y recomendaciones considerando la hidrología, hidráulica y aspectos generales de la problemática.

7.1 Conclusiones

Sobre hidrología

- Este estudio confirma que hay limitantes en cuanto al registro de información de la estación pluviográfica río Liberia, así como en las otras 2 que pueden tener características similares a nivel hidrológico; Colorado y El Salto. En ninguna de las 3 estaciones se tiene un registro actualizado y dejaron de compilar datos hace ya más de 27 años. Por otra parte, no hay estudios que describan la distribución temporal de la lluvia a través de hietogramas característicos en la subcuenca río Liberia. Barquero (2019) realizó un hietograma de la estación 74051 pero solo para la tormenta más significativa según el autor, correspondiente a Nate en el año 2017.

Esto demuestra que existe áreas de mejora no solo en el cantón de Liberia, sino que a nivel de Guanacaste en temas de hidrometeorología, específicamente en mantenimiento y operación de estaciones pluviográficas y temas de modelado de lluvia distribuida en el tiempo. Este segundo muy importante para el modelado correcto de una cuenca que incluya los sistemas de alcantarillado pluvial y lagunas de retención de las zonas urbanas que contenga el área en estudio además de que son una herramienta muy importante para la construcción de obras de ingeniería tanto de aprovechamiento, mitigación de inundaciones y otros, aún más cuando estamos en presencia del desarrollo urbano desordenado y sin planificación por lo que los usos tradicionales de métodos de diseño hidrológico con información puntual de lluvia no son suficientes ante la dinámica que existe.

Sobre hidráulica

- Este estudio confirma que al momento de la visita en campo existían cerca de 4 árboles de gran tamaño obstruyendo el paso del flujo del agua en el cauce del río Liberia específicamente en el sector llamado aforo 3 del presente estudio. Lo cual muestra que existe áreas de mejora en el cantón de Liberia en temas de gestión de riesgo de

inundaciones debido a que hasta ese momento fue posible divisar la situación y no fue hasta 5 meses después que la unidad de Gestión Ambiental inició con los trabajos de corta y extracción de los troncos secos y árboles caídos.

- Los tirantes o cotas de lámina de agua a un periodo de retorno de 5 años no superan la altura del dique en ninguno de los 3 escenarios de modelado de lluvia, pero si la altura a la que se encuentra el pluvial de descarga hacia el río, por tanto, se requiere aumentar su altura en al menos 2.36 metros para disminuir los efectos del modelado de lluvia 1 y de 3.36 metros para que pueda ser útil para los 3 escenarios.
- Los tirantes hidráulicos que se generan van desde los 0.01 hasta los 8.5 m según los 3 escenarios de lluvia modelados a un período de retorno de 100 años y según cota de terreno implica que el muro debe aumentar su altura a 0.41m, 0.86m y 2.60m según modelado de lluvia 1, modelado de lluvia 2 y modelado de lluvia 3 respectivamente. Además, en el tramo en estudio las velocidades del agua sobrepasan las velocidades que pueden soportar los materiales o suelos presentes antes de que se produzca erosión o socavación, catalogados como rocas blandas, alcanzando los 10.7 m/s en el centro del cauce mientras que conforme se desplaza hacia los márgenes se identifican valores que rondan de 8.31-6.61 m/s.

Sobre aspectos generales de las inundaciones en el sitio de estudio

- La altura del desfogue pluvial potencia la problemática en torno a las inundaciones urbanas como es el caso de la urbanización barrio Chorotega. La Municipalidad de Liberia cuando se diseñó y construyó el sistema pluvial debió considerar aspectos de hidrología e hidráulica del cuerpo receptor al momento de las inspecciones y entrega de la obra.
- El modelado hidráulico presenta incertidumbre acumulada a nivel de estadística, topografía y software aunado a que la simulación al inicio del tramo específicamente en la sección km +251 no contempla obras hidráulicas aguas arriba como por ejemplo el puente que se sitúan en la localidad de Felipe Pérez a escasos 260 metros agua arriba de dicha sección, lo que infiere en que el flujo ingresa sin ninguna restricción de manera que puede favorecer las condiciones hidráulicas cuando en realidad puede que las variables sufran algún aumento o disminución en los valores obtenidos según sea el caso.

7.2 Recomendaciones

Sobre hidrología

- Se recomienda poner en operación las estaciones fluviográficas con su respectivo plan de mantenimiento, así como iniciar con estudios de distribución temporal de lluvia para la zona en estudio. En cuanto a la intervención de las estaciones fluviográficas para que vuelvan a operar correctamente, estas labores pueden tardar 6 meses en tanto se levanta un diagnóstico del estado actual de las mismas. Las acciones por realizar pueden ir desde visitas en campo, revisión y diagnóstico de equipo, entre otras. Para agilizar este tiempo, se podría realizar este esfuerzo en conjunto con otras instancias asociadas, primeramente, el ICE como dueño de las estaciones fluviográficas, seguido de la Municipalidad, CNE y la UNA Sede Liberia quienes podrían cooperar con estudiantes asistentes que deseen colaborar. Este tipo de trabajos requiere de profesionales multidisciplinarios que pueden ir desde técnicos electromecánicos e ingenieros hidrológicos o afines. El ICE cuenta con el Centro de Servicios Estudios Básicos de Ingeniería – Área de Hidrología de manera que tienen todo el conocimiento y personal capacitado para ejecutar este tipo de acciones.

Para el caso de los estudios de modelado de lluvia distribuida en el tiempo se pueden tomar de referencia algunos estudios desarrollados en distintas zonas del país como el proyecto final de graduación llamado estudio de Intensidades de lluvia en la cuenca del río Virilla (Murillo, 1994) así como el trabajo de graduación de Maroto (2011) Distribución Temporal de la Precipitación en el Valle del Guarco. Esta labor podría tardar hasta 9 meses en ejecutarse y debería ser liderada por la municipalidad en conjunto con el IMN.

Sobre hidráulica

- Se recomienda realizar visitas con una frecuencia mínima de 1 vez cada año en la etapa de transición de la época seca a lluviosa a largo del cauce del río Liberia, así como incentivar a la población a que haga reportes por medio de vía telefónica con especial atención en los meses de mayo-noviembre propios de la época lluviosa para detectar zonas de riesgo e intervenirlas de manera prioritaria.

En cuanto a las visitas y en caso de requerir trabajos de corta y extracción, estas labores pueden ser realizadas por la cuadrilla municipal, labor que se estima podría efectuarse en 3 días según la accesibilidad de la zona y demás variables. Cabe destacar que el fundamento jurídico de este tipo de actividad se basa en la ley de aguas No. 276 y está regulada mediante el permiso de obras menores en cauces del dominio público según MINAE por lo que es necesario llenar y entregar el formulario, lo podría realizar el encargado del departamento de Gestión Ambiental como representante de la Municipalidad y el tiempo de respuesta varía y puede ser prolongado por lo que para agilizar este tiempo, se podría realizar un esfuerzo en conjunto que permita establecer un convenio de cooperación con instituciones como SETENA, MINAE y CNE quienes tienen relación directa con este tipo de actividades, basado en la gestión del riesgo.

- Aumentar la altura del muro a 0.41m, 0.86m o 2.60 según modelado de lluvia 1, modelado de lluvia 2 o modelado de lluvia 3 respectivamente implicaría al menos 4 meses de estudios preliminares y diseños de la geometría del dique en el que se considere las velocidades de hasta 10.7 m/s en el centro del cauce y de 8.31 - 6.61 m/s conforme se acerca a las márgenes, otros 6 meses de trámites ante las autoridades y alrededor de 3 meses de obras de construcción con un costo estimado de 35 millones de colones por cada metro cúbico con las condiciones actuales y para una vida útil de 50 años, tarea que podría realizarse en conjunto con la Municipalidad, el MOPT y Dirección de Aguas del MINAE.

Sobre aspectos generales de las inundaciones en el sitio de estudio

- Se recomienda a corto plazo proveer al sistema de desfogue pluvial existente de válvulas antiretorno esto para minimizar los efectos cuando el río aumente de nivel. Sin embargo, esta medida no representa una protección total, ya que, al haber flujo de agua en ambas direcciones en la salida del pluvial, el agua precipitada y colectada en la zona urbana no podrá ser desalojada y puede que haya zonas que sigan inundándose por el colapso del sistema pluvial, pero con esto se asegura que el problema no se va a incrementar con agua proveniente del río. Así mismo, iniciar con un estudio preliminar para una nueva ubicación del desfogue existente.

En cuanto a la colocación de la válvula antiretorno, requiere de cierto conocimiento técnico por lo que un ingeniero de la municipalidad debe supervisar la obra misma que puede ser efectuada por una cuadrilla municipal, labor que se estima podría realizarse en 5 días. Para el caso de los estudios preliminares con miras a proponer una nueva ubicación del desfogue pluvial con su respectivo cabezal, se podría realizar con estudiantes universitarios de ingeniería a nivel de licenciatura, los estudios podrían tomar hasta 9 meses en ejecutarse y tendría una inversión cercana a ₡700 000 para cubrir costos de trabajo visitas a campo, levantamiento topográfico, entre otros, labor que debería ser liderada por la municipalidad de Liberia en conjunto con la UNA Subsede Liberia. El presente estudio puede ser una herramienta para el cálculo de la altura adecuada del pluvial al margen del cauce del río Liberia tomando en cuenta la topografía de la tubería existente.

- Se recomienda considerar los posibles efectos a la sección hidráulica del tramo en estudio que produce el puente sobre Felipe Pérez ubicado aproximadamente a 260 metros de la urbanización barrio Chorotega siguiendo la ruta del cauce para descartar o no posibles aumentos en las variables hidráulicas estimadas en el presente estudio.

Para evaluar dichos efectos se puede realizar estudios de índoles hidrológica e hidráulica similar al presentado en este trabajo, se podría realizar con estudiantes universitarios de ingeniería a nivel de licenciatura, que podría tardar similar al caso anterior de 9 meses para ejecutarse cuya inversión se centraría principalmente en visitas a campo y levantamiento topográfico de 260 metros sobre el cauce con secciones transversales cada 20 metros de separación y una extensión al ancho del cauce de mínimo 40 metros a cada margen del río, dicha labor debería ser liderada por la municipalidad de Liberia en conjunto con la UNA Subsede Liberia. Para disminuir los tiempo de ejecución del proyecto se puede utilizar información del presente estudio como los registros históricos de precipitación máxima, así como la delimitación del área afluente a cada punto de descarga con su respectivo uso de suelo.

Bibliografía

Aragón, F. (2014). Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina. <https://infohub.practicalaction.org/bitstream/handle/11283/622265/14418820141210173451.pdf;jsessionid=F74945F4E3337FF1F9654F6F94AA1CA5?sequence=1>

Arias, R., Sánchez, L., & Torres, J. (2011). Proyecto: Análisis de Competitividad Territorial y Mercado de Trabajo (Informe final). https://iice.ucr.ac.cr/informes/P_721_b2_215.pdf

Arrollo, L. (2011). Costa Rica: Análisis de la incidencia espacial de inundaciones y deslizamientos por provincias y cantones, años 2000-2006. *Revista Geográfica de América Central*, 2(47), pp. 97-126.

Baltodano, M. (2020). Generación de curvas de intensidad- duración-frecuencia del período de 1999-2019, para la zona de influencia del proyecto abastecimiento de agua para la cuenca media del río tempisque y comunidades costeras (PAACUME).

Banco Mundial (2012). Gestión integral de aguas urbanas. *World Bank, Washington*. Programa de agua y saneamiento (WSP). <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/10/Gesti%C3%B3n-Integral-de-Aguas-Urbanas-S%C3%Adntesis.pdf>

Bello, O. Bustamante A., & Pizarro P. (2020) "Planificación para la reducción del riesgo de desastres en el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible", Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/108), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*, 30(1), 1-10. https://www.scipedia.com/public/Blade_et_al_2012a

Bocel, J. (2016). Modelación hidrológica para evaluar los niveles de erosión hídrica y producción de sedimentos en diferentes usos y coberturas de la tierra y su efecto en la calidad del agua en la subcuenca del río San Francisco, cuenca del lago Atitlán, Guatemala (Doctoral dissertation, Tesis M Sc. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 113p).

Bogantes, R., Laporte, G., Quesada, C., & Vázquez, A. (2002). Zonificación Geotécnica General de Costa Rica considerando elementos edáficos y climáticos. In VIII Geotechnic's National Seminar and III Center American Encounter of Geotechnical People (pp. 159-181).

Bonilla, A (2014). Patrones de sequía en Centroamérica. *GWP Centroamérica, Cooperación Suiza, y el Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH)*.
https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/patrones-de-sequia_fin.pdf

Bonilla, A (2014). Patrones de sequía en Centroamérica. *GWP Centroamérica, Cooperación Suiza, y el Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH)*.
https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/patrones-de-sequia_fin.pdf

Brenes, A. (2016). Gestión del riesgo y vulnerabilidad en Costa Rica. Vigésimosegundo informe Estado de la Nación en desarrollo humano sostenible.
<https://repositorio.conare.ac.cr/bitstream/handle/20.500.12337/364/331.%20Gesti%C3%B3n%20del%20riesgo%20y%20vulnerabilidad%20en%20Costa%20Rica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Breña, A., & Jacobo, M. (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Universidad Autónoma Metropolitana, p.33.

Cabrera, J. (2012). Modelos hidrológicos. Instituto para la Mitigación de los Efectos del Fenómeno El Ni-o, Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Perú, p.1.

Campos, D., & Quesada, A. (2017). Impacto de los eventos hidrometeorológicos en Costa Rica, periodo 2000-2015. *Geo Uerj*, (30), pp. 440-465.

Castillo, B. (2021). Modelación Hidrológica e Hidráulica para la Valoración del Riesgo de Inundación en un Tramo del Río Lepanto en la Península de Nicoya, Costa Rica., Liberia, Guanacaste.: Universidad Nacional, Costa Rica.

Cely, G. (2017). Manual de prácticas de topografía para estudiantes de Ingeniería Civil Universidad Santo Tomás, Tunja.
<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30155/2017ginacely.pdf>

CEPAL, BID & PNUD. (2012). Resumen regional del impacto de la depresión tropical 12-e en Centroamérica. Cuantificación de daños y pérdidas sufridos por los países de la región en el mes de octubre de 2011. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
<https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37546/LCMEXL1060s.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chetyrina, A. (2017). Análisis y determinación de las curvas IDF en Navarra.
<https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/25380>

Chetyrina, A. (2017). Análisis y determinación de las curvas IDF en Navarra. https://academica-e.unavarra.es/xmlui/bitstream/handle/2454/25380/TFG_.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Comisión Nacional de Emergencias (2006). Descripción de amenazas cantón de Liberia. https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/mapas_amenazas/mapas_de_amaneza/guanacaste/Liberia%20-%20descripcion%20de%20amenazas.pdf

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (2021). Plan Nacional de Gestión del Riesgo 2021–2025 / La Comisión – San José, CR; CNE, 2021. <https://www.cne.go.cr/rectoria/planngr/Plan%20Nacional%20de%20Gestion%20del%20Riesgos%202021-2025.pdf>

Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (2014). Normas y elementos básicos de gestión municipal del riesgo de desastre con énfasis en prevención, control y regulación territorial / Javier Saborío Bejarano, María del Mar Saborío Víquez, Sergio Mora Castro. – 1ª. Ed. – San José, C.R. : La Comisión, Sistemas Geoespaciales, 2014. https://www.cne.go.cr/reduccion_riesgo/biblioteca/gestion%20municipal/gestion_municipal_del_riesgo_de_desastres.pdf

Cubillo, O. (2015). Evaluación del Sistema de Alcantarillado Pluvial del Cuadrante Urbano del Distrito de Colón, Cantón Mora, Mediante la Utilización de Paquetes Computacionales. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/5861>

Dannenberger, J. (2016). Análisis y soluciones a problemas de inundaciones en el cantón de Oreamuno, Cartago. <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2017/05/Tesis-JorgeChinchilla.pdf>

Del Moral, L. & Herrera, T. (2015). Perspectiva ecosistémica y gestión integrada. Fundación nueva cultura del agua. Zaragoza, I – Punto de partida: El reto de integrar valores y principios ecológicos, sociales y éticos, pp.08-15.

Díaz, U., Guacaneme, D., Alonso, F. (2017). Estimación de caudales máximos para el sector hidrológico de la quebrada El Diamante, mediante modelación con HEC-HMS.

Evans, D., Gruba, P. & Zobel J. (2014). How to Write a Better Thesis. 3era Edición. Springer International: Switzerland.

Ferrér, M., Rodríguez, J., & Estrela, T. (1995). Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Ingeniería del agua*, p. 54. <https://iwaponline.com/IA/article/2/4/43/68181/Generacion-automatica-del-numero-de-curva-con>

Gámez, W. (2010). *Texto Básico de Hidrología*. – 1ª ed. – Managua: Universidad Nacional Agraria (UNA), 2010, pp.8-9. <https://repositorio.una.edu.ni/2464/1/np10q192.pdf>

García Trujillo, A. (2017). *Obtención de curvas de Intensidad, Frecuencia y Duración de la precipitación para la región de Trinidad (Doctoral dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Hidráulica)*. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/8649>

García, C., & Rogel, Á. (2015). Propuesta metodológica para la delimitación de áreas inundables y la estimación de usos afectados en sistemas de drenaje efímero. *NIMBUS n° 11-12*, 107.

Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Delgado, M. I., & Besteiro, S. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas, pp.48-58. – 1ª ed. – La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2013. https://www.academia.edu/20227994/Gaspari_et_al_2013

Gaspari, F., Rodríguez, A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. *Augm Domus*, 4.

Gaspari, F., Senisterra G., Delgado M., Rodríguez, A., & Besteiro, S. (2009). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. EditorialAutores, 1 ed, La Plata, Argentina. 321pp.

Gaspari, F., Senisterra, G., Delgado, M., Rodríguez, A y Besteiro, S. (2010). *Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas*. Grupo de Manejo de Cuencas. La Plata – Argentina.

Gómez, C. (1994). *El análisis costo-beneficio y el medio ambiente*. Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/30295>

Gómez, N., & Monge, K. (2019). Diseño de obras de mitigación y encauzamiento mediante modelaciones hidráulicas e hidrológicas para disminuir la condición por vulnerabilidad de inundaciones en un tramo de 3 km de río comprendido en la cuenca media baja del río Corredor. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/11295>

Guerra, F., & González, J. (2002). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada la Bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. *Geoenseñanza*, 7(1-2), 88-108.

Guzmán, I., Watson, F., Villagra, K., & Casasola, R. (2017). Modelación hidrodinámica y morfológica del Río La Estrella, Limón. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/9154>

INDER. (2014). Caracterización del territorio Liberia-La Cruz. <https://www.inder.go.cr/liberia-la-cruz/Caracterizacion-Territorio-Liberia-LaCruz.pdf>

Instituto Meteorológico Nacional. (2009). Atlas Climatológico Interactivo [Software]. <https://www.imn.ac.cr/atlas-climatologico>

Maroto, E. (2011). Distribución temporal de la precipitación en el Valle del Guarco. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/3243>

Martín, J. (2002). Ingeniería de ríos. Segunda Edición. Barcelona, España. Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya. p.338

Masís, R., & Vargas, H (2014). Incremento de áreas impermeables por cambios de usos de la tierra en la microcuenca del río Burío. *Revista Reflexiones*, 93(1), pp. 33-46. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-28592014000100003

MIDEPLAN (2017). Índice de Desarrollo Humano Distrital 2017, según división administrativa. <https://documentos.mideplan.go.cr/share/s/T3CmePFRSdCAUc1q50kZQA>

Monsalve, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería (2.a ed.). Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, p.33.

Murillo, R. (1994). Estudio de intensidades de lluvia en la cuenca del río Virilla. https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/861/TFG_REMM.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Naranjo, D. (2017, octubre). Boletín meteorológico mensual octubre 2017. Instituto Meteorológico Nacional. <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/437028/OCTUBRE>

Nicomedes, E. (2018). Tipos de investigación. Universidad Santo Domingo de Guzmán. <http://repositorio.usdg.edu.pe/bitstream/USDG/34/1/Tipos-de-Investigacion.pdf>

Oreamuno, R. (2022). Curso: Hidrología para el diseño de alcantarillados pluviales y sistemas de retención: Conceptos básicos distribución temporal de la precipitación [Recomendación].

