

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones representan uno de los desafíos ambientales más complejos a nivel global, no solo por su recurrencia, sino por el impacto directo que ejercen sobre la integridad de las poblaciones y la infraestructura civil. En regiones con marcada estacionalidad climática, como el Chaco boliviano, estos eventos se intensifican notablemente, las precipitaciones suelen concentrarse en episodios de corta duración, pero de gran intensidad, lo que desencadena crecidas repentinas en cauces que, durante gran parte del año, permanecen inactivos (Chow et al., 1988; Tucci, 2007).

La ciudad de Yacuiba registra una precipitación media anual de 1126.0 mm, de acuerdo con los registros históricos de la estación Yacuiba del SENAMHI para el periodo 1949-2017. El régimen pluviométrico de la zona se caracteriza por una marcada estacionalidad; meses como enero y febrero presentan promedios superiores a los 190 mm, habiendo registrado máximos mensuales que superan los 500 mm en años excepcionalmente húmedos. Esta concentración de lluvias en periodos cortos favorece la generación de escorrentías superficiales masivas, lo que deriva en incrementos drásticos de los caudales en las quebradas que atraviesan el área urbana.

Bajo este escenario, el crecimiento demográfico en el Distrito 2 ha forzado la ocupación de terrenos próximos a cauces naturales. El área de estudio comprende principalmente los barrios Aserradero y Chaqueño, donde la vulnerabilidad es crítica debido a la ubicación de viviendas en zonas susceptibles a desbordamientos y a la limitada sección hidráulica para evacuar las crecidas.

La complejidad del sector radica en que la quebrada actúa como receptor de los sistemas de drenaje pluvial de la ciudad. Al inicio del tramo de estudio, en el Barrio Aserradero, confluyen dos canales principales que recolectan el flujo de zonas pavimentadas, como la avenida San Martín. Estos aportes, provenientes de superficies impermeables, eliminan la capacidad de infiltración del suelo y aceleran la respuesta del cauce, concentrando grandes volúmenes de agua en poco tiempo y aumentando el

riesgo de inundación antes de que el flujo atravesase el Barrio Chaqueño, punto donde finaliza el análisis del presente modelo.

Uno de los mayores desafíos para el estudio de estos fenómenos en la zona es la ausencia de registros hidrométricos directos en la quebrada. Ante esta limitación, la modelación numérica mediante HEC-RAS, integrada con herramientas de ArcGIS, se convierte en la alternativa técnica más sólida para simular escenarios de riesgo. En tal sentido, la presente investigación tiene como propósito estimar los caudales máximos y determinar las manchas de inundación para periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, proporcionando una base científica para la prevención de desastres en el área urbana de Yacuiba.

JUSTIFICACIÓN

La relevancia de esta investigación surge ante la necesidad de abordar la inestabilidad hidrológica en el área urbana de Yacuiba, donde la expansión demográfica ha desplazado la planificación hidráulica por una ocupación desordenada de las zonas de servidumbre. En el Distrito 2, específicamente en los barrios Aserradero y Chaqueño, la combinación de una topografía con pendientes pronunciadas y una infraestructura de drenaje insuficiente ha configurado un escenario de alta vulnerabilidad frente a las precipitaciones extremas del Chaco.

Desde una perspectiva técnica, la carencia de estaciones hidrométricas en las quebradas locales imposibilita el uso de métodos estadísticos directos. Ante este vacío de información, el empleo de métodos de estimación indirecta basados en los parámetros físicos de la cuenca, como el tipo de suelo y la pendiente, se presenta como la metodología más confiable para determinar caudales máximos. La implementación de HEC-RAS permite transformar los datos de la cuenca en perfiles de flujo precisos que, al ser procesados en ArcGIS, facilitan una representación real del riesgo.

Como aporte sustancial desde la Ingeniería Forestal, el estudio analiza cómo la pérdida de cobertura vegetal por la expansión urbana ha alterado los procesos de infiltración. La sustitución de la vegetación nativa por superficies impermeables y edificaciones en

los límites de la quebrada reduce el tiempo de concentración de la cuenca, lo cual acelera la escorrentía superficial y aumenta los caudales de pico (Chow et al., 1988; Tucci, 2007). Esta dinámica es fundamental para proponer soluciones de gestión, considerando que la impermeabilización del suelo urbano es un factor determinante en la magnitud de las inundaciones actuales, tal como lo señalan diversos estudios sobre hidrología urbana en cuencas degradadas (Pizarro et al., 2008).

En el plano social, esta investigación identifica sectores vulnerables donde la integridad de los habitantes está en riesgo. La cartografía resultante constituye un instrumento esencial para que el Gobierno Autónomo Municipal de Yacuiba (GAMY) ejerza sus facultades de ordenamiento territorial, establecidas en la Constitución Política del Estado y la Ley N° 031 Marco de Autonomías. Al amparo de la Ley Autónoma Municipal N° 16/2018 de Gestión de Riesgos, los resultados de este modelo proporcionan la base técnica necesaria para transitar hacia una planificación urbana preventiva y resiliente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la ciudad de Yacuiba, la interacción entre eventos hidrológicos extremos y una configuración urbana en constante expansión ha generado un escenario de riesgo creciente. El Distrito 2, específicamente en el área de influencia de los barrios Aserradero y Chaqueño, enfrenta desbordamientos recurrentes que no solo afectan la transitabilidad, sino que ponen en peligro la infraestructura habitacional y la seguridad de las familias asentadas en las márgenes de la quebrada.

Este fenómeno se ve agravado por la impermeabilización del suelo y la canalización de drenajes pluviales que descargan directamente en el cauce, lo que altera el comportamiento natural de la escorrentía. Sin embargo, la gestión de este riesgo se ve limitada por una brecha de información esencial: la falta de datos hidrométricos históricos que permitan conocer con exactitud la magnitud de las crecidas. Ante esta incertidumbre técnica, surge la necesidad de aplicar herramientas de simulación numérica para predecir el comportamiento del agua frente a diferentes escenarios de lluvia.

Por lo expuesto, se plantea la siguiente interrogante de investigación:

¿Cuáles son los caudales máximos asociados a periodos de retorno de 10, 50 y 100 años que generan condiciones de desbordamiento e inundación en el cauce del Distrito 2 de la ciudad de Yacuiba, obtenidos mediante la aplicación del modelo hidrológico HEC-RAS?

OBJETIVOS

Objetivo General

Estimar los caudales máximos del cauce en el área urbana de la ciudad de Yacuiba e identificar las zonas con riesgo de inundación para diferentes periodos de retorno, empleando el modelo hidrológico HEC-RAS y el software ArcGIS.

Objetivos Específicos

- Determinar los caudales máximos en el Distrito 2 de la ciudad de Yacuiba para periodos de retorno de 10, 50 y 100 años, mediante el análisis estadístico de precipitaciones máximas y métodos de estimación hidrológica analítica.
- Cartografiar los sectores más vulnerables al riesgo de inundación mediante el uso de herramientas geomáticas para la delimitación espacial de zonas susceptibles.
- Proponer medidas de prevención orientadas a minimizar los impactos negativos de las inundaciones en la zona urbana de la ciudad de Yacuiba.

HIPÓTESIS

La estimación de caudales máximos mediante modelación hidrológica e hidráulica permitirá identificar con mayor precisión las áreas susceptibles a inundación en el Distrito 2 de la ciudad de Yacuiba para diferentes periodos de retorno.

CAPITULO I
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CAPITULO I

1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Hidrología y el ciclo hidrológico en cuencas urbanas

La hidrología es la ciencia natural que estudia la ocurrencia, circulación y distribución del agua en la superficie terrestre y su interacción con el medio ambiente (Villón, 2002). En el contexto de esta tesis, el ciclo hidrológico se analiza bajo la influencia de la urbanización, proceso que altera la infiltración natural y potencia la escorrentía superficial debido a la impermeabilización de los suelos (Tucci, 2007).

1.2 Conceptos de caudal y balance hídrico

El caudal se define como el volumen de agua que atraviesa una sección transversal en un tiempo determinado. Para estimar caudales máximos en cuencas sin datos directos, se recurre a la ecuación del balance hídrico, la cual cuantifica las entradas (precipitación) y salidas (evapotranspiración e infiltración) dentro de un volumen de control (Barth, 1987).

1.3 Dinámica de las inundaciones urbanas

Una inundación ocurre cuando el flujo de agua sobrepasa la capacidad de transporte del cauce principal, invadiendo terrenos colindantes (OMM/UNESCO, 1974). En ciudades como Yacuiba, las inundaciones se clasifican como fluviales (desbordamiento del cauce) y pluviales (saturación del sistema de drenaje).

Velázquez (2017) sostiene que la magnitud de estos eventos es el resultado de una combinación entre factores meteorológicos extremos y la acción humana, tales como el crecimiento descontrolado de asentamientos en franjas costeras y el mantenimiento insuficiente de los colectores pluviales.

1.4 Gestión del riesgo y vulnerabilidad

El análisis del riesgo hídrico requiere la integración de dos componentes fundamentales (Cardona, 2001):

1. Amenaza: Probabilidad de que un evento de inundación con cierta intensidad ocurra en un periodo de retorno determinado (T).
2. Vulnerabilidad: Susceptibilidad de la infraestructura y la población de los barrios Aserradero y Chaqueño ante el impacto del agua.

1.5 Análisis estadístico de valores extremos

Debido a la naturaleza aleatoria de los eventos climáticos, se utilizan distribuciones de probabilidad para estimar magnitudes de lluvia asociadas a periodos de retorno. La distribución de Gumbel (Tipo I) es una de las más empleadas en hidrología para modelar valores de precipitación máxima en 24 horas. La precipitación para un periodo de retorno determinado se estima mediante la siguiente expresión (Chow et al., 1988):

$$X_T = \bar{x} + K \cdot S$$

Donde:

X_T : Precipitación máxima para un periodo de retorno T (mm).

