



**Pontificia Universidad
Católica del Ecuador**
Seréis mis testigos

MANABÍ

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
SEDE MANABÍ
CARRERA DE HIDRÁULICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN
DETERMINACIÓN DE ESCENARIO DE INUNDACIÓN MEDIANTE LA
MODELACIÓN HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA EN LA CUENCA MEDIA
BAJA DE RIO CHICO DEL CANTÓN PORTOVIEJO**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN
MANEJO SOSTENIBLE DE LOS RECURSOS NATURALES**

**SUBLÍNEA DE INVESTIGACIÓN
GESTIÓN SOSTENIBLE Y APROVECHAMIENTO DE LOS RECURSOS
NATURALES**

**PREVIO AL TÍTULO DE
INGENIERO HIDRÁULICO**

**AUTORES
KLEVER ANDRES ALAVA CAJAPE
GUSTAVO ALFREDO MARUN PAZMIÑO**

**TUTOR
ING. JOSÉ RAMÓN ALARCÓN LOOR, M.Sc.**

PORTOVIEJO, DICIEMBRE 2024

Certificación de la Tesis

Ing. José Ramón Alarcón Loor, M.Sc.

Tutor del plan de investigación curricular

En mi calidad de tutor del trabajo de integración curricular, certifico haber revisado el presente manuscrito de investigación, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Manabí, cumpliendo la Normativa del Trabajo de Integración Curricular; en consecuencia, es apto para su presentación y sustentación.

Ing. José Ramón Alarcón Loor, M.Sc.

C.I. 131128820-1

Aprobación del Tribunal

El jurado examinador aprueba el presente trabajo de integración curricular en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Manabí:

(F)_____

Ing. José Ramón Alarcón Loor, M.Sc.

Presidente del tribunal

(F)_____

Ing. Fabian Rodrigo Espinales Cedeño, M. Sc.

Primer Lector

(F)_____

Ing. John Enrique Félix Mera, M. Sc

Segundo Lector

Declaración de Originalidad

Este manuscrito, no contiene ningún tipo de material que ha sido aceptado para la obtención de un título universitario en otra institución, excepto en la información de soporte que ha sido debidamente citada en el trabajo. Este trabajo es de total responsabilidad de los autores, quienes declaran bajo juramento que ninguna sección de este trabajo de integración curricular infringe los derechos de autor de nadie.

Autores:

F. _____

Klever Andres Alava Cajape
Dirección: Portoviejo, Abdón Calderón
E-mail: kalava5317@pucesm.edu.ec
Celular: 099 672 5580

F. _____

Gustavo Alfredo Marun Pazmiño
Dirección: Portoviejo, Urbanización Capitán Santana
E-mail: Gmarun3583@pucesm.edu.ec
Celular: 098 991 2034

Declaración de Derecho del Autor

Autorizamos a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, a distribuir este manuscrito de investigación en medios físicos y electrónicos, con el fin de promover la divulgación de mis resultados a la comunidad científica y a la sociedad en general. Adicionalmente autorizamos el uso de los contenidos de esta investigación como bibliografía para fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, citando como fuente de información al autor de este trabajo.

Autores:

F. _____
Klever Andres Alava Cajape
C.I: 1350845317

F. _____
Gustavo Alfredo Marun Pazmiño
C.I: 1205753583

Agradecimiento y Dedicatoria

Quiero dedicar un espacio especial en esta tesis para expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres y a toda mi familia. A mis queridos padres, por su amor incondicional y su apoyo constante. Su fe en mí ha sido el pilar que me ha sostenido en los momentos más desafiantes de este viaje académico. Cada sacrificio que han hecho, cada palabra de aliento y cada gesto de cariño han sido fundamentales para que pudiera alcanzar mis metas. Esta tesis es un reflejo de su dedicación y un tributo a todo lo que han hecho por mí. A mi madre, por ser mi guía y mi inspiración. Tus enseñanzas y tu ejemplo de perseverancia me han motivado a seguir adelante, incluso cuando las cosas se ponían difíciles. A mi padre, por brindarme los recursos necesarios y estar siempre a mi lado, apoyándome con sabiduría y paciencia.

También agradezco a mi director de tesis, por su invaluable orientación, apoyo y paciencia a lo largo de este proceso, su conocimiento y dedicación han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A mis compañeros y amigos, por su apoyo incondicional y por crear un ambiente de colaboración y motivación.

Sin ustedes, este logro no habría sido posible. Gracias a todos.

Klever Andrés Álava Cajape

Agradecimiento y Dedicatoria

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que, de una u otra forma, me han acompañado y apoyado durante este arduo pero gratificante camino hacia la obtención de mi título de Ingeniero Hidráulico en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, sede Manabí.

En primer lugar, deseo agradecer profundamente a mi abuelo, Eduardo Pazmiño Narvárez, por haber sido una fuente de inspiración constante, impulsándome a seguir el camino de la ingeniería. A mi abuela, Nancy Romero Franco, le dedico un reconocimiento especial por ser un pilar fundamental en mi vida y carrera, brindándome su amor y apoyo incondicional en cada paso del proceso.

A mi madre, Adriana Pazmiño Romero, quien con su amor y fortaleza me ha guiado siempre, brindándome su apoyo incondicional y siendo una presencia esencial en mi vida.

También quiero agradecer a mi padre, Gustavo Marun Bermeo, por su respaldo inquebrantable en todo momento, por creer en mí y estar presente cuando más lo necesitaba.

Asimismo, quiero agradecer de manera especial a mis tíos, Diego Pazmiño Romero y Estefanía Pazmiño Romero, por estar presentes en este proceso y contribuir de manera significativa a mi desarrollo.

Finalmente, a todas las personas que me acompañaron y apoyaron de diversas formas hasta el final de esta travesía, mi más profundo agradecimiento. Este logro es también de ustedes.

Gustavo Alfredo Marun Pazmiño

Resumen

Se efectuó una investigación mixta del análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca media-baja de Río Chico en Portoviejo mediante datos cuantitativos, a fin de identificar zonas propensas a inundarse. El estudio exploratorio se desarrolló desde julio a octubre del 2024 considerando parámetros topográficos y meteorológicos, la obtención de lluvia de diseño con periodos de retorno de 2, 5, 15, 25 y 50 años, una simulación en el software HEC-HMS mediante el método lluvia-escorrentía para obtener la morfometría de la cuenca y los caudales máximos para los periodos de retorno, posteriormente se analizaron las condiciones de cauce mediante una simulación en el software HEC-RAS con el método de flujo uniforme y gradualmente variado que consideró la velocidad y la altura del agua para identificar las zonas vulnerables. Se obtuvo un área de 275.07 km² y perímetro de 111.58 que la clasifican como intermedia pequeña y alargada, con pendiente media del cauce del 2.0 %, con su río principal de orden 5 con longitud 30.82 km, un tiempo de concentración de 310.09 minutos; la simulación de eventos de inundación con un caudal máximo de 2 048 m³/s para un periodo de retorno de 50 años, denotaron velocidades de flujo entre 0.05 m/s y 4.05 m/s, profundidades hidráulicas entre 0.92 y 4.87 metros, reflejando su vulnerabilidad que se puede acumular el agua en las zonas bajas el agua. Se recomienda un monitoreo continuo de las variables meteorológicas para actualizar y validar periódicamente la modelación ante cambios en patrones climáticos y fenómenos extremos.

Palabras clave: simulación, zonas vulnerables, monitoreo

Abstract

A mixed-methods hydrological and hydraulic analysis of the middle and lower basin of the Chico River in Portoviejo was conducted using quantitative data to identify flood-prone areas. This exploratory study, carried out from July to October 2024, considered topographic and meteorological parameters, obtaining design rainfall with return periods of 2, 5, 15, 25, and 50 years. A simulation was performed in the HEC-HMS software using the rainfall-runoff method to obtain the basin's morphometrics and peak flows for the return periods. Subsequently, the channel conditions were analyzed using a simulation in the HEC-RAS software with the uniform and gradually varied flow method, considering the velocity and water depth to identify vulnerable areas. An area of 275.07 km² and a perimeter of 111.58 km were obtained, classifying it as a small to medium, elongated basin, with an average channel slope of 2.0%, and a main river of order 5 with a length of 30.82 km, a concentration time of 310.09 minutes; the simulation of flood events with a peak flow of 2,048 m³/s for a return period of 50 years, showed flow velocities between 0.05 m/s and 4.05 m/s, and hydraulic depths between 0.92 and 4.87 meters, reflecting its vulnerability to water accumulation in low-lying areas. Continuous monitoring of meteorological variables is recommended to periodically update and validate the modeling in the face of changes in climate patterns and extreme events.

Keywords: simulation, vulnerable areas, monitoring

Índice

Certificación de la Tesis.....	i
Aprobación del Tribunal	ii
Declaración de Originalidad	iii
Declaración de Derecho del Autor.....	iv
Agradecimiento y Dedicatoria	v
Agradecimiento y Dedicatoria	vi
Resumen.....	vii
Abstract	viii
Índice de Figuras	11
Índice de Tablas	12
Índice de Formulas	13
Introducción	14
Materiales y Métodos.....	16
Características de la Investigación.....	16
Características del Lugar.....	16
Métodos.....	17
Modelos Empleados	17
Lluvias de Diseño	18
Proceso de Análisis mediante la Distribución Probabilística de Gumbel	19
Precipitaciones Máximas Diarias en Diversas Frecuencias	21
Curvas de Intensidad Duración Frecuencia “IDF”	23

Tiempo de Concentración.....	24
Tiempo de Retardo “Lag Time”	25
Caracterización Hidrológica	26
Parámetros Generales	26
Parámetros de Forma	28
Parámetros de Relieve.	29
Parámetros de la Red Hídrica	30
Simulación Hidrológica	31
Simulación Hidráulica y Zonas Inundables	32
Resultados y Discusiones.....	33
Información para Alimentar el Modelo HEC-HMS	33
Lluvia de Diseño.....	33
Hietograma	37
Características Morfométricas	40
Caudales Máximos Probable.....	43
Simulación de Eventos de Inundaciones.....	43
Conclusiones	52
Recomendaciones.....	53
Bibliografía	54
Anexos	61

Índice de Figuras

Figura 1. Localización de la cuenca media-baja de Río Chico.....	16
Figura 2. Flujograma de procesos a seguir en la metodología.....	32
Figura 3. Curva de regresión potencial.	35
Figura 4. Curva de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF).	37
Figura 5. Hietograma de precipitación para $T_r = 50$ años	39
Figura 6. Cuenca media baja de Río Chico en el modelo HEC-HMS	40
Figura 7. Modelo Digital del Terreno (MDT) de 3m x 3m generado por SIG Tierra	44
Figura 8. Análisis de la geometría del cauce de Río Chico	45
Figura 9. Malla de simulación base de 10m x10m y refinamiento del cauce de 5m x 5m.	45
Figura 10. Velocidades estimadas durante eventos repentinos de inundación	46
Figura 11. Fluctuación de las velocidades en la cuenca media-baja de Río Chico	47
Figura 12. Profundidades estimadas durante eventos repentinos de inundación.....	48
Figura 13. Fluctuación de las alturas de agua en la cuenca media-baja de Río Chico	49
Figura 14. Zona de baja inundación.....	50
Figura 15. Zona de media baja inundación.....	50
Figura 16. Zona de media inundación.....	51
Figura 17. Hietograma y caudal para un periodo de retorno de 50 años	63
Figura 18. Información levantada en campo.....	64

Índice de Tablas

Tabla 1: Datos DEM aprovechados en el estudio	17
Tabla 2: Máximas precipitaciones en 24 horas durante los años 2009 al 2023	18
Tabla 3: Variables σ_y y μ_y según la cantidad de datos de Gumbel	21
Tabla 4: Categorización de las cuencas hidrográficas de acuerdo con el área	26
Tabla 5: Clasificación según el Coeficiente de Compacidad (k_c) de la subcuenca	28
Tabla 6: Categorización según la pendiente de la cuenca	30
Tabla 7: Clasificación de la densidad de drenaje según Strahler y Horton	29
Tabla 8: Precipitaciones Máximas Probables para cada periodo de retorno	33
Tabla 9: Intensidades diarias de lluvia para diferentes duraciones y periodos de retorno	34
Tabla 10: Primera regresión potencial.	34
Tabla 11: Segunda regresión potencial	35
Tabla 12: Intensidades para cada intervalo de tiempo y periodo de retorno	36
Tabla 13: Cálculo del hietograma por bloques alternos para $Tr = 50$ años	38
Tabla 14: Parámetros generales de la cuenca media baja de Rio Chico	40
Tabla 15: Parámetros generales de la cuenca	41
Tabla 16: Parámetros de forma de la cuenca	41
Tabla 17: Parámetros de relieve de la cuenca	42
Tabla 18: Parámetros de forma de la red Hídrica	42
Tabla 19: Coeficientes de esorrentía	61
Tabla 20: Números de Curva	62

Índice de Formulas

Fórmula 1. Media estadística	19
Fórmula 2. Desviación estándar.....	19
Fórmula 3. Probabilidad de Gumbel.....	20
Fórmula 4. Probabilidad de Gumbel.....	20
Fórmula 5. Probabilidad de ocurrencia.....	22
Fórmula 6. Precipitación.....	22
Fórmula 7. Corrección de intervalos fijos.....	22
Fórmula 8. Intensidades de Lluvia.....	23
Fórmula 9. Analítica para construir la ecuación de intensidad.....	23
Fórmula 10. Modelo de regresión múltiple.....	24
Fórmula 11. Tiempo de concentración mediante Kirpich	24
Fórmula 12. Tiempo de retardo	25
Fórmula 13. Coeficiente de uniformidad	25
Fórmula 14. Desnivel altitudinal.....	27
Fórmula 15. Coeficiente de compacidad	28
Fórmula 16. Pendiente media del cauce	29
Fórmula 17. Densidad de drenaje	30

Introducción

Las inundaciones son fenómenos naturales catastróficos que pueden causar pérdidas de vidas humanas y generar daños económicos significativos, afectando a infraestructuras, bienes y zonas agrícolas productivas (Arreguín *et al.*, 2016). Según Cajigal y Maldonado (2019), estos eventos están influenciados por factores geográficos y estacionales, por la disposición del terreno y las condiciones climáticas que determinan su magnitud, donde factores como la topografía, la proximidad a cuerpos de agua, y la capacidad de drenaje del suelo influyen en la severidad de las inundaciones en las zonas vulnerables; además el cambio climático modifica los patrones habituales que intensifica la frecuencia de lluvias extremas y provocan fenómenos atípicos que agravan el riesgo de inundación (Reyes, 2023).