Oreamuno, R., & Villalobos, R. (2015). Estudios hidrológicos e hidráulicos en la cuenca Quebrada Seca-Río Burío. *Universidad de Costa Rica: San José, Costa Rica*. <http://ciedes.ucr.ac.cr/docs/informe-final-quebrada.pdf>

Organización Meteorológicas Mundial. (1994). Guía de prácticas hidrológicas: adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. Academia.edu. https://www.academia.edu/14015021/Guia_de_Practicas_Hidrogeologicas_OMM

Orozco, E., Alvarado, M., Suárez, J., Monge, C., García, P., Chaves, M., & Arias, M. (2010). Estudio Hidrogeológico integral de las comunidades del Jobo y Soley, La Cruz, Guanacaste. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/11296>

Orozco, R. & Cedeño, B. (2018). Servicio de mapoteca virtual de la Escuela de Ciencias Geográficas, Universidad Nacional. *Revista Geográfica de América Central*, 3(61E), 597-607. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/11255/14375>

Ortiz, E. (2014). Atlas Digital de Costa Rica 2014. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6749?show=full>

Ortiz, J. (2021). Modelación hidrológica de la subcuenca del Río Balsar en el distrito de Ciudad Cortés (Informe del trabajo final de graduación). Instituto Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/12362#:~:text=El%20proyecto%20fue%20enfocado%20en,en%20la%20provincia%20de%20Puntarenas>

Oyola, A., & Medina, O. (2019). Estimación de caudales máximos con fines de prevención de inundaciones aplicando el modelo hidrológico HEC-RAS, caso Río Zarumilla–2018. <http://repositorio.untumbes.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12874/1057/TESIS%20-%20OYOLA%20Y%20MEDINA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Paniagua, D (2016). Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde de Grecia. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/3880/1/40477.pdf>

Pérez, I. y Müggenburg, M. (2007), "Tipos de estudio en el enfoque de investigación cuantitativa." *Enfermería Universitaria*, Vol. 4, núm.1, pp.35-38 [Consultado: 23 de junio de 2022]. ISSN: 1665-7063. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=358741821004>

Pérez, P. (2020). TP6 Modelado de Elevación Digital: productos derivados e importancia. Ingeniería Hidrológica. SIG Aplicado a recursos hídricos. Universidad Nacional

Perilla, G. & Mas, Jean. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. Investigaciones geográficas, (101), e59929. Epub 02 de octubre de 2020. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112020000100111

Pizarro, R., Ausensi, P., Aravena, D., Sangüesa, C., León, L. & Balocchi, F. (2009). Evaluación de Métodos Hidrológicos para la Completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la Región del Maule, Chile. Aqua-LAC. 1. 172-184. 10.29104/phi-aqualac/2009-v1-2-07.

Porras, P. (2020). Estudio de hidrología básica del cauce de agua de la microcuenca en que se localiza el área de proyecto delegación policial de Jacó. Ministerio de Justicia y Paz. Vieto Ingenieros Consultores y Consultora Guayacán S.A. http://mjp.go.cr/UCP/DelegacionesPoliciales/LOTE_2_GARABITO_APOYO/04.%20Estudio%20Hidrol%C3%B3gico%20Puesto%20de%20Apoyo%20Jaco.pdf

Ramírez, J. (2015). Alternativas de manejo sustentable de la subcuenca del río Pitura, provincia de Imbabura, Ecuador. Universidad Nacional de La Plata, Argentina, 136. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/49801/Documento_completo.pdf-PDFA-U.pdf?sequence=3

Ramos, A., & Pacheco, J. (2017). Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del Río Frío, municipios de Ciénaga y zona bananera, departamento del Magdalena. Revista Logos, Ciencia & Tecnología, 9(1). <https://doi.org/10.22335/rict.v9i1.302>

Rincón, C., Pérez, M., Delfín, G., Freitez, C., & Martínez, F. (2017). Análisis comparativo entre los modelos HEC-RAS e IBER en la evaluación hidráulica de puentes. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6521655>

Rodríguez, P. (2008). Hidráulica de Canales. https://www.academia.edu/download/59539423/hidraulica_ruiz20190605-53177-dlu0cu.pdf

Rodríguez, Y., Ramírez, M. & Bernal, J. (2017). Levantamiento topográfico y modelación hidráulica para la sección que corresponde a 4.5 km del caño Maizaro desde 500 metros aguas arriba de la bocatoma fuentes altas hasta la carrera 38 con calle 32 en el municipio de Villavicencio. https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/14650/1/2017_levantamiento_topografico_modelacion.pdf

Rojas, N. (2011). Curvas de intensidad duración frecuencia de algunas estaciones meteorológicas mecánicas. Departamento de climatología e investigaciones aplicadas – MINAET. <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/publicaciones/CuInDuFreAIEsMecanicas/offline/download.pdf>

Rojas, R. (2009). Hidrología aplicada al manejo de cuencas. Universidad de los Andes., facultad de ciencias forestales y ambientales.

Sanabria, J. (2010). Guía para el diseño geotectónico de diques de protección civil en zonas inundables de Costa Rica [Trabajo final de graduación]. Universidad de Costa Rica. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/73039>

Sanabria, W. (2021). Análisis comparativo de los modelos Hec Ras e Iber en la determinación de las zonas de amenaza por inundación en el corregimiento de Santa Fe de Morichal, municipio de Yopal, departamento de Casanare. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/26383>

Sánchez, F., & Lastra, J. (2011). Guía metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. *Gobierno de España, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino*. https://www.miteco.gob.es/es/agua/publicaciones/guia_snczi_baja_optimizada_tcm30-422920.pdf

Segeer, C., & Villodas, R. (2006). Hidrología I (Unidad 5: Las precipitaciones). pp. Universidad Nacional de Cuyo, pp. 5-21.

Segura, L., & Casasola, R. (2011). Modelación hidráulica para el análisis y propuesta de obras de mitigación de inundaciones en finca valle La Estrella. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5706/MODELACION_HIDRAULICA_MITIGACION_VALLE_ESTRELLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Sobrero, F. (2009). Análisis de Viabilidad: La cenicienta en los Proyectos de Inversión. FCE-UNL. Santiago, Chile. <http://www.asociacionag.org.ar/pdfcap/5/Sobrero.%20Francisco%20-%20ESTUDIOS%20DE%20VIABILIDAD%20LA%20CENICIENTA%20DE%20LOS%20PROYECTOS%20DE%20INVERSION.pdf>

Solano, J., & Villalobos, R. (2000). Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica. San José: Instituto Meteorológico Nacional. Instituto Meteorológico Nacional. Recuperado de

<https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>

Torres, Y. (2021). Búsqueda, clasificación y recopilación de datos de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro del área de influencia de PAACUME en la margen derecha del río Tempisque.

Tucci, C. (2006) Gestión de inundaciones Urbanas. Global Water Partnership.
https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/gestion-de-inundaciones/gestion-de-inundaciones-urbanas-esp.pdf

Umaña, B. (2014). Análisis hidrológico de la cuenca del río Toyogres utilizando el modelo HEC-HMS.

US Army Corps of Engineers (2010). HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual. https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf

Vallejos, S., Esquivel, L. & Hidalgo, M. (2012). Histórico de desastres en Costa Rica (febrero 1723 – setiembre 2012). <https://www.bvs.sa.cr/ambiente/4923.pdf>

Villón, M (2014). Hec-Ras: Ejemplos. Instituto Tecnológico de Costa Rica. pp.17-18

Villón, M. (2004). Hidrología (1.a ed.). Cartago: Editorial Tecnológico de Costa Rica, 2004, pp.29-30.

Wang, L. & Liu, H. (2006): An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. International Journal of Geographical Information Science, Vol. 20, No. 2: 193-213. https://saga-gis.sourceforge.io/saga_tool_doc/2.2.3/ta_preprocessor_4.html

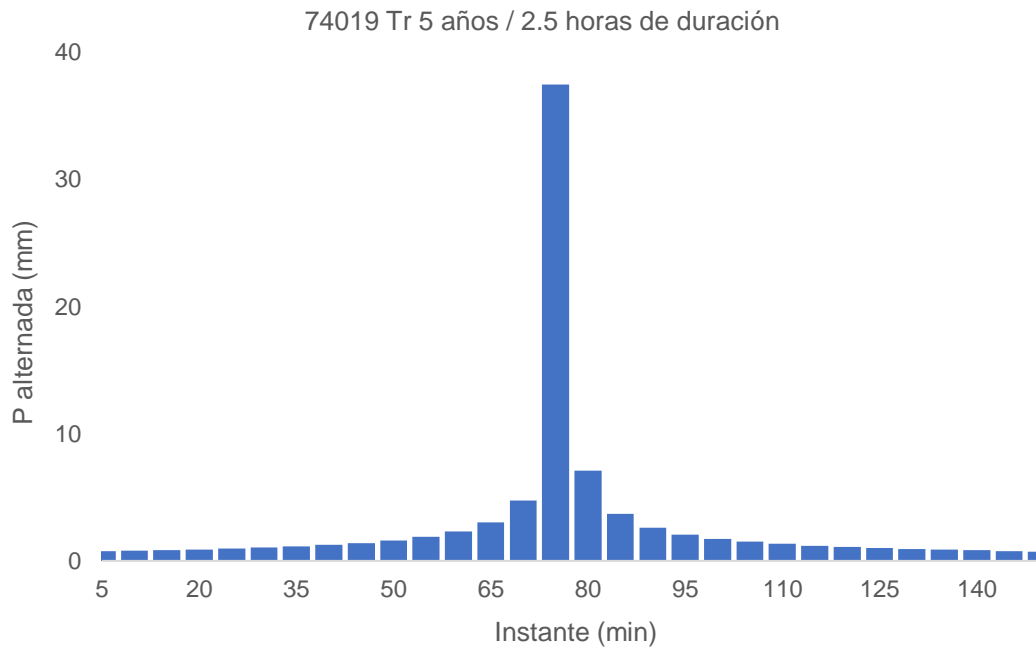
Zucarelli, G., & Hammerly, R. (2013). Determinación de curvas envolventes de caudales máximos observados y esperados para la República Argentina. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(1), 187-194. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v4n1/v4n1a10.pdf>

ANEXOS

Anexo 1. Hietogramas para distintos períodos de retorno, método 1): sin factor de ajuste.

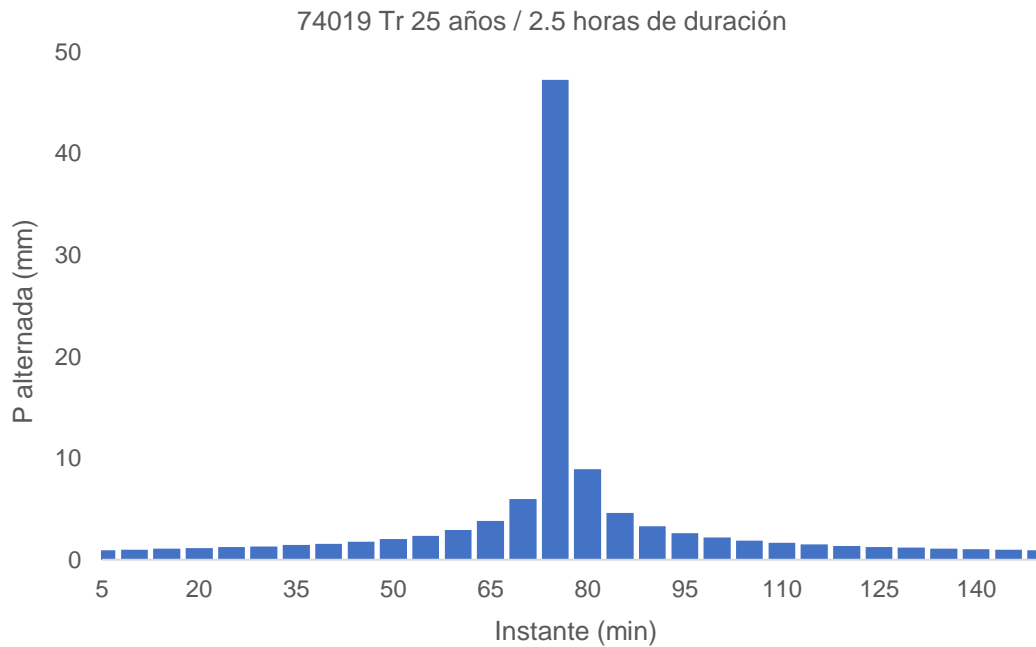
Estación 74019, duración de la tormenta de 2.5 horas.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74019 Tr 5 años.



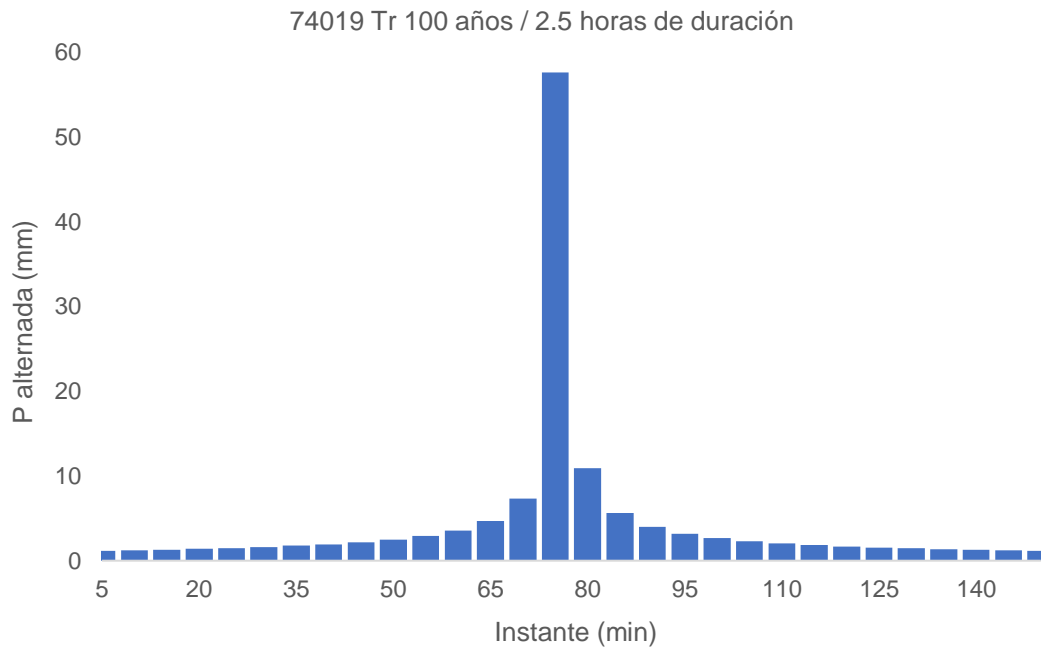
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74019 Tr 25 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74019 Tr 50 años.

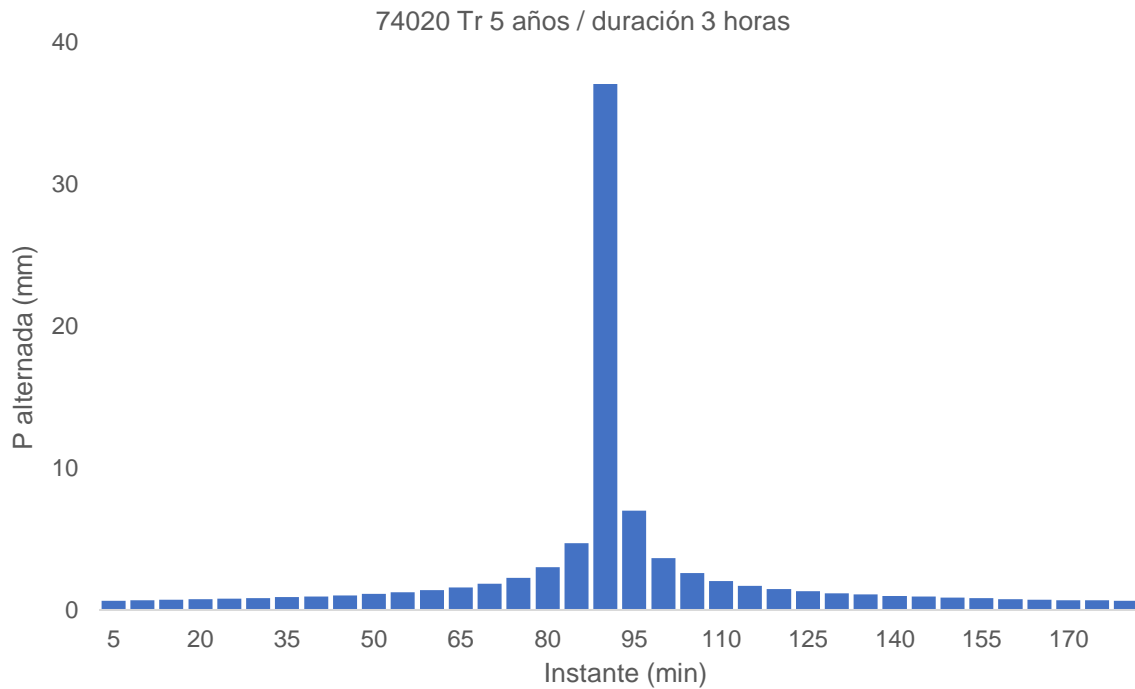


Fuente: elaboración propia, 2022.

Anexo 2. Hietogramas para distintos períodos de retorno, método 1): sin factor de ajuste.

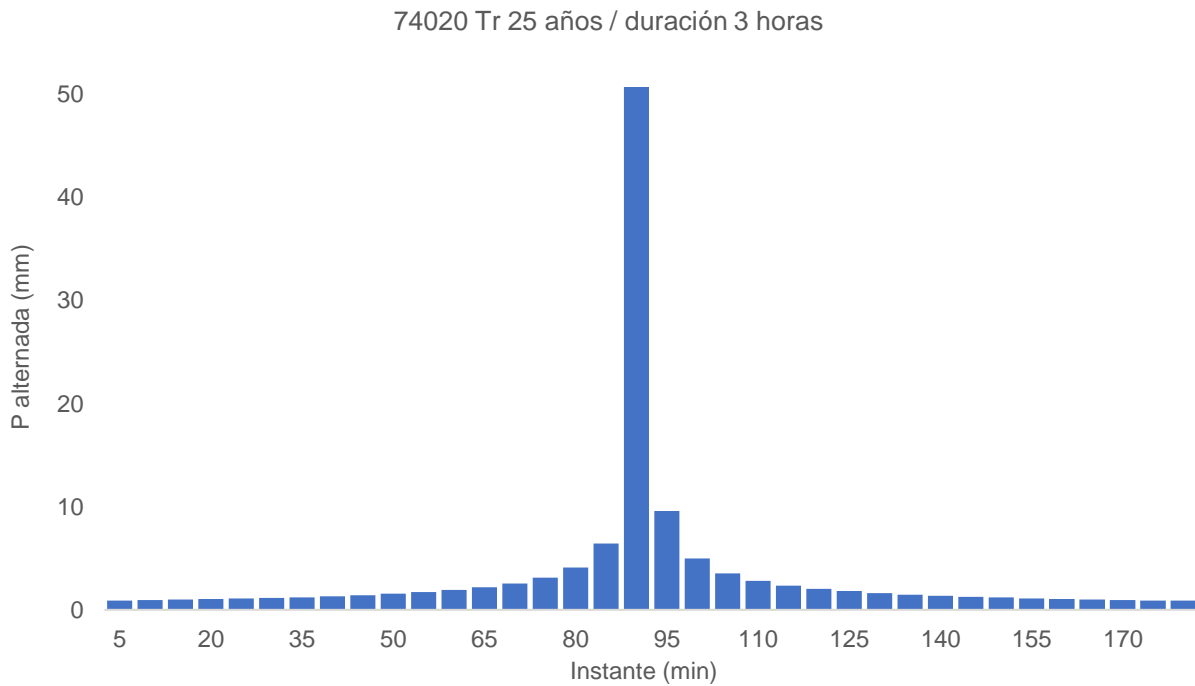
Estación 74020, duración de la tormenta de 3 horas.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 5 años.



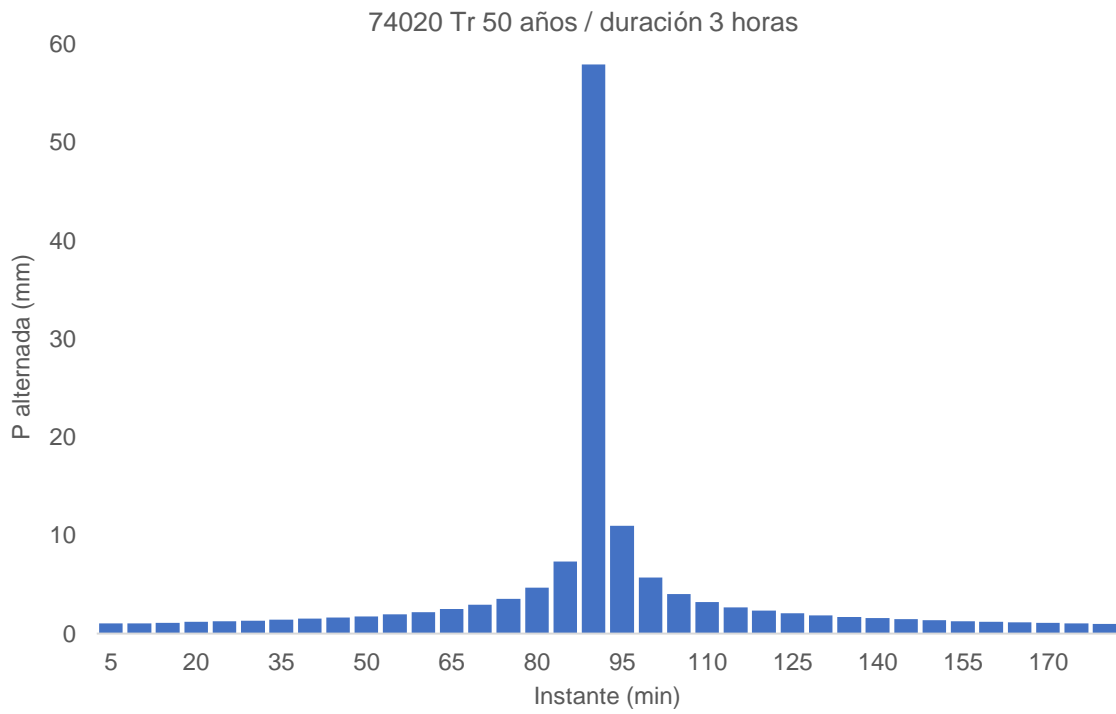
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 25 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 50 años.