$\bar{x}$: Media aritmética de los datos históricos.

S : Desviación estándar de la muestra.

K : Factor de frecuencia, calculando a partir de la variable reducida de Gumbel (Y_T)

1.6 El tiempo de concentración (T_c)

El tiempo de concentración es el lapso necesario para que una gota de agua viaje desde el punto más remoto de la cuenca hasta el punto de salida. Para cuencas con características similares a la de Yacuiba, se recomienda la fórmula de Kirpich (Aparicio, 1992):

$$T_c = 0.0195 \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385}$$

Donde:

T_c : Tiempo de concentración (minutos).

L : Longitud del cauce principal (metros).

S: Pendiente media del cauce (m/m).

1.7 El Método Racional para la estimación de caudales

El Método Racional es una herramienta hidrológica que permite transformar la profundidad de lluvia en caudal de pico. Se fundamenta en la relación entre el área de la cuenca, la intensidad de la precipitación y un coeficiente de escorrentía (C), el cual depende directamente del uso de suelo y la cobertura vegetal, siendo ideal para microcuencas urbanas de respuesta rápida (Aparicio, 1992). La ecuación general se expresa de la siguiente manera:

$$Q = 0.278 \cdot C \cdot i \cdot A$$

Donde:

Q: Caudal máximo (m^3/s).

C: Coeficiente de escorrentía (adimensional), representativo de la cobertura y permeabilidad del suelo.

i: Intensidad de la lluvia para una duración igual al T_c (mm/h).

A: Área de la cuenca (Km^2).

0.278: Factor de conversión.

1.8 Desagregación de la precipitación (método de Campos Aranda)

Ante la carencia de registros pluviográficos detallados, se recurre a modelos de desagregación temporal. El método propuesto por Campos Aranda (1978) permite estimar intensidades de lluvia para duraciones menores a 24 horas a partir de datos de precipitación máxima diaria. Este proceso es fundamental para determinar la intensidad de diseño que actúa sobre el tiempo de concentración de la cuenca urbana. La relación utilizada es:

$$P_d = P_{24} \cdot C$$

Donde:

P_d = Precipitación para una duración específica (mm).

P_{24} = Precipitación máxima diaria (mm).

C = Coeficiente de desagregación.

1.9 Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Las curvas IDF relacionan la intensidad de la lluvia, la duración de la tormenta y la frecuencia de ocurrencia (periodo de retorno). Estas curvas constituyen el insumo probabilístico fundamental para la estimación y cálculo de caudales máximos de diseño. A partir de este análisis cuantitativo de la precipitación, se define con precisión la carga hidráulica crítica que recibirá el sistema de drenaje pluvial de Yacuiba, garantizando así el dimensionamiento óptimo de la infraestructura civil y la mitigación de riesgos por inundaciones urbanas (Chow et al., 1988; SENAMHI, 2017).

1.10 Modelación con HEC-RAS y ArcGIS

El modelo hidrológico HEC-RAS se fundamenta en la resolución de las ecuaciones de energía para el cálculo de perfiles de flujo. Permite simular regímenes subcríticos y supercríticos, siendo una herramienta esencial para determinar niveles de agua en secciones transversales (Brunner, 2016). Por su parte, ArcGIS actúa como la plataforma de procesamiento geoespacial que facilita la delimitación de la cuenca y la generación de la cartografía de inundación para diferentes periodos de retorno (Cárdenas, 2012).

El sistema HEC-RAS basa sus cálculos en la resolución de las ecuaciones de energía para flujo gradualmente variado. La ecuación fundamental de energía entre dos secciones transversales se define como:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Donde:

Z : Elevación del fondo del canal.

Y: Tirante de agua (profundidad).

V: Velocidad media.

g: Aceleración de la gravedad.

h_e : Pérdida de energía por fricción y contracción/expansión.

CAPITULO II
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO II

2 MATERIALES Y MÉTODOS

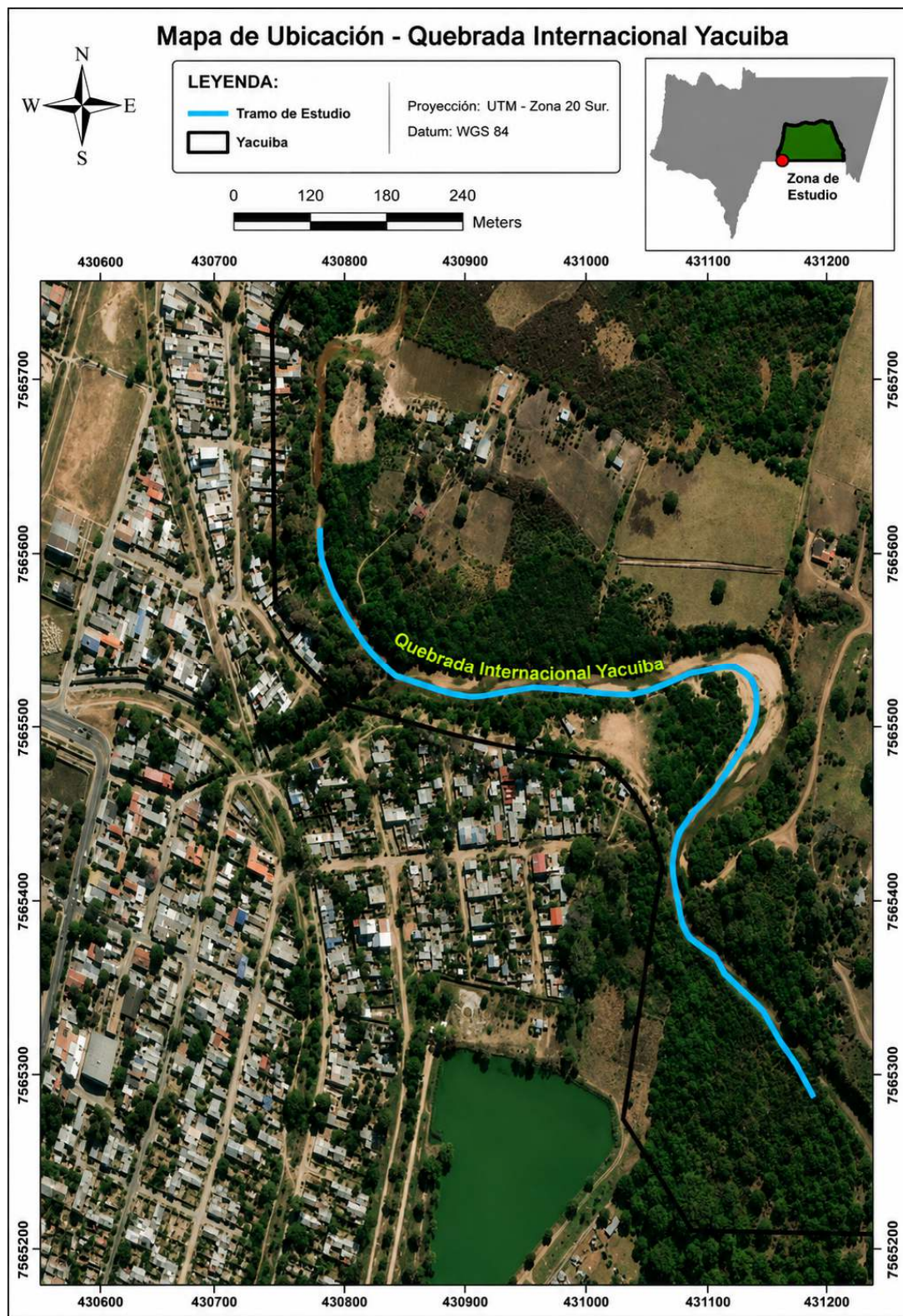
2.1 Zona De Estudio

2.1.1 Ubicación

El Municipio de Yacuiba, capital de la primera sección de la provincia Gran Chaco en el departamento de Tarija, se sitúa en una zona de transición estratégica entre el Subandino Sur y la llanura chaqueña. Su jurisdicción territorial abarca una franja que se extiende desde la serranía del Aguaragüe hasta las formaciones vegetales típicas del Chaco semiárido.

Geográficamente, el municipio se encuentra delimitado por las coordenadas extremas 21° 13' 35.6" y 22° 03' 05" de Latitud Sur, y 62° 48' 36.4" y 63° 40' 54" de Longitud Oeste. Con una extensión superficial de 5,206 Km^2 , Yacuiba representa el 28% del territorio provincial. Según los registros del último censo nacional, la población alcanza los 92,245 habitantes, consolidándose como un centro urbano de crecimiento acelerado (PTDI Yacuiba, 2016).

Figura 1. *Mapa de Ubicación de la Zona de Estudio*



2.1.2 Características Generales De La Zona De Estudio

2.1.2.1 Fiografía Y Geología

El relieve del municipio de Yacuiba se define por una interacción tectónica compleja, perteneciendo a las provincias fisiográficas del Subandino y la llanura chaqueña. Geológicamente, la zona presenta una secuencia que abarca desde el Precámbrico hasta el Cuaternario, caracterizándose por formaciones sedimentarias que condicionan la respuesta hidrológica de las cuencas locales (GAMY, 2016).

2.1.2.2 Características Edáficas (Suelos)

Los suelos predominantes en las series Yacuiba, Caiza y Palmar Grande presentan una fisiografía de valle que transita de plano a inclinado, originada por procesos de aluvión lateral. La pendiente varía en un rango del 0% al 12%, lo que favorece un drenaje que oscila de bueno a moderado. No obstante, estas características físicas advierten una susceptibilidad significativa a la erosión hídrica superficial ante eventos climáticos extremos (Prefectura del Departamento de Tarija, 2001).