Esta realidad es evidente en América Latina, donde entre 2000 y 2022, se registraron 681 inundaciones que afectaron principalmente a Brasil, Colombia y Perú, influenciando su frecuencia e intensidad por el cambio climático, que afectaron a las zonas urbanas de crecimiento no planificado, donde la pobreza y la inestabilidad incrementaron su vulnerabilidad (Paz, 2023). Durante los años 1970 al 2013, las inundaciones fueron el desastre natural más frecuente en América Latina y el Caribe, siendo vulnerables con una media de daños del 0,18% del PIB por evento, evidenciando la necesidad de un plan de mejoras del sistema de drenaje pluvial para fortalecer la gestión de riesgos y reducir la vulnerabilidad urbana (Fernández y Buss, 2016).

En Ecuador, las inundaciones son frecuentes en las zonas costeras por lluvias intensas, el cambio climático y la recurrencia del fenómeno de El Niño, las cuales provoca daños sociales, económicos y ambientales significativos que afectan a zonas pobladas, resultando necesario de una gestión adecuada del riesgo que contemple mejorar los sistemas de drenaje, una planificación urbana y una resiliencia climática para adaptarse, resistir y recuperarse (Serrano *et al.*, 2017).

La provincia de Manabí es propensa a ser inundada debido a sus factores físicos, sociales, ecológicos y económicos, destacando la cercanía de las viviendas al río y la falta de preparación institucional, donde los eventos extremos como el fenómeno El Niño agravan esta situación, generando importantes daños en infraestructuras y cultivos (Burgos *et al.*, 2019). En esta provincia la parroquia Río Chico del cantón Portoviejo, enfrenta inundaciones que son provocadas por las crecidas repentinas, esencialmente en la cuenca media-baja del Río Portoviejo, intensificada por fuertes lluvias en las zonas altas de Santa Ana, mismas que generan serios daños en viviendas, pérdidas en la agricultura y repercusiones económicas negativas, afectando significativamente a la población y su entorno (Pinto y Prehn, 2023; Vera *et al.*, 2024).

Por tanto, en la mitigación de impactos de inundaciones en zonas vulnerables como Portoviejo, es fundamental aplicar modelos matemáticos predictivos y simulaciones hidrológicas e hidráulicas mediante los softwares HEC-HMS que permite estimar lluvias máximas y flujos críticos, y HEC-RAS que simula los efectos de inundaciones en diferentes escenarios (Sanmartín *et al.* 2024). Para una mejor comprensión son necesarios los mapeos de las zonas vulnerables, ya que optimizan la planificación urbana y la gestión de riesgos, lo cual aporta a la toma de decisiones informadas, mediante estrategias preventivas (Alcocer *et al.*, 2016).

En base a ello se propone determinar un escenario de inundación, mediante la modelación hidráulica e hidrológica en la cuenca media-baja de Río Chico del cantón Portoviejo, apoyado en la recolección de datos topográficos, hidrológicos y meteorológicos de la cuenca Río Chico para alimentar el modelo en HEC-HMS; simular un evento de inundación mediante una modelación hidráulica en el software HEC-RAS considerando variaciones climáticas y eventos extremos; e identificar mediante un mapa las zonas con mayor probabilidad a ser inundadas.

Materiales y Métodos

Características de la Investigación

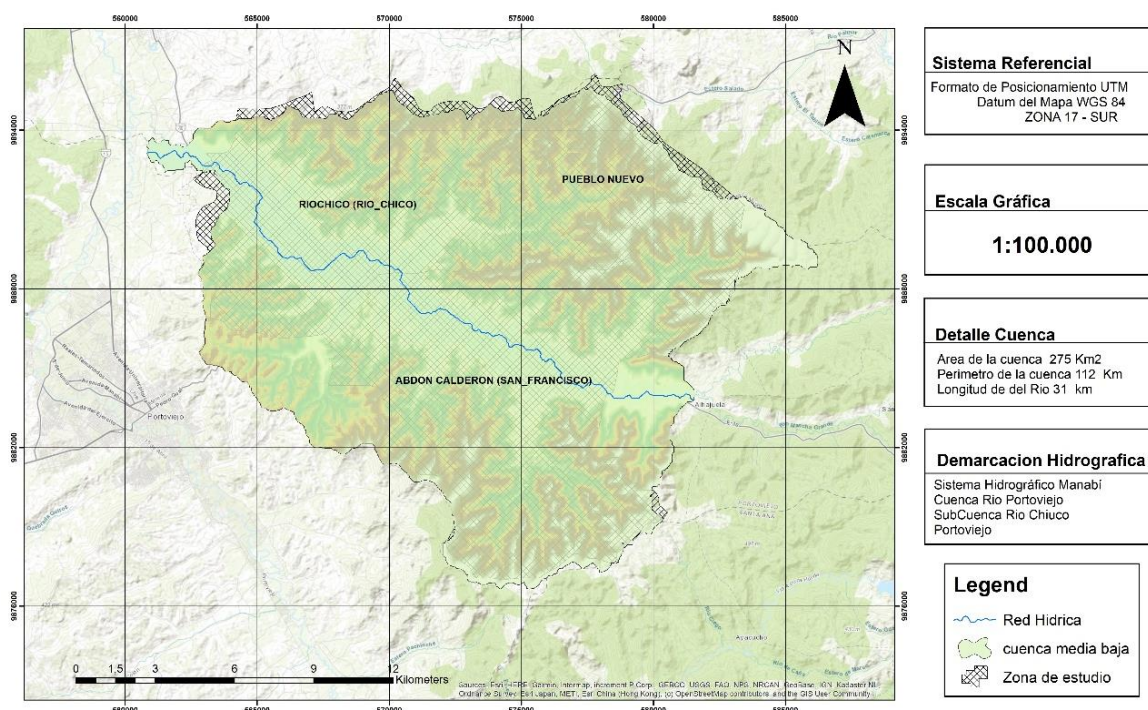
Se genera una investigación mixta, considerando el análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca media-baja de Río Chico mediante datos mixtos, integrando valores cuantitativos a una categorización cualitativa, donde la metodología seguida es de tipo no experimental descriptiva, identificando las características del lugar sin su intervención directa (Borja, 2016).

Características del Lugar

Se genera en la provincia de Manabí, en la cuenca media-baja de Río Chico perteneciente a la cuenca hidrográfica del Río Portoviejo, abarcando las parroquias de Portoviejo, Abdón Calderón, Río Chico, Pueblo Nuevo, considerando para su desarrollo los meses de mayo a octubre del 2024.

Figura 1

Localización de la cuenca media-baja de Río Chico.



Fuente: Autor propio

Métodos

Modelos Empleados

Para estimar las características físicas y morfométricas de la cuenca, se emplearon Modelos de Elevación Digital (DEM) con resolución de píxeles 10 x 10 m descargados desde la NASA, cartas geográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM) y datos de textura del suelo del MAGAP, procesados en el software ArcGIS; se realizaron análisis estadísticos y correlaciones para relacionar los parámetros morfométricos con las características hidrológicas, y se integraron los resultados en el modelo HEC-HMS para simular la esorrentía (Tenesaca *et al.*, 2024).

Tabla 1

Datos DEM aprovechados en el estudio.

Insumo	Institución	Resolución/ Escala	Año
DEM Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	SIGTIERRAS	10 x 10 m	2016
Mapa de Textura de Suelos del Ecuador	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP)	1: 60 000	2020
Mapa de Cobertura y uso de la tierra en el Ecuador	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGAP)	1: 60 000	2020
Cartografía Base	Instituto Geofísico Militar (IGM)	1: 60 000	2020

Lluvias de Diseño

Una lluvia de diseño es una precipitación estimada que denota las características extremas de un evento de lluvia con base en la relación entre intensidad, duración y frecuencia (IDF), las cuales son usadas en el diseño y planificación de infraestructuras hidráulicas en base de un periodo de retorno específico, denotando las condiciones más probables de ocurrencia de un evento extremo (Guerrero, 2018). En el estudio se emplea la distribución de Gumbel, mediante precipitaciones máximas durante 24 horas tomadas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], en la estación código MB82 La Teodomira en Lodana, siendo la más cercana a la zona, con datos desde los años el 2009 al año 2023 (visualizar en la tabla 2).

Tabla 2

Máximas precipitaciones en 24 horas durante los años 2009 al 2023.

Año	Máxima Precipitación en 24 h (mm)
2009	164.0
2010	232.2
2011	210.1
2012	437.1
2013	215.1
2014	182.5
2015	234.2
2016	220.2
2017	284.8
2018	284.7
2019	208.7
2020	132.1
2021	297.4
2022	217.4
2023	261.1

Fuente: INAMHI, 2024.

Proceso de Análisis mediante la Distribución Probabilística de Gumbel

Se utilizó la distribución de Gumbel porque está diseñada para modelar eventos extremos como las precipitaciones máximas anuales, para ello se calcularon la media y la desviación estándar de las precipitaciones máximas anuales, luego se determinaron los valores reducidos de Gumbel y su desviación estándar, y finalmente se estimaron las precipitaciones para distintos periodos de retorno usando una fórmula basada en estas variables, donde las intensidades de lluvia se obtuvieron dividiendo las precipitaciones entre sus duraciones para construir la curvas IDF, tal como se describe a continuación según Sánchez (2023):

Media Estadística.

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Fórmula 1. Media estadística.

Donde:

\bar{x} = Media estadística.

X_i = Conjunto de observaciones.

n = Número de observaciones.

Desviación Estándar.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Fórmula 2. Desviación estándar.

Donde:

S = Desviación estándar.

n = Número de observaciones.

x_i = Observación número i de la variable x .

\bar{x} = Media estadística.

Probabilidades mediante Gumbel.

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * S$$

Fórmula 3. Probabilidad de Gumbel.

Donde:

α = Probabilidad de Gumbel.

S = Desviación estándar de la muestra.

$$u = \bar{x} - \mu_y * \sigma_y$$

Fórmula 4. Probabilidad de Gumbel.

Donde:

u = Probabilidad de Gumbel.

\bar{x} = Media estadística.

σ_y, μ_y = Factores de Gumbel según el número de datos (visualizar la tabla 3).

Tabla 3

Variables σ_y y μ_y según la cantidad de datos de Gumbel.

Número de datos	μ_y	σ_y
10	0,4952	0,9496
15	0,5128	1,0206
20	0,5236	1,0628
25	0,5309	1,0914
30	0,5362	1,1124
35	0,5403	1,1285
40	0,5436	1,1413
45	0,5463	1,1518
50	0,5485	1,1607
55	0,5504	1,1682
60	0,5521	1,1747
65	0,5535	1,1803
70	0,5548	1,1854
75	0,5559	1,1898
80	0,5569	1,1938
85	0,5578	1,1974
90	0,5586	1,2007
95	0,5593	1,2037
100	0,5600	1,2065

Precipitaciones Máximas Diarias en Diversas Frecuencias

Los valores estimados representan la precipitación máxima que se puede prever en un único día durante un periodo específico, analizando diferentes intervalos de recurrencia (García y Rodríguez, 2015). Para su análisis se empleará la metodología propuesta por Sánchez (2013), como se muestra a continuación:

Probabilidad de Ocurrencia.

$$F(\mathbf{xt}) = 1 - \frac{1}{T_r}$$

Fórmula 5. Probabilidad de ocurrencia.

Donde:

F (xt) = Probabilidad de ocurrencia.

Tr = Periodo de retorno (años).

Precipitación.

$$P = \mu_y - \ln \left(\frac{-\ln(F(\mathbf{xt}))}{\frac{1}{\sigma_y}} \right)$$

Fórmula 6. Precipitación.

Donde:

P = Precipitación (mm).

u_y = Probabilidad de Gumbel.

σ_y = Factores de Gumbel.

F (xt) = Probabilidad de ocurrencia.

Corrección del Intervalos.

$$X_T = P * 1,14$$

Fórmula 7. Corrección de intervalos fijos.

Donde:

XT = Corrección del Intervalos.

P = Precipitación.

Intensidades de Lluvia.

$$I = \frac{P}{t}$$

Fórmula 8. Intensidades de Lluvia.

Donde:

I= Intensidades de Lluvia (mm).

P = Precipitación (mm).

t = Tiempo de duración (horas).

Curvas de Intensidad Duración Frecuencia “IDF”

Las curvas de Intensidad Duración Frecuencia (IDF) ilustran la relación entre la intensidad de la precipitación, su duración y la frecuencia de eventos de lluvia, siendo esenciales en el diseño de infraestructuras hidráulicas y control de inundaciones, ya que permiten estimar la cantidad de lluvia esperada en un periodo específico de tiempo, ya que se la asocia a un período de retorno u ocurrencia, facilitando así la evaluación de la probabilidad de lluvias en diferentes duraciones (Marcus *et al.*, 2019). Para su elaboración, se desarrolla la ecuación de intensidad para la zona, fundamentándose en la fórmula presentada por Aparicio en 1977, la cual se detalla a continuación. (Pizarro *et al.*, 2003):

$$I = \frac{k * T^m}{D^n}$$

Fórmula 9. Analítica para construir la ecuación de intensidad.