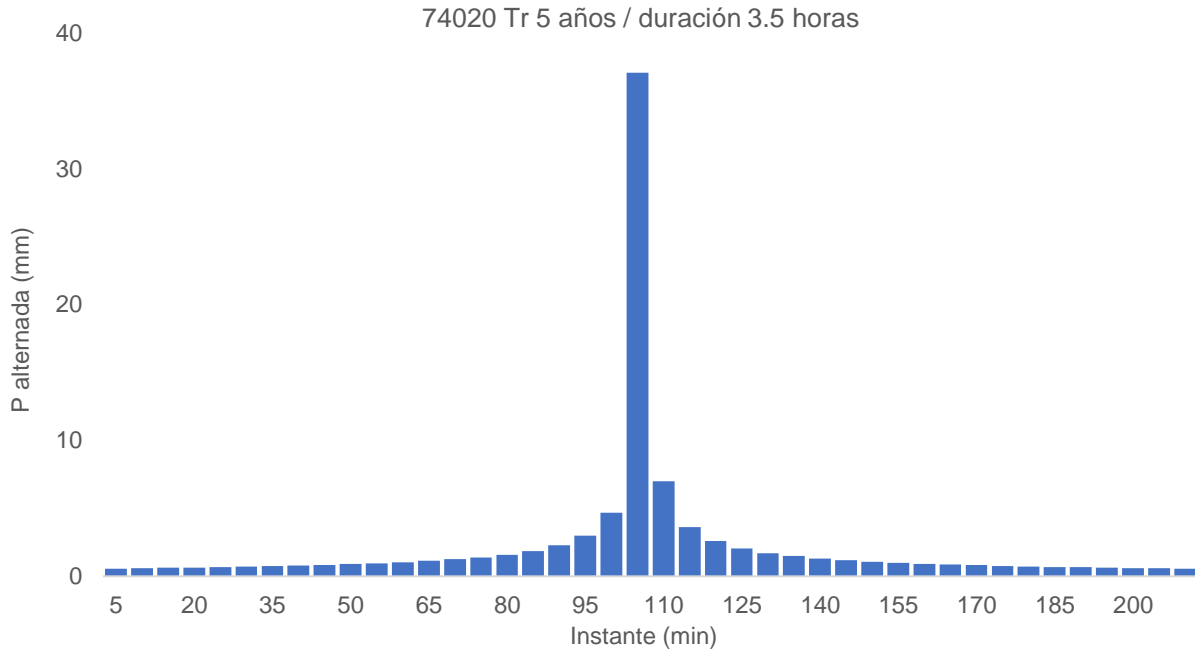


Fuente: elaboración propia, 2022.

Anexo 3. Hietogramas para distintos períodos de retorno, método 1): sin factor de ajuste.

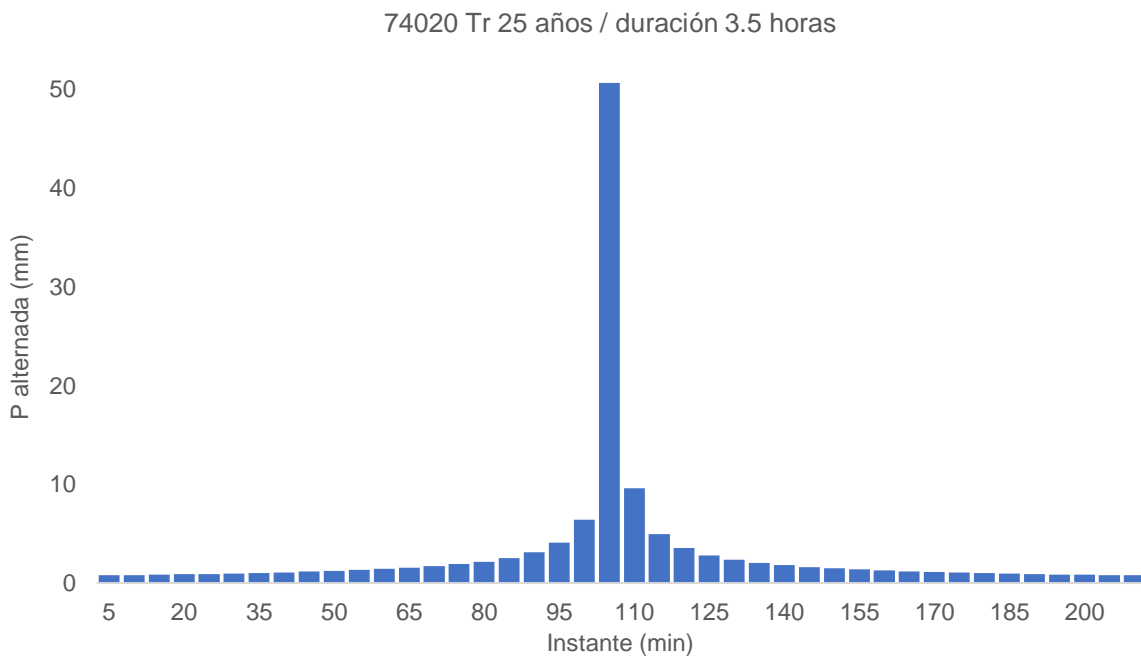
Estación 74020, duración de la tormenta de 3.5 horas.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 5 años.



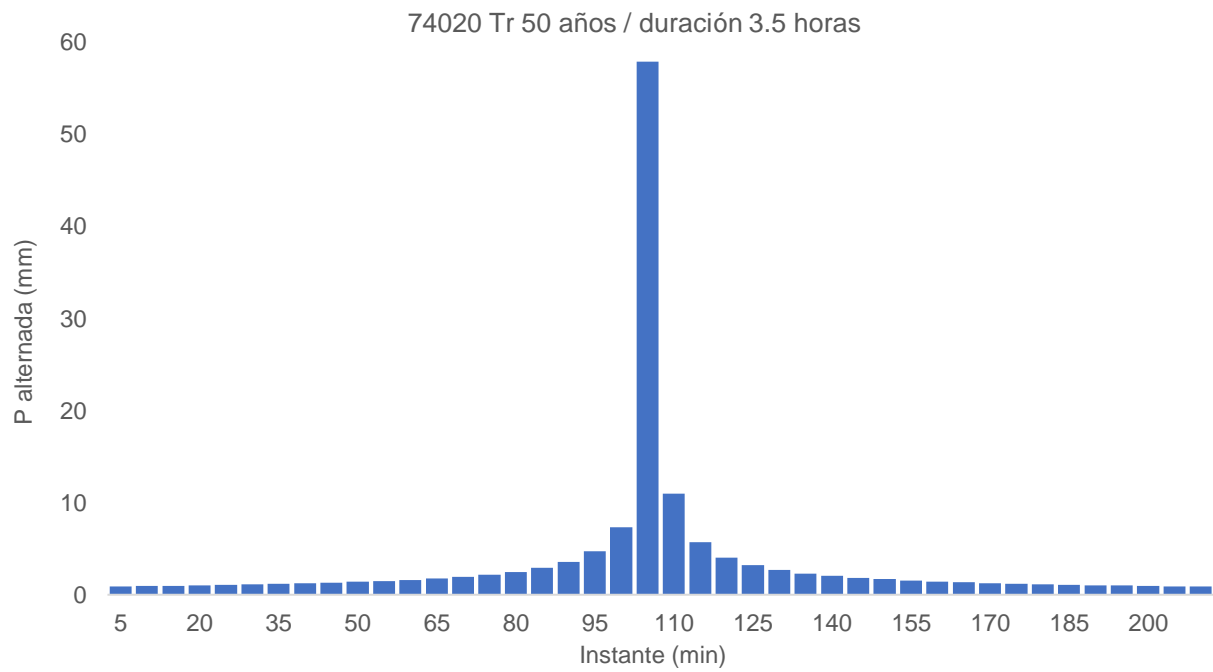
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 25 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

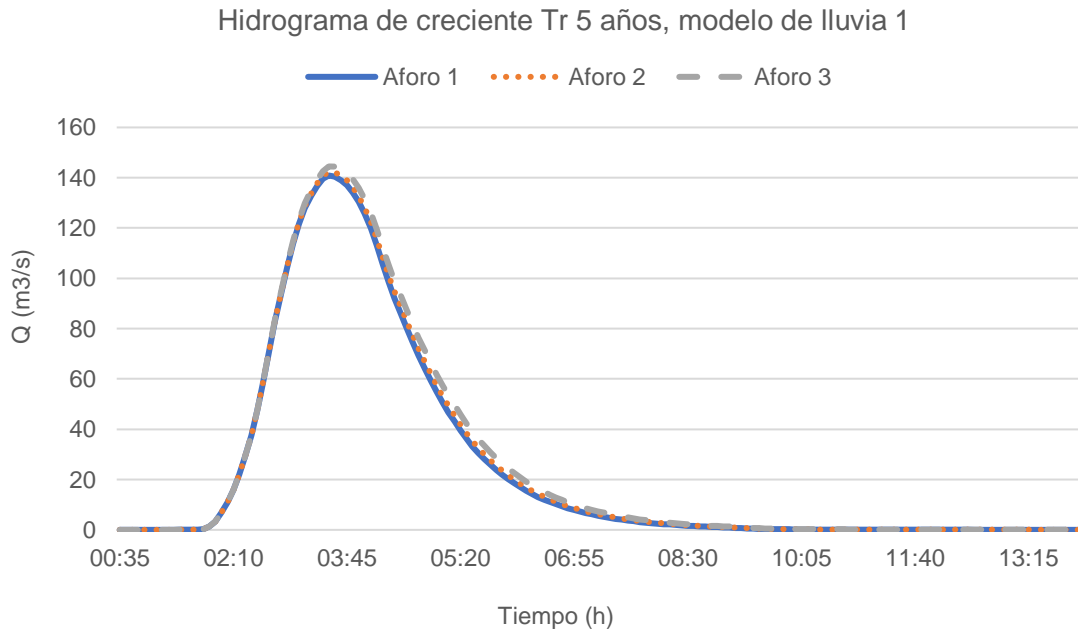
Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 50 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

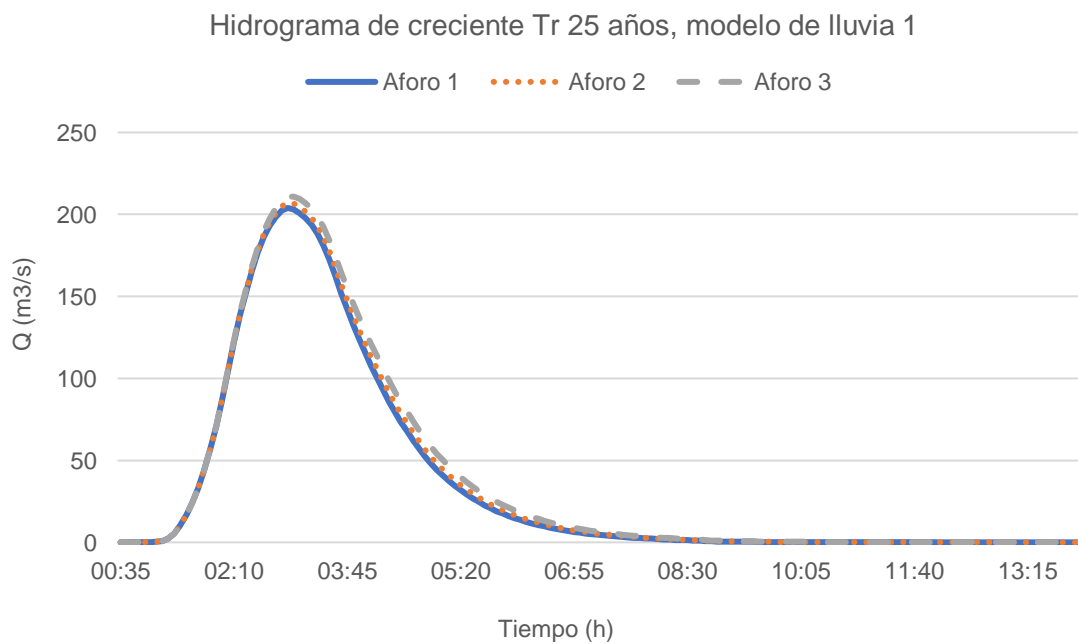
Anexo 4. Hidrogramas para distintos períodos de retorno, a partir de método 1): precipitación máxima sin factor de ajuste.

Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia para un período de retorno de 5 años.



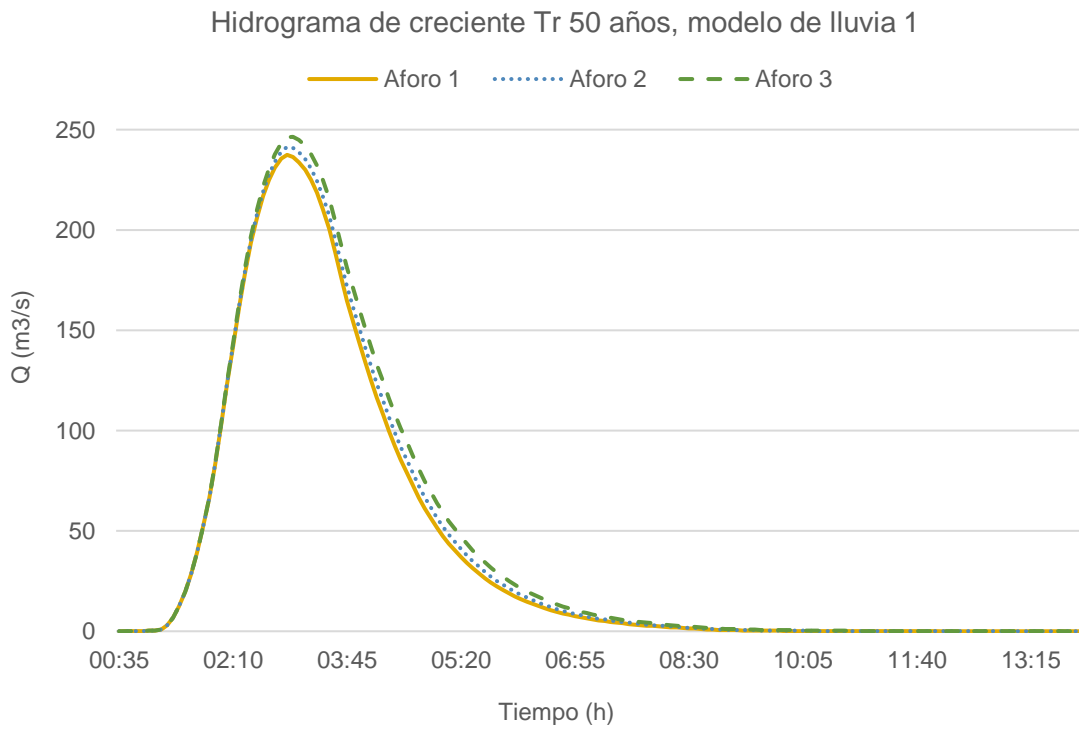
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia para un período de retorno de 25 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

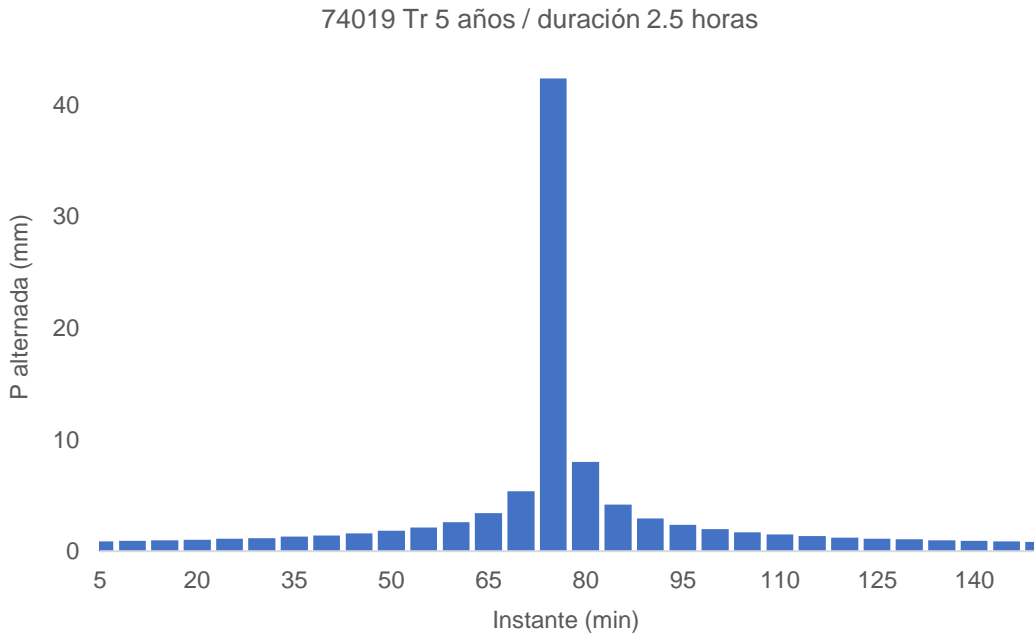
Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia para un período de retorno de 50 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

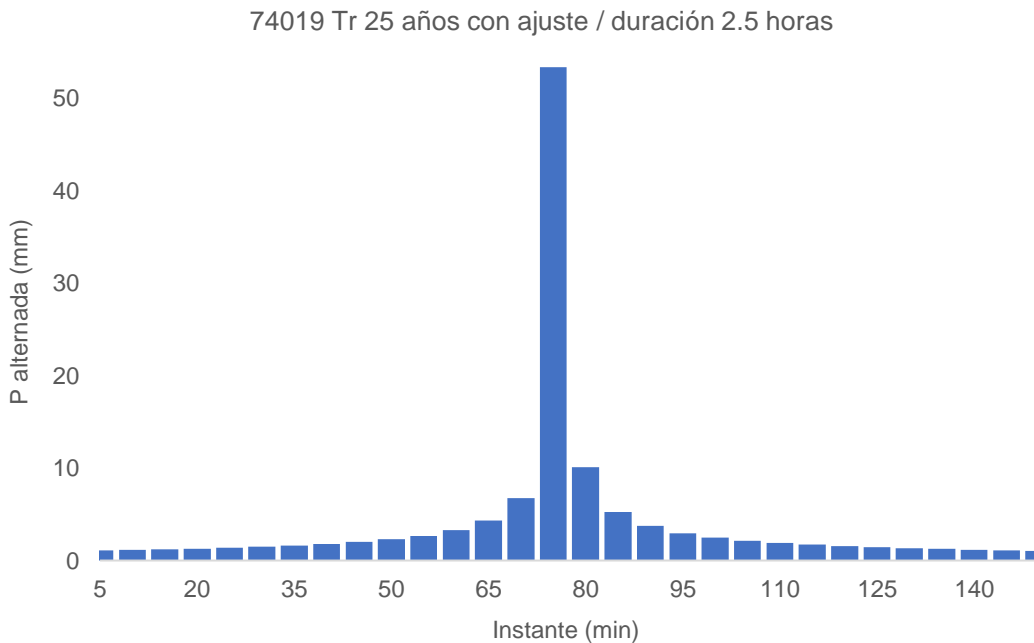
Anexo 5. Hietogramas para distintos períodos de retorno, método 2): con factor de ajuste de 1.13 a los datos de precipitación máxima. Estación 74019, duración de la tormenta de 2.5 horas.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74019 Tr 5 años.



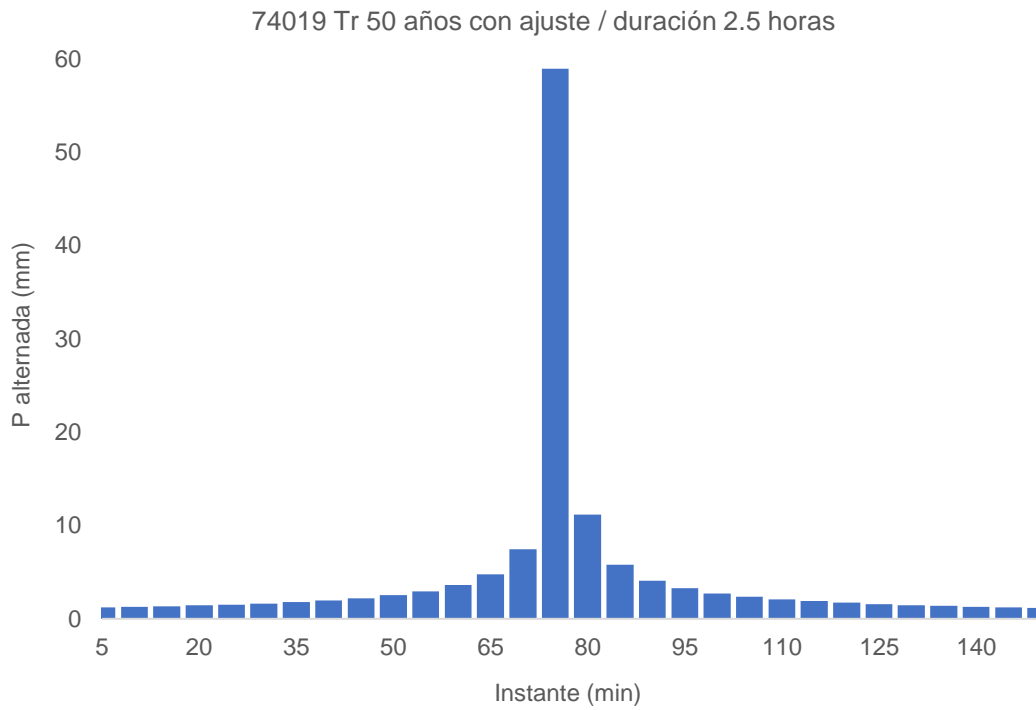
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74019 Tr 25 años.