En cuanto a su morfología y composición, se destacan los siguientes aspectos técnicos:

- **Propiedades Físicas:** Son suelos con una profundidad efectiva superior a los 150 cm, sin limitaciones severas para el desarrollo radicular. La textura varía de franca a franco-arenosa en los horizontes superiores, volviéndose franco-arcillosa en profundidad. La estructura predominante es de bloques subangulares, con una consistencia que facilita la infiltración en condiciones naturales, pero que tiende a la dureza en estado seco.
- **Propiedades Químicas:** El pH fluctúa entre moderadamente ácido y neutro, aunque en horizontes profundos puede presentarse una tendencia hacia la alcalinidad. Presentan una capacidad de intercambio catiónico que varía de moderada a baja, con niveles de materia orgánica que oscilan según el grado de conservación del área.
- **Fertilidad y Mineralogía:** Se reportan niveles variables de macronutrientes (Calcio, Magnesio y Potasio), con una saturación de bases generalmente alta.

Estas condiciones edáficas, sumadas a la porosidad fina frecuente, confirman la aptitud forestal y agrícola de la región, aunque refuerzan la necesidad de mantener la cobertura vegetal para evitar el lavado de nutrientes y la degradación del suelo por escorrentía pluvial.

2.1.3 Características Climáticas

2.1.3.1 Régimen Térmico (Temperatura)

El comportamiento térmico en el municipio de Yacuiba se caracteriza por una marcada estacionalidad, definiéndose dos periodos térmicos bien diferenciados. Durante el periodo húmedo (noviembre-abril), la temperatura media se sitúa en los 24.78°C, alcanzando máximas extremas de hasta 40°C entre diciembre y enero. Por el contrario, en el periodo seco (mayo-octubre), la media desciende a los 19.2°C, registrándose en junio las temperaturas más bajas con una media mensual de 15.5°C (GAMY, 2016).

Un factor determinante para el ecosistema local es la ocurrencia de heladas en la época invernal, con mínimas extremas que pueden alcanzar los -7°C. Esta fluctuación térmica no solo condiciona los ciclos biológicos de la vegetación nativa, sino que también limita la actividad agrícola y pecuaria de la región.

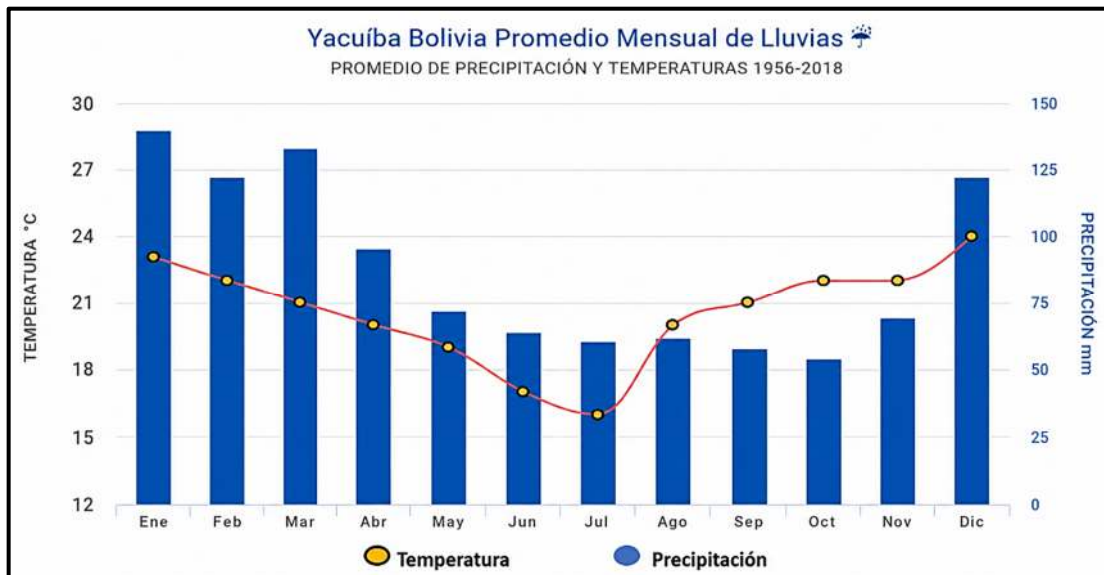
2.1.3.2 Comportamiento Pluviométrico (Precipitación)

El régimen de lluvias es el factor dinámico principal en la generación de escorrentía en la zona urbana de Yacuiba. De acuerdo con los registros históricos de la estación Yacuiba del SENAMHI (1949-2017), la precipitación media anual es de 1126.0 mm, presentando una fuerte concentración entre los meses de diciembre y marzo, periodo en el que se registra más del 70% del acumulado anual.

Los meses con mayor aporte hídrico son enero y febrero, con promedios mensuales que superan los 190 mm, habiéndose registrado máximos históricos mensuales por encima de los 500 mm en años excepcionalmente húmedos. Esta concentración de energía hídrica en lapsos breves, sumada a la escasa precipitación en el estiaje (con mínimos en septiembre y octubre), configura un escenario de crecidas súbitas que saturan la

capacidad de infiltración del suelo y activan la respuesta hidráulica de las quebradas locales.

Figura 2. *Climograma de la estación Yacuiba: Precipitación media mensual y temperatura media (1956-2018).*



Como se observa en la Figura 2 el régimen pluvial de Yacuiba es típicamente monzónico, con un periodo de lluvias intensas que inicia en noviembre y alcanza su máximo en enero. Esta estacionalidad coincide con las temperaturas más elevadas (superiores a los 23°C), lo que incrementa la energía del sistema hidrológico. Por el contrario, el estiaje se marca profundamente entre junio y octubre, meses donde la precipitación decae por debajo de los 60 mm mensuales, evidenciando una alta variabilidad hídrica anual que condiciona la respuesta de las cuencas urbanas.

2.1.4 Características Bióticas

2.1.4.1 Flora y Cobertura Vegetal

La vegetación en el municipio de Yacuiba se caracteriza por su pertenencia a la provincia biogeográfica del Chaco Serrano y las formaciones de transición del Subandino. Esta zona destaca por una diversidad florística que no solo cumple una función ecosistémica vital, sino que actúa como un regulador natural del ciclo hidrológico en las cuencas locales (GAMY, 2016).

Actualmente, la cubierta vegetal original se encuentra bajo una modificación antropogénica constante. La expansión de los asentamientos urbanos, como los barrios Aserradero y Chaqueño, ha desplazado la vegetación nativa por superficies impermeables, alterando la infiltración y aumentando la escorrentía superficial. A pesar de esta presión, la vegetación remanente sigue siendo un proveedor crítico de servicios ecosistémicos, incluyendo la protección de márgenes de ríos y el suministro de productos maderables y no maderables para la población local (Navarro & Maldonado, 2002).

De acuerdo con los inventarios regionales, las especies más representativas de la zona de estudio y sus alrededores se incluyen en la siguiente tabla:

Tabla 1. *Especies vegetales representativas en el municipio de Yacuiba y su entorno.*

Nombre Científico	Nombre Común	Familia	Importancia / Uso
Schinopsis balansae	Quebracho Colorado	Anacardiaceae	Construcción y protección de suelos.
Cedrela odorata	Cedro	Meliaceae	Maderable de alto valor comercial.
Aspidosperma quebracho-blanco	Quebracho Blanco	Apocynaceae	Protección de cuencas y maderables.
Prosopis nigra	Algarrobo negro	Fabaceae	Forraje y regulación hídrica.
Anadenathera colubrina	Cebil	Fabaceae	Estabilización de suelos en ladera.
Bursera graveolens	Palo Santo	Bursaraceae	Ornamental y medicinal.
Geoffroea decorticans	Chañar	Fabaceae	Frutos y protección de márgenes.
Schinus molle	Molle	Anacardiaceae	Protección riparia (márgenes de río)
Ziziphus mistol	Mistol	Rhamnaceae	Alimenticio y cobertura xerofítica.

Nota. Elaboración en base a inventarios regionales y PTDI Yacuiba (2016).

La diversidad florística presentada en la Tabla 1 refleja la transición ecológica propia de Yacuiba. Destaca la presencia de especies de gran porte y sistema radicular profundo, como el Quebracho Colorado y el Algarrobo, las cuales cumplen una función mecánica esencial en la prevención de la erosión hídrica. Sin embargo, la degradación de este bosque nativo en el área urbana de la quebrada internacional Yacuiba ha reducido la rugosidad natural del terreno, factor que contribuye a la aceleración de las escorrentías y al incremento del riesgo de inundación identificado en este estudio.

2.1.4.2 Fauna

La fauna en el municipio de Yacuiba es representativa del ecosistema chaqueño; sin embargo, la presión por actividades extractivas y la expansión de la mancha urbana han desplazado a diversas especies de sus hábitats naturales. En las zonas próximas a las serranías y cauces fluviales, aún se registra la presencia de especímenes que cumplen funciones biológicas vitales dentro de la cadena trófica regional (GAMY, 2016).

A continuación, se detallan las especies más características registradas en la zona:

Tabla 2. *Fauna representativa del municipio de Yacuiba.*

Clasificación	Nombre Científico	Nombre Común
Mamíferos	<i>Mazama gouazoubira</i>	Corzuela
	<i>Cerdocyon thous</i>	Zorro del monte
	<i>Chaetophractus nationi</i>	Quirquincho
	<i>Hydrochoerus hydrochaeris</i>	Carpincho
	<i>Panthera onca</i>	Jaguar / Yaguareté
	<i>Puma concolor</i>	Puma
	<i>Tapirus terrestris</i>	Anta

	<i>Pecari tajacu</i>	Taitetú / Pecarí
Aves	<i>Rhea pennata</i>	Suri
	<i>Ortalis canicollis</i>	Charata
	<i>Cyanocorax chrysops</i>	Urraca de cresta
	<i>Zenaida auriculata</i>	Torcaza
	<i>Ramphastidae (Familia)</i>	Tucán

Nota. Elaboración en base a el PTDI Yacuiba (2016) y registros regionales.