Donde:

I = Intensidad de precipitación (mm/h).

k, m y n = Constantes calculadas mediante una regresión lineal múltiple.

T = Periodo de retorno (años).

D = Duración (horas o minutos).

Los logaritmos se consideraron, tal como se presenta en la fórmula 10, para establecer las bases de un modelo de regresión múltiple.

$$\log I = \log k + m \log T - n \log D$$

Fórmula 10. Modelo de regresión múltiple.

Tiempo de Concentración

El tiempo de concentración o de equilibrio, es el intervalo necesario para que una cuenca hidrológica alcance el estado estacionario durante un aguacero uniforme, donde todas las partes del sistema fluyen de manera efectiva en el punto de desagüe, garantizando la respuesta adecuada frente a eventos de precipitación (Vélez y Botero, 2011).

Su elección se basó en las características geomorfológicas de la cuenca, como la pendiente y la longitud del cauce, que influyen en la rapidez con la que las aguas de escorrentía alcanzan el punto de desagüe, donde se validaron con comparaciones de otros estudios, en su estimación hay varias fórmulas indirectas, pero se usó el método de Kirpich descrito a continuación:

$$tc = 0,02 * L^{0,77} * S^{0,385}$$

Fórmula 11. Tiempo de concentración mediante Kirpich.

Donde:

tc = Tiempo de concentración (minutos).

L = Longitud máxima a la salida (m).

S = Pendiente media del lecho (m/m).

Tiempo de Retardo “Lag Time”

Según Vélez y Botero (2011), el tiempo de retardo de una cuenca hidrográfica es el espacio entre el inicio de una precipitación significativa y el momento en que se registra el caudal máximo en el sistema fluvial como respuesta a dicha precipitación, para su estimación se usa la fórmula 12 descrita a continuación:

$$\mathbf{Lag\ Time = 0,35 * tc}$$

Fórmula 12. Tiempo de retardo.

Donde:

Lag Time = Tiempo de retardo (minutos).

tc = Tiempo de concentración (minutos).

Coefficiente de uniformidad (K).

Según Témez (1978), el coeficiente de uniformidad permite evaluar la homogeneidad en la distribución de la precipitación sobre una superficie, donde más cercano sea su valor al 100% mayor será la uniformidad en la distribución, para obtenerlo se usa la fórmula 13:

$$\mathbf{k = 1 + \frac{tc^{1.25}}{tc^{1.25} + 14}}$$

Fórmula 13. Coeficiente de uniformidad.

Donde:

k = Intensidad de precipitación (mm/h).

tc = Tiempo de concentración (minutos).

Caracterización Hidrológica

La caracterización hidrológica es el proceso de análisis y descripción de las condiciones hídricas de una cuenca, considerando parámetros de forma, relieve, drenaje y comportamiento del caudal, para su desarrollo se consideran herramientas geoespaciales como los sistemas de información geográfica (SIG), identificando aspectos morfométricos, distribución de la precipitación, pendiente, densidad de drenaje y tiempo de concentración (Guerrero *et al.*, 2024).

Parámetros Generales

Área (A).

Según Cruz *et al.* (2022), el área de una cuenca es la extensión geográfica delimitada por características geológicas o topográficas que determinan la dirección predominante del drenaje, donde interactúan los subsistemas biológicos, físicos y socioeconómicos, que influyen en los procesos naturales y en la gestión del territorio. En su estimación se emplea el software HEC-HMS como herramienta de cálculo, valor numérico que responde a la categorización dada por Campos (1998) que se presentada en la tabla 4.

Tabla 4

Categorización de las cuencas hidrográficas de acuerdo con el área.

Rangos de áreas (km²)	Calificación
< 25	Microcuenca
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia – pequeña
500 a 2 500	Intermedia – grande
2 500 a 5 000	Grande
> 5 000	Muy grande

Perímetro (P).

El perímetro de una cuenca es la longitud total de su contorno, formada por divisorias de agua que separan la cuenca de otras, delimitando la superficie de captación hacia el cauce principal, y que a su vez determina la extensión del área que drena hacia un mismo punto de salida (Cruz *et al.*, 2022).

Longitud del Curso Principal (L).

Es la distancia total recorrida a lo largo del cauce más extenso de una cuenca, desde su punto de origen o nacimiento hasta su desembocadura, influyendo en el tiempo de concentración, la velocidad del flujo y la dinámica del drenaje. Para su cálculo, se utiliza el software ArcGIS, y su medida se expresa en kilómetros (Cruz *et al.*, 2022).

Desnivel altitudinal (DA).

El desnivel altitudinal es la diferencia de elevación entre el punto más alto y el más bajo de una cuenca, expresada en metros o como un porcentaje, se usa para analizar la pendiente del terreno, la dinámica del flujo y la energía disponible para el movimiento del agua en la cuenca. (Zhicay, 2020).

$$DA = HM - Hm$$

Fórmula 14. Desnivel altitudinal.

Donde:

DA = Desnivel altitudinal (m).

HM= Cota máxima (msnm).

Hm= Cota mínima (msnm).

Parámetros de Forma

Coeficiente de Compacidad (Kc).

El coeficiente de compacidad mide la eficiencia de cuenca hidrográfica en términos de drenaje en relación a su forma, donde más compacta sea, más rápido se concentra el flujo hacia la salida de la misma, influyendo en su comportamiento hidrológico, para su estimación se emplea la fórmula 15 que relaciona su área y perímetro (Londoño, 2001).

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Fórmula 15. Coeficiente de compacidad.

Donde:

Kc = Coeficiente de compacidad (-).

P = Perímetro de la cuenca (m).

A= Área (m²).

Tabla 5

Clasificación según el Coeficiente de Compacidad (kc) de la subcuenca.

Rango de Kc	Clasificación
1 – 1.25	Redonda a oval redonda
1.25 – 1.50	Oval redonda a oval oblonga
1.50 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga
> 1,75	Alargada

Fuente: Villela y Matos (1975).

Parámetros de Relieve.

Pendiente Media del Cauce (j).

La pendiente media de la cuenca es un parámetro que denota la inclinación promedio del terreno dentro de una cuenca hidrográfica, influyendo de manera directamente en la velocidad del escurrimiento superficial, la erosión y el tiempo de concentración del flujo (Araque *et al.*, 2019).

$$j = \frac{DA}{Lc}$$

Fórmula 16. Pendiente media del cauce.

Donde:

j = pendiente media del Cauce (%).

DA = desnivel Altitudinal (km).

Lc = Longitud del cauce principal (km).

Pendiente Media de la Cuenca (J).

La pendiente media de la cuenca denota el comportamiento del escurrimiento y su influencia en los procesos hidrológicos, generalmente se lo mide como una relación entre el cambio en elevación y la distancia recorrida por el flujo superficial; en su estimación se emplea un Modelo Digital de Elevación (MDE), calculando las pendientes de cada celda para obtener un valor promedio para toda la cuenca (Araque *et al.*, 2019).

Tabla 6

Categorización según la pendiente de la cuenca.

Rango	Descripción
0 – 4	Nula o casi nivel
4 – 15	Ligeramente inclinada
15 – 25	Moderadamente empinada
25 – 50	Empinada
50 – 75	Muy empinada
> 75	Extremadamente empinada

Fuente: Alcántara (2015).

Parámetros de la Red Hídrica

Densidad de Drenaje.

Según Araque *et al.* (2019), la densidad de drenaje es definida como la relación entre la longitud total de los cauces y el área de la cuenca (fórmula 17), respuesta que se categoriza según los rangos presentados en tabla 7 para evaluar su capacidad de drenaje, la cual es determinante en la generación de escorrentía y en su respuesta hidrológica.

$$\mathbf{Dd} = \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{A}}$$

Fórmula 17. Densidad de drenaje.

Donde:

Dd = Densidad de drenaje (km/km²).

Lt = Longitud total de las corrientes (km).

A = Área de la cuenca (Km²).

Tabla 7

Clasificación de la densidad de drenaje según los criterios de Strahler y Horton.

Densidad de drenaje (km/km²)	Categoría	Descripción
< 1	Baja	Baja la escorrentía y aumenta la infiltración
1 – 2	Moderada	Tendencia media de escorrentía
2 – 3	Alta	Alta tendencia a fluir ya las inundaciones
> 3	Muy Alta	Alta tendencia a la escorrentía, ya a la erosión

Fuente: Horton (1945) y Strahler (1957).

Simulación Hidrológica

Se lleva a cabo la modelación hidrológica de la cuenca mediante el software HEC-HMS, aplicando el modelo Muskingum-Cunge para estimar el flujo de agua en la zona (Cunge, 1969). Se considera el factor de escorrentía propuesto por Ibáñez *et al.* (2011) y el número de curva del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1986), como se detalla en los anexos. Además, se integra la lluvia de diseño con las características de la cuenca para calcular el periodo de retorno de 50 años como evento más catastrófico (Tenesaca *et al.*, 2024).

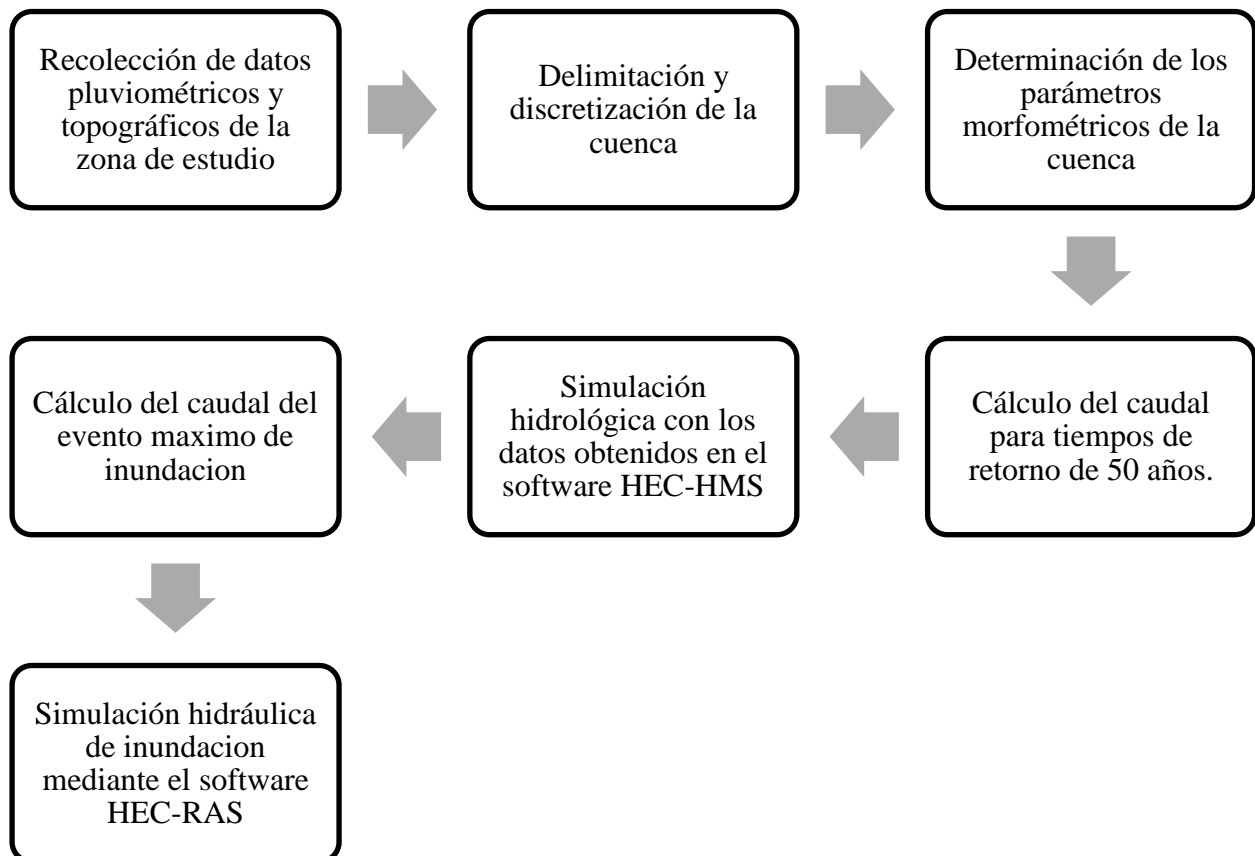
El coeficiente de Manning (n) se eligió según las características del terreno y el tipo de cauce de la cuenca, aplicando valores estándar sugeridos en la literatura para distintos tipos de superficies, como cauces naturales o canales modificados; valor que se incorporó al modelo mediante la división de la cuenca en varias subáreas, asignando un valor específico de “n” a cada segmento en función de las condiciones del terreno en cada zona.

Simulación Hidráulica y Zonas Inundables

Se lleva a cabo la simulación hidráulica mediante el software HEC-RAS para modelar el comportamiento del flujo en cauces y planicies de inundación, permitiendo analizar la propagación del agua en diferentes escenarios (Toapaxi y Acero, 2021). A partir de los resultados obtenidos se genera un mapa de inundaciones que identifica las áreas potencialmente afectadas, lo que facilita la evaluación y planificación de medidas de mitigación (Benavidas *et al.*, 2021).

Figura 2

Flujograma de procesos a seguir en la metodología.



Resultados y Discusiones

Información para Alimentar el Modelo HEC-HMS

Lluvia de Diseño

Para alimentar el modelo en HEC-HMS fue necesario el análisis de información meteorológica máxima en 24 horas desde el año 2009 al 2023 (ver tabla 1), misma que se analizó estadísticamente, estimando una media de 238.80 mm y una desviación estándar de 71.13 mm, escogiendo según la cantidad de datos desde la tabla 3 las variables Gumbel α de 55.46 mm y μ de 206.79 mm, analizadas para periodos de retornos de 2, 5, 10, 25 y 50 años.