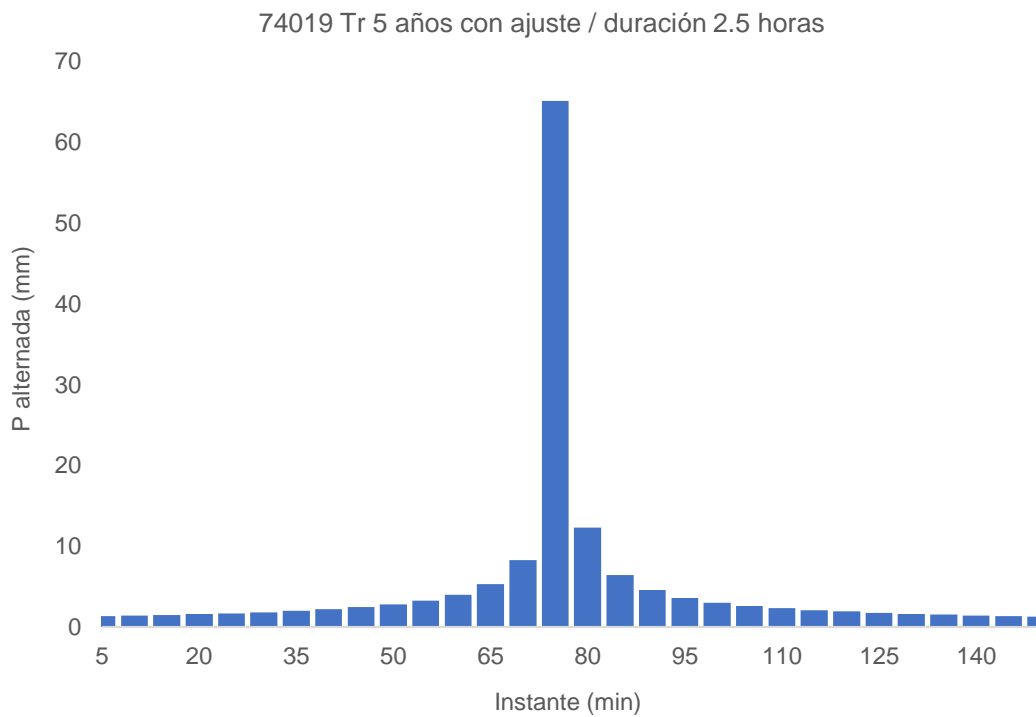
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74019 Tr 50 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74019 Tr 100 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

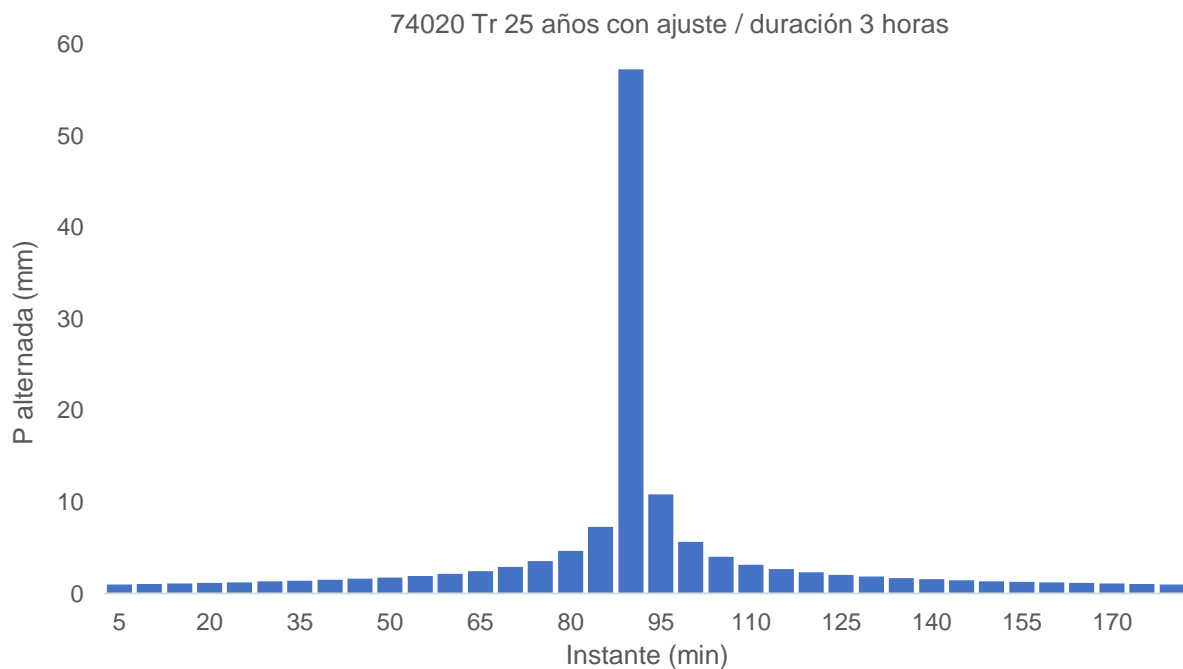
Anexo 6. Hietogramas para distintos períodos de retorno, método 2): con factor de ajuste de 1.13 a los datos de precipitación máxima. Estación 74020, duración de la tormenta de 3 horas.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 5 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 25 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 50 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

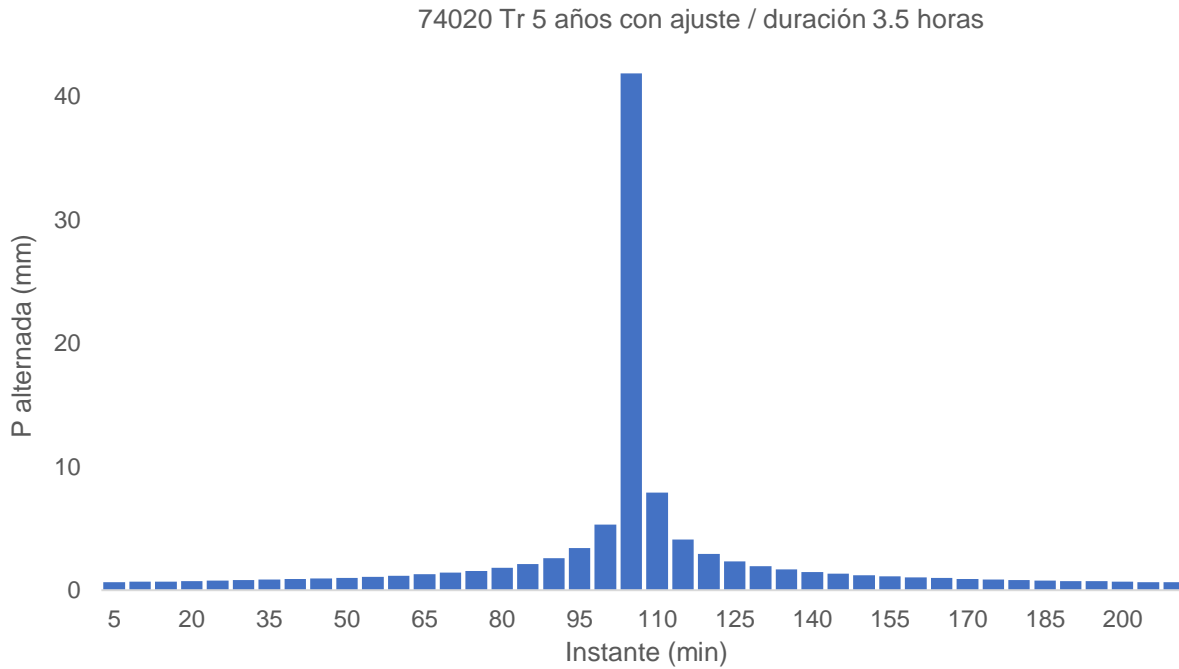
Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 100 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

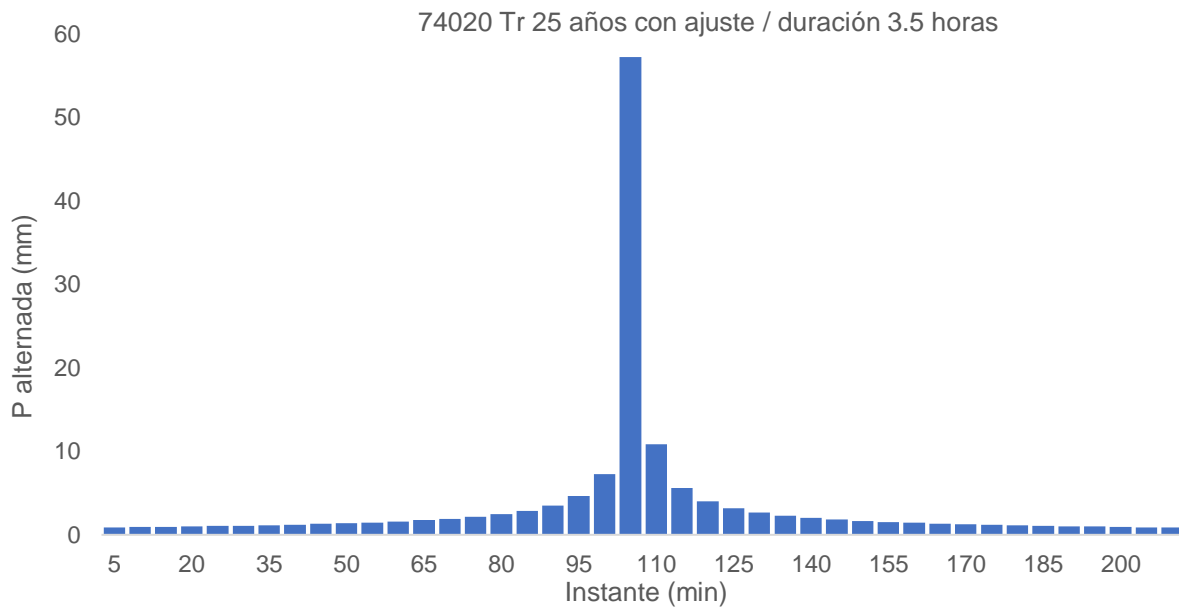
Anexo 7. Hietogramas para distintos períodos de retorno, método 2): con factor de ajuste de 1.13 a los datos de precipitación máxima. Estación 74020, duración de la tormenta de 3.5 horas.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 5 años.



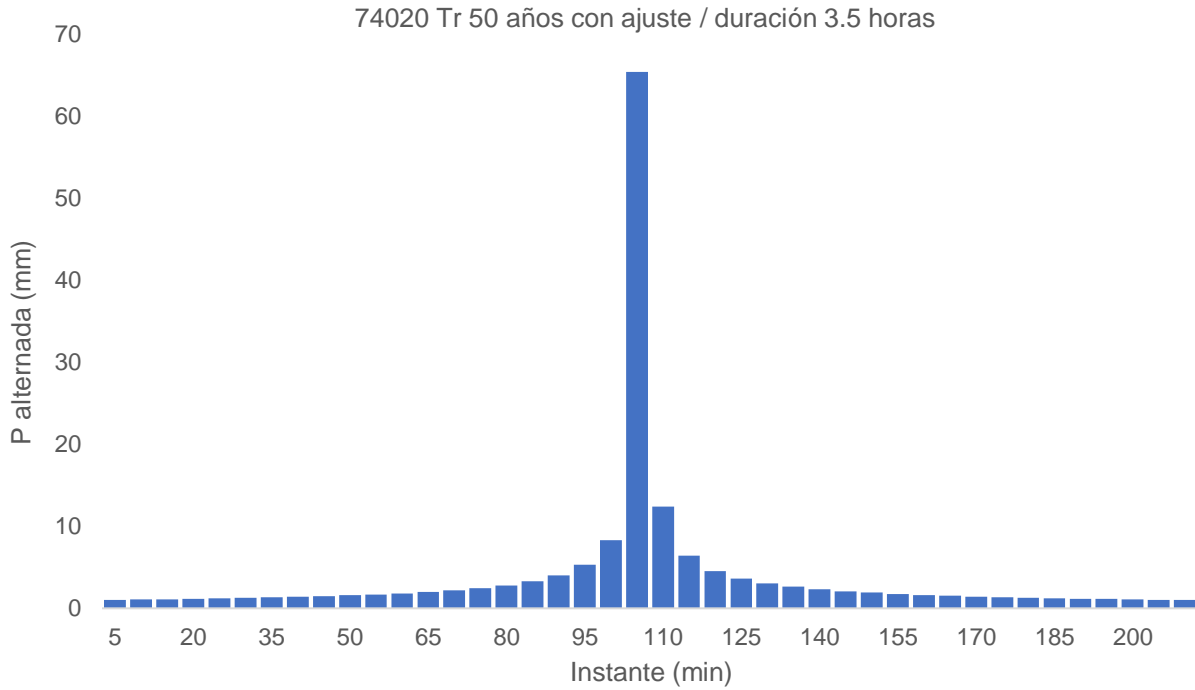
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 25 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 50 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

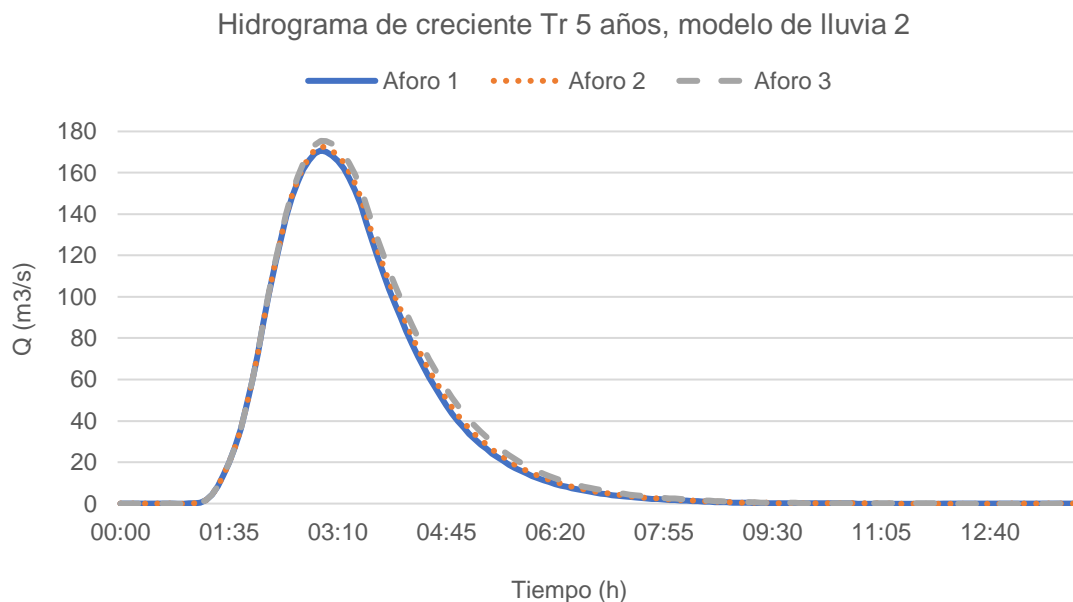
Hietograma por método de bloque alterno estación 74020 Tr 100 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

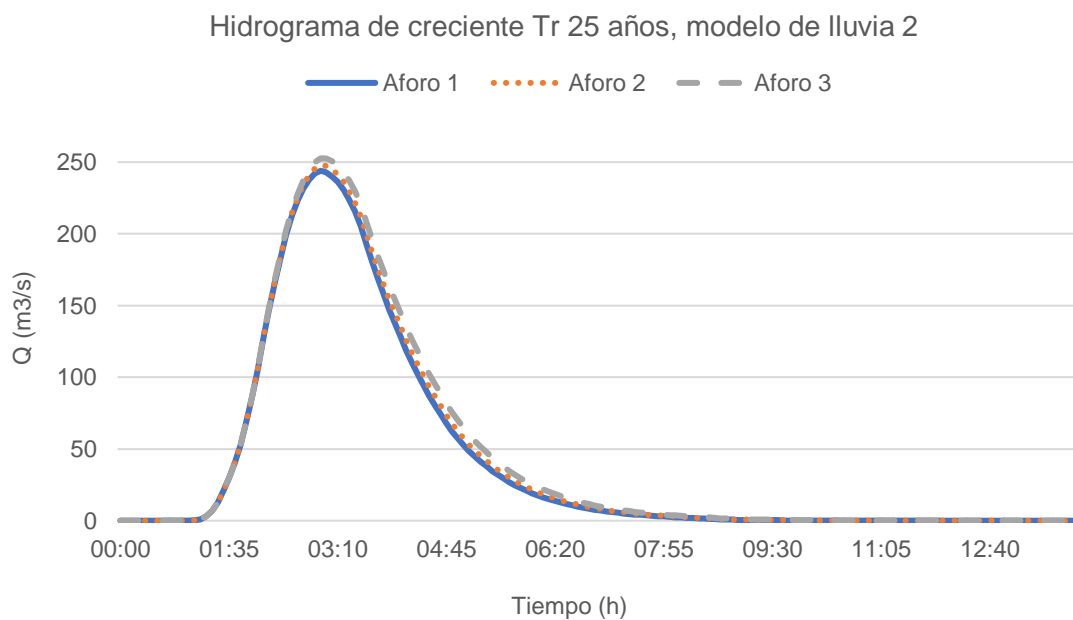
Anexo 8. Hidrogramas para distintos períodos de retorno, método 2): con factor de ajuste de 1.13 a los datos de precipitación máxima.

Hidrogramas de creciete para cada área de influencia del río Liberia para un período de retorno de 5 años.



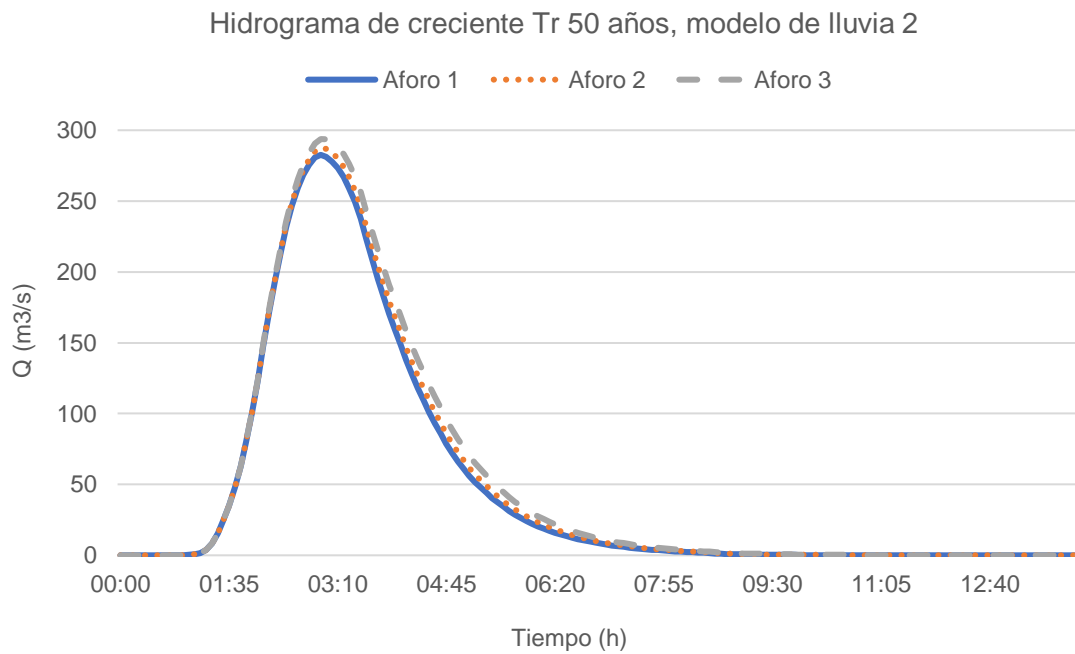
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hidrogramas de creciete para cada área de influencia del río Liberia para un período de retorno de 25 años.