La presencia de estas especies resalta la importancia de conservar los corredores biológicos de las quebradas, dado que estas sirven de refugio y fuente de agua, especialmente en los periodos de estiaje prolongado característicos del Chaco.

2.1.5 Aspectos Demográficos Y Socioeconómicos

2.1.5.1 Dinámica Poblacional y Distribución Territorial

Según los resultados preliminares del Censo de Población y Vivienda 2024, el municipio de Yacuiba cuenta con una población total de 97,577 habitantes, lo que representa un incremento del 5.7% respecto al censo de 2012 (92,245 hab.). Este crecimiento, aunque moderado a nivel municipal, mantiene una tendencia de alta concentración en las áreas urbanas del Distrito 2 y 3, donde la densificación habitacional ha avanzado hacia las zonas de servidumbre de los cauces naturales.

Tabla 3. Población comparativa del municipio de Yacuiba (Censos 2012 - 2024).

Fuente Censal	Población Total	Incremento Absoluto
Censo 2012	92,245.	-
Censo 2024	97,577	+5,332 hab.

Nota. Elaboración en base a datos del INE (2024).

2.2 MATERIALES

2.2.1 Materiales de Campo

- Cámara fotográfica
- GPS (Sistema de posicionamiento global)

2.2.2 Materiales de gabinete

- Computadora
- Impresora

2.2.3 Software:

- ArcGIS 10.5
- HEC-RAS versión 6.5
- Google Earth Pro

2.3 Enfoque y Diseño Metodológico

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, dado que se fundamenta en la recolección y análisis estadístico de datos pluviométricos y el procesamiento de parámetros geométricos (dimensiones y formas del cauce) para simular de manera indirecta el comportamiento hidráulico ante la ausencia de datos de aforo directo en la quebrada. El estudio es de tipo aplicado, orientándose a la resolución de una problemática de inundación urbana específica en el Distrito 2 de la ciudad de Yacuiba mediante el uso de modelos numéricos.

El diseño de la investigación es no experimental de corte transversal, debido a que las variables hidrológicas y las características topográficas del terreno se analizan en su estado actual, sin manipulación deliberada por parte del investigador.

2.3.1 Operacionalización de Variables

Para garantizar la coherencia interna del estudio, se estructuró la matriz de variables e indicadores que rigen los procesos de cálculo e instrumentación geomática:

Tabla 4. Matriz de operacionalización de variables para la estimación de caudales y delimitación de áreas de inundación.

VARIABLE	TIPO	INDICADORES	INSTRUMENTO/ FUENTES
Periodo de retorno (T)	Independiente	Años (10, 50, 100 años).	Registros históricos SENAMHI.
Caudal máximo estimado (Q_{max})	Dependiente	Caudal pico (m^3/s), tirante hidráulico (m), velocidad de flujo (m/s).	Ecuación de Gumbel, Método Racional, Software HEC-RAS.
Características geomorfológicas	Independiente	Área de la cuenca (ha), longitud del cauce (m), pendiente media (m/m), coeficientes de rugosidad (n).	Modelo Digital de Elevación (DEM), ArcGIS, Inspección de campo e índices tabulados de rugosidad (Manning, USACE)
Riesgo de Inundación	Dependiente	Área inundable (ha), extensión espacial, nivel de susceptibilidad.	RAS Mapper, ArcGIS, Google Earth Pro.

2.3.2 Fases del Procedimiento Técnico

El desarrollo metodológico para la estimación de caudales y delimitación de áreas de inundación se estructuró en cuatro fases secuenciales:

Fase 1: Recopilación y Gestión de Información Base

Esta etapa inicial comprendió la adquisición de la serie histórica de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Yacuiba (periodo 1949-2017) gestionada ante el SENAMHI. Paralelamente, se ejecutó una inspección de campo en los barrios Aserradero y Chaqueño con el fin de reconocer la topografía adyacente al cauce e identificar los sectores críticos vulnerables por la expansión de los asentamientos hacia los márgenes de la quebrada. Asimismo, se registraron las características de la cobertura vegetal y el estado físico de la infraestructura de drenaje actual para la posterior asignación de parámetros en el modelo.

Fase 2: Análisis Estadístico e Hidrológico (Estimación de Caudales de Diseño)

Con la serie pluviométrica validada, se realizó el análisis de frecuencias acumuladas mediante la Distribución de Probabilidad Tipo I (Gumbel), cuya función de distribución de extremos se rige por la ecuación:

$$X_T = \bar{x} + K \cdot s$$

Donde $\bar{x}$ representa la media aritmética de la muestra, s la desviación estándar y K el factor de frecuencia calculado a partir de la variable reducida de Gumbel (Y_T) para los escenarios de 10, 50 y 100 años mediante la relación:

$$K = \frac{Y_T - 0.5772}{1.2825}$$

Donde:

Y_T = Variable reducida de Gumbel.

0.5772 = Media de la distribución de Gumbel.

1.2825 = Desviación estándar de Gumbel.

Ante la ausencia de registros pluviográficos continuos en la zona, se aplicó el método de desagregación temporal de Campos Aranda (1978) para determinar las láminas de lluvia para duraciones menores mediante la relación:

$$P_d = P_{24} \cdot C$$

Donde:

P_d = Precipitación para una duración específica (mm).

P_{24} = Precipitación máxima diaria (mm).

C = Coeficiente de desagregación.

Posteriormente, la intensidad de diseño (i) se calculó mediante la expresión:

$$i = \frac{P_d}{t}$$

Donde:

i = Intensidad de precipitación (mm/h).

P_d = Precipitación para la duración considerada (mm).

t = Duración (horas).

La respuesta física de la cuenca se determinó mediante la estimación del Tiempo de Concentración (T_c) empleando la ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.0195 \cdot L^{0.77} \cdot S^{-0.385}$$

Donde L corresponde a la longitud del cauce principal (m) y S a la pendiente media de la microcuenca (m/m). Finalmente, el caudal máximo de diseño (Q) para cada periodo de retorno se cuantificó mediante el **Método Racional**, seleccionando este procedimiento analítico por tratarse de una microcuenca urbana menor a 1000 ha:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360}$$

Donde C es el coeficiente de escorrentía ponderado y A es el área de la cuenca (ha).

Fase 3: Modelación Hidráulica en el Sistema HEC-RAS

Esta fase consistió en la simulación numérica del flujo empleando el software HEC-RAS (v.6.5) bajo un régimen de flujo permanente (*Steady Flow*). El procedimiento metodológico se rigió por los siguientes criterios técnicos:

- **Configuración de la Geometría:** A partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) procesado en el entorno SIG, se digitalizó el eje de la quebrada internacional Yacuiba, delimitando los márgenes izquierdo y derecho del cauce y las secciones transversales perpendiculares a la dirección del flujo con los espaciamientos requeridos para capturar las llanuras de inundación en las zonas bajas de los barrios Chaqueño y Aserradero.
- **Asignación de Coeficientes de Rugosidad:** Se aplicó la ecuación de Manning asignando coeficientes diferenciados (n) basados en los valores estandarizados

del manual de referencia del software (Chow, 1959) y validados mediante la inspección ocular de campo: lecho del cauce ($n=0.030$), canal de drenaje de concreto ($n=0.015$), margen derecha en zona urbana ($n=0.085$) y margen izquierda con vegetación arbustiva densa ($n=0.065$).

- **Condiciones de Contorno:** Se introdujeron los caudales máximos calculados en la Fase 2 como condiciones de aguas arriba, estableciendo la condición de Pendiente Normal (*Normal Depth*) en el extremo de aguas abajo, calculada a partir de la pendiente promedio del lecho obtenida mediante el análisis geoespacial.

Fase 4: Generación de Cartografía y Propuesta de Mitigación

Los perfiles de flujo y tirantes hidráulicos resultantes de la simulación se procesaron espacialmente en el módulo RAS Mapper. Mediante herramientas de análisis geoespacial, se ejecutó la delimitación de las manchas de inundación, determinando de forma precisa las áreas afectadas (hectáreas) y tirantes de agua sobre las zonas habitadas del Distrito 2. Con base en esta cartografía de riesgo, se formularon lineamientos y propuestas de mitigación técnica, clasificadas en medidas no estructurales (gestión de la cobertura vegetal y control del uso del suelo urbano).

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO III

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados

3.1.1 Análisis hidrológico y estimación de caudales máximos de diseño

Para la determinación de los caudales de diseño en la microcuenca urbana del Distrito 2 de Yacuiba, se procesaron los datos hidrometeorológicos obtenidos de la estación meteorológica Yacuiba (1949-2017). El análisis de frecuencias para eventos extremos se realizó mediante la función de distribución de probabilidad de Gumbel (Tipo I), calculando la precipitación máxima en 24 horas (P_{max}) para los periodos de retorno de 10, 50 y 100 años mediante la ecuación:

$$P_T = \bar{x} + K \cdot s$$

Donde $\bar{x}$ representa la media de los datos históricos (103.93 mm), s la desviación estándar (41.16 mm) y K el factor de frecuencia asociado a cada periodo de retorno. Los resultados de las precipitaciones máximas proyectadas se consolidan en la Tabla 5.

Tabla 5. *Precipitaciones máximas proyectadas para diferentes periodos de retorno.*

Periodo de Retorno (T)	Precipitación Máxima (P_{max})
10 años	153.63 mm
50 años	210. 63 mm
100 años	233.04 mm

Como se observa en la Tabla 5, existe un incremento significativo en la lámina de agua esperada conforme aumenta el periodo de retorno. El escenario de 100 años presenta un valor de 233.04 mm , lo que implica una carga hídrica extrema para la quebrada internacional Yacuiba. Estos resultados confirman que la cuenca está sujeta a eventos

de alta magnitud que superan los promedios históricos anuales, condicionando la respuesta hidráulica del cauce urbano.

