

ACTA NOVA

Revista de Ciencias y Tecnología

¹ Universidad Mayor de San Simón,
Dirección de Postgrado Facultad de
Ciencias y Tecnología

² Universidad Católica Boliviana San
Pablo Sede Cochabamba

³ Universidad Mayor de San Simón,
Dirección de Postgrado Facultad de
Ciencias y Tecnología

Autor para correspondencia:
Darcy Xavier Rojas Guerrero
darcy.rojas.civ@gmail.com

Análisis de las inundaciones mediante simulaciones Hidrológicas e Hidráulicas en el río Chorolque de Santiago de Cotagaita

Flood analysis using Hydrological and Hydraulic simulations in the Chorolque River in Santiago de Cotagaita

Darcy Xavier Rojas Guerrero¹, Willman García Fernández², Claudia Lorena Pizarro Muñoz³

Resumen: La investigación se enfoca en el análisis de las inundaciones en el Municipio de Santiago de Cotagaita, Departamento de Potosí, como respuesta al evento extremo ocurrido en febrero de 2020, cuando el río Chorolque se desbordó causando daños a la población. Se aplicaron herramientas de modelación hidrológica HEC-HMS e hidráulica HEC-RAS, para simular caudales máximos y evaluar el comportamiento del cauce bajo distintos escenarios de cambio climático. Para lo cual, se utilizaron datos hidrometeorológicos históricos (1990–2024), curvas I-D-F ajustadas con y sin cambio climático, y se delimitaron subcuencas a partir de un modelo digital de elevación. Los resultados muestran que los actuales muros de contención son insuficientes frente a eventos con periodos de retorno de 50 y 100 años. Se propusieron medidas estructurales (muros de gaviones mejorados) y no estructurales (sistemas de alerta temprana, monitoreo y educación ambiental) como parte de una estrategia de implementación de medidas de reducción de riesgos de desastres de inundaciones.

Palabras clave: Inundaciones, cambio climático, modelaciones hidrológicas e hidráulicas.

Abstract: The research focuses on the analysis of flooding in the Municipality of Santiago de Cotagaita, Department of Potosí, in response to the extreme event that occurred in February 2020, when the Chorolque River overflowed its banks, causing damage to the population. HEC-HMS hydrological and HEC-RAS hydraulic modeling tools will be applied to simulate peak flows and evaluate riverbed behavior under different climate change scenarios. Historical hydrometeorological data (1990–2024), I-D-F curves fitted with and without climate change, and subbasins were delimited using digital elevation model. The results show that current retaining walls are insufficient for events with return periods of 50 and 100 years. Structural measures (improved gabion walls) and non-structural measures (early warning, monitoring, and environmental education systems) were proposed as part of a strategy to implement flood disaster risk reduction measures.

Key words: Floods, climate change, hydrological and hydraulic modeling.

1. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones vistas como amenaza, se refiere al desbordamiento no controlado de masas de agua fuera de sus confines normales; generalmente es ocasionada por la precipitación (lluvia, nieve o granizo), oleaje, marea de tormenta, o falla de alguna estructura hidráulica (OMM, 2012).

Según Moreno et al., 2014 las inundaciones son un fenómeno natural que ocurre durante la presencia de fuertes lluvias las que por su intensidad o su duración no logran ser evacuadas cómodamente por los cauces

naturales que integran la cuenca hidrográfica, produciendo el desbordamiento de ríos y demás cuerpos de agua.

Este suceso pone en evidencia la importancia de estudiar los principios científicos de los fenómenos hidrológicos para desarrollar métodos que permitan minimizar los riesgos asociados a las inundaciones. En el contexto actual de cambio climático, las inundaciones se han vuelto más recurrentes e intensos, es así como el aumento de lluvias torrenciales, resultado de la variabilidad climática con un clima más extremo, incrementa el riesgo de desbordes en sistemas hídricos, poniendo en peligro a comunidades enteras.