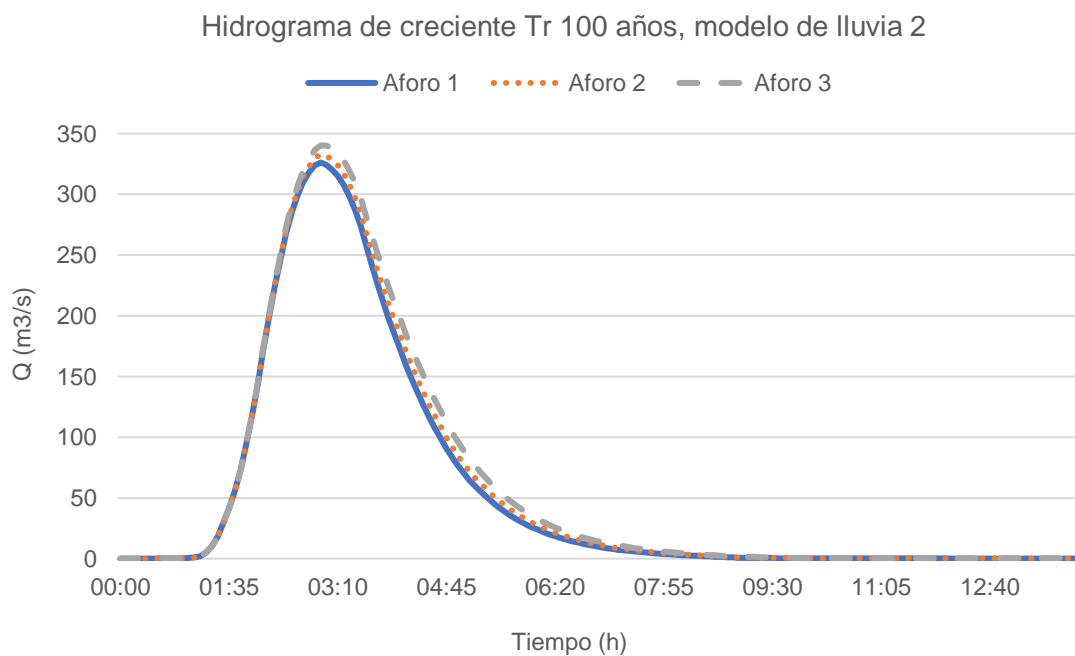
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia para un período de retorno de 50 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

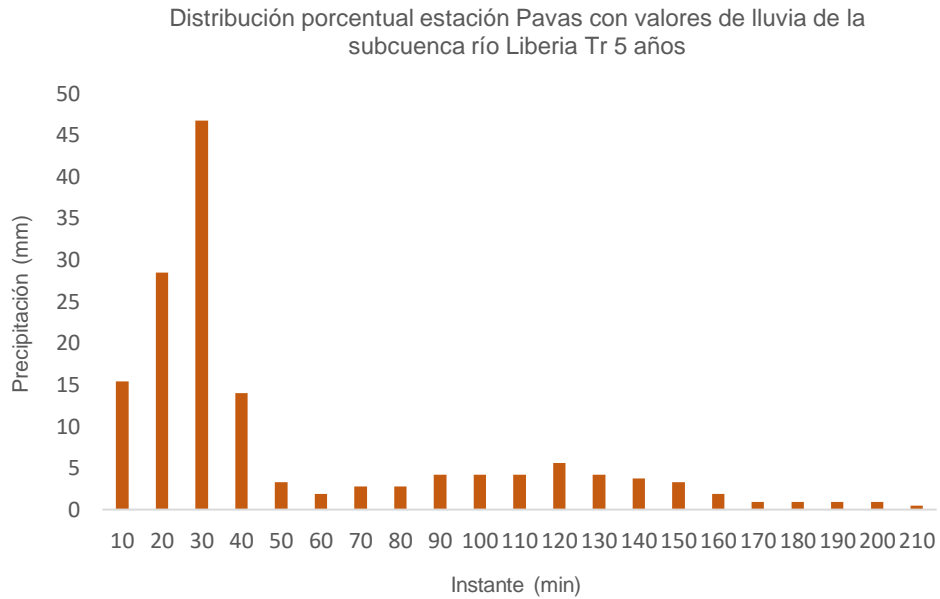
Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia para un período de retorno de 100 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

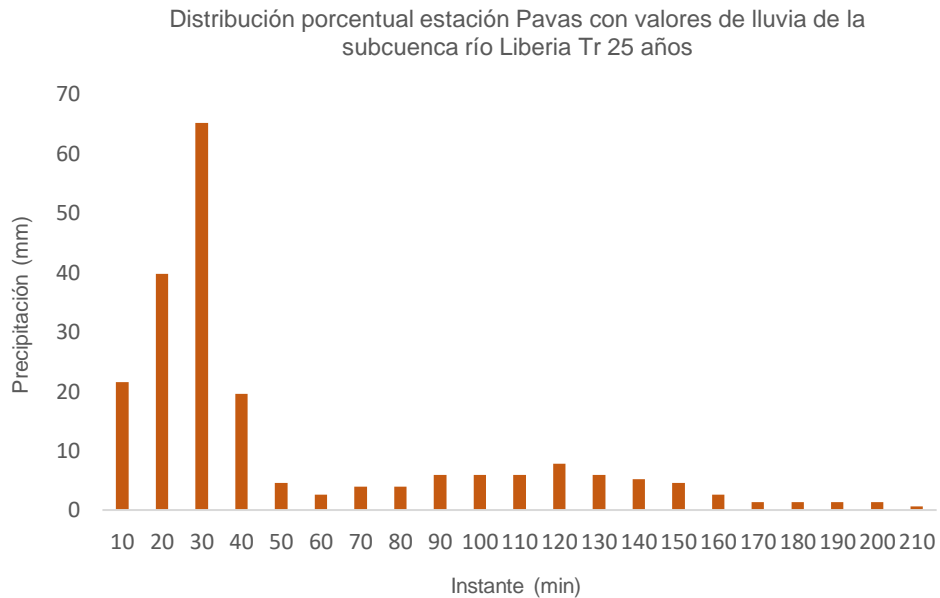
Anexo 9. Hietogramas para distintos períodos de retorno, método 3): uso de información de distribución temporal de estación Pavas. Área de influencia de 78% de la estación 74029 y 22% de la estación 74020.

Hietograma con aproximación característica para Tr 5 años



Fuente: elaboración propia, 2022.

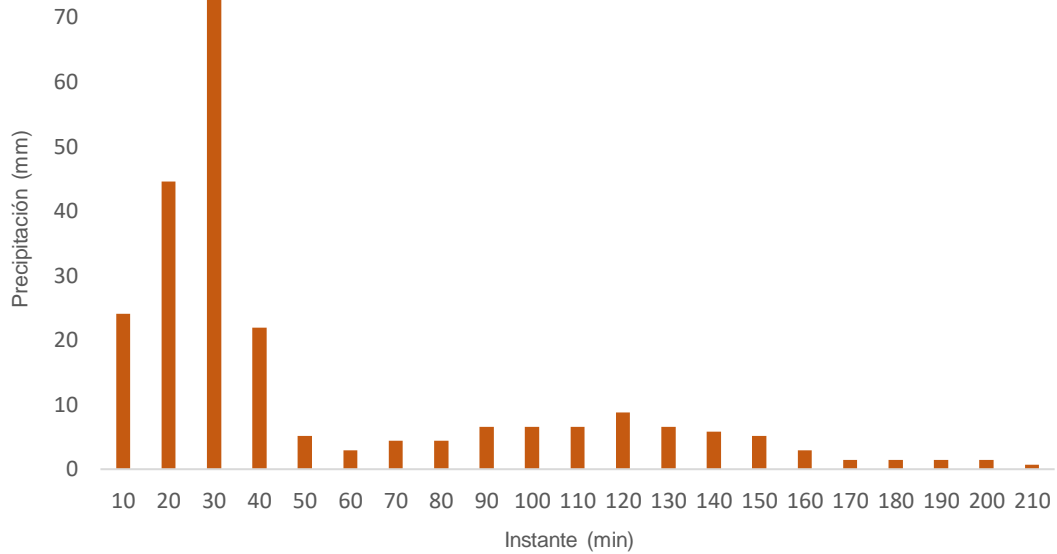
Hietograma con aproximación característica para Tr 25 años



Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma con aproximación característica para Tr 50 años

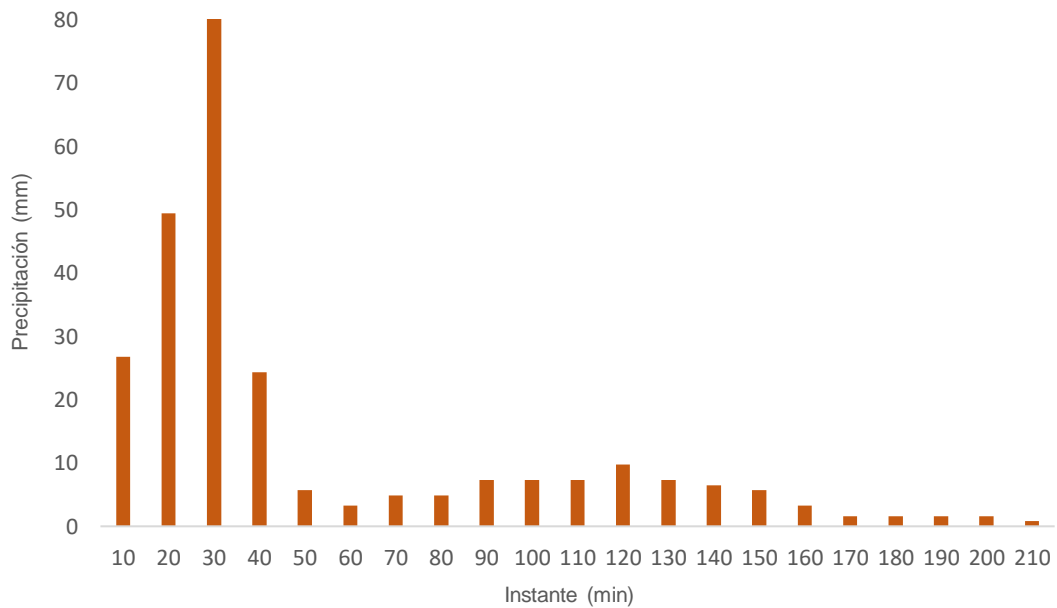
Distribución porcentual estación Pavas con valores de lluvia de la subcuenca río Liberia Tr 50 años



Fuente: elaboración propia, 2022.

Hietograma con aproximación característica para Tr 100 años

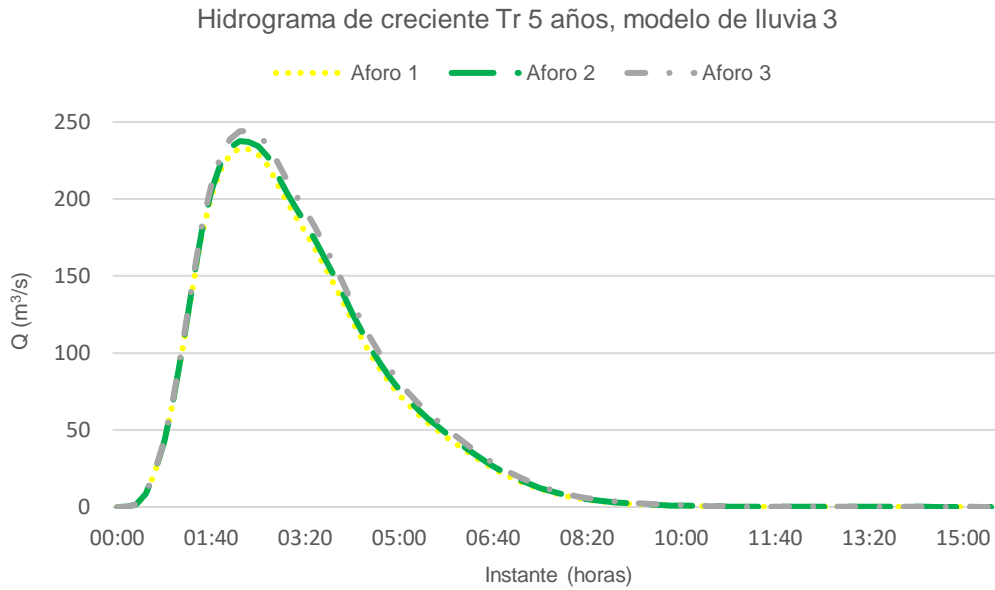
Distribución porcentual estación Pavas con valores de lluvia de la subcuenca río Liberia Tr 100 años



Fuente: elaboración propia, 2022.

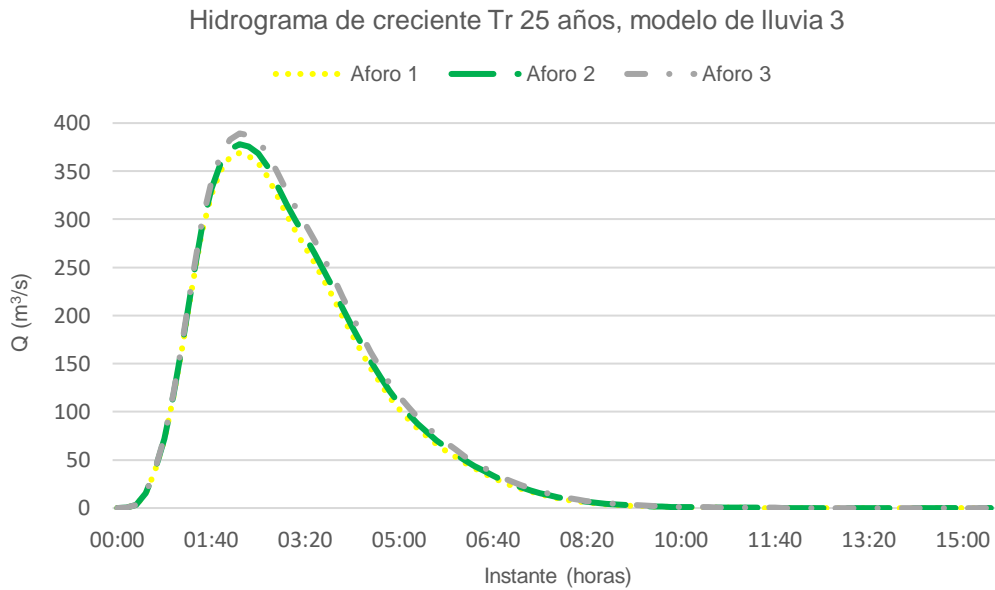
Anexo 10. Hidrogramas para distintos períodos de retorno, método 3): uso de información de distribución temporal de estación Pavas.

Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia y un período de retorno de 5 años.



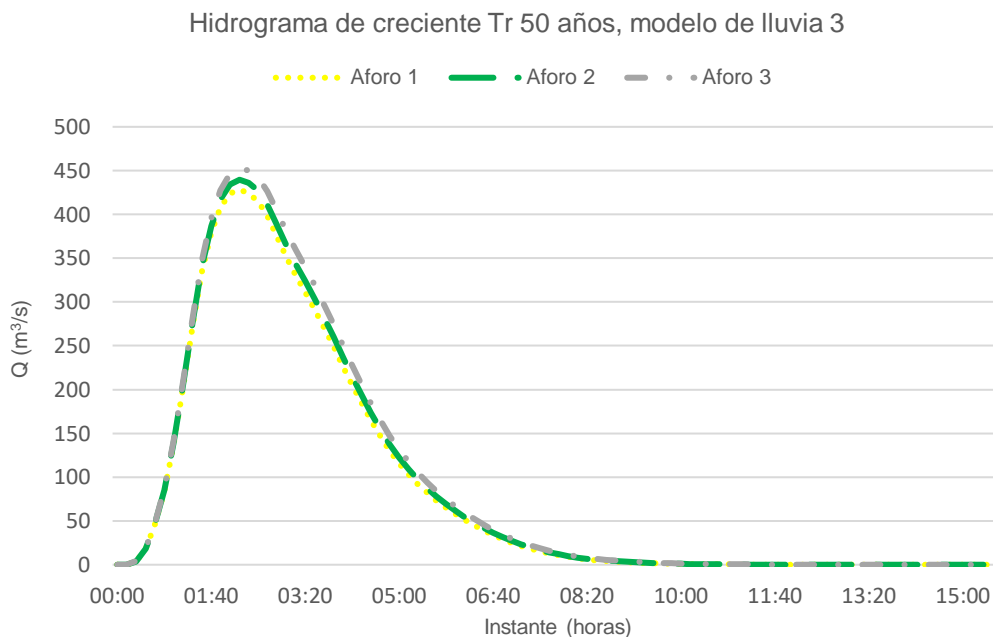
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia y un período de retorno de 25 años.



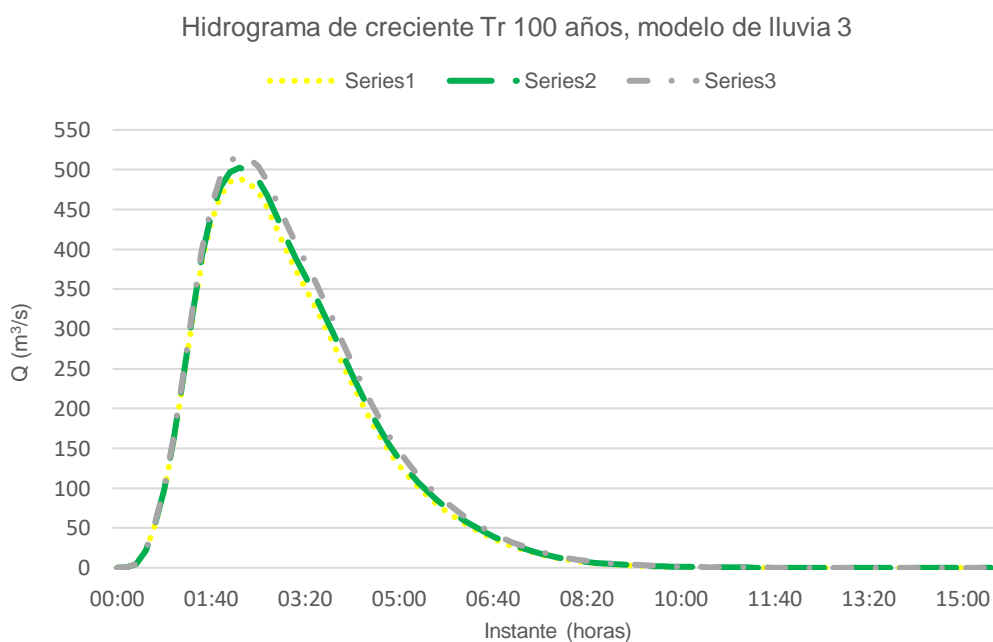
Fuente: elaboración propia, 2022.

Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia y un período de retorno de 50 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Hidrogramas de creciente para cada área de influencia del río Liberia y un período de retorno de 100 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Anexo 11. Evidencia del nivel de altura de la margen izquierda del río Liberia, aforo 1.



Fuente: fotografía propia, 2022

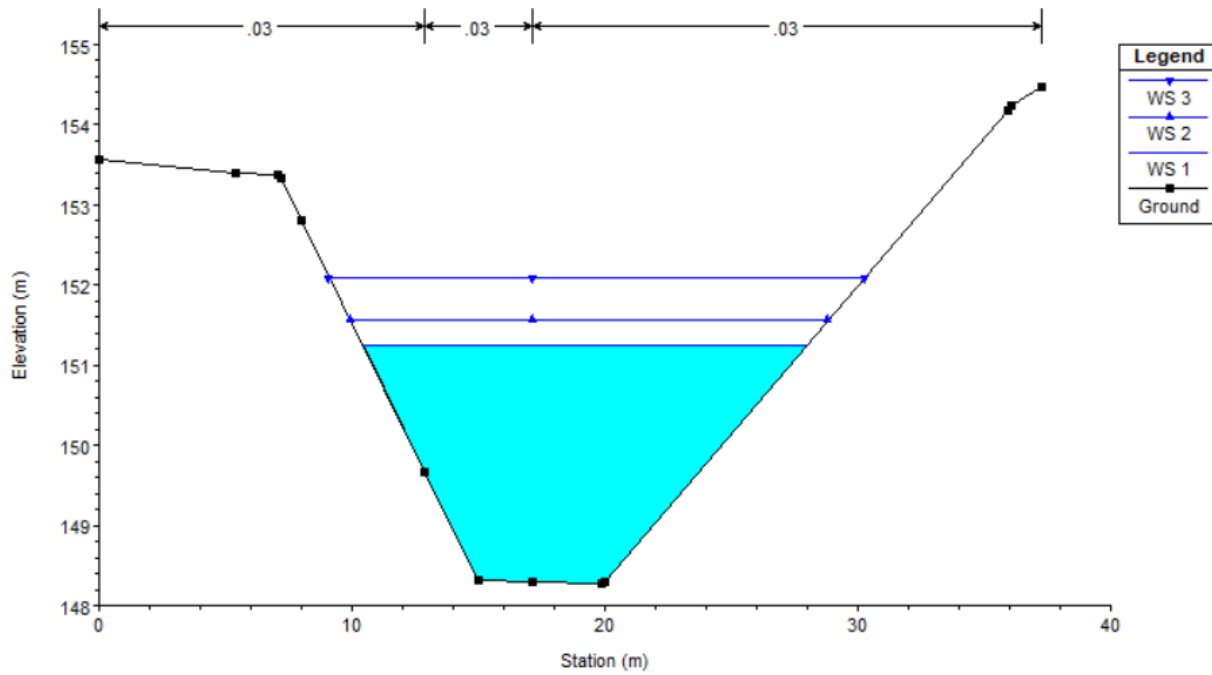
Anexo 12. Salida de desfogue pluvial a la altura de la urbanización barrio chorotega, aforo 1.



Fuente: fotografía propia, 2022.

Anexo 13. Comportamiento de las secciones transversales para un período de retorno de 5 años y 3 escenarios de modelado de lluvia distintos.