Debido a la inexistencia de registros pluviográficos continuos en la zona de estudio, se procedió a realizar la desagregación temporal de la lluvia diaria empleando las relaciones de coeficientes propuestas por Campos Aranda (1978). Esta desagregación permitió estimar las láminas de lluvia acumuladas (P_d) para duraciones críticas de 1, 2 y 3 horas, las cuales posteriormente se transformaron en intensidades de precipitación (i) mediante la expresión:

$$i = \frac{P_d}{t}$$

Los valores de intensidad-duración-frecuencia (IDF) calculados para los diferentes escenarios de recurrencia se estructuran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de la relación Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF)

Escenario	Duración (Horas)	P (mm)	Intensidad (mm/h)
T = 10 años	1	47.29	47.29
	2	61.48	30.74
	3	72.51	24.17
T = 50 años	1	63.19	63.19
	2	82.15	41.08
	3	96.89	32.30
T = 100 años	1	69.91	69.91
	2	90.89	45.45
	3	107.20	35.73

Nota. Elaboración en base a datos del SENAMHI (2017) y el método de Campos Aranda (1978).

Como se observa en los resultados obtenidos, existe una relación inversamente proporcional entre la duración de la tormenta y la intensidad de la precipitación; a medida que el evento se prolonga en el tiempo, la intensidad media disminuye. Para el

escenario más crítico ($T = 100$ años), se registra una intensidad máxima de 69.91 mm/h para una duración de una hora. Este comportamiento es propio de las lluvias de fuerte impacto y corta duración que ocurren en la región del Chaco, donde caen grandes volúmenes de agua en lapsos muy breves. Debido a que el tiempo de concentración de los barrios analizados es de apenas 21 minutos, estas intensidades son las que provocan que el sistema de drenaje se vea superado rápidamente, activando los desbordamientos que se visualizan en el modelo.

Finalmente, la transformación de lluvia a escorrentía superficial se ejecutó mediante la aplicación del Método Racional. El procesamiento geoespacial del Modelo Digital de Elevación (DEM) en ArcGIS delimitó un área real de aporte de la microcuenca de 9.97 ha; no obstante, siguiendo criterios prácticos de diseño e ingeniería hidráulica para la absorción de incertidumbres topográficas, este valor fue redondeado formalmente a 10.00 ha ($A=10$ ha).

Asimismo, se determinó un coeficiente de escorrentía ponderado de $C = 0.55$. Este valor se sustentó técnicamente en las tablas de diseño del *Reglamento Técnico de Drenaje Pluvial del Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia (MMAyA)* y la literatura de *Chow (1959)*, cuyas memorias normativas e institucionales de respaldo se detallan formalmente en los Anexos 15 y 16 del presente documento. Dicha selección corresponde a zonas residenciales urbanas densificadas con calles de tierra/asfalto combinadas con parcelas habitacionales y un suelo de matriz fina con baja capacidad de infiltración, garantizando un margen de seguridad técnica ante eventos de máxima precipitación.

Tomando como base el tiempo de concentración calculado mediante la ecuación de Kirpich ($T_c = 20.9141 \text{ min} \rightarrow 21 \text{ minutos} \approx$), y al ser este menor a una hora, se seleccionaron las intensidades máximas de diseño para una duración de 1 hora. La cuantificación de los caudales máximos se realizó mediante la fórmula:

$$Q = \frac{C \cdot i \cdot A}{360}$$

Cabe destacar que el impacto numérico del redondeo del área del terreno (9.97 ha a 10 ha) genera una variación marginal menor al 0.3 % en el volumen de descarga pluvial, manteniéndose los caudales pico de diseño calculados dentro de los márgenes de seguridad requeridos. Los caudales pico resultantes, que constituyen la carga hídrica de entrada para la posterior simulación hidráulica en el software HEC-RAS, se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. *Resumen de caudales máximos para diferentes periodos de retorno.*

Escenario	Intensidad (i) [mm/h]	Caudal Máximo (Q) [m³/s]
T = 10 años	47.29	0.72
T = 50 años	63.19	0.96
T= 100 años	69.91	1.06

Los resultados indican que el sistema debe ser capaz de gestionar un volumen de agua que supera el metro cúbico por segundo en eventos de baja frecuencia (T = 100 años). Al comparar los escenarios, se observa que el caudal aumenta en un 47% al pasar de un evento de 10 años a uno de 100 años.

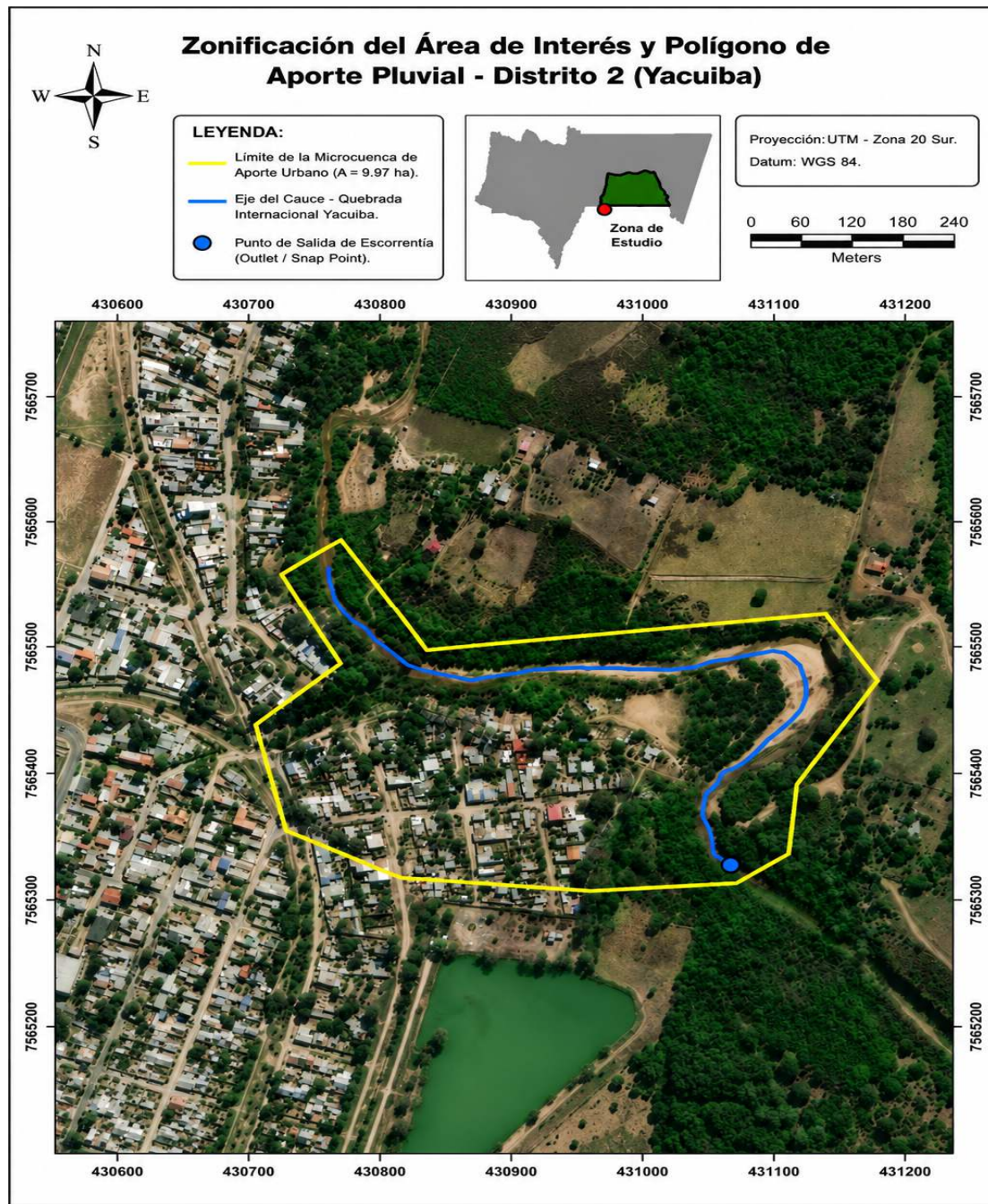
Este incremento en la magnitud del flujo es lo que provoca que la sección natural de la quebrada se vea desbordada, dado que la velocidad y el volumen del agua encuentran resistencia en la vegetación y las construcciones del margen derecho. Estos valores son los que se utilizaron como base para generar los mapas de inundación, demostrando que incluso variaciones pequeñas en el caudal tienen un impacto directo en el área anegada del Barrio Chaqueño.

3.1.2 Simulación hidráulica y análisis de la mancha de inundación

La simulación numérica del flujo en la quebrada internacional Yacuiba, ejecutada mediante el software HEC-RAS, permitió modelar el comportamiento del tirante hidráulico y delimitar espacialmente las llanuras de inundación en los barrios Chaqueño y Aserradero del Distrito 2. Como paso previo a la modelación, se delimitó un polígono de análisis específico de 9.97 ha (Figura 3).

Esta delimitación fue técnicamente necesaria debido a que los Modelos Digitales de Elevación (DEM) globales integrados en mosaico procesan cuencas de escala regional que se extienden más allá del límite internacional. Introducir una macrocuenca de esa magnitud en el método hidrológico pluvial urbano habría generado caudales pico sobredimensionados e irreales para la infraestructura local. Por tanto, el polígono adoptado confina el análisis exclusivamente al área de aporte pluvial directo y de afectación inmediata sobre el tejido urbano consolidado.

Figura 3. Mapa de zonificación del área de interés, delimitación de la microcuenca de aporte urbano directo ($A = 9.97$ ha) y tramo crítico de estudio en los barrios



A partir de las manchas de inundación vectorizadas y procesadas mediante herramientas geomáticas en ArcGIS, se cuantificó la superficie total afectada para cada uno de los periodos de retorno evaluados ($T = 10, 50, 100$ años), cuyos resultados se consolidan en la Tabla 8.