Tabla 8

Precipitaciones Máximas Probables para cada periodo de retorno.

Periodo de retorno (Años)	Precipitación (mm)	Probabilidad de ocurrencia F (XT)	Corrección de intervalo fijo XT (mm)
2	0.3665	227.1153	0.5000
5	1.4999	289.9754	0.8000
10	2.2504	331.5942	0.9000
25	3.1985	384.1798	0.9600
50	3.9019	423.1907	0.9800

Con la precipitación máxima probables se analizaron las intensidades diarias de lluvia, considerando rangos entre 1 y 24 horas en variados periodos de retorno, tal como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9

Intensidades diarias de lluvia para diferentes duraciones y periodos de retorno.

Tiempo de duración		Intensidad de la lluvia (mm /hr)				
Hr	min	2 años	5 años	10 años	25 años	50 años
24	1440	272.54	347.97	397.91	461.02	507.83
18	1080	248.01	316.65	362.10	419.52	462.12
12	720	218.03	278.38	318.33	368.81	406.26
8	480	185.33	236.62	270.58	313.49	345.32
6	360	166.25	212.26	242.73	281.22	309.78
5	300	155.35	198.34	226.81	262.78	289.46
4	240	141.72	180.94	206.91	239.73	264.07
3	180	125.37	160.07	183.04	212.07	233.60
2	120	106.29	135.71	155.19	179.80	198.05
1	60	81.76	104.39	119.37	138.30	152.35

Con esta información se generó regresiones de Intensidad - Duración - Período de Retorno o “IDP”, relacionando la duración de la lluvia, el tiempo y la probabilidad de ocurrencia en un tiempo determinado, proceso que se muestra en la tabla 10.

Tabla 10

Primera regresión potencial.

Periodo de Retorno (años)	Término constante de regresión (d)	Coefficiente de regresión [n]
2	1030.34	-0.62
5	1315.51	-0.62
10	1504.32	-0.62
25	1742.88	-0.62
50	1919.86	-0.62
Promedio	1502.58	-0.62

En la segunda regresión potencial se vinculó el período de retorno (T) con la constante de regresión (d), para estimar los factores “k” y “m” de la ecuación de intensidad como se muestra en la tabla 11.

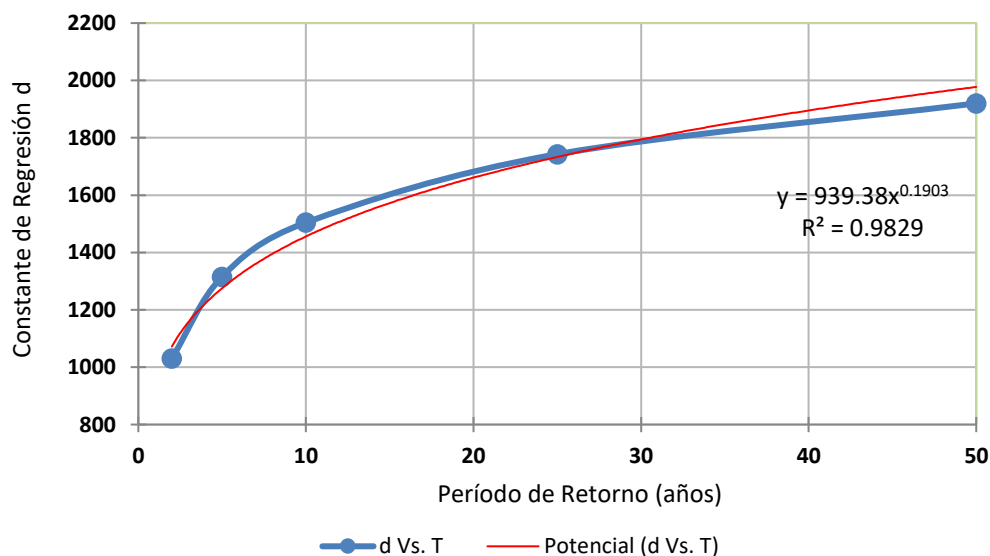
Tabla 11

Segunda regresión potencial.

N.º	x	y	Ln x	Ln y	Ln x*Ln y	(Ln x) ²	
1	2	1030.3379	0.6931	6.9376	4.8088	0.4805	
2	5	1315.5110	1.6094	7.1820	11.5590	2.5903	
3	10	1504.3203	2.3026	7.3161	16.8459	5.3019	
4	25	1742.8815	3.2189	7.4633	24.0234	10.3612	
5	50	1919.8598	3.9120	7.5600	29.5749	15.3039	
Ln (K) =		6.85	K =	939.38	m =	0.1903	

Figura 3

Curva de regresión potencial.



Con las regresiones generadas se consiguieron los factores “n”, “k” y “m” de la ecuación de intensidad “I” para la zona en estudio, dando como resultado la siguiente, donde (T) representa el periodo de retorno y (t) el tiempo de precipitación:

$$I = \frac{939.38 * T^{0.1903}}{t^{0.62}}$$

En la tabla 12 se presentan las intensidades para cada intervalo de tiempo y periodo de retorno necesario para trazar las curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia “IDF” de la zona en estudio, permitiendo generar hietogramas para simular en HEC-HMS el comportamiento hidrológico de la cuenca y estimar los caudales picos durante eventos extremos.

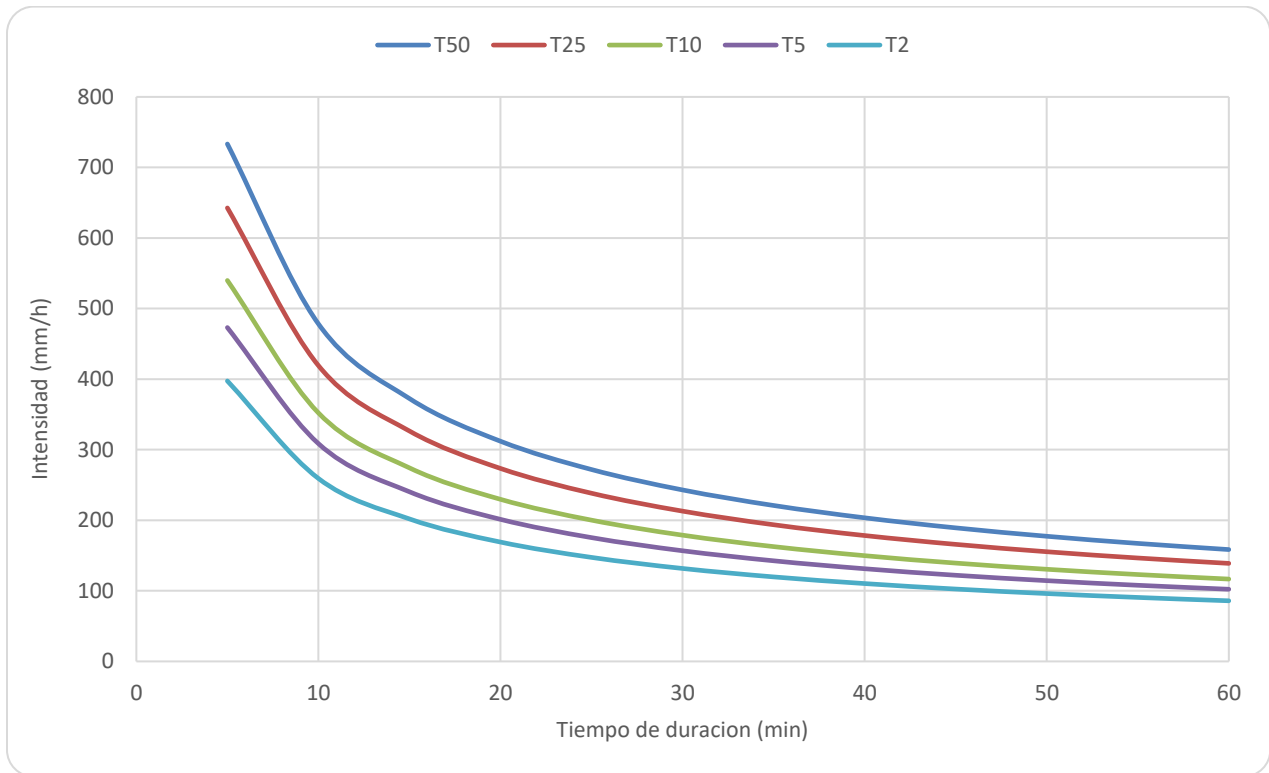
Tabla 12

Intensidades para cada intervalo de tiempo y periodo de retorno.

Frecuencia	Duración en minutos											
	Años	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
2	397.45	259.26	201.92	169.11	147.38	131.72	119.78	110.31	102.59	96.14	90.65	85.92
5	473.14	308.63	240.38	201.32	175.45	156.80	142.59	131.32	122.13	114.45	107.92	102.28
10	539.84	352.14	274.27	229.70	200.19	178.91	162.69	149.84	139.34	130.58	123.13	116.70
25	642.66	419.21	326.50	273.45	238.31	212.98	193.67	178.37	165.88	155.45	146.58	138.93
50	733.25	478.30	372.53	312.00	271.91	243.00	220.98	203.52	189.27	177.36	167.25	158.51

Figura 4

Curva de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF).



Hietograma

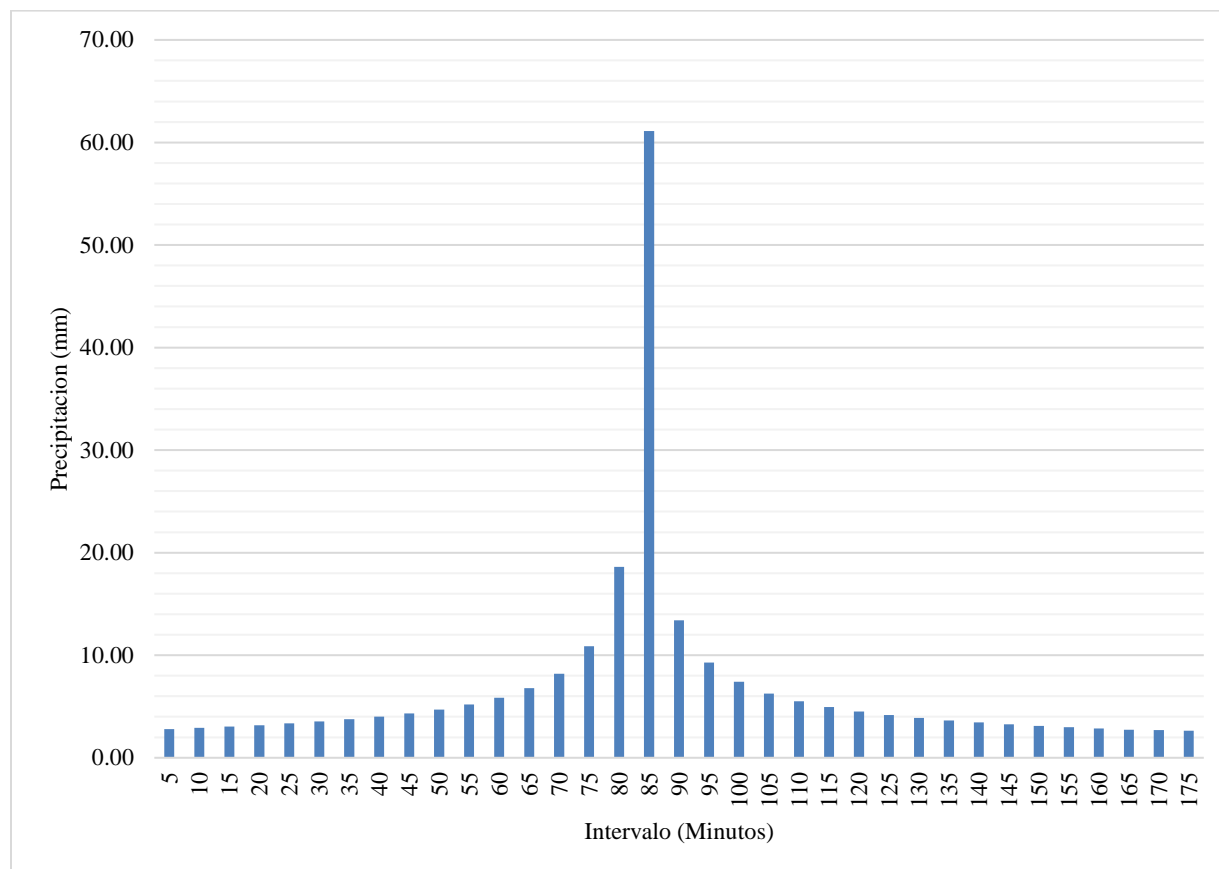
Mediante el método de bloques alternos, se generó el hietograma para analizar cómo se distribuye la intensidad de precipitación para un periodo de retorno de 50 años (ver tabla 13 y figura 5), siendo un elemento clave para entender cómo la cuenca respondería ante un evento extremo de lluvia, permitiendo modelar la escorrentía y las posibles inundaciones en el escenario más crítico.