Por lo general, las comunidades más afectadas por inundaciones están ubicadas en zonas bajas, planas, con poca cobertura vegetal y suelos asfálticos que impiden la infiltración de agua. La tala de bosques, fallas en el diseño de las obras hidráulicas y ubicación de centros poblados en las orillas de las masas de agua, agravan este problema (CENAPRED, 2009).

A esto se suma el impacto de la variabilidad y el cambio climático, que intensifican los fenómenos de La Niña y El Niño asociados a inundaciones y sequías respectivamente. El impacto del cambio climático debido al efecto invernadero sobre las inundaciones y sequías constituye una de las principales incertidumbres de todos los informes realizados hasta el momento por los organismos internacionales (Benito, 2007).

Las situaciones de inundación también son generadas por causas antrópicas ya que la población asentada en las planicies de inundación y zonas de las rondas de los cuerpos de agua produce alteraciones en los sistemas fluviales y costeros, especialmente bajo situaciones de cambio climático. La construcción de estructuras de protección marginal como diques y revestimientos, muchas veces de forma precaria en situación de emergencia y muy cerca del cauce de los ríos y cuerpos de agua, ha producido alta fragilidad en los mismos, lo que hace más vulnerables las poblaciones que dependen de dichas estructuras (Moreno *et al.*, 2014). Muchas veces el crecimiento urbano sin un plan de ordenamiento territorial ni cumplimiento de normativas hace que las sociedades construyan sus propias vulnerabilidades como es el caso del establecimiento de Organizaciones Territoriales de Base en los conos de deyección de aproximadamente 38 torrenteras del Parque Tunari en el Departamento de Cochabamba (García W. *et al.*, 2021).

El propósito de la investigación es desarrollar una metodología para estimar las inundaciones en Santiago de Cotagaita del Departamento de Potosí, donde el desborde del río Chorolque, ha causado graves daños, superando las estructuras actualmente existentes. Dado que las medidas no son suficientes y no consideran los efectos de la variabilidad climática, se propone un análisis hidrológico e hidráulico para estimar los caudales de máxima recurrencia y evaluar el nivel de amenaza de inundación. Así mismo, se plantea el análisis de medidas estructurales y no estructurales para mitigar y/o reducir el riesgo de las inundaciones.

2. ANTECEDENTES

Los fenómenos como el ocurrido en Cotagaita son potencialmente destructivos, y su ocurrencia está asociada a una probabilidad específica en el tiempo y espacio (Kingma, 2007). A nivel global, se estima que

aproximadamente el 77% de los desastres que afectan a la población mundial están relacionados con fenómenos hidrometeorológicos (Yamanak, 2016). Uno de los factores determinantes en la gravedad de estos eventos es la planeación inadecuada del uso del suelo, sumada a condiciones socioeconómicas que obligan a las personas a asentarse en zonas de alto riesgo de inundación (Maskrey, 1993).

La necesidad de una adecuada gestión del riesgo queda evidenciada en casos como el deslave de la cuenca Taquiña, el cual pudo haberse evitado con una intervención oportuna basada en medidas de gestión de riesgo preventivas, correctivas y prospectivas orientadas a reducir vulnerabilidades e incrementar la resiliencia de la cuenca (García W. *et al.*, 2021). Asimismo, en localidades como Santa Ana del Yacuma, la falta de información sobre el nivel de riesgo ante inundaciones impide el desarrollo e implementación de planes de prevención y mitigación, lo que representa una vulnerabilidad constante y una exposición permanente a desastres de inundaciones (García W. *et al.*, 2017).

Santiago de Cotagaita es una localidad situada en la provincia Nor Chichas del Departamento de Potosí, fue escenario de un desastre natural el 6 de febrero de 2020, cuando una riada causada por el desborde del río Chorolque destruyó completamente 250 viviendas, afectó parcialmente instituciones públicas y dejó a 1 500 personas damnificadas, con pérdidas significativas en infraestructura, cultivos y ganado.