Tabla 8. *Superficie urbana afectada por inundación según el periodo de retorno.*

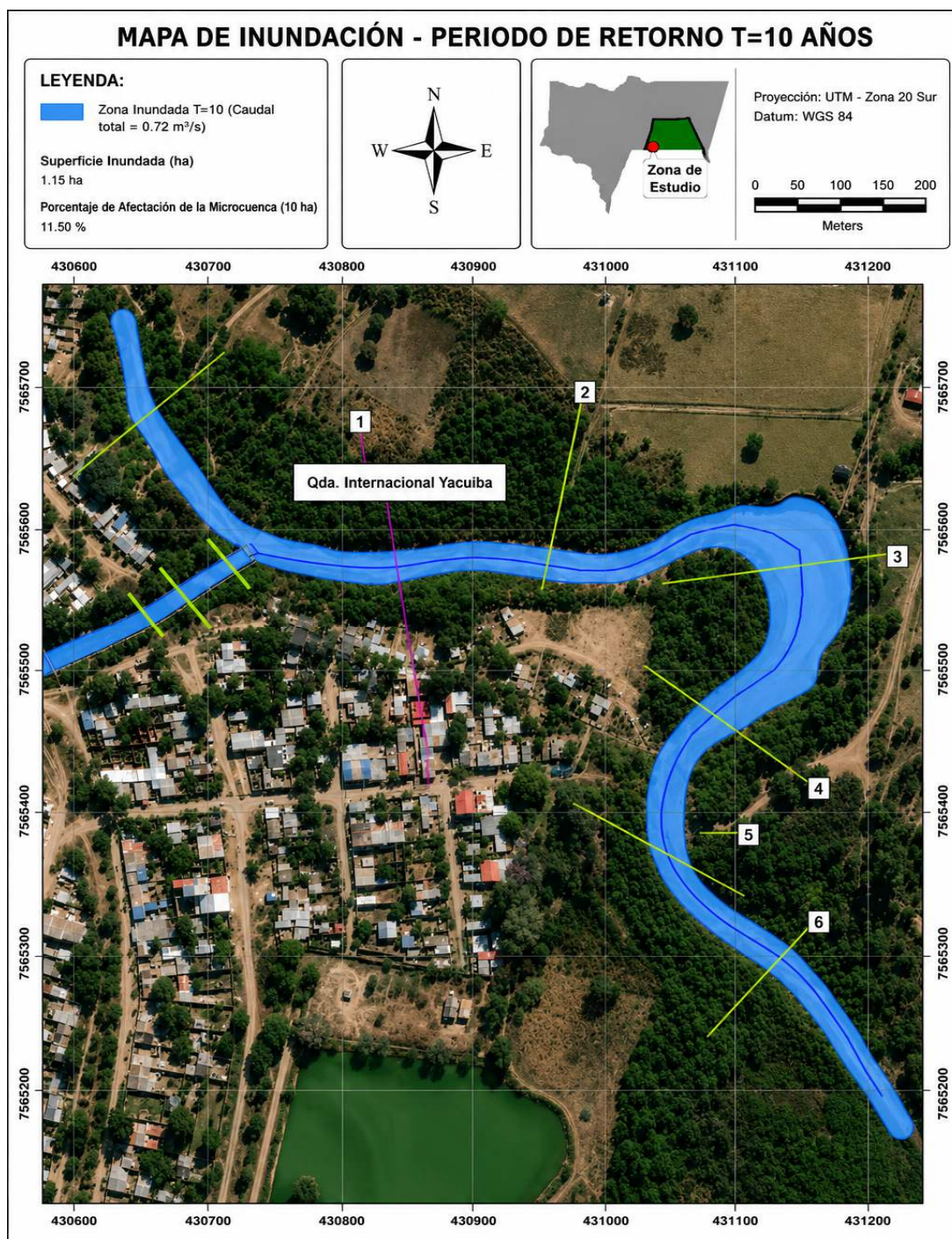
Periodo de retorno (T)	Caudal de Diseño (Q_{max})	Superficie Inundada (ha)	Porcentaje de Afectación de la Microcuenca (10 ha)
10 años	$0.72 \text{ m}^3/\text{s}$	1.15 ha	11.50 %
50 años	$0.96 \text{ m}^3/\text{s}$	2.30 ha	23.00 %
100 años	$1.06 \text{ m}^3/\text{s}$	3.45 ha	34.50 %

3.1.2.1 Análisis de los Escenarios de Simulación

A. Escenario para $T = 10$ años

Para una recurrencia de 10 años ($Q = 0.72 \text{ m}^3/\text{s}$), el flujo se mantiene mayormente confinado dentro del cauce principal. La mancha de inundación cubre el lecho arenoso sin comprometer la infraestructura habitacional de los barrios Aserradero y Chaqueño. Se observa que el tirante de agua respeta los niveles de borde, si bien el flujo no desborda, la reducida revancha (margen de seguridad) en la zona de confluencia con el drenaje pluvial advierte sobre la sensibilidad del sistema ante variaciones menores en la intensidad de la lluvia.

Figura 4. Mapa de mancha de inundación y tirantes hidráulicos para un periodo de retorno de 10 años en el área urbana de la quebrada internacional Yacuiba

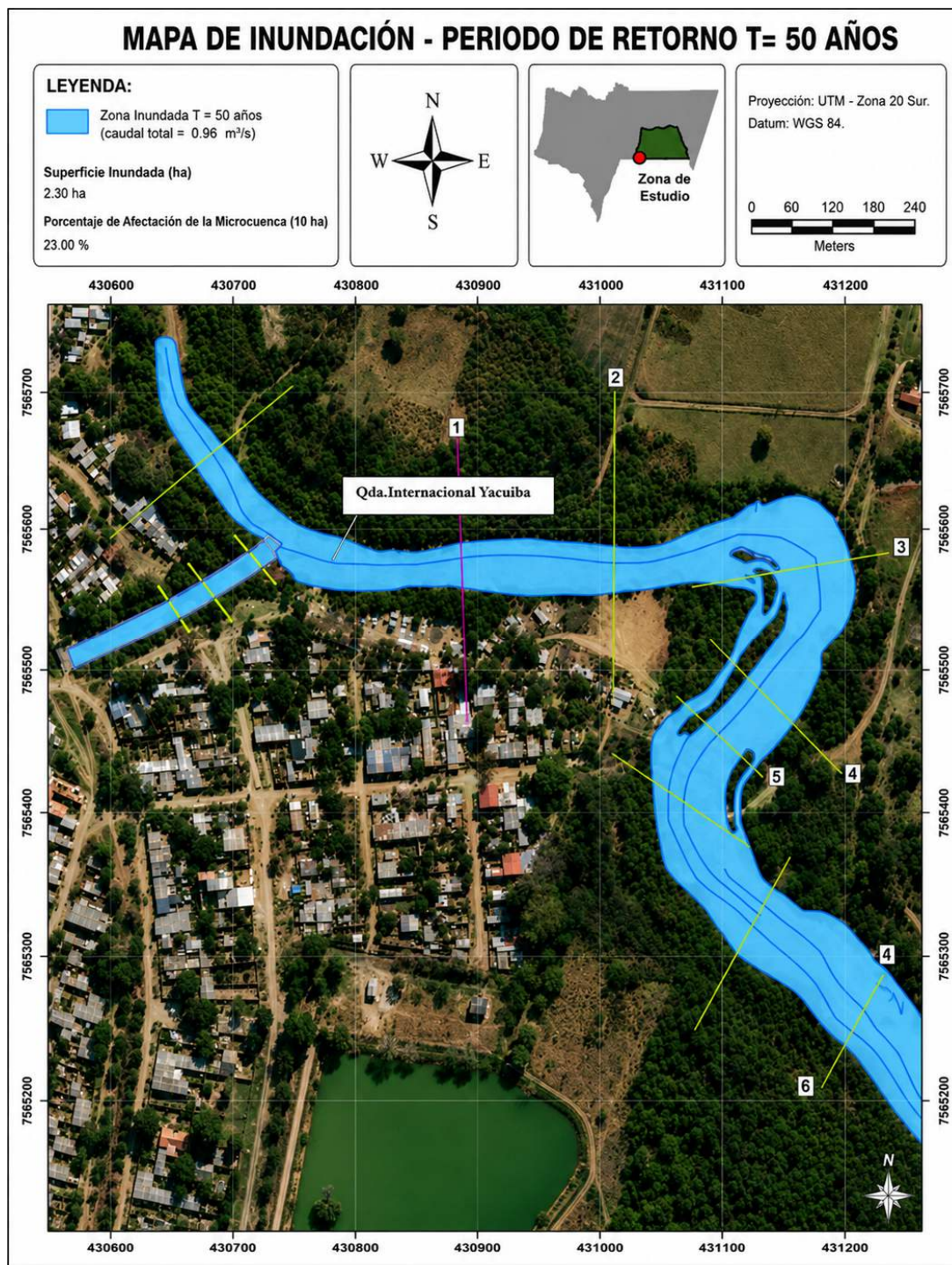


Nota. Representación espacial de la mancha de inundación basada en los resultados del modelo HEC-RAS.

B. Escenario para $T = 50$ años

Al incrementar la carga hídrica a un escenario de 50 años ($Q = 0.96 \text{ m}^3/\text{s}$), el modelo detecta los primeros puntos de desbordamiento. Debido a la topografía asimétrica del sector, el agua no puede evacuar hacia la margen izquierda (zona de vegetación alta), volcándose hacia la margen derecha. En este nivel de recurrencia, la inundación deja de ser un evento confinado para convertirse en una amenaza directa, identificándose anegamientos en los patios traseros de las viviendas y en las vías de tierra en un radio de 50 metros del eje del cauce, cuya falta de drenaje adecuado prolonga el tiempo de permanencia del agua en el sector.