Tabla 13*Cálculo del hietograma por bloques alternos para $Tr = 50$ años.*

Instante (min)	Intensidad (mm/h)	Precipitación acumulada (mm)	Precipitación Parcial (mm)	Intensidad parcial (mm/h)	Precipitación Alternada (mm)	Int. Parcial Alternada (mm)
5	733.25	61.10	61.10	733.25	2.80	33.55
10	478.30	79.72	18.61	223.35	2.91	34.93
15	372.53	93.13	13.42	160.99	3.04	36.47
20	312.00	104.00	10.87	130.40	3.18	38.21
25	271.91	113.29	9.29	111.54	3.35	40.19
30	243.00	121.50	8.21	98.49	3.54	42.45
35	220.98	128.90	7.40	88.82	3.76	45.09
40	203.52	135.68	6.78	81.30	4.02	48.20
45	189.27	141.95	6.27	75.25	4.33	51.94
50	177.36	147.80	5.85	70.26	4.71	56.56
55	167.25	153.31	5.50	66.05	5.20	62.44
60	158.51	158.51	5.20	62.44	5.85	70.26
65	150.88	163.45	4.94	59.31	6.78	81.30
70	144.14	168.17	4.71	56.56	8.21	98.49
75	138.14	172.68	4.51	54.12	10.87	130.40
80	132.76	177.01	4.33	51.94	18.61	223.35
85	127.89	181.17	4.16	49.98	61.10	733.25
90	123.46	185.19	4.02	48.20	13.42	160.99
95	119.41	189.07	3.88	46.57	9.29	111.54
100	115.70	192.83	3.76	45.09	7.40	88.82
105	112.27	196.47	3.64	43.72	6.27	75.25
110	109.09	200.01	3.54	42.45	5.50	66.05
115	106.15	203.45	3.44	41.28	4.94	59.31
120	103.40	206.80	3.35	40.19	4.51	54.12
125	100.83	210.06	3.26	39.17	4.16	49.98
130	98.42	213.24	3.18	38.21	3.88	46.57
135	96.16	216.35	3.11	37.32	3.64	43.72
140	94.03	219.39	3.04	36.47	3.44	41.28
145	92.01	222.37	2.97	35.68	3.26	39.17
150	90.11	225.28	2.91	34.93	3.11	37.32
155	88.31	228.13	2.85	34.22	2.97	35.68
160	86.60	230.92	2.80	33.55	2.85	34.22
165	84.97	233.67	2.74	32.90	2.74	32.90
170	83.42	236.36	2.69	32.30	2.69	32.30
175	81.94	239.00	2.64	31.72	2.64	31.72

Figura 5

Hietograma de precipitación para $Tr = 50$ años.



Para poder alimentar el modelo HEC-HMS es necesario el uso de información topográfica y meteorológica para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca ante eventos extremos, permitiendo simular diversos escenarios de precipitación, considerando intensidades y duraciones específicas para diferentes períodos de retorno según lo señalan Cabrera *et al* (2019), en su estudio donde evalúa una cuenca de páramo. Este criterio coincide con el trabajo de Vallejo *et al.* (2024), quienes generan la lluvia de diseño a partir de precipitaciones máximas en 24 horas, donde desarrollan curvas IDF para períodos de retorno de 2 a 500 años, lo cual permite comprender la dinámica hidrológica, y establecer un marco sólido en la planificación y gestión del recurso hídrico.

Características Morfométricas

Mediante una simulación hidrológica en HEC-HMS, basada en la lluvia de diseño y el hietograma para un periodo de retorno de 50 años, se estimó las propiedades morfométricas de la cuenca media-baja del Río Chico, como se detalla a continuación.

Figura 6

Cuenca media baja de Rio Chico en el modelo HEC-HMS.

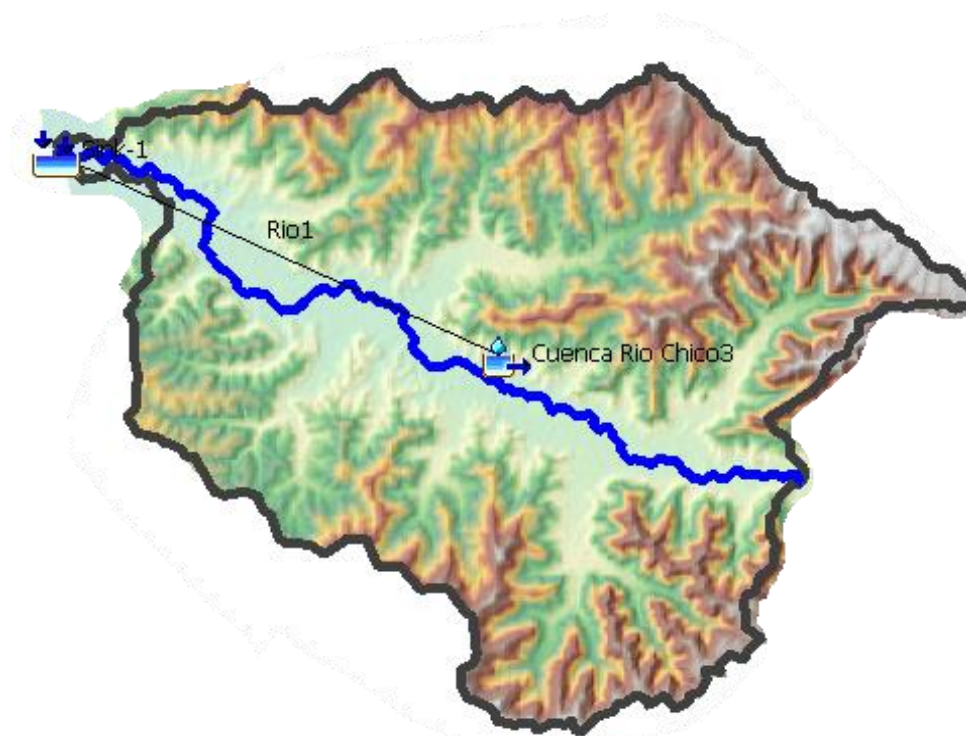


Tabla 14

Parámetros generales de la cuenca media baja de Rio Chico.

Cuenca	Numero de Curva (-)	Área (km ²)	Perímetro (km)
Rio Chico	75	275.07	111.58

La tabla 15 muestra la información general de la cuenca media-baja, que, con un área que la clasifica como una cuenca intermedia pequeña, se encuentra dentro del rango de 250 a 500 km², conforme a la clasificación detallada en la tabla 3, que sugiere que tiene una capacidad limitada para manejar grandes volúmenes de agua durante eventos de lluvia extrema.

Tabla 15

Parámetros generales de la cuenca.

Parámetro	Valor
Área (A) [km ²]	275.07
Perímetro (P) [m]	111.58
Longitud del Curso Principal (Lc) [km]	30.82
Cota Mayor [m]	590
Cota Menor [m]	20
Desnivel altitudinal (DA) [m]	570

Los parámetros de relieve presentados en la tabla 16 indican que la cuenca posee un coeficiente de compacidad o Gravelius de 1.90, clasificándola como una cuenca alargada, de acuerdo a la clasificación de la tabla 5, tendiendo a tener un tiempo de respuesta más rápido ante eventos de lluvia, siendo más propensas a generar picos de caudal más y experimentar inundaciones con mayor rapidez.

Tabla 16

Parámetros de forma de la cuenca.

Parámetro	Valor
Coeficiente Compacidad o Gravelius (Kc) [-]	1.90

La tabla 17 presenta los parámetros de relieve, donde se observa una pendiente media del cauce del 2.0 %, lo que la clasifica como nula o casi a nivel, según la tabla 6, donde la alta vulnerabilidad a inundaciones en las zonas bajas se debe a la combinación de pendientes suaves y suelos impermeables, lo que facilita la acumulación de agua y aumenta el riesgo de inundaciones.

Tabla 17

Parámetros de relieve de la cuenca.

Parámetro	Valor
Pendiente Media del Cauce (j) [%]	2.00
Pendiente Media de la Cuenca (J) [m/m]	0.007

Con respecto a los parámetros de la red hídrica mostrados en la tabla 18, la cuenca presenta una densidad de drenaje de 0.13 km/km², lo que indica una escorrentía baja y favorece la infiltración según la clasificación de la tabla 7 implicando que durante lluvias moderadas tiene una mayor capacidad para absorber el agua sin que se produzcan grandes volúmenes de escorrentía superficial; su río principal es de orden 5, con un tiempo de concentración de 310.09 minutos y un tiempo de retardo de 108.57 minutos.

Tabla 18

Parámetros de forma de la red Hídrica.

Parámetro	Valor
Densidad de Drenaje [km/km ²]	0.13
Número de Orden	5
Tiempo de concentración (tc) [min]	310.09
Tiempo de retardo (Lag Time) [min]	108.57

Caudales Máximos Probable

Teniendo en cuenta la morfometría de la cuenca media – baja de Río Chico se realizó una simulación hidrológica utilizando el software HEC-HMS, integrando datos de entrada como el número de curva, el tiempo de concentración, las precipitaciones máximas en 24 horas, logrando estimar un caudal máximo probable de 2 048 m³/s para un Tr = 50 años; esto es esencial para tener una proyección precisa del comportamiento hidrológico de la cuenca ante un evento extremo, facilitando la evaluación de riesgos de inundación.

Los resultados de la caracterización morfométrica de Figueroa y Ortega (2020), muestran coincidencias significativas en orden de magnitud respecto a la simulación hidrológica realizada según los parámetros considerados, en ambos estudios se integran precipitaciones máximas en 24 horas mediante el software HEC-HMS, donde ellos obtuvieron un área de 460,31 km² que la clasifica como intermedia-pequeña, un perímetro de 117,66 km con una longitud del curso de agua principal de 51,04 km, una longitud axial de 43,53 km, una cota máxima de 440 m y mínima de 20 m que dan una diferencia altitudinal de 420 m.s.n.m, y un coeficiente de compacidad de 1.55 que la categoriza de forma oval oblonga a rectangular.

Según Benavidas *et al.*(2021), los parámetros obtenidos evidencian vulnerabilidad en la cuenca a procesos de inundación y deslizamiento, especialmente en zonas con pendientes suaves y suelos impermeables, donde su forma alargada y los largos tiempos de concentración incrementan la probabilidad de crecidas lentas de gran magnitud, aumentando el riesgo en las zonas pobladas.

Simulación de Eventos de Inundaciones

Se realizó una simulación hidráulica para analizar las profundidades y velocidades del flujo de agua, considerando un caudal de 2 048 m³/s aguas abajo. Los parámetros empleados incluyeron un coeficiente de Manning de 0.06, una tolerancia de volumen celular de 0.003, una

fracción mínima de área celular de 0.01, una profundidad laminar de 0.06, cinco celdas y una resolución del Raster de 5 m.

El modelo fue implementado para predecir un evento hiperconectado, usando un Modelo Digital del Terreno (MDT) de 3m x 3m generado por SIG Tierra (ver figura 7), mediante un refinamiento exhaustivo del cauce (ver figura 8), con un ajuste preciso en los parámetros de modelado, sin considerar la presencia de sedimentos. En el análisis de la geometría del río Chico, la malla de simulación tuvo un tamaño base de 10m x10m y un refinamiento del cauce de 5m x 5m (ver figura 9).

Figura 7

Modelo Digital del Terreno (MDT) de 3m x 3m generado por SIG Tierra.