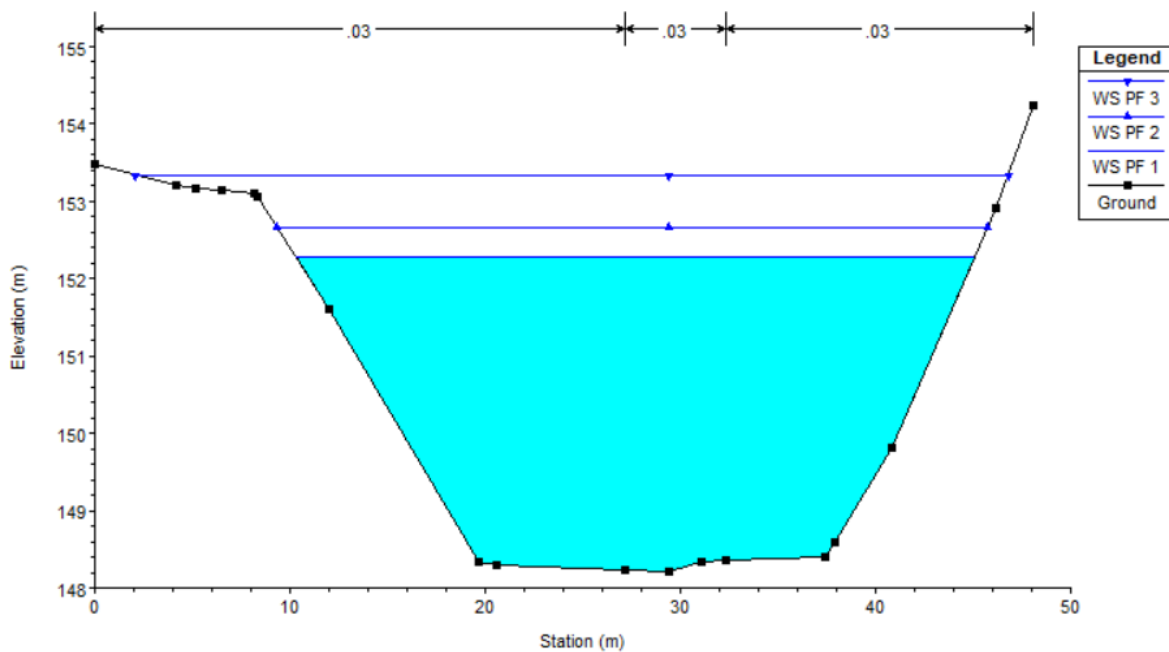
Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 21 TR 5 años.



Nota: W.S 1= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 1, W.S 2= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 2, W.S 3= cota de lámina de agua para modelo de lluvia 3.

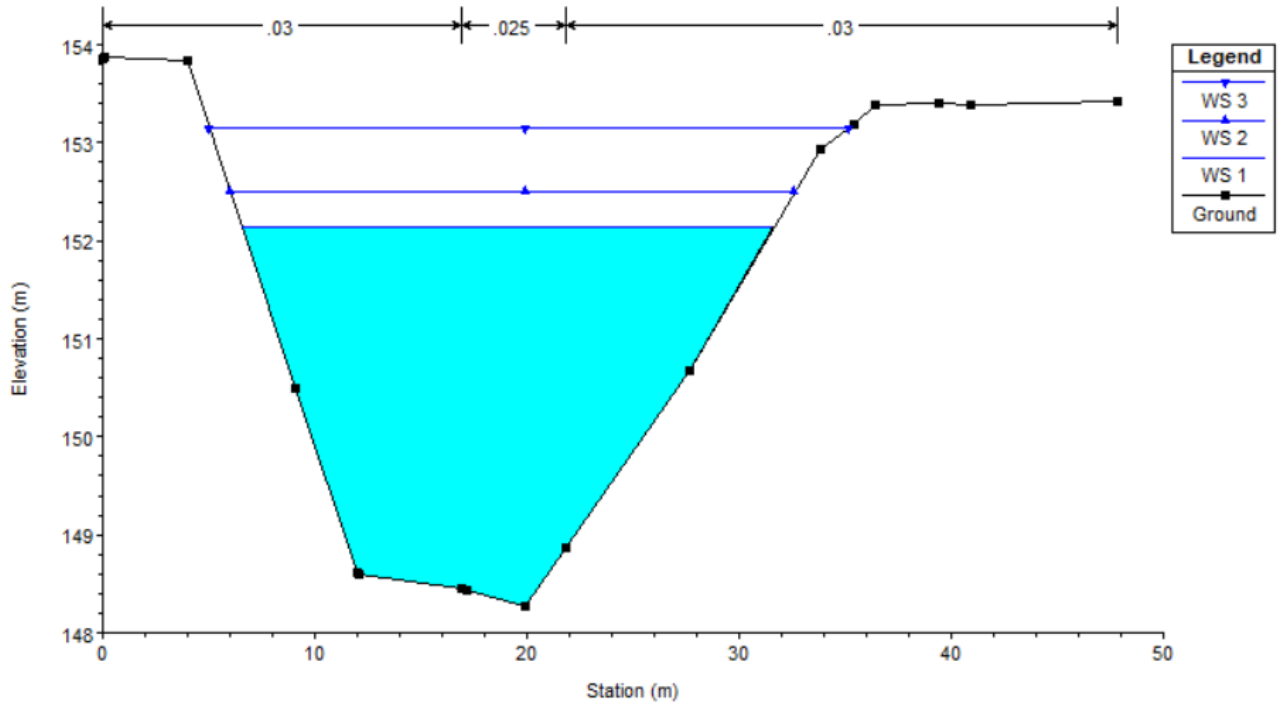
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 60 TR 5 años.



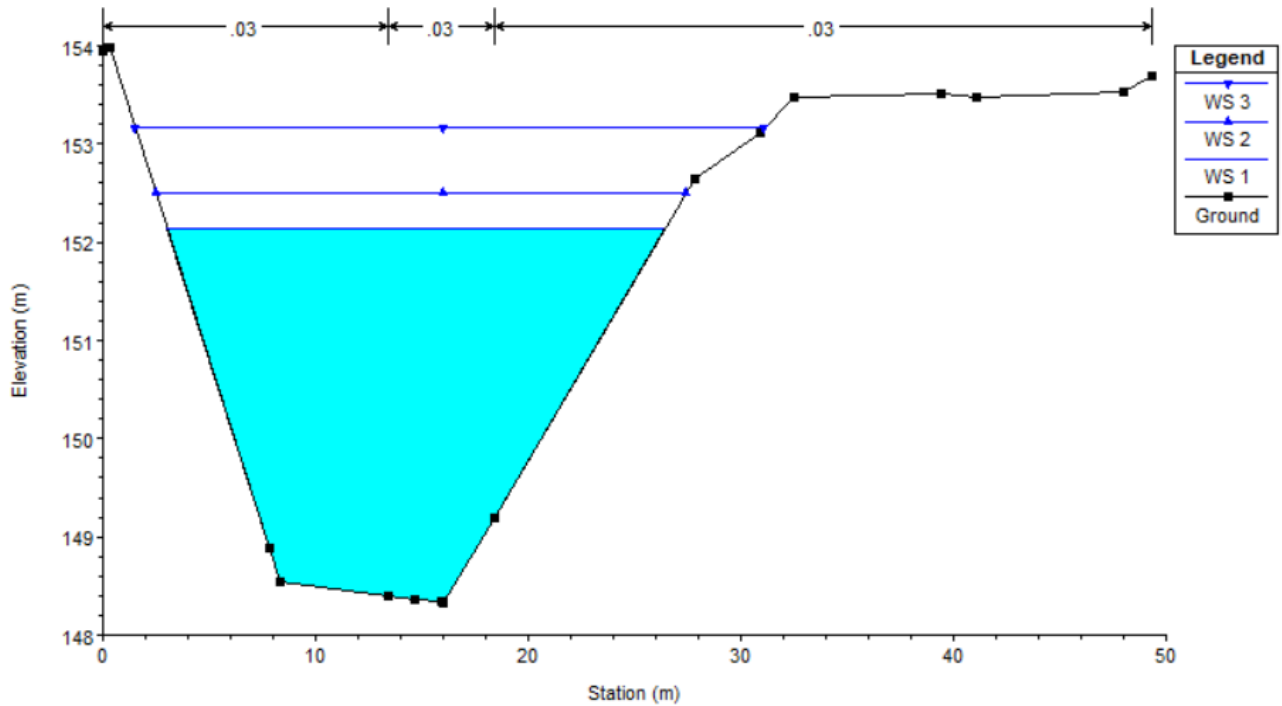
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 97 TR 5 años.



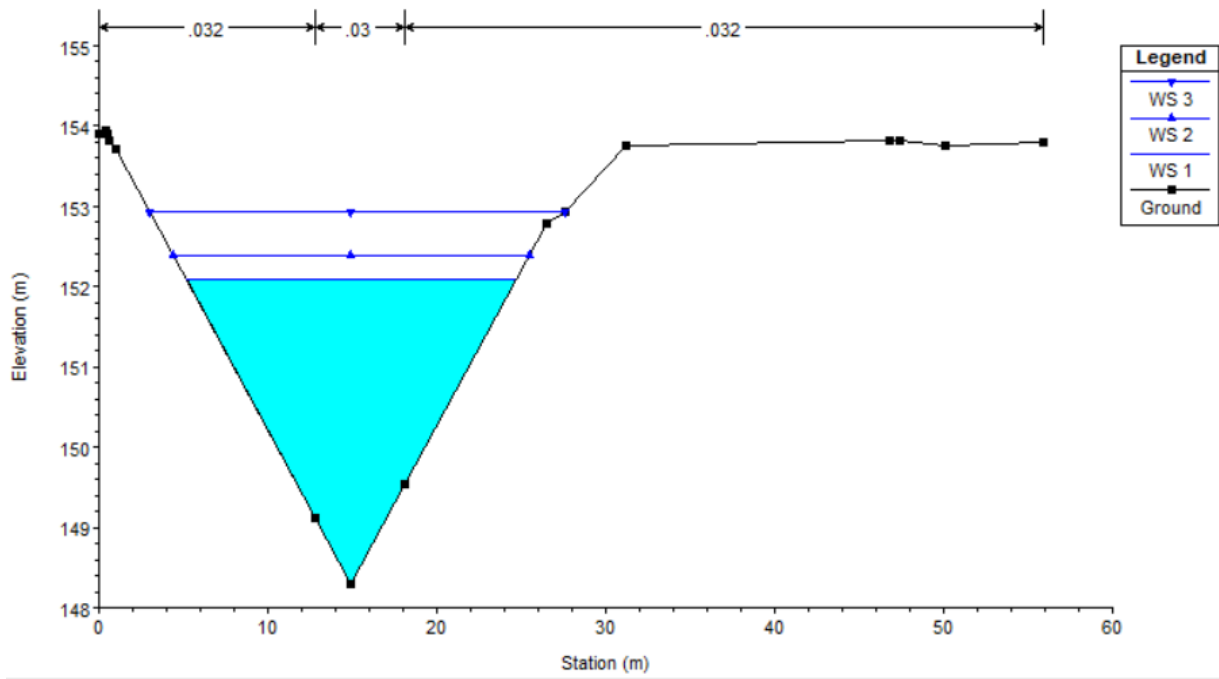
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 102 TR 5 años.



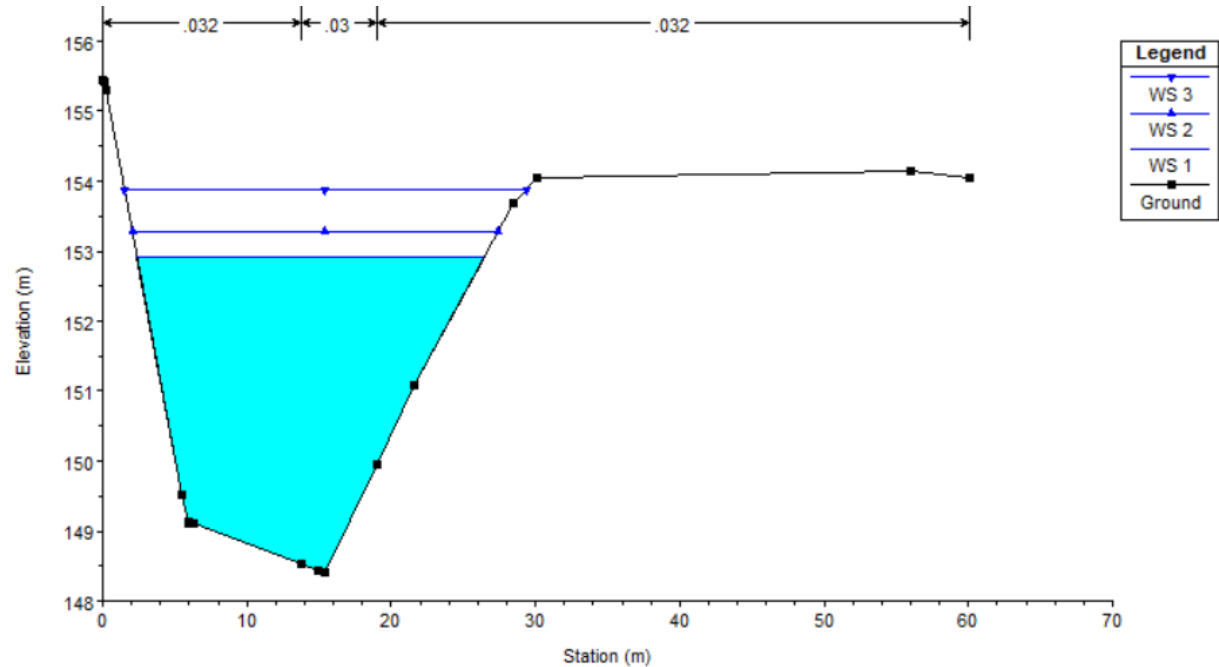
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 116 TR 5 años.



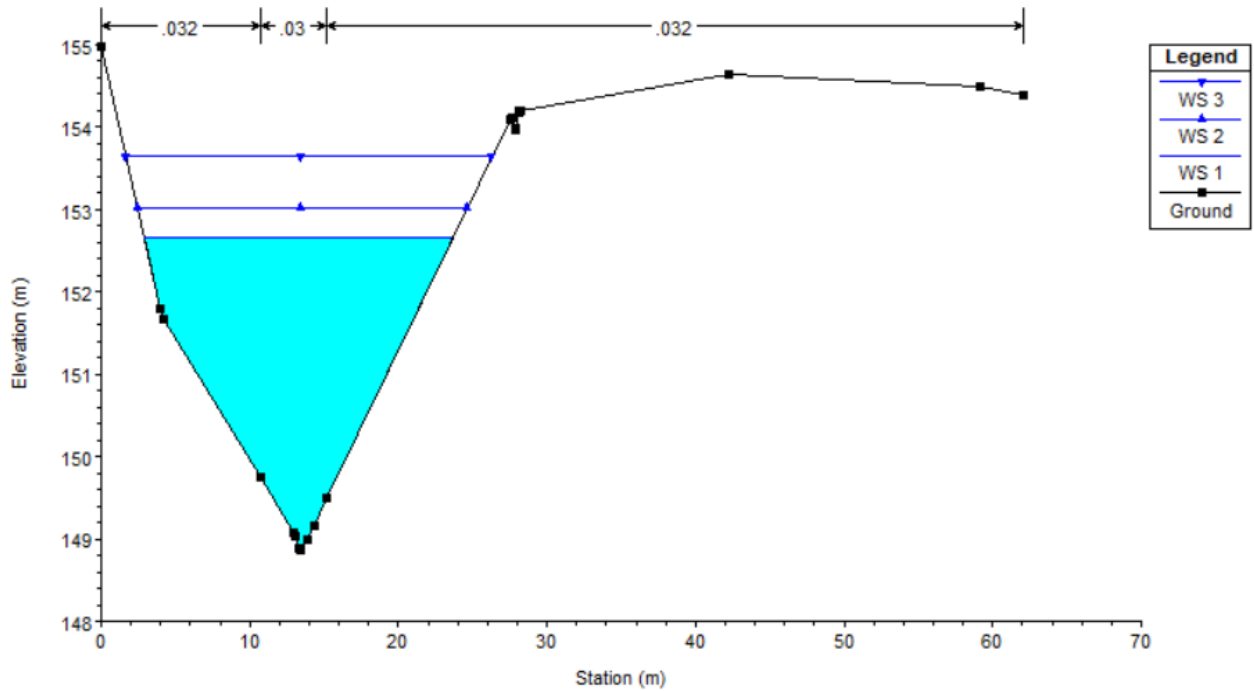
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 133 TR 5 años.



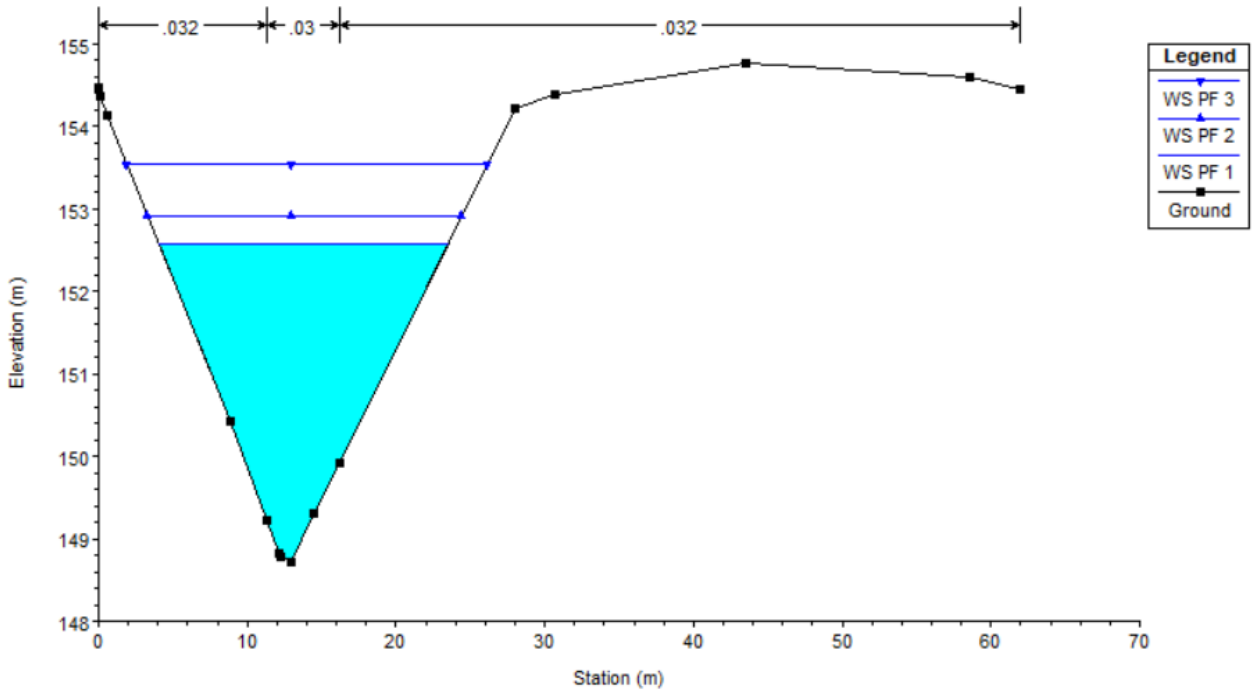
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 183 TR 5 años.



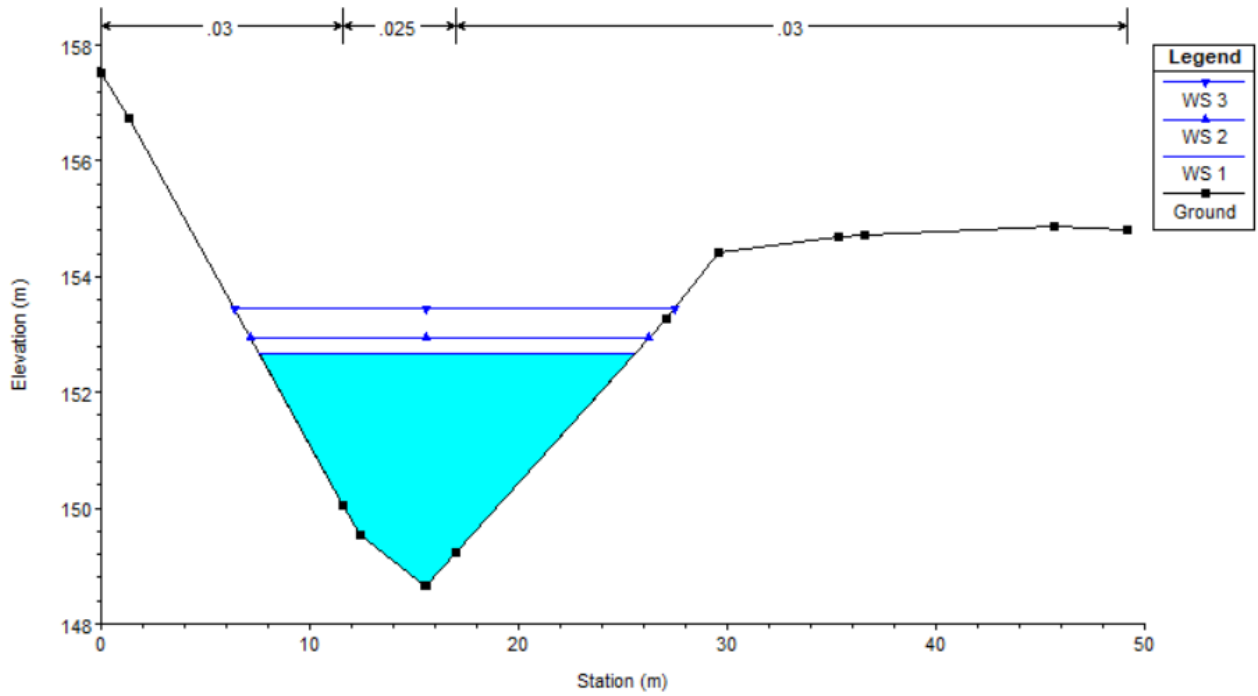
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 195 TR 5 años.