Figura 5. Mapa de mancha de inundación y tirantes hidráulicos para un periodo de retorno de 50 años en los barrios Chaqueñito y Aserradero.

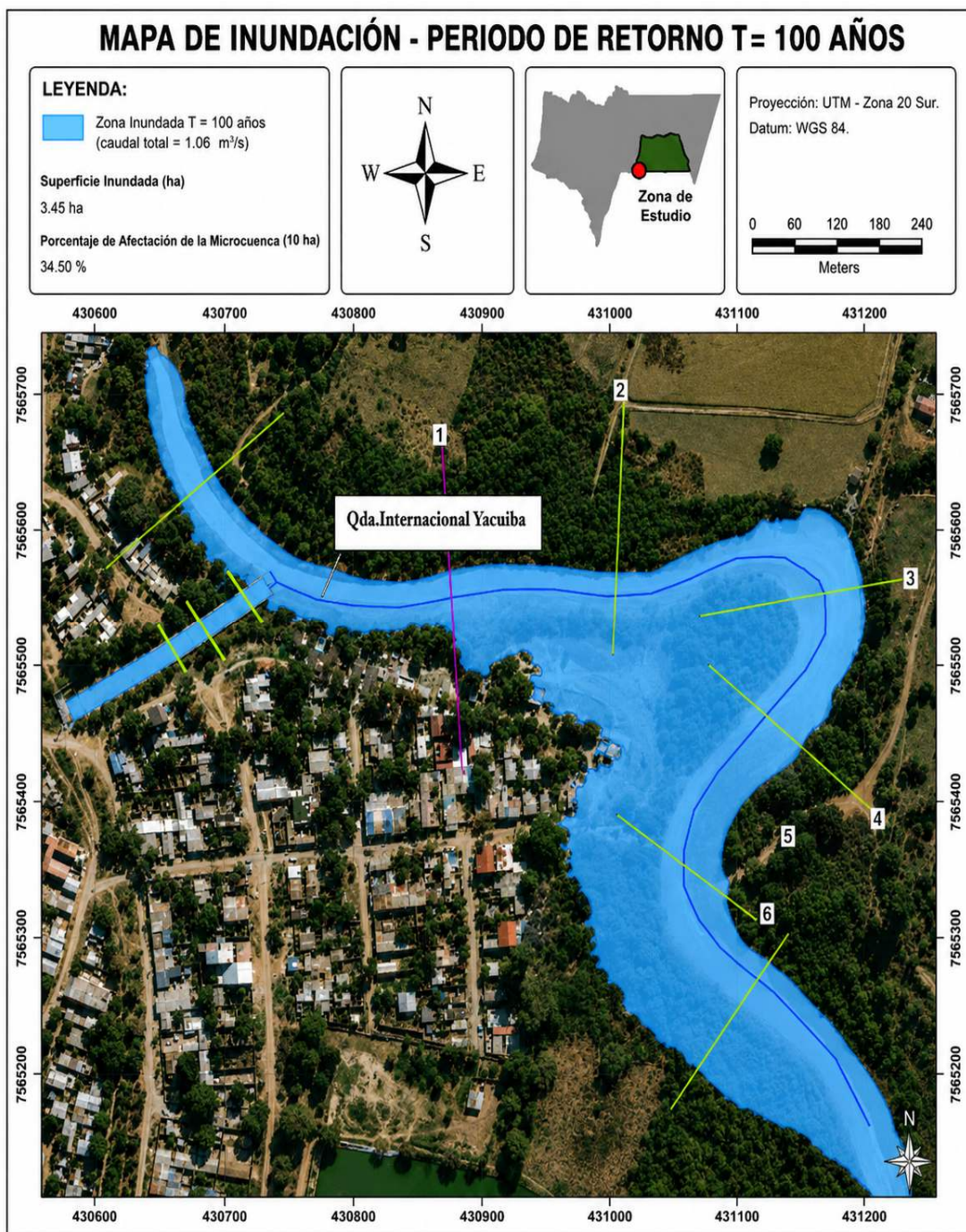


Nota. Representación espacial de la mancha de inundación basada en los resultados del modelo HEC-RAS

C. Escenario para $T = 100$ años (Escenario Crítico)

Bajo la influencia de un evento extraordinario de 100 años ($Q = 1.06 \text{ m}^3/\text{s}$), la capacidad de transporte de la quebrada es superada significativamente. La mancha azul penetra en el tejido urbano del barrio Chaqueño, cubriendo varias viviendas. Este resultado valida la hipótesis de investigación, demostrando que la cercanía de las edificaciones al cauce, sumada a la alta rugosidad urbana ($n = 0.085$), genera condiciones de riesgo extremo para la población. Este escenario alarmante evidencia que la actual sección de la quebrada internacional Yacuiba es insuficiente para gestionar avenidas de baja frecuencia, convirtiendo el asentamiento en una zona de alta vulnerabilidad donde la infraestructura habitacional carece de cualquier margen de seguridad.

Figura 6. Mapa de mancha de inundación para el escenario crítico de un periodo de retorno de 100 años e invasión del flujo sobre el tejido urbano consolidado



Nota. Representación espacial de la mancha de inundación basada en los resultados del modelo HEC-RAS

3.1.3 Propuestas de medidas de mitigación y prevención

Las intervenciones planteadas integran los criterios de gestión de riesgos y restauración de riberas de Maza y García (2002) y Navarro y Maldonado (2002), ajustándolos a la realidad hidrológica de la quebrada internacional Yacuiba. Estas soluciones buscan estabilizar el sistema hídrico del Distrito 2 y, sobre todo, restablecer la dinámica natural de respuesta del propio cauce.

3.1.3.1 Restauración del entorno ripario

El levantamiento de datos en campo constató la inestabilidad de la cobertura vegetal; la caída de individuos en los tramos más vulnerables del cauce confirma que las especies con sistemas radiculares superficiales son incapaces de resistir la saturación hídrica y el socavamiento lateral. Frente a este proceso de degradación, se plantea una reforestación estratégica que emplee Sauce Criollo (*Salix humboldtiana*) en el nivel de contacto hídrico y Lapacho Rosado (*Handroanthus impetiginosus*) en las terrazas superiores. A diferencia de los Eucaliptos (*Eucalyptus spp.*) que predominaban antes del asentamiento, y que fueron retirados para la expansión urbana, estas especies nativas ofrecen un anclaje mecánico superior sin deshidratar el perfil del suelo. El Sauce (*Salix humboldtiana*), gracias a su flexibilidad y capacidad de rebrote, actúa amortiguando el empuje del agua y reduciendo la fuerza del caudal en los bordes del cauce. A su vez, el Lapacho Rosado (*Handroanthus impetiginosus*) aporta estabilidad estructural al terreno mediante el anclaje de sus raíces, lo que evita el desprendimiento del suelo en las zonas de mayor pendiente.

Figura 7. Evidencia de socavamiento lateral y desplome de vegetación inestable en la margen urbana (Barrio Chaqueño).



En la Figura 7 se observa el proceso de descalce que afecta directamente al margen derecho de la quebrada, donde se asienta el área urbana. La caída de este ejemplar evidencia que la vegetación actual no posee el anclaje radicular necesario para estabilizar el suelo ante la fuerza del flujo. Este fenómeno no solo reduce la sección hidráulica del cauce por el aporte de sedimentos y restos vegetales, sino que amenaza la estabilidad mecánica de los terrenos colindantes, justificando la urgencia de implementar la reforestación con especies nativas de mayor resistencia, como el Lapacho Rosado (*Handroanthus impetiginosus*).

Esta problemática no es exclusiva de la franja urbana; por el contrario, se manifiesta con mayor intensidad en la margen natural del cauce (Figura 8). Como se observa en la margen opuesta, el proceso de socavamiento genera un descalce de la estructura del suelo que deriva en fallas por cortante y desplomes masivos. Esta dinámica de inestabilidad, al reducir la capacidad de transporte del lecho por el aporte excesivo de

sedimentos y vegetación caída, incrementa el riesgo de desbordamiento hacia el sector habitado, comprometiendo severamente la estabilidad del suelo donde se asientan las viviendas del Barrio Chaqueño.

Figura 8. *Detalle de inestabilidad de taludes y pérdida de cobertura vegetal en la margen natural de la quebrada.*



En la Figura 8 se observa el proceso de remoción en masa provocado por la fuerza erosiva del cauce en la base del talud. La verticalidad de la pared y el desprendimiento de grandes bloques de tierra confirman un estado de inestabilidad activa. Esta dinámica no solo aporta un volumen considerable de sedimentos al lecho, reduciendo la capacidad de transporte hidráulico, sino que fuerza el desplazamiento del flujo hacia la margen opuesta. Este comportamiento hidrodinámico eleva la presión sobre el margen derecho, incrementando directamente la vulnerabilidad y el riesgo de inundación en las zonas consolidadas del Barrio Chaqueño.

3.1.3.2 Manejo técnico y mantenimiento del cauce

El modelo hidráulico evidenció que cualquier obstrucción en la confluencia con el canal de drenaje pluvial (Junction) eleva de forma alarmante el tirante de agua. Por ello, resulta necesario establecer un programa de limpieza periódica de sedimentos y residuos sólidos. Esta medida garantiza que la sección hidráulica se mantenga operativa para el escenario de 100 años, permitiendo un tránsito fluido del caudal y evitando desbordamientos prematuros por colmatación.

3.1.3.3 Gestión no estructural y ordenamiento territorial

Se establece la delimitación de áreas de servidumbre ecológica y franjas de seguridad, definidas a partir de la modelación de la mancha de inundación para un periodo de retorno de 50 años. Esta disposición técnico-administrativa tiene como objetivo regular el uso del suelo y restringir la expansión de asentamientos sobre la ribera de la quebrada internacional Yacuiba. Bajo los lineamientos de la normativa de ordenamiento territorial de Yacuiba, la medida busca restituir el espacio de libertad del cauce, garantizando su llanura de inundación natural y reduciendo la exposición de la infraestructura habitacional ante eventos extraordinarios.