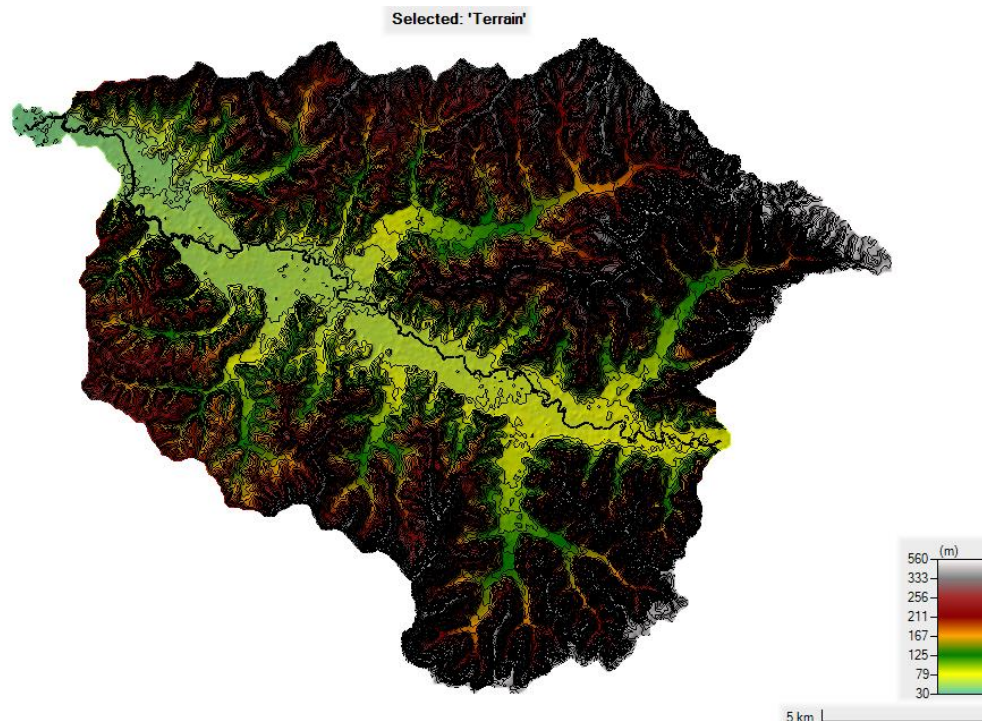
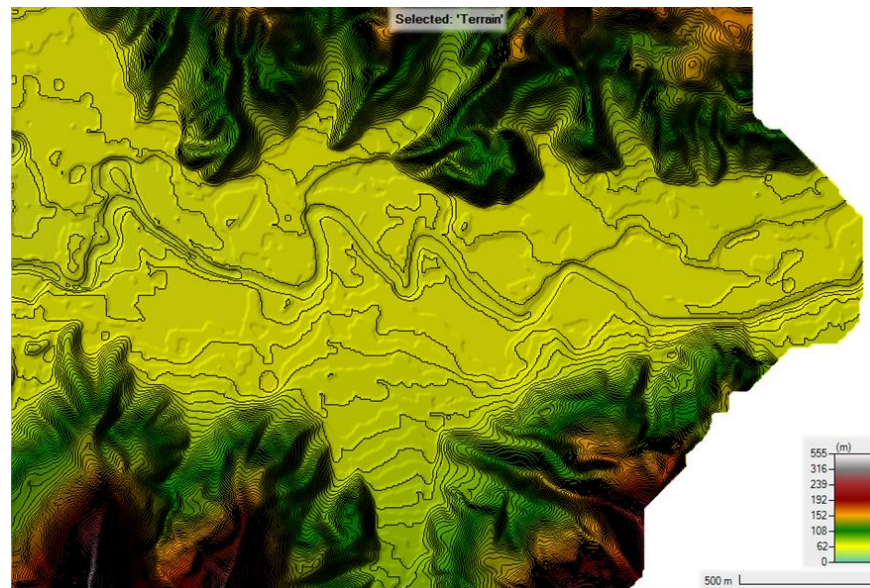
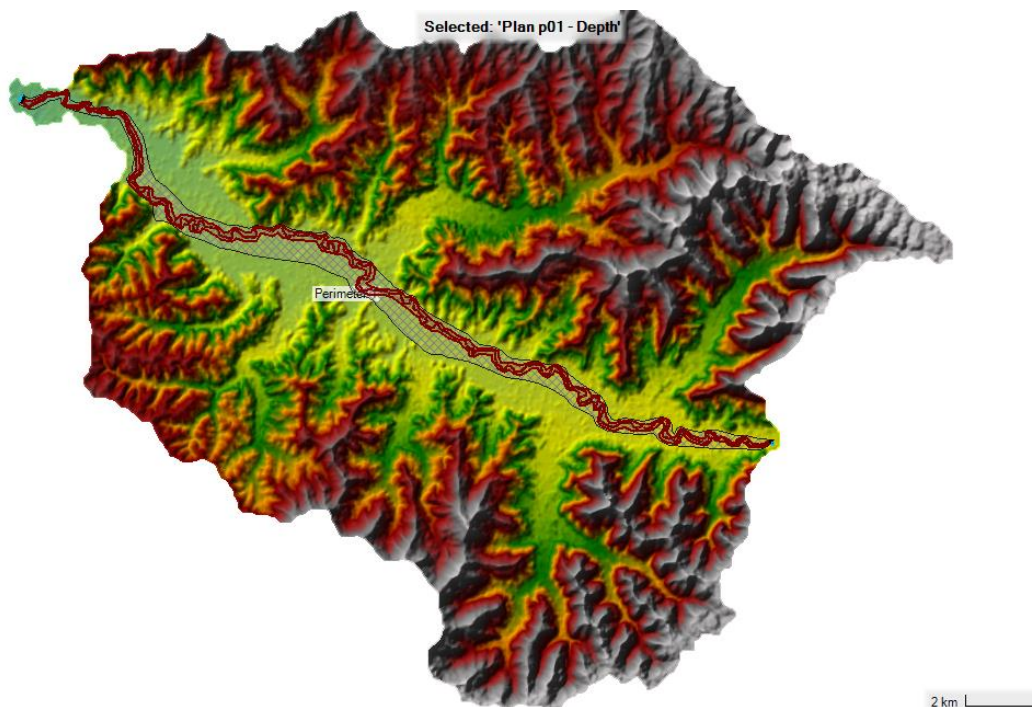


Figura 8

Análisis de la geometría del cauce de Rio Chico.

**Figura 9**

Malla de simulación base de 10m x10m y refinamiento del cauce de 5m x 5m.



Velocidades Mínimas y Máximas durante Evento de Inundación

Se registraron velocidades de flujo que oscilaron entre un mínimo de 0.05 m/s y un máximo de 4.05 m/s, evidenciando la variabilidad dinámica del agua a lo largo de la cuenca, permitiendo evaluar los riesgos asociados al arrastre de personas u objetos, especialmente en tramos críticos que pueden comprometer la seguridad de la población y la estabilidad de infraestructuras cercanas.

Figura 10

Velocidades estimadas durante eventos repentinos de inundación.

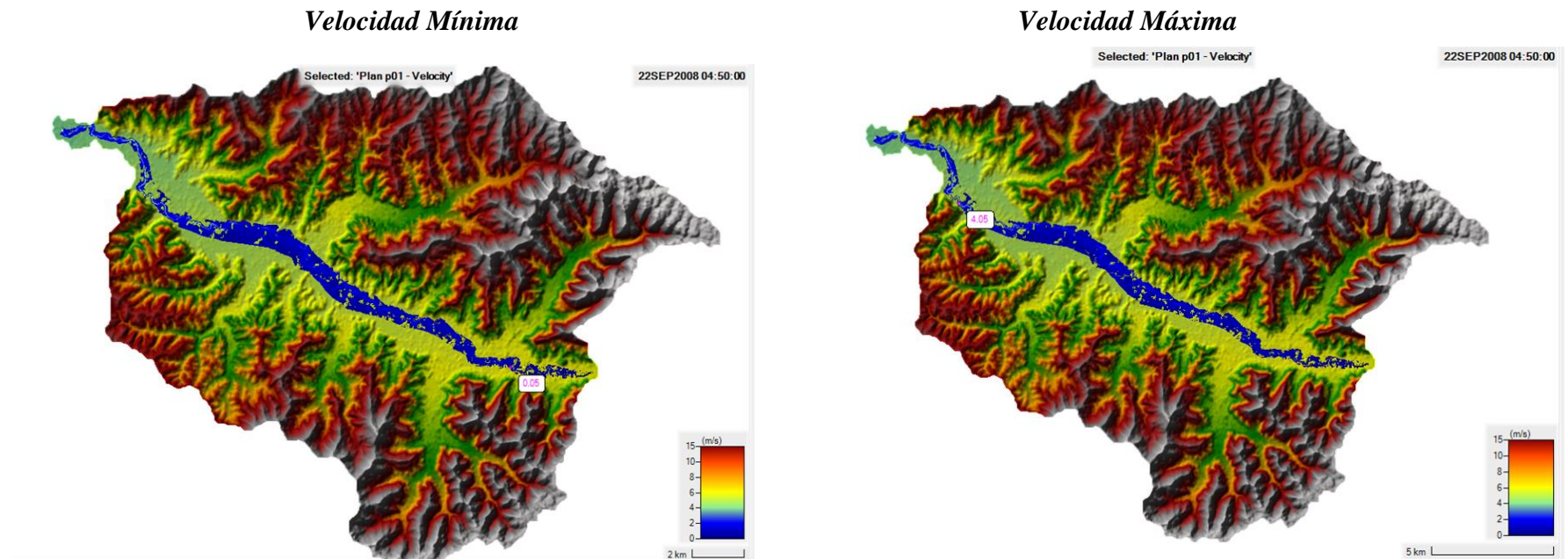
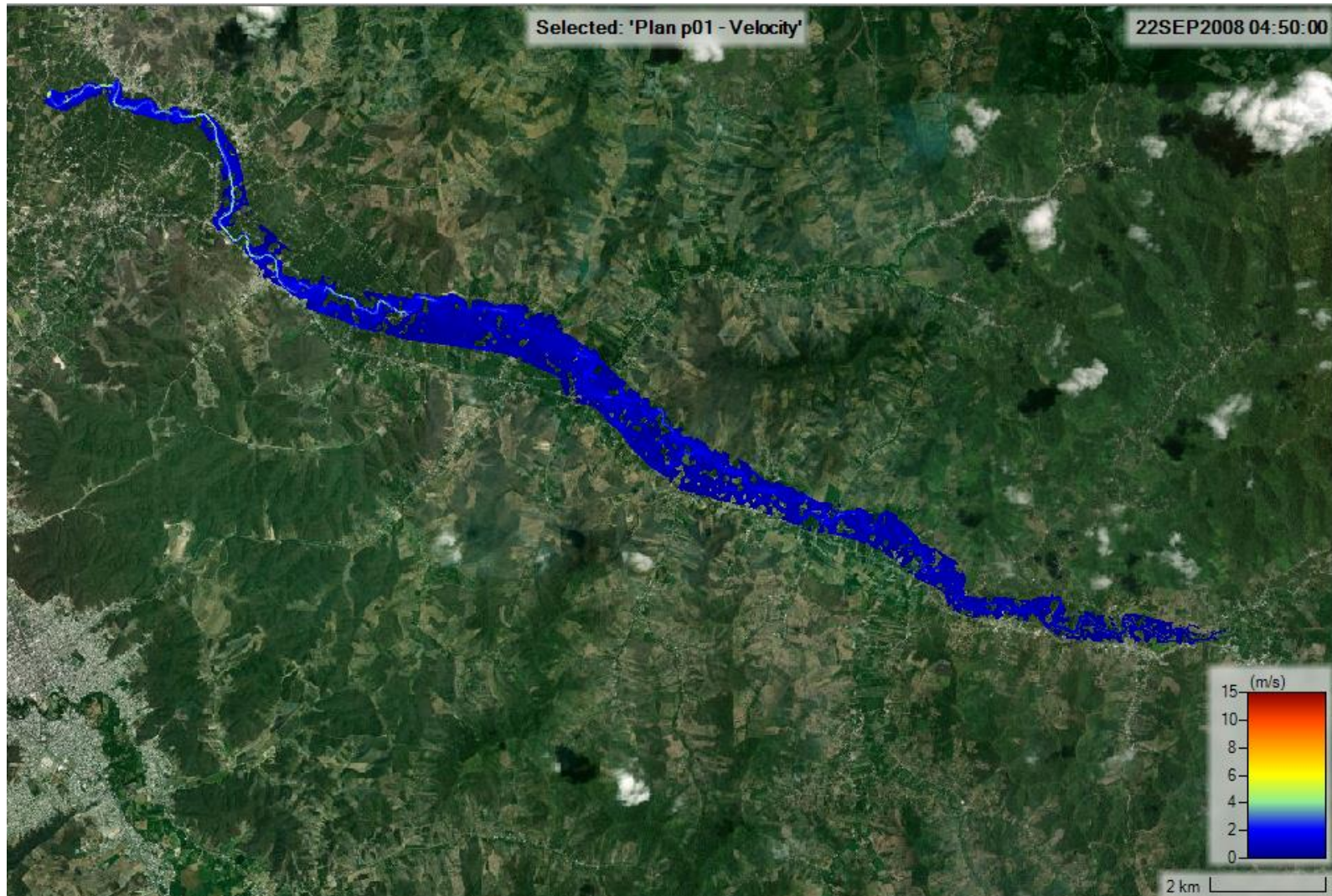


Figura 11

Fluctuación de las velocidades en la cuenca media-baja de Río Chico.



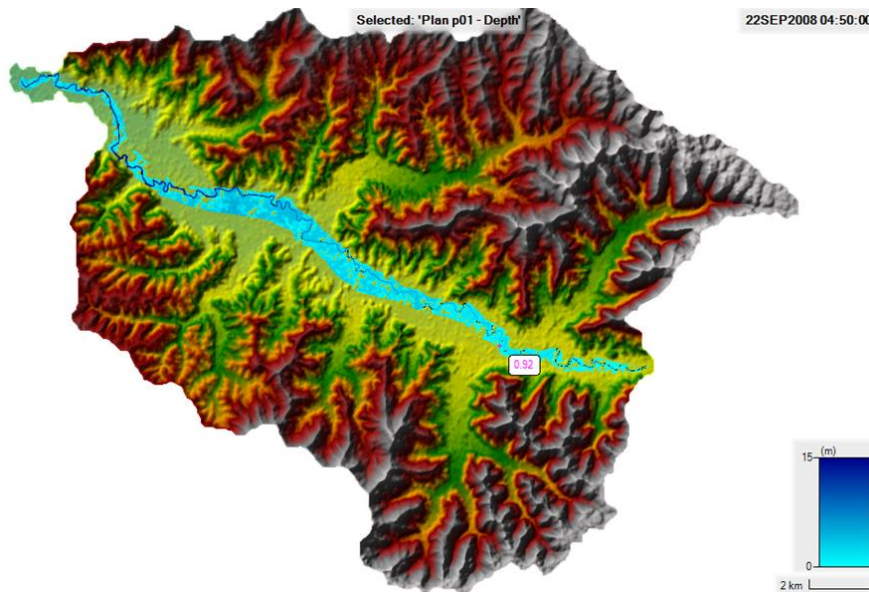
Alturas de Agua Mínimas y Máximas durante Evento de Inundación

La profundidad hidráulica osciló entre un mínimo de 0.92 m y un máximo de 4.87 m, reflejando un nivel considerablemente elevado de agua en el sistema, lo cual permite analizar los riesgos de inundación y diseñar estrategias preventivas en zonas vulnerables, identificando áreas críticas para planificar medidas de mitigación efectivas.

Figura 12

Profundidades estimadas durante eventos repentinos de inundación.

Profundidad Mínima



Profundidad Máxima

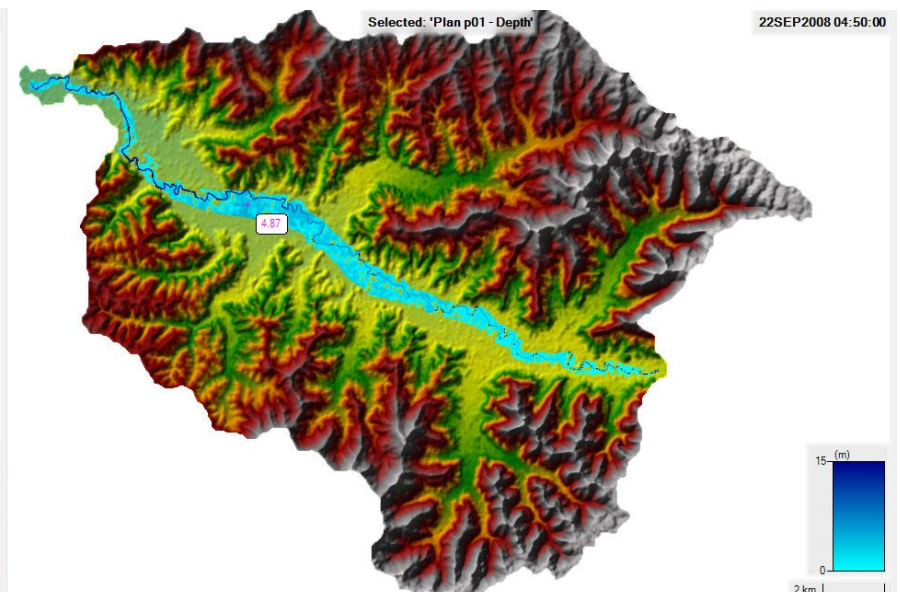


Figura 13

Fluctuación de las alturas de agua en la cuenca media-baja de Río Chico.