Figura 1. Inundación en Santiago de Cotagaita

Este evento ha tenido efectos negativos en la economía local, generando temor entre los habitantes, muchos de los cuales se han visto obligados a buscar nuevos lugares de asentamiento en busca de mayor seguridad. Situación que ha impactado negativamente en el progreso y desarrollo de la región, reflejando la alta vulnerabilidad de la zona frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

Frente a esta realidad, resulta imprescindible la implementación de medidas de reducción de riesgo de desastres como de medidas estructurales y no estructurales. Las estructurales comprenden obras de

ingeniería como muros de contención, presas o diques (Cardona, 2006), mientras que las no estructurales incluyen acciones como el ordenamiento territorial, monitoreo climático, sistemas de alerta temprana, educación ambiental y cumplimiento de normativas. Estas medidas deben ser eficaces, sostenibles y accesibles, orientadas a reducir los daños materiales y el número de personas afectadas (Fernandez, 2003).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Clima

Es el conjunto fluctuante de condiciones atmosféricas caracterizado por los estados y la evolución del tiempo, en el curso de un periodo suficientemente largo y en un dominio espacial determinado (Organización Meteorológica Mundial, 2011).

3.2 Cambio Climático

El cambio climático, resultado de la actividad humana es hoy en día, uno de los temas de interés para toda comunidad internacional. El CO₂ es el principal responsable del aumento del efecto invernadero, ya que provoca incremento en la temperatura; de tal manera que en los últimos 150 años su concentración se ha elevado más de 30 %, mientras que la temperatura global anual registra un aumento de 0,74 °C en 100 años, el cual ha sido constante en aproximadamente 0,13 °C por década desde 1956, de acuerdo con estimaciones del Panel intergubernamental de cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, se prevé que este aumento en la temperatura induzca alteraciones a nivel global que se traduzcan en cambios, positivos o negativos, en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres en el mediano y largo plazo (Romero Sánchez, 2016).

3.3 Modelos climáticos

Son representaciones numéricas del sistema climático basadas en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y procesos y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas (IPCC, 2017). Los modelos climáticos se utilizan como herramienta de investigación para estudiar y simular el clima y para fines operacionales, en particular predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales.

3.4 Variabilidad climática

El concepto de variabilidad climática hace referencia a las variaciones del estado medio y a otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales más

amplias que de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa) (IPCC, 2017).

3.5 Modelación hidrológica

Los modelos hidrológicos buscan representar la parte terrestre del ciclo hidrológico, transformando la precipitación que cae sobre una cuenca en una determinada sección de un río (Almeida & Valdés Serra, 2017). Este tipo de modelos puede ser representado matemáticamente, dado que, abarca un sistema de ecuaciones y procedimientos compuestos por variables y parámetros que están siendo cada vez más utilizados dentro el campo de la investigación.

3.6 Modelo hidrológico en HEC-HMS

Son varios los modelos hidrológicos que existen, siendo el Sistema de Modelación Hidrológico del Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE. UU. (HEC-HMS por sus siglas en inglés) se aplicó en la presente investigación, puesto que es un programa computacional gratuito y de amplia utilización internacional en el estudio de avenidas, el cual provee una variedad de opciones para simular procesos de precipitación - escurrimiento y tránsito de caudales (Feldman, 2000). Este modelo utiliza métodos para estimar los hidrogramas de escorrentía directa generados por las precipitaciones en una cuenca durante un período especificado.