3.2 Discusión

El análisis integrado de los componentes hidrológicos, hidráulicos y forestales de la microcuenca urbana de la quebrada internacional Yacuiba evidencia una dinámica de degradación ambiental y vulnerabilidad física típica de las áreas de interfaz urbano-riparia en regiones subhúmedas y semiáridas de Sudamérica. Los hallazgos de la presente investigación se discuten a continuación bajo un enfoque comparativo y sistémico, contrastándolos con la literatura científica y modelos homólogos de la región.

3.2.1 Dinámica hidrológica y la alteración del coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía ponderado determinado para el área de estudio ($C = 0.55$) refleja de forma directa el impacto del avance urbano sobre los procesos hidrológicos superficiales. Al evaluar la respuesta de la microcuenca ante eventos extremos, se

identificó que la transformación del suelo natural en un tejido consolidado de baja permeabilidad (viviendas y calles de tierra compactada) ha reducido drásticamente la capacidad de infiltración y acelerado el tiempo de concentración a un valor de apenas 21 minutos.

Este comportamiento coincide con los postulados teóricos de Tucci (2007) en sus estudios sobre hidrología urbana en cuencas de rápida consolidación, donde se demuestra que los procesos de urbanización desordenada en llanuras aluviales alteran el balance hídrico local, incrementando los volúmenes de escorrentía directa entre un 40% y un 60% en comparación con escenarios de cobertura vegetal nativa.

Asimismo, las intensidades máximas calculadas para las duraciones críticas de una hora (47.29 mm/h para $T=10$ años, 63.19 mm/h para $T = 50$ años y 69.91 mm/h para $T=100$ años), obtenidas mediante la desagregación temporal de Campos Aranda (1978), guardan una estricta correspondencia con las investigaciones hidrometeorológicas desarrolladas por Minetti et al. (2010) para el Noroeste Argentino (NOA) y la región del Chaco semiárido. Estos autores caracterizan la precipitación de la región por su alta torrencialidad y concentración temporal, lo que explica por qué el sistema pluvial del Distrito 2 es propenso a experimentar una saturación hídrica casi instantánea, validando la adopción de los caudales pico simulados ($0.72 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.96 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.06 \text{ m}^3/\text{s}$) como parámetros de diseño seguros y realistas.

3.2.2 Comportamiento hidráulico y el efecto de remanso por rugosidad urbana

La modelación geomática ejecutada en HEC-RAS demostró que la llanura de inundación se expande de forma asimétrica, afectando un área crítica de hasta 3.45 ha durante el escenario de recurrencia de 100 años. Este incremento del tirante hidráulico no responde únicamente a la magnitud del caudal de entrada, sino a factores de resistencia hidráulica provocados por obstáculos antrópicos. La asignación de un coeficiente de rugosidad de Manning elevado en la margen derecha ($n = 0.085$) debido a la densidad de viviendas, patios traseros y escombros, frena la velocidad de flujo y genera un remanso hidráulico que sobreeleva los niveles del agua.

Un comportamiento análogo fue discutido por Paoli et al. (2011) en sus evaluaciones de riesgo de inundación en sistemas ribereños de la cuenca del Plata de características topográficas similares. Los autores concluyen que la invasión de las franjas de inundación natural reduce la sección transversal útil del cauce, y que la rugosidad introducida por las edificaciones residenciales genera pérdidas de energía por fricción que duplican el área de anegamiento original. Esto corrobora que la vulnerabilidad observada en el barrio Chaqueño está ligada a la asimetría topográfica de la ladera y al avance descontrolado de los asentamientos sobre la ribera de la quebrada.

3.2.3 Justificación ecológico-forestal de la restauración del entorno ripario

Frente a los procesos de descalce basal, socavamiento lateral y remoción en masa documentados en los puntos críticos (Figuras 7 y 8), las acciones propuestas para la restauración del entorno ripario basadas en el uso de especies nativas se fundamentan sólidamente en la ecología forestal aplicada al manejo de cuencas. El desplome de la vegetación actual inestable observado en campo confirma las limitaciones biomecánicas de los individuos con sistemas radiculares superficiales frente al socavamiento lateral del cauce.

La selección y distribución de *Salix humboldtiana* (Sauce Criollo) y *Handroanthus impetiginosus* (Lapacho Rosado) responde a una rigurosa complementariedad ecomorfológica que ha sido ampliamente validada por Navarro y Maldonado (2002) para la recuperación de riberas degradadas. El *Salix humboldtiana*, como especie reófila y pionera, posee un sistema radicular fasciculado y denso capaz de colonizar el nivel de contacto hídrico permanente. Su flexibilidad morfológica reduce el coeficiente de arrastre bajo flujos turbulentos, absorbiendo la energía cinética del agua sin sufrir desarraigo.

Por su parte, el *Handroanthus impetiginosus*, ubicado en las terrazas aluviales superiores, desarrolla un sistema radicular pivotante y profundo que penetra los horizontes subsuperficiales del suelo, actuando como un anclaje mecánico que incrementa la resistencia al corte del terreno y previene los deslizamientos en masa en las laderas.

Esta distribución por estratos ecológicos coincide con las directrices de manejo forestal de cuencas propuestas por Maza y García (2002), quienes sostienen que la vegetación nativa adaptada es técnicamente superior a las introducidas (como el *Eucalyptus spp.*) que fueron retiradas para la expansión urbana. La vegetación nativa restablece la rugosidad natural del cauce sin provocar la deshidratación del perfil edáfico, consolidando las medidas de mitigación planteadas en la presente investigación como una solución sostenible y adaptada a la realidad socioambiental de Yacuiba.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- La determinación de los parámetros hidrológicos fundamentales de la microcuenca del Distrito 2 de Yacuiba permitió cuantificar la respuesta de la zona urbana ante precipitaciones extraordinarias para los periodos de retorno de 10, 50 y 100 años. El hallazgo más significativo radica en la verificación de la alta torrencialidad de la cuenca, donde el tiempo de concentración estimado en apenas 21 minutos dinamiza la transformación de la lluvia en escorrentía directa, generando caudales pico que escalan críticamente desde $0.72 m^3/s$ hasta $1.06 m^3/s$. Este análisis se validó rigurosamente a partir de los registros históricos de la Estación Meteorológica Aeropuerto Yacuiba; no obstante, debido a que la información oficial se presenta en acumulados diarios, el estudio requirió la aplicación analítica de ecuaciones de desagregación temporal para estimar con precisión matemática las intensidades máximas en duraciones críticas de una hora.
- La integración de herramientas geomáticas aplicadas a la modelación hidráulica en el entorno HEC-RAS hizo posible cartografiar con precisión espacial las franjas de desbordamiento de la quebrada internacional Yacuiba. El elemento más relevante derivado de este mapa es la alarmante tasa de expansión de la mancha de inundación sobre el tejido urbano consolidado: mientras que para un evento ordinario ($T = 10 \text{ años}$) la afectación es de 1.15 ha, en el escenario extremo de 100 años la superficie anegada se triplica hasta alcanzar 3.45 ha, comprometiendo de forma directa el 34.50 % de la microcuenca analizada. El desarrollo de este escenario gráfico se facilitó sustancialmente por la compatibilidad de datos vectoriales entre ArcGIS y los algoritmos del simulador hidráulico, permitiendo modelar el efecto de remanso provocado por

el coeficiente de rugosidad de Manning ($n = 0.085$) en las secciones adyacentes a las laderas consolidadas del barrio Chaqueño.

- El diseño del plan de mitigación física y administrativa para la zona urbana de Yacuiba consolida una propuesta técnica viable fundamentada estrictamente en los principios del manejo forestal de cuencas y la ecología riparia. Lo más trascendental de esta propuesta es la viabilidad de la restauración biológica de las márgenes combinada con la delimitación regulatoria de servidumbres ecológicas, la cual toma como base técnica el escenario de inundación para un periodo de retorno de 50 años. La estructuración de estas medidas integrales se sustentó en el diagnóstico ecomorfológico de los puntos críticos, resolviendo la inestabilidad de los taludes mediante una distribución estratificada que aprovecha la flexibilidad y densidad radicular fasciculada del Sauce Criollo (*Salix humboldtiana*) en la línea de agua, y el anclaje mecánico profundo del Lapacho Rosado (*Handroanthus impetiginosus*) en las laderas superiores expuestas a procesos de remoción en masa.

4.2 Recomendaciones

- Se plantea para futuras líneas de investigación complementar la modelación hidráulica unidimensional (1D) incorporando un levantamiento topográfico de alta resolución geométrica mediante el uso de sensores remotos aerotransportados o fotogrametría digital con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT). Esta integración técnica permitirá capturar los micro relieves de las laderas consolidadas con un menor margen de incertidumbre, optimizando la delimitación espacial de las servidumbres ecológicas en tramos con alta densidad de infraestructura urbana.
- Se propone establecer esquemas técnicos de monitoreo y limpieza periódica de sedimentos, residuos sólidos y restos vegetales flotantes. El retiro planificado de estos elementos obstructivos es prioritario debido a que su acumulación reduce drásticamente el área de la sección transversal útil y altera localmente el coeficiente de rugosidad, forzando elevaciones artificiales del tirante hidráulico y provocando desbordamientos prematuros ante avenidas extraordinarias.
- Se aconseja realizar un análisis experimental exhaustivo de las propiedades físicas, cohesión y resistencia al corte de los suelos que conforman los taludes en las curvas del cauce. La obtención de estos parámetros geotécnicos locales permitirá refinar las simulaciones en HEC-RAS al correlacionar la fuerza tractiva del flujo dinámico con la susceptibilidad real a los procesos de descalce basal y remoción en masa, consolidando un marco predictivo más robusto para los planes de restauración forestal.