Figura 14

Zona Baja de inundación.

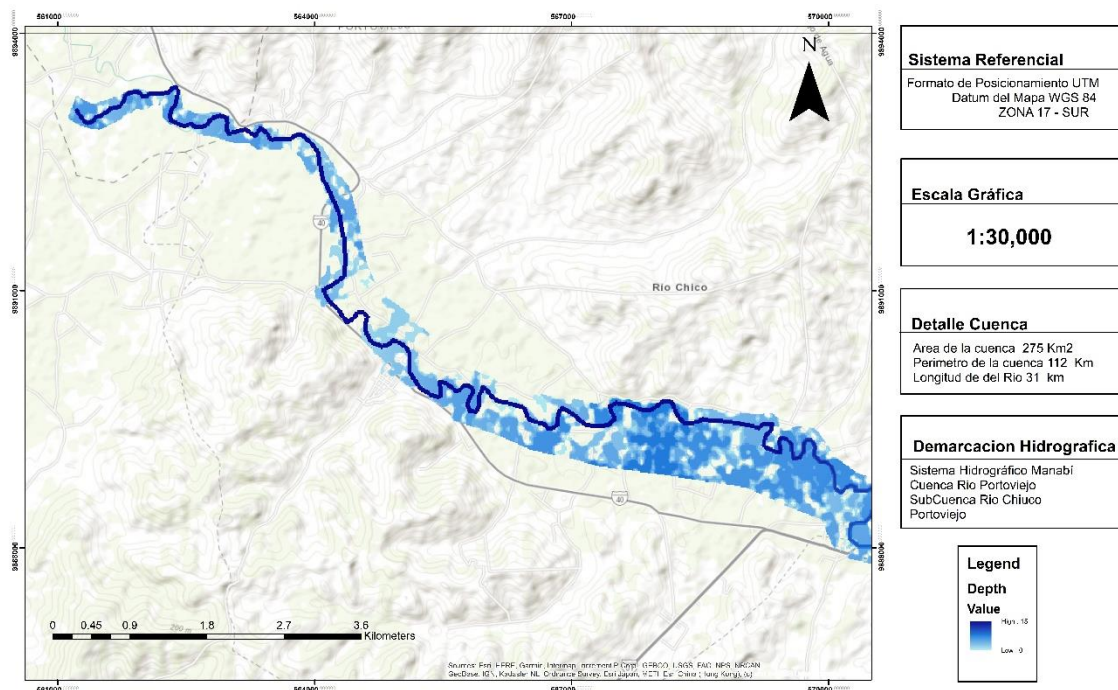


Figura 15

Zona de media baja inundación.

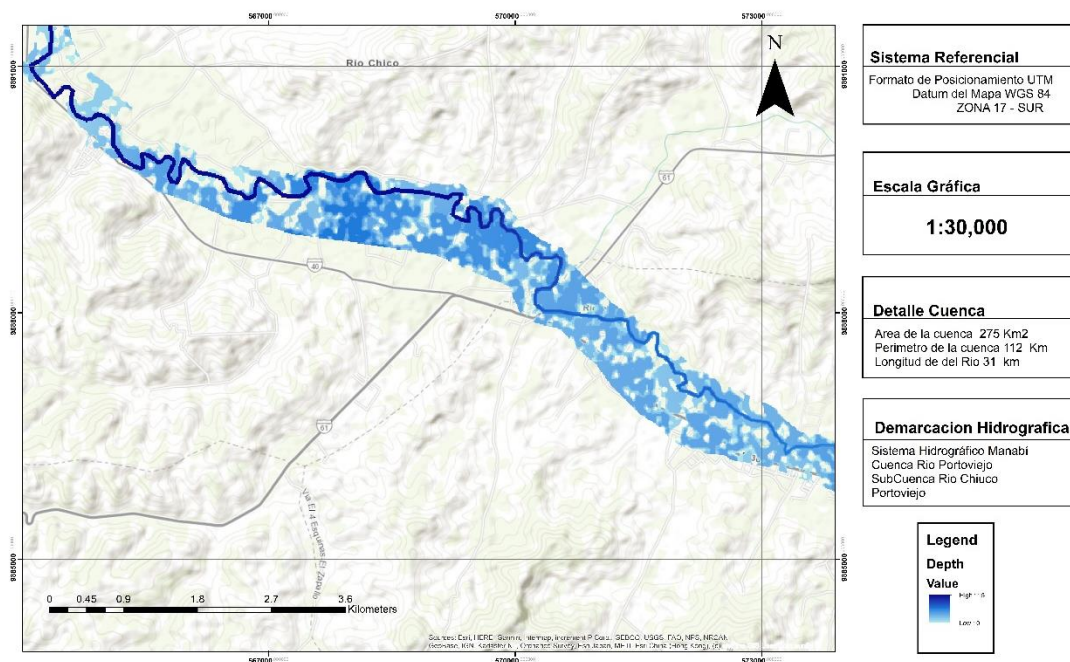
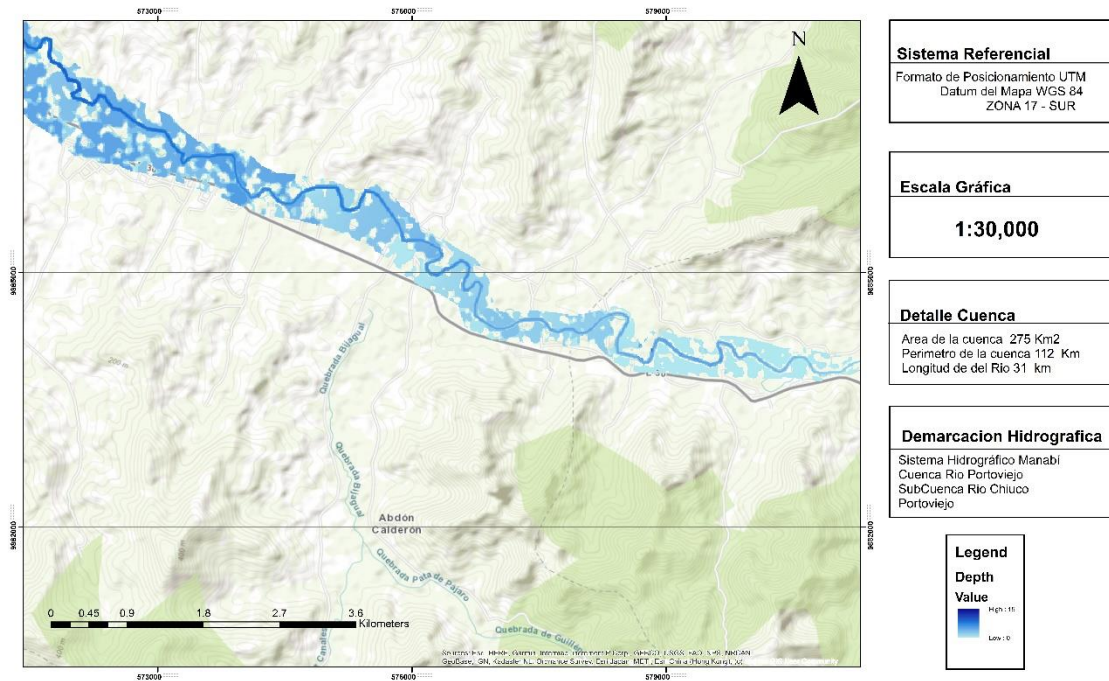


Figura 16

Zona de media inundación.



Las condiciones obtenidas en este estudio coinciden con los hallazgos de Orozco *et al.* (2024), quienes señalaron que las velocidades del flujo en un afluente superficial pueden variar desde condiciones laminares hasta turbulentas por los obstáculos y las variaciones en la geometría de la sección transversal. En cuanto a las alturas del agua, Benítez y Ordoñez (2018) indica que estas dependen del caudal que circula en la cuenca, así como de la topografía y la capacidad de almacenamiento del sistema, lo cual resalta la interrelación entre las condiciones del flujo y las características morfométricas de la cuenca.

Conclusiones

La recolección de información topográficos como alturas entre 590 y 20 msnm, y meteorológica con lluvias máximas en 24 horas 437 y 132 mm, permiten calcular lluvias de diseño y generar curvas IDF para dotar al modelo HEC-HMS, de tal forma que otorgue una respuesta hidrológica aproximada, permitiendo diseñar infraestructura hidráulica resiliente priorizar medidas como reforestación y terrazas de infiltración, y reducir riesgos de inundaciones.

La caracterización hidrológica en el modelo HEC-HMS denotó un área de 275.1 km² que la clasifica como una cuenca intermedia pequeña, un coeficiente de compacidad de 1.90 que la clasifica como alargada, con pendiente media del cauce nula o casi a nivel del 2.0 %, su la red hídrica posee una esorrentía baja que favorece la infiltración, con su río principal es de orden 5 de longitud 30.82 km, un tiempo de concentración de 310.09 minutos y un tiempo de retardo de 108.57 minutos, lo que sugiere una dinámica hidrológica que favorece la absorción del agua y reduce el riesgo de inundaciones rápidas, pero durante lluvias extensas se podrían generar caudales elevados que afecten zonas críticas, permitiendo identificar áreas críticas en la cuenca, optimizar estrategias de manejo de inundaciones y diseñar infraestructuras hidráulicas adaptadas.

La simulación de eventos de inundación en el software HEC-RAS permitió evaluar el comportamiento hidráulico de la cuenca ante distintas intensidades de precipitación y condiciones extremas, con un caudal máximo de 2 048 m³/s para un periodo de retorno de 50 años, donde se registraron velocidades de flujo entre un mínimo de 0.05 m/s y un máximo de 4.05 m/s, con profundidades hidráulicas entre un mínimo de 0.92 m y un máximo de 4.87 m, valores que reflejan la vulnerabilidad de la cuenca ante inundaciones, ya que el agua puede acumularse en las zonas más bajas, o generar arrastre de personas u objetos por las velocidades que alcanza.

Recomendaciones

Se debe mantener un monitoreo continuo de las variables climáticas y de caudales en la cuenca Río Chico, para actualizar y validar periódicamente los datos del modelo HEC-HMS, facilitando ajustes en la modelación ante cambios en patrones climáticos y fenómenos extremos.

Utilizar los mapas para crear planes de emergencia y construir infraestructuras adecuadas que disminuyan el impacto de futuras inundaciones, considerando una actualización periódica.

Bibliografía

- Alcocer, V., Rodríguez, J., Bourguett, V., Llaguno, O., Albornoz, P. (2016). *Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas*. Obtenido de Revista Scielo, volumen 7: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000500033
- Araque, A., Vásquez, M., Manchero, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., y Ortiz, L. (2019). *Cuencas Hidrográficas*. Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19038/1/Cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas.pdf>
- Arreguín, F., López, M., y Marengo, H. (2016). *Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática*. Obtenido de Revista Tecnología y Ciencias del Agua: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=353549829001>
- Benavidas, M., Scheffczyk, K., Urrutia, M., Huerta, B., y Walz, Y. (2021). *Evaluación del riesgo de inundación en Ecuador*. Obtenido de Servicio Nacional de Gestión de Riesgo y Emergencias: https://collections.unu.edu/eserv/UNU:8434/VALE_Flood_Risk_Assesment_Report_Ecuador_SPA_FINAL_META.pdf
- Benítez, M., y Ordoñez, A. (2018). La Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) como herramienta para contribuir al proceso de adaptación del Cambio Climático en la Cuenca Transfronteriza Catamayo-Chira. Obtenido de Universidad Andina Simón Bolívar, Ecuador: <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/6438/1/T2746-MCCNA-Benitez-La%20gestion.pdf>

- Borja, M. (2016). *Metodología de Investigación Científica para ingeniería Civil*. Obtenido de ACADEMIA:
https://www.academia.edu/33692697/Metodolog%C3%ADa_de_Investigaci%C3%B3n_Cient%C3%ADfica_para_ingenier%C3%ADa_Civil
- Burgos, B., Cartaya, S., y Mero, D. (2019). *Análisis de la vulnerabilidad a inundaciones de la parroquia Santa Ana de Vuelta Larga, provincia de Manabí, Ecuador*. Obtenido de Revista Scielo, volumen 98: <https://doi.org/10.14350/rig.59767>
- Cabrera, J., Timbe, L., y Crespo., P. (2019). *Evaluación del modelo HEC-HMS para la simulación hidrológica de una cuenca de páramo*. Obtenido de Universidad Nacional de Colombia: <https://www.redalyc.org/journal/496/49662789043/html/>
- Cajigal, E., y Maldonado, A. (2019). *Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante inundaciones. Un ejercicio emergente ante el cambio climático*. Obtenido de Revista Scielo, volumen 19: <https://doi.org/10.22136/est20191342>
- Campos, A. (1998). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Obtenido de Universidad Autónoma de San Luis Potosí: <https://repositorioinstitucional.uaslp.mx/xmlui/handle/i/3331>
- Carrera, J. (2019). *Simulación de los procesos naturales mediante un modelo numérico para modelar fenómenos relacionados con procesos de flujo y transporte de sedimentos en cauces naturales*. Obtenido de Universidad de Cuenca:
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/446/1/Tesis.pdf>