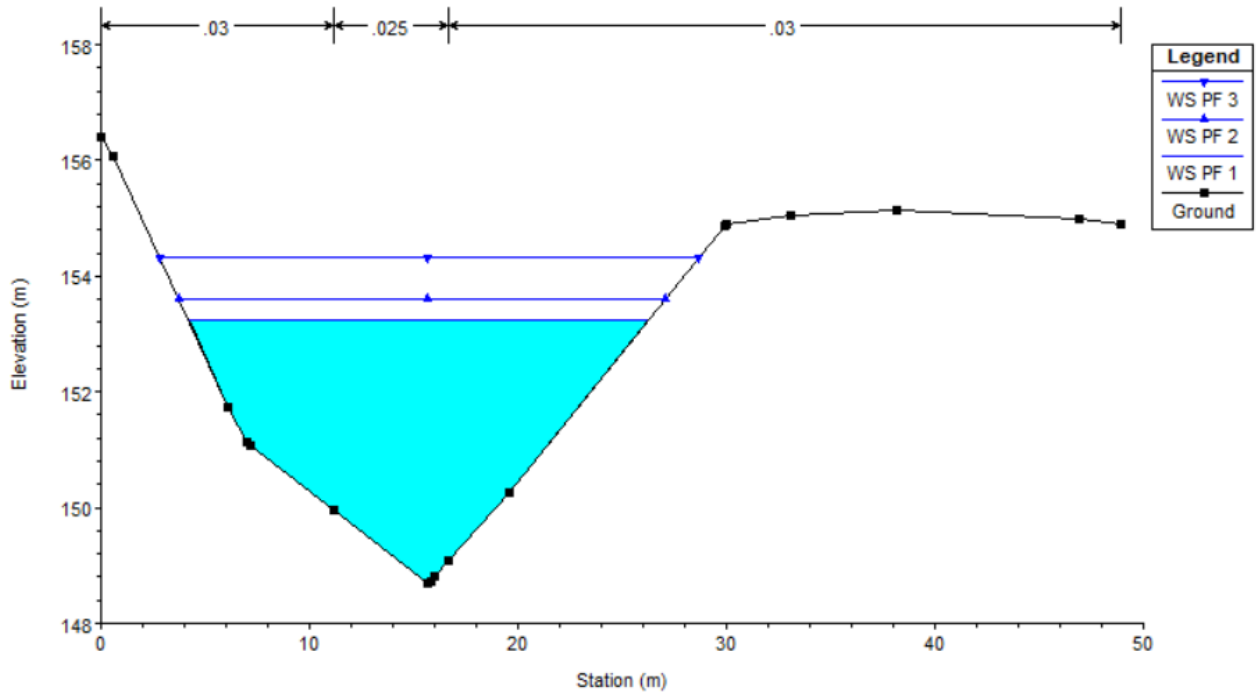
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 218 TR 5 años.



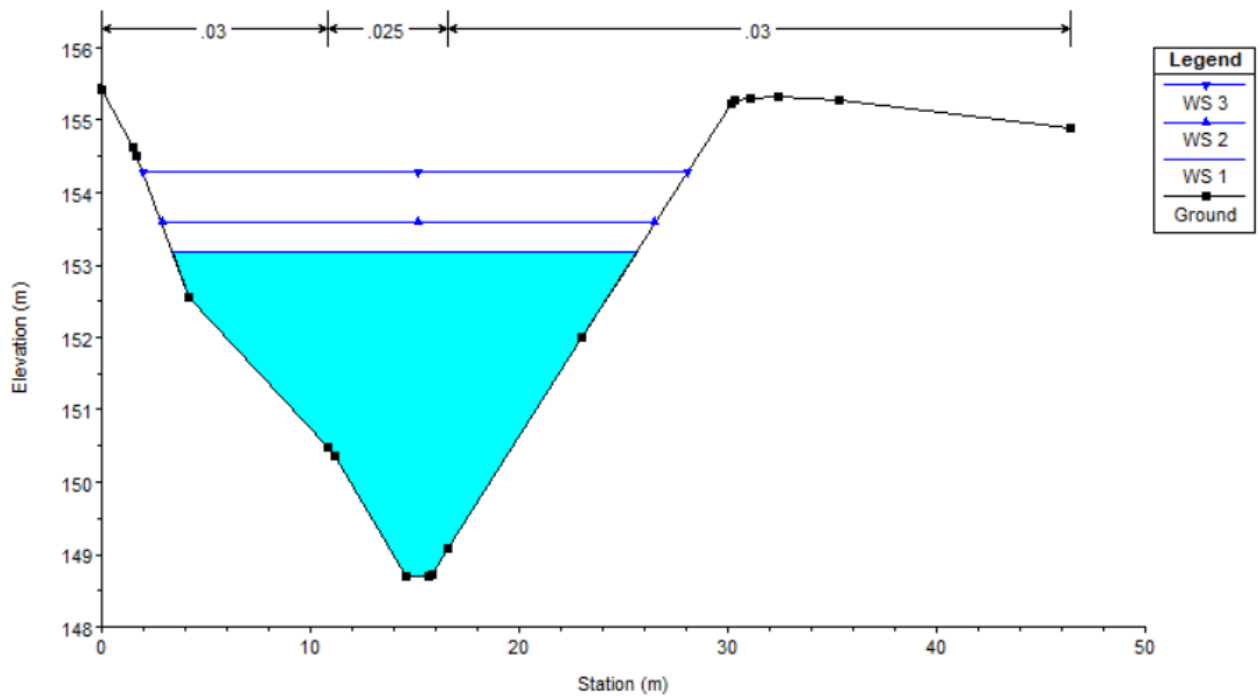
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 232 TR 5 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

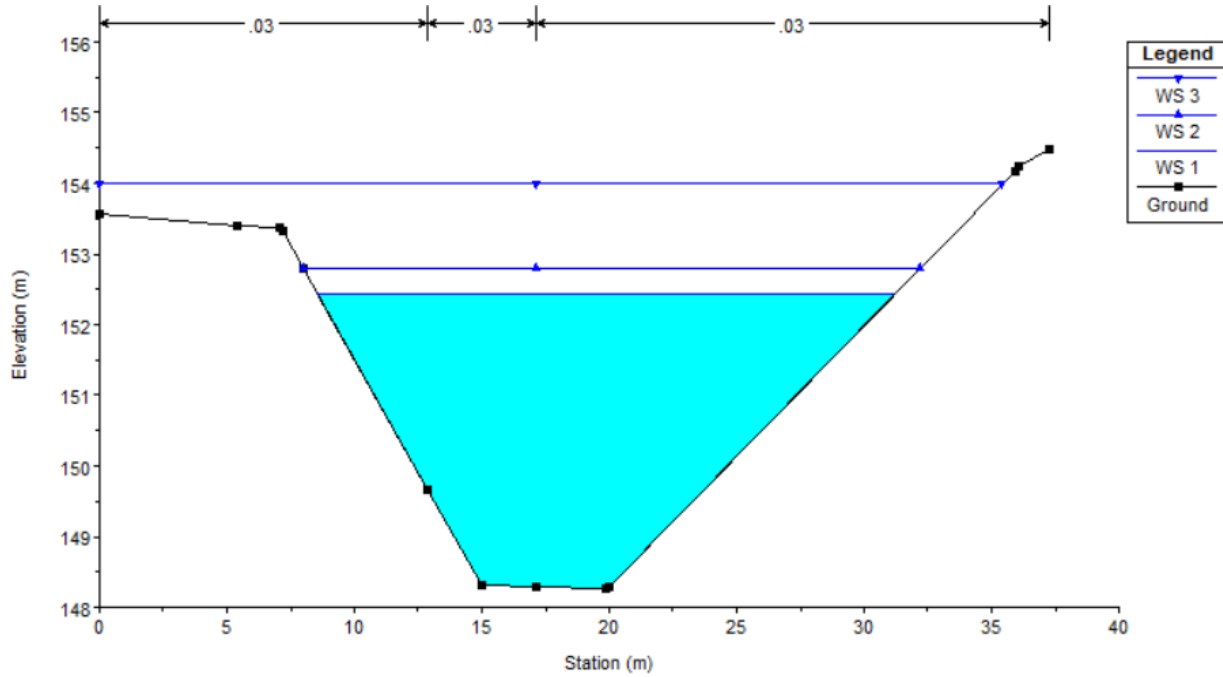
Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 243 TR 5 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

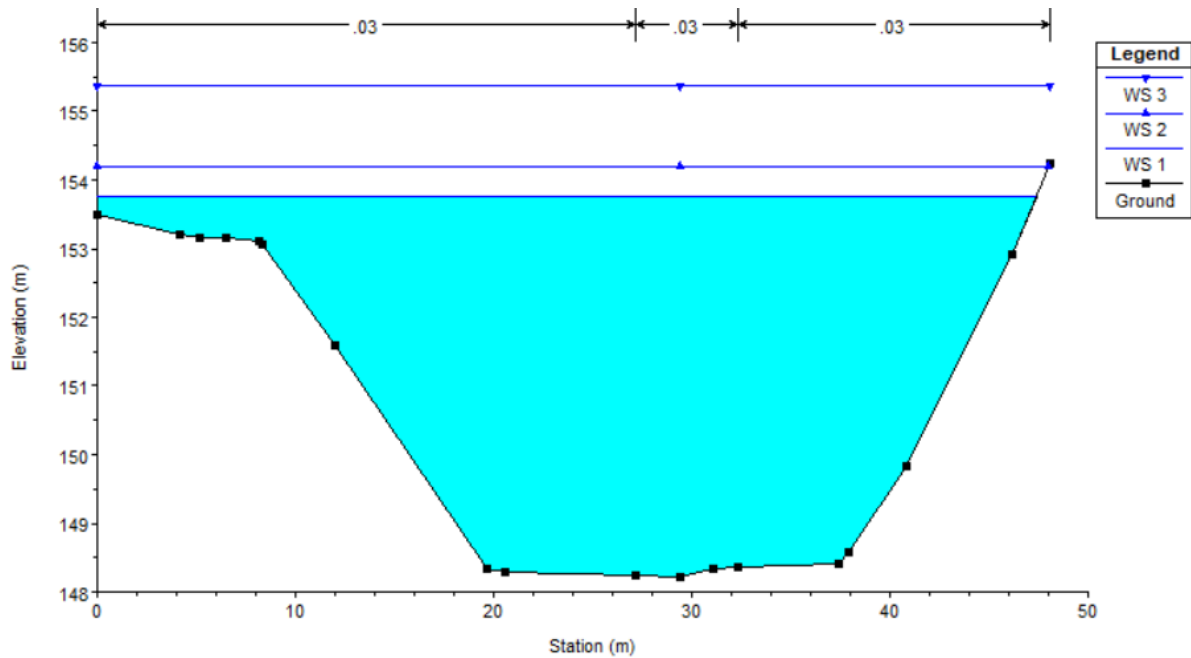
Anexo 14. Comportamiento de las secciones transversales para un período de retorno de 100 años y 3 escenarios de modelado de lluvia distintos.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 21 TR 100 años.



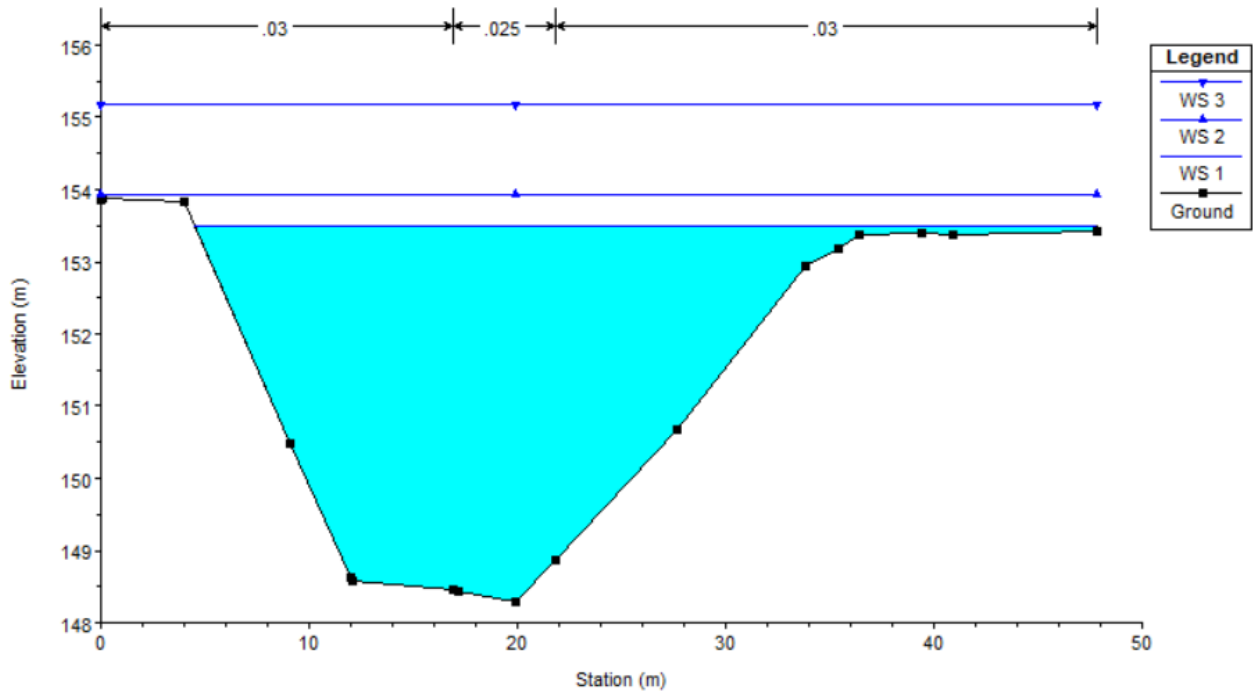
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 60 TR 100 años.



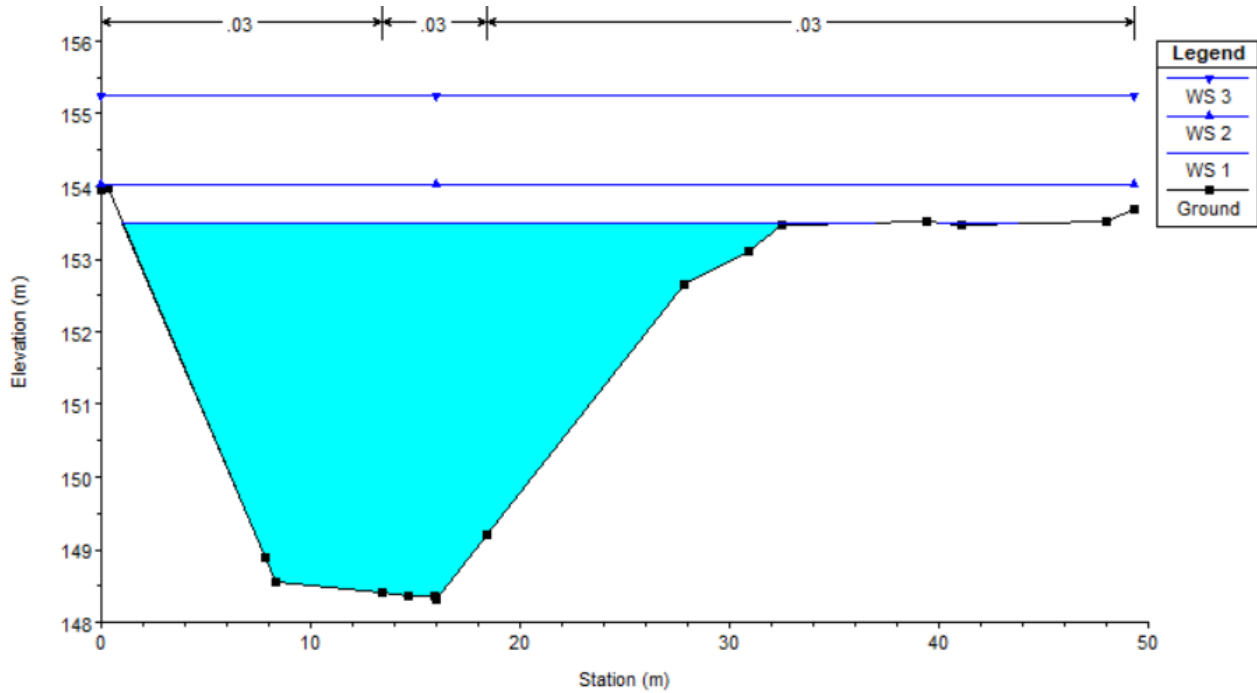
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 97 TR 100 años.



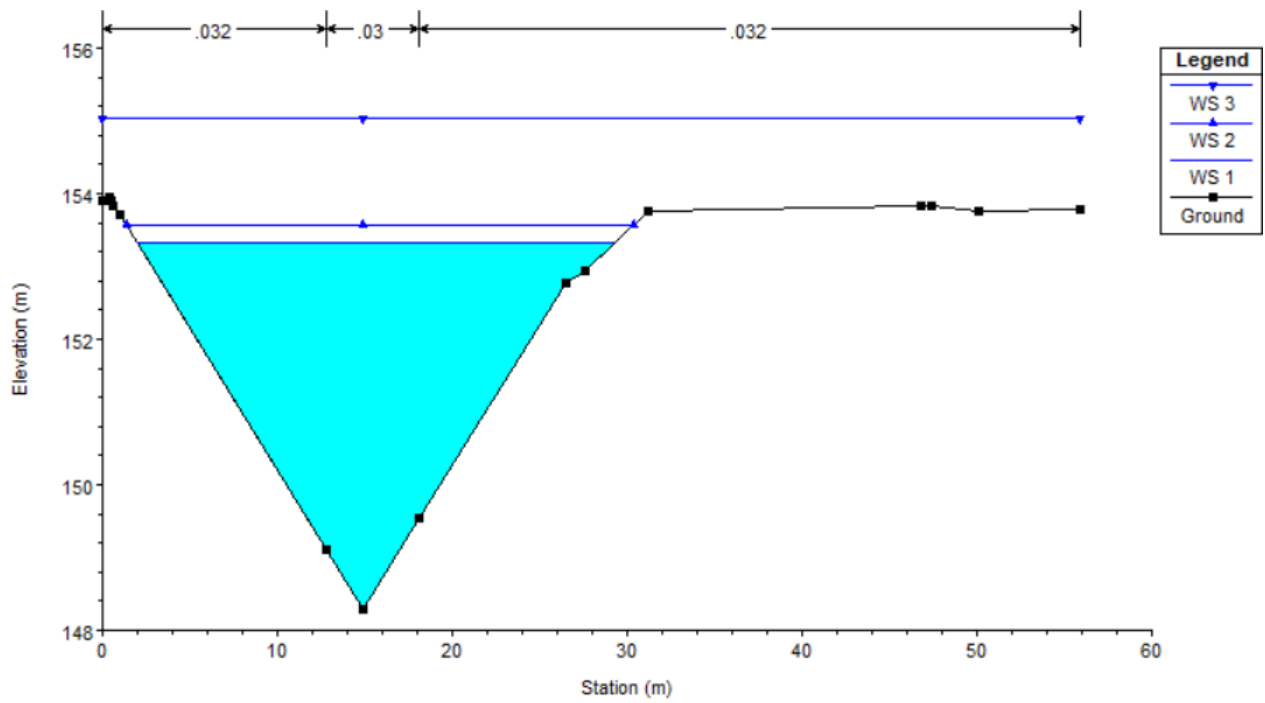
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 102 TR 100 años.



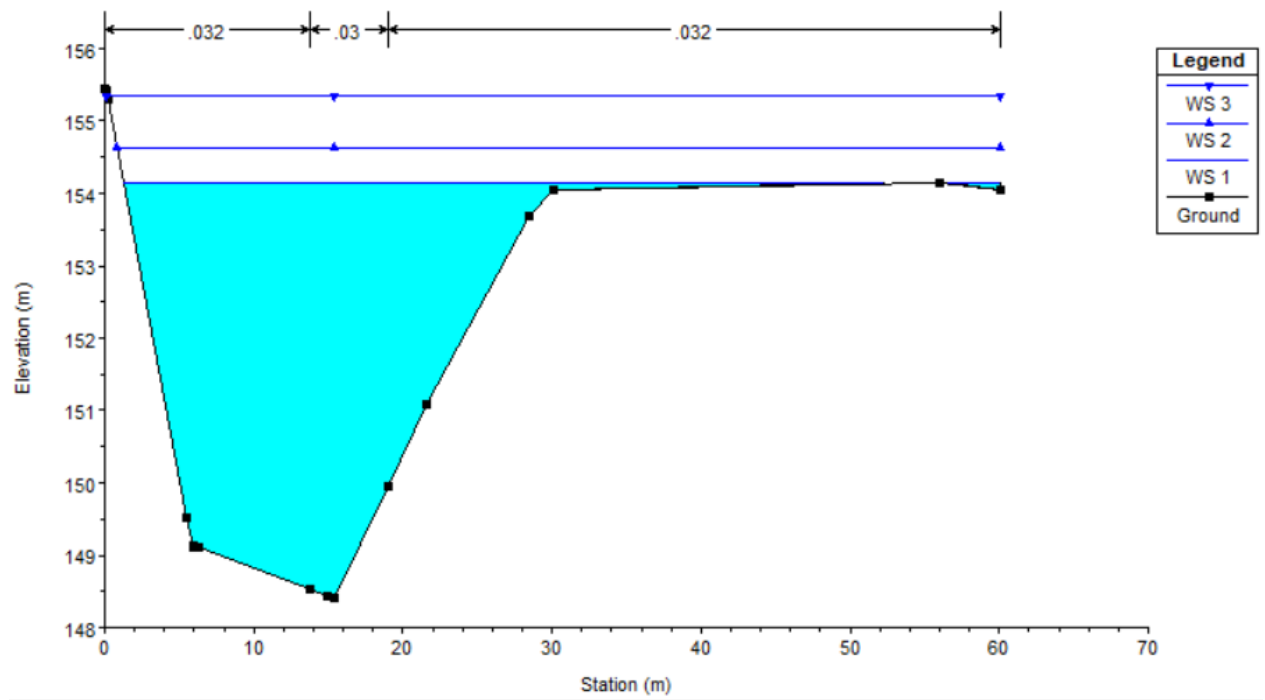
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 116 TR 100 años.