3.7 Modelación hidráulica

La modelación hidráulica de una determinada cuenca mediante ecuaciones matemáticas ha tenido una larga historia de desarrollo científico y tecnológico, dando lugar a un amplio número de modelos con diferentes objetivos y grados de sofisticación (Caicedo, 2017). Con la resolución por métodos numéricos de ecuaciones obtenidas con una serie de hipótesis, se puede modelar matemáticamente el flujo de un río y predecir los valores de las variables hidráulicas (Pérez, 2018). Los modelos toman datos geográficos que brindan la descripción física del área y datos de flujo que proporcionan información sobre descargas o caudales (Yamanak, 2016). El análisis completo de una modelación comienza con la modelación geométrica del campo a analizar, es decir, una representación en el ordenador de dicha geometría a simular (Pérez, 2018).

3.7.1 Modelo hidráulico en HEC – RAS

El software HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System), desarrollado por el Hydrologic

Engineering Center del US Army Corps of Engineers, es un software gratuito de modelación hidráulica que permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar el nivel del agua. Su objetivo principal es realizar estudios de inundabilidad y delimitar zonas susceptibles a inundaciones. Además, permite analizar distintos escenarios de caudal, eventos extremos y proponer medidas de mitigación.

3.8 Medidas estructurales

Estas medidas engloban construcciones que reducen o evitan el posible impacto de la inundación, incluyendo un amplio rango de obras de ingeniería civil. Su funcionalidad se encuentra limitada, ya que se diseñan para eventos asociados a una cierta probabilidad anual de excedencia, de manera que, si se produce un evento superior al de diseño, la estructura no es capaz de proporcionar la protección necesaria frente a la inundación, y pierde su funcionalidad (Novillo López, 2012).

3.9 Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales incluyen políticas, concienciación, desarrollo del conocimiento, reglas de operación, así como mecanismos de participación pública e información a la población, de modo que puede reducirse el riesgo existente y los impactos derivados de la inundación. Buscan la reducción de la vulnerabilidad de la población en riesgo a partir del planeamiento y la gestión llevados a cabo antes, durante y después de la catástrofe (Novillo López, 2012).

4. Ubicación y características biofísicas de la zona de estudio

4.1 Ubicación

La localidad de Santiago de Cotagaita, capital municipal de Cotagaita de la primera sección de la provincia Nor Chichas del Departamento de Potosí, se encuentra ubicada a aproximadamente 180 kilómetros de la ciudad de Potosí, constituyéndose en el principal centro urbano del municipio. Su localización geográfica se define por las coordenadas UTM WGS 84, zona 20K, 223 281,24 E y 7 695 721,35 S, situándose a una altitud promedio de 2 644 m s.n.m. La ciudad se asienta en el territorio ancestral del pueblo chicha, reconocido como una de las culturas prehispánicas más representativas e influyentes del sur de Bolivia. En cuanto a su delimitación territorial, el municipio de Cotagaita limita al norte con el Departamento de Chuquisaca. Asimismo, presenta límites al sur con los municipios de Tupiza y Atocha, y al oeste con los municipios de Uyuni y Tomave, configurando su área de influencia dentro de la región Nor Chichas.



Figura 2. Mapa de ubicación Cotagaita

4.2 Características biofísicas

4.2.1 Geomorfología

Santiago de Cotagaita presenta cinco unidades fisiográficas diferenciadas. En el sector oeste predominan las montañas medias, caracterizadas por una fuerte disección. Hacia el este, estas dan paso a serranías altas con disección moderada. En la zona central se desarrollan serranías medias, también con fuerte disección. Más al este, el relieve está conformado por colinas altas, igualmente afectadas por una fuerte disección. Finalmente, en el extremo oriental, colindante con los municipios de Camargo y Villa Abecia, se presentan montañas medias y montañas altas, ambas con fuerte disección.

4.2.2 Geología

La mayor parte del territorio de municipio presenta las siguientes características geológicas: areniscas, limolitas, cuarcitas, pizarras, lutitas y lavas almohadilladas del periodo Ordovícico, y en la parte central este tiene características como son parte del periodo del cuaternario: depósitos aluviales, fluvio lacustres, fluvio-glaciales, coluviales, lacustres, morrenas y dunas.