- Cruz, S., Mendoza, C., Pezo, P., Ascoy, K., Gonzales, T., y Guerrero, H. (2022). *Delimitación de una cuenca con ArcGIS*. Obtenido de Revista Multidisciplinaria Ciencia Latina: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/1906>
- Cunge, J. (1969). *On the subject of A flood propagation computation method*. Obtenido de Journal of Hydraulic Research: <https://doi.org/10.1080/00221686909500264>
- Fernández, C., y Buss, S. (2016). *Ocurrencia y gestión de inundaciones en América Latina y el Caribe: Factores claves y experiencia adquirida*. Obtenido de Banco Interamericano de Desarrollo: <https://publications.iadb.org/es/publicacion/15599/ocurrencia-y-gestion-de-inundaciones-en-america-latina-y-el-caribe-factores#:~:text=http%3A//dx.doi.org/10.18235/0010109>
- Figuera, N., y Ortega, C. (2020). *Geoprocesamiento aplicado en la evaluación de las características fisiográficas de la subcuenca río Chico*. Obtenido de Revista Multidisciplinaria Polo del Conocimiento, volumen 5: <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/2034/4055>
- García, A., y Rodríguez, A. (2015). *Análisis de Frecuencia de precipitaciones máximas diarias en la cuenca alta del río Cauca, utilizando distribuciones de probabilidades*. Obtenido de Universidad del Valle: <https://hdl.handle.net/10893/25890>
- Guerrero, F. (2018). *Evaluación y análisis de la intensidad de lluvia de diseño influenciada por oscilaciones decadales de precipitación mediante la determinación de una metodología de cálculo para la cuenca del río Paute*. Obtenido de Universidad de Cuenca, Ecuador: [https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/31528/3/Trabajo-de-Titulaci% c3% b3n.pdf](https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/31528/3/Trabajo-de-Titulaci%c3%b3n.pdf)

Guerrero, N., Diaz, M., Herrera, R., y Nieto, C. (2024). *Caracterización hidrológica de la microcuenca del río Quevedo, Ecuador*. Obtenido de Revista Instituto Superior Tecnológico Los Andes, volumen 5:
<https://revistacodigocientifico.itslosandes.net/index.php/1/article/view/335>

Horton, R. (1945). *Erosion al development of streams and their drainage basins: hydrographical approach to quantitative morphology*. Obtenido de Geological Society of America Bulletin, 56. 275-370.

Ibáñez, S., Moreno, H., y Gisbert, J. (2011). *Método para la determinación del coeficiente de escorrentía C*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia:
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10781/Coeficiente%20de%20escorrent%20C3%20ADa.pdf>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2024). *Biblioteca- INAMHI*. Obtenido de Publicaciones metereológicas.

Londoño, C. (2001). *Cuencas hidrográficas: bases conceptuales - caracterización - planificación - administración*. Obtenido de Universidad de Tolima, Colombia:
https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/siar-puno/archivos/public/docs/cuencas_hidrograficas_bases.pdf

Marcus, R., Valle, M., Carrillo, S., Marcor, J., y Ignacio, C. (2019). *Curvas de Intensidad Duración y Frecuencia (IDF) de la estación metereológica del CIM-FISH Serie 1986-2016*. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7260055.pdf>

- Orozco, M., Reyes, J., Párraga, J., y Jesús, C. (2024). Modelación Hidrológica e Hidráulica de la Quebrada El Tejado para la Análisis de Zonas de Inundación en la Ciudad de Quito en 2023. Obtenido de Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación, volumen 14: <https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/227>
- Paz, A. (2023). *Inundaciones y sequías: los desastres que más afectaciones han provocado en América Latina*. Obtenido de Obtenido de MONGABAY: <https://es.mongabay.com/2023/09/desastres-que-mas-afectaciones-han-provocado-en-america-latina-informe/>
- Pinto, C., y Prehn, C. (2023). *Análisis de la cuenca del río Portoviejo y el plan de contingencia ante el fenómeno de el niño*. Obtenido de Ciencia Latina Revista científica multidisciplinaria: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4535
- Pizarro, R., Abarza, A., Farias, C., y Jordán, C. (2003). *Construcción de Curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) en zonas semiáridas de Chile central*. Obtenido de: <https://www.fao.org/3/XII/0397-B3.htm>
- Reyes, J. (2023). *Eficiencia del recurso hídrico en el riego de pasto para la adaptación al cambio climático*. (Tesina de titulación no publicada). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Chone.
- Sánchez, J. (2013). *Valores extremos de distribución de Gumbel*. Obtenido de Universidad Salamanca, España: https://hidrologia.usal.es/temas/calculos_esta.pdf
- Sanmartín, B., Prehn, C., Reyes, J., y Chavarría, J. (2024). *Evaluación de Inundaciones Mediante Modelación Hidráulica en el Río Burgay: Caso de estudio Sector el Descanso*. Obtenido

- de Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología E Investigación, volumen 7:
<https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0218>
- Serrano, S., Reisancho, A., Lizano, R., Borbor, M., y Stewart, A. (2017). *Análisis de inundaciones costeras por precipitaciones intensas, cambio climático y fenómeno de El Niño*. Caso de estudio: Machala. Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador:
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17163/lgr.n24.2016.05>
- Strahler, A. (1952). *Dynamic Basis of Geomorphology*. Obtenido de Revista Geological Society of America Bulletin, 63, 923-938: [http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2)
- Témez, J. (1978). *Calculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Obtenido de Tecnología Carreteras MOPU:
https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0610400.pdf
- Tenesaca, M., Reyes, J., Vallejo, D., y Chavarría, J. (2024). *Modelación Hidrológica e Hidráulica para la Identificación de Zonas de Inundación en la Quebrada Las Abras, Riobamba*. Obtenido de Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación, volumen 7: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0220>
- Toapaxi, J., y Acero, A. (2021). *Análisis de Inundación por Rotura de Presa Utilizando el Modelo HEC-RAS 2D: Caso de Estudio de la Presa Mulacorral, Provincia de Tungurahua, Ecuador*. Obtenido de Revista Politécnica, volumen 48:
<https://www.redalyc.org/journal/6887/688772209005/html/>

Vallejo, D., Reyes, J., Tenesaca, M., y Alarcón, J. (2024). *Modelación Hidráulica HEC-RAS para la Estimación y Simulación de Inundaciones en la Quebrada Cunduana, Riobamba.*

Obtenido de Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación, volumen 7: <https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/229>

Vélez, J., y Botero, A. (2011). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales.* Obtenido de

Universidad Nacional de Colombia, volumen 78:

<https://www.redalyc.org/pdf/496/49622372006.pdf>

Vera, B., Mero, C., y Daza, R. (2024). *Análisis de vulnerabilidad y resigo a inundación en la parroquia Río chico del cantón Portoviejo, provincia de Manabí.* Obtenido de Revista

Multidisciplinaria de Investigación Científica, volumen 8:

<https://www.investigarmqr.com/ojs/index.php/mqr/article/view/1506>

Villela, S. y Mattos, A. (1975). *Hidrología aplicada.* Obtenido de McGraw-Hill do Brasil, Sao Paulo, 245 p.

Zhicay, J. (2020). *Caracterización morfométrica y estudio hidrológico de la microcuenca del río San Francisco, cantón Gualaceo.* Obtenido de Universidad Politécnica Salesiana,

Ecuador: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18364/1/UPS-CT008684.pdf>

Anexos

Tabla 19

Coefficientes de escorrentía.

Cobertura del suelo	Tipo de suelo	Pendiente (%)				
		> 50	20 – 50	5 – 20	1 – 5	0 – 1
Sin vegetación	Impermeable	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60
	Semipermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Permeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
Cultivos	Impermeable	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50
	Semipermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Permeable	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
Pastos, vegetación ligera	Impermeable	0,65	0,60	0,55	0,50	0,45
	Semipermeable	0,55	0,50	0,40	0,40	0,35
	Permeable	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
Hierba	Impermeable	0,60	0,55	0,50	0,45	0,40
	Semipermeable	0,50	0,45	0,40	0,35	0,30
	Permeable	0,30	0,25	0,20	0,15	0,10
Bosque, vegetación densa	Impermeable	0,55	0,50	0,45	0,40	0,35
	Semipermeable	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25
	Permeable	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

Fuente: Ibáñez et al. (2011).

Tabla 20

Números de Curvas.

Descripción del Uso			Grupo Hidrológico del Suelo			
Uso del Suelo	Promedio área impermeable	Condición Hidrológica	A	B	C	D
Áreas urbanas completamente desarrolladas		Pobre	68	79	86	89
		Media	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
Áreas Impermeables						
Aparcamientos, azoteas, carreteras			98	98	98	98
Calles y Carreteras						
Pavimentadas; cunetas y red de saneamiento			98	98	98	98
Pavimentadas; cunetas abiertas			83	89	92	93
Grava			76	85	89	91
Sucias			72	82	87	89
Zonas ajardinadas xerofitas						
Zonas naturales (solo permeables)			63	77	85	88
Zonas ajardinadas (incluidas zonas impermeables)			96	96	96	96
Zonas Urbanas						
Centros comerciales y de negocios	85%		89	92	94	95
Industrial	72%		81	88	91	93
Zonas residenciales						
0.05ha o menos (2 casas)	65%		77	85	90	92
0.10 ha	38%		61	75	83	87
0.13 ha	30%		57	72	81	86
0.20 ha	25%		54	70	80	85
0.40 ha	30%		51	68	79	84
0.81 ha	12%		46	65	77	82
Áreas Urbanas en desarrollo						
Explicaciones (zonas permeables, sin vegetación)			77	86	91	94

Fuente: United States Department of Agriculture (USDA), 1986.

Figura 17

Hietograma y caudal para un periodo de retorno de 50 años.

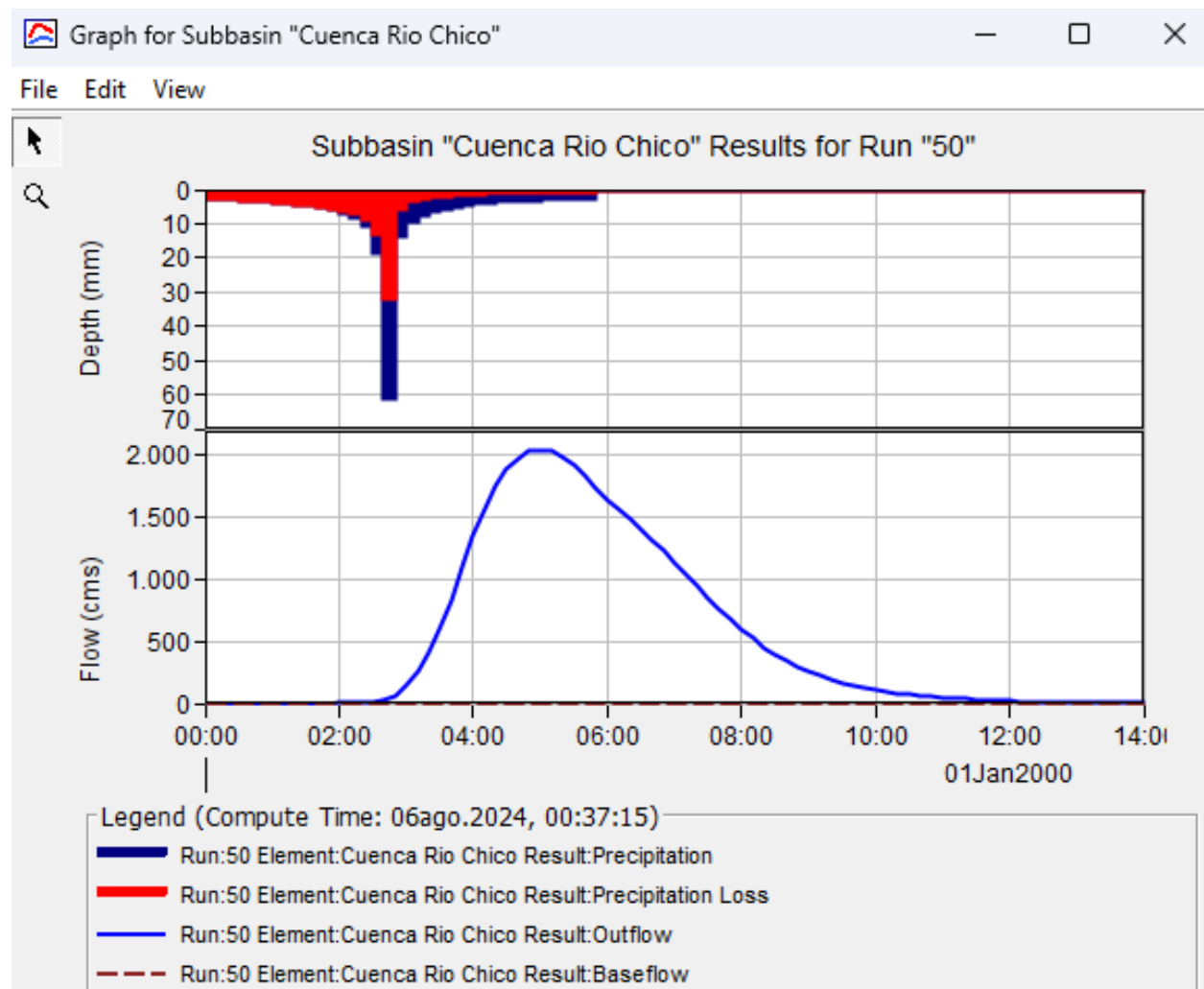


Figura 18

Información levantada en campo.