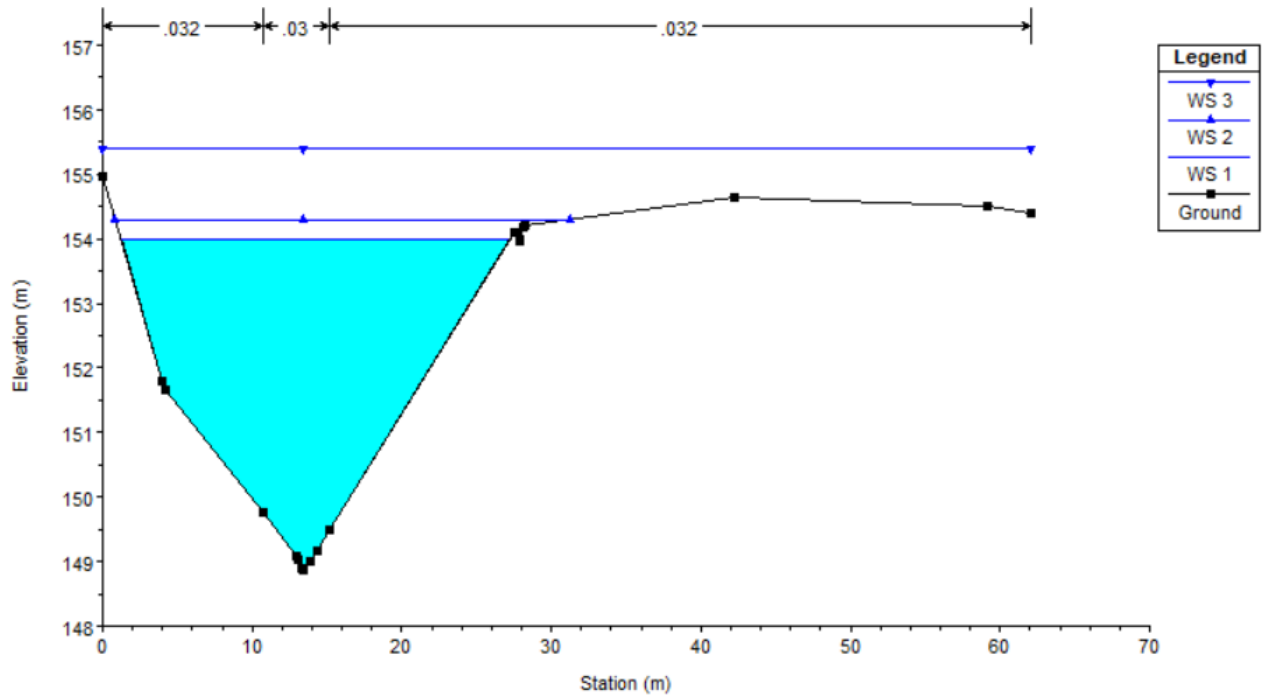
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 133 TR 100 años.



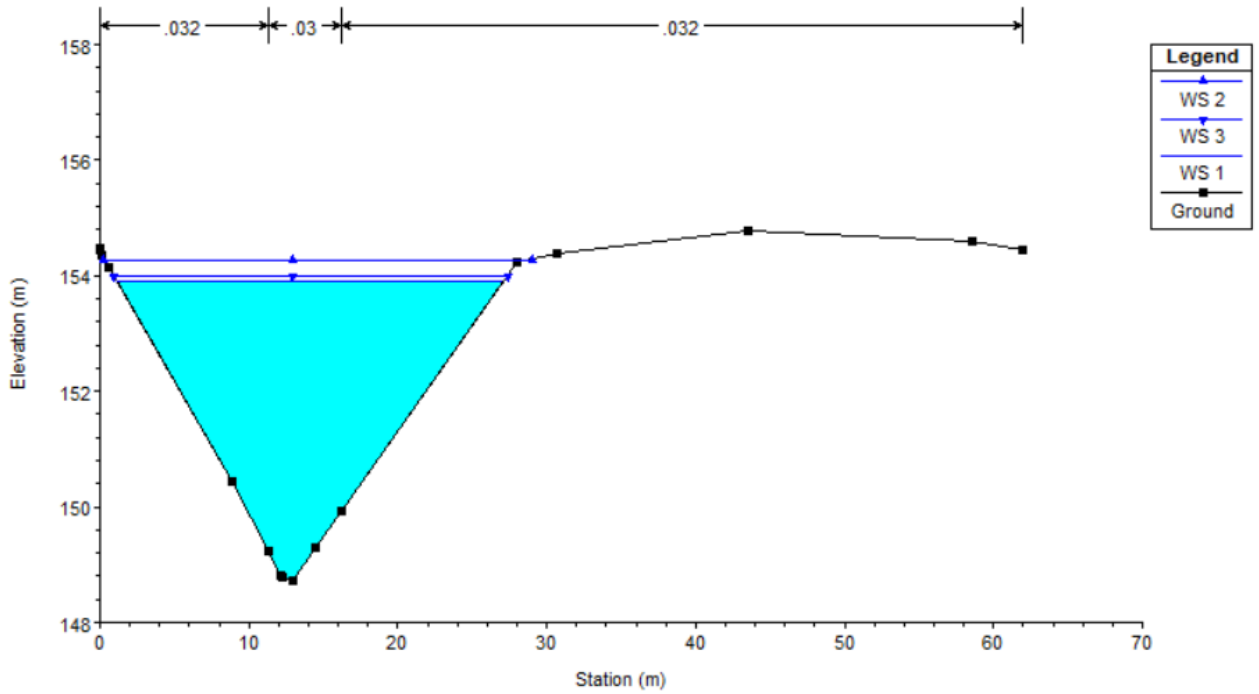
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 183 TR 100 años.



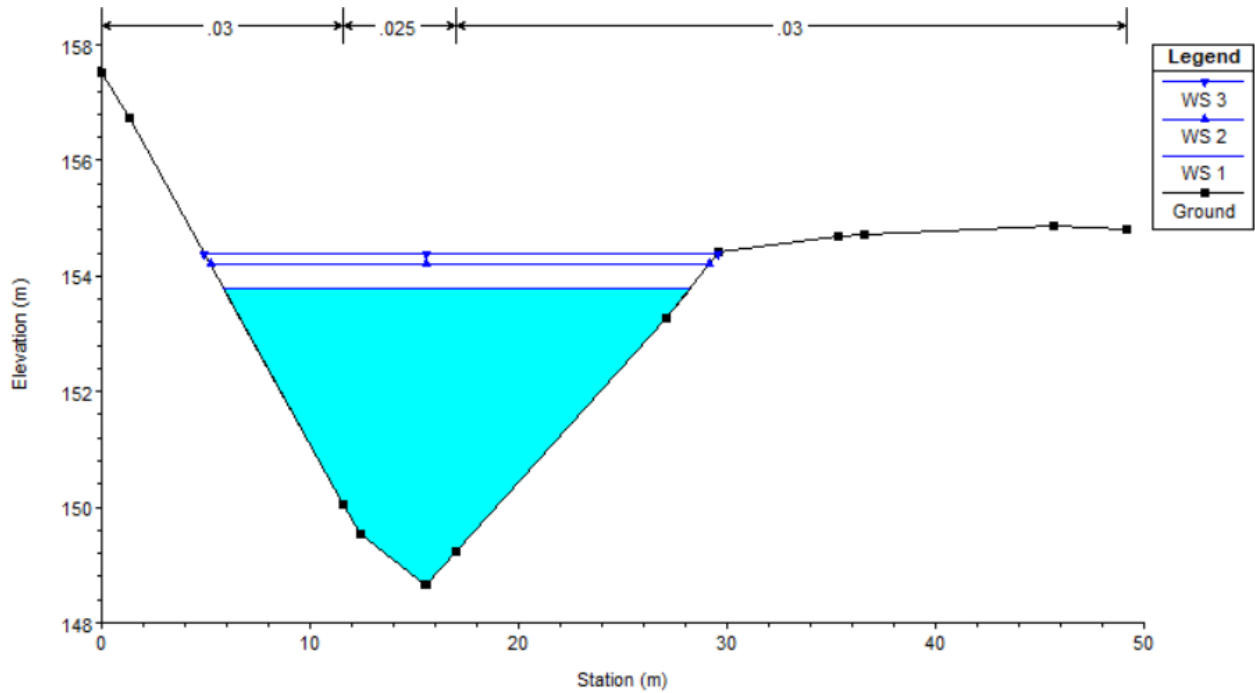
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 195 TR 100 años.



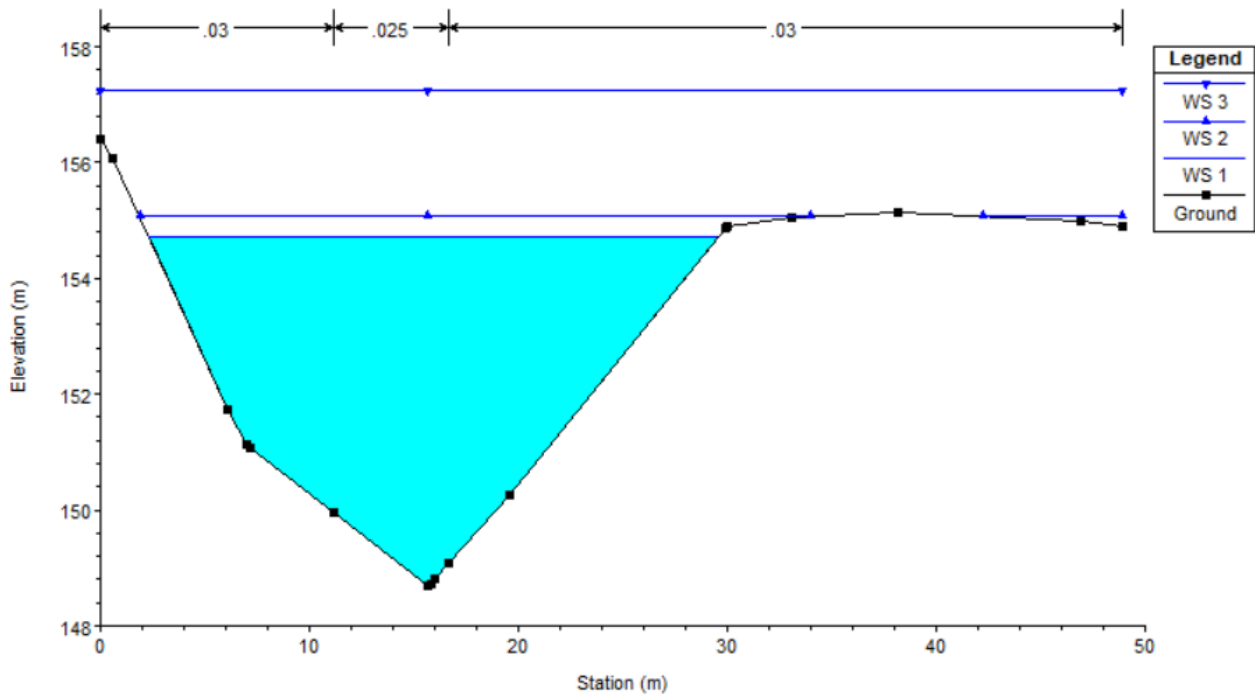
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 218 TR 100 años.



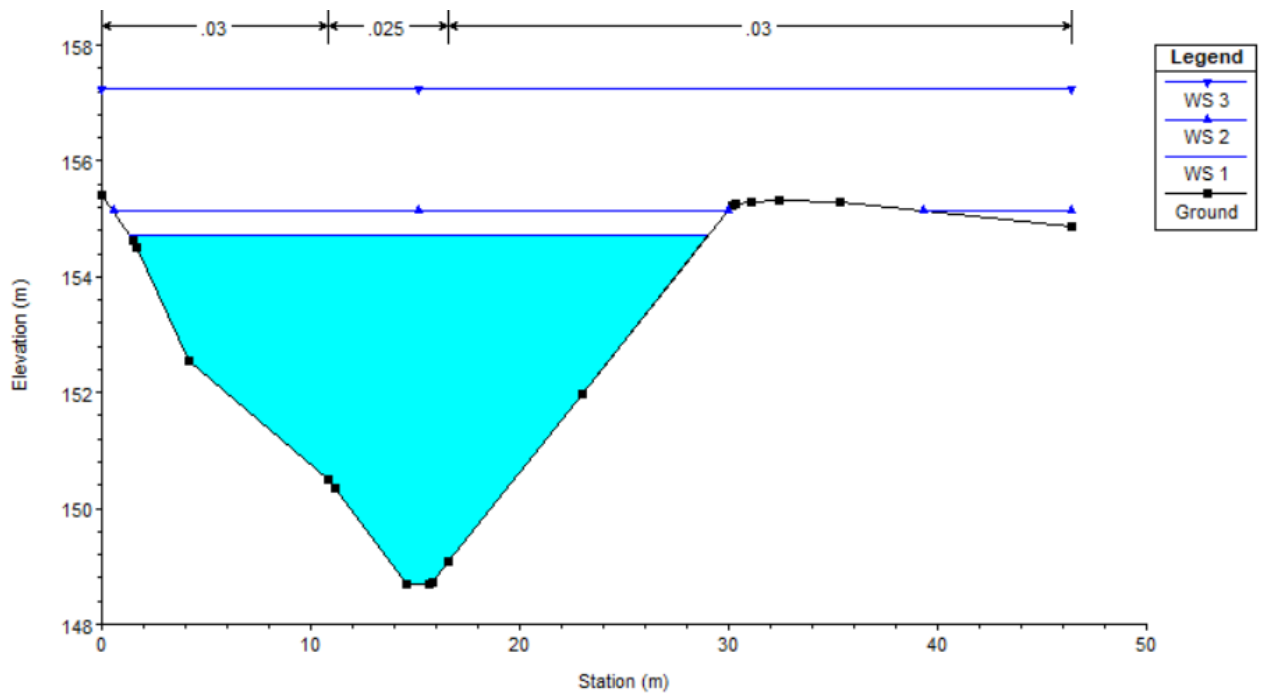
Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 232 TR 100 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Perfil transversal del cauce y cota de agua km 0 + 243 TR 100 años.



Fuente: elaboración propia, 2022.

Anexo 15. Diferencia de alturas producidas por distintas láminas de agua para el periodo de retorno de 100 años tanto en la margen izquierda como derecha según cota de terreno.

Cota de la lámina de agua para un período de retorno de 100 años y modelo de lluvia 1.

Estación	Elevación lámina de agua (m)	Elev.máx margen izq (m)	Elev.máx margen der (m)	Diferencia margen izq (m)	Diferencia margen der (m)	Tirante (m)
km0+21	152.44	153.57	154.47	1.13	2.03	4.17
km0+25	153.24	153.36	154.63	0.12	1.39	4.95
km0+53	153.61	153.20	154.1	-0.41	0.49	5.45
km0+60	153.76	153.49	154.07	-0.27	0.31	5.55
km0+97	153.49	153.88	153.38	0.39	-0.11	5.21
km0+102	153.50	153.98	153.48	0.48	-0.02	5.18
km0+116	153.33	153.94	153.75	0.61	0.42	5.03
km0+126	154.00	154.57	153.94	0.57	-0.06	5.73
km0+133	154.14	155.41	154.05	1.27	-0.09	5.73
km0+143	154.24	156.25	154.24	2.01	0.00	5.65
km0+183	153.98	154.97	154.2	0.99	0.22	5.11
km0+195	153.90	154.48	154.22	0.58	0.32	5.19
km0+218	153.80	157.51	154.41	3.71	0.61	5.14
km0+232	154.72	156.40	155.05	1.68	0.33	6.02
km0+243	154.70	155.42	155.3	0.72	0.60	6.00
km0+251	154.81	154.61	155.36	-0.20	0.55	6.14

Fuente: elaboración propia, 2022.

Cota de la lámina de agua para un período de retorno de 100 años y modelo de lluvia 2.

Estación	Elevación lámina de agua (m)	Elev.máx margen izq (m)	Elev.máx margen der (m)	Diferencia margen izq (m)	Diferencia margen der (m)	Tirante (m)
km0+21	152.80	153.57	154.47	0.77	1.67	4.53
km0+25	153.67	153.36	154.63	-0.31	0.96	5.38
km0+53	154.06	153.20	154.1	-0.86	0.04	5.9
km0+60	154.20	153.49	154.07	-0.71	-0.13	5.99
km0+97	153.93	153.88	153.38	-0.05	-0.55	5.65
km0+102	154.04	153.98	153.48	-0.06	-0.56	5.72
km0+116	153.56	153.94	153.75	0.38	0.19	5.26
km0+126	154.57	154.57	153.94	0.00	-0.63	6.3
km0+133	154.63	155.41	154.05	0.78	-0.58	6.22
km0+143	154.61	156.25	154.24	1.64	-0.37	6.02
km0+183	154.30	154.97	154.2	0.67	-0.10	5.43
km0+195	154.28	154.48	154.22	0.20	-0.06	5.57
km0+218	154.20	157.51	154.41	3.31	0.21	5.54
km0+232	155.07	156.40	155.05	1.33	-0.02	6.37
km0+243	155.13	155.42	155.3	0.29	0.17	6.43
km0+251	155.24	154.61	155.36	-0.63	0.12	6.57

Fuente: elaboración propia, 2022.

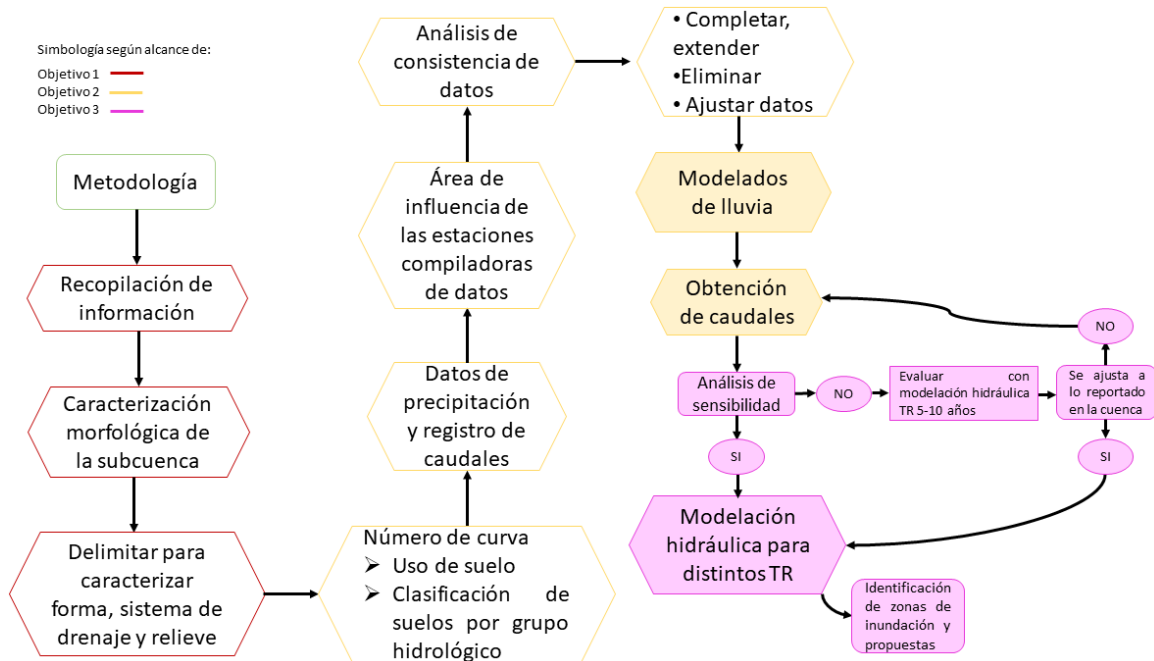
Cota de la lámina de agua para un período de retorno de 100 años y modelo de lluvia 3.

Estación	Elevación lámina de agua (m)	Elev.máx margen izq (m)	Elev.máx margen der (m)	Diferencia margen izq (m)	Diferencia margen der (m)	Tirante (m)
km0+21	154.00	153.57	154.47	-0.43	0.47	5.73
km0+25	154.87	153.36	154.63	-1.51	-0.24	6.58
km0+53	155.21	153.20	154.1	-2.01	-1.11	7.05
km0+60	155.36	153.49	154.07	-1.87	-1.29	7.15
km0+97	155.18	153.88	153.38	-1.30	-1.80	6.9
km0+102	155.26	153.98	153.48	-1.28	-1.78	6.94
km0+116	155.04	153.94	153.75	-1.10	-1.29	6.74
km0+126	155.29	154.57	153.94	-0.72	-1.35	7.02
km0+133	155.34	155.41	154.05	0.07	-1.29	6.93
km0+143	155.34	156.25	154.24	0.91	-1.10	6.75
km0+183	155.41	154.97	154.2	-0.44	-1.21	6.54
km0+195	154.00	154.48	154.22	0.48	0.22	5.29
km0+218	154.39	157.51	154.41	3.12	0.02	5.73
km0+232	157.25	156.40	155.05	-0.85	-2.20	8.55
km0+243	157.23	155.42	155.3	-1.81	-1.93	8.53
km0+251	157.20	154.61	155.36	-2.59	-1.84	8.53

Fuente: elaboración propia, 2022.

Anexo 16. Resumen de metodología según oportunidad de mejora identificada en el desarrollo del proyecto.

Flujograma del diseño metodológico actualizado con base en las experiencias vinculadas al proyecto.



Fuente: elaboración propia, 2022.