4.2.3 Altitud

La zona oeste del Municipio de Santiago de Cotagaita tiene mayores elevaciones en un rango de 3 931 – 4 417 m.s.n.m. y a medida que vamos al centro las elevaciones van disminuyendo 3 389 – 3 930 m.s.n.m. y la parte central se observan serranías de altitudes 2 695 – 3 388 m.s.n.m. y colinas de las siguientes alturas 2 000 – 2 694 m.s.n.m. y

al oeste las alturas son: 2 695 – 3 388 m.s.n.m. colindando con Camargo y Villa Abecia. El Municipio de Santiago de Cotagaita por tener un ecosistema de valles donde se desarrollan las actividades agro-productivas y de subsistencia.

4.2.4 Clasificación de suelos

Los suelos del municipio presentan una variedad de unidades, predominando las consociaciones de Leptosoles, Cambisoles y Calcisoles, con inclusiones de Fluvisoles, Regosoles y Arenosoles. En el oeste destacan los Leptosoles con Fluvisoles, mientras que hacia el límite con Villa Abecia se encuentran combinaciones de Leptosoles, Fluvisoles y Arenosoles.

4.2.5 Erosión

En la primera sección del Municipio de Nor Chichas se presentan dos tipos principales de erosión: hídrica, activa en temporada de lluvias (diciembre a marzo), y eólica, predominante en época seca (junio a septiembre). La erosión hídrica afecta severamente las tierras agrícolas por la escasa cobertura vegetal y la escorrentía en terrenos con fuerte pendiente, mientras que la eólica impacta sobre suelos secos y descubiertos, especialmente en zonas agrícolas elevadas. A pesar de la vegetación natural en los valles, la topografía accidentada favorece estos procesos, afectando especialmente a comunidades como Cotagaita, Tumusla, Ckara Ckara, Totora I, Ramadas, Vichacla, Sagrario, Tasna y Río Blanco.

5. La Universidad Católica Boliviana frente a los desastres naturales

La Universidad Católica Boliviana “San Pablo” (UCB), en coordinación con la Universidad Mayor de San Simón (UMSS), realizó un estudio de evaluación de riesgos de inundaciones en el Municipio de Cotagaita. Esta investigación, que incluye análisis climáticos y simulaciones hidrológicas e hidráulicas, proporciona insumos técnicos importantes para la elaboración del Plan Territorial de Desarrollo Integral (PTDI), Plan de Emergencias y Contingencias (PEyC), Plan de Manejo Integral de Cuencas (PMIC) y el diseño de Sistemas de Alerta Temprana (S.A.T.).

6. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, aplicando modelos hidrológicos e hidráulicos con el objetivo de estimar el riesgo de inundación en la localidad de Santiago de Cotagaita. Como punto de partida, se recopilaron datos hidrometeorológicos históricos de precipitación y temperatura, que fueron

procesados y completados para disponer de series continuas y consistentes. Esta información constituyó la base para la caracterización climática de la cuenca. Posteriormente, se delimitó la cuenca y sus subcuencas a partir de un modelo digital de elevación, lo que permitió calcular parámetros morfométricos relevantes para la modelación, tales como áreas de aporte, pendientes y longitudes de cauce. Estos parámetros se integraron en la etapa de simulación hidrológica.

La modelación hidrológica se llevó a cabo en el software HEC-HMS, empleando curvas de Intensidad–Duración–Frecuencia (I-D-F) generadas mediante distribuciones probabilísticas y transformadas en tormentas de diseño sintéticas. Con estos insumos se obtuvieron hidrogramas de salida para distintos periodos de retorno, considerando escenarios tanto históricos como de cambio climático, a fin de evaluar variaciones en los caudales máximos.

Los caudales obtenidos en la simulación hidrológica fueron utilizados como insumo en la modelación hidráulica desarrollada en HEC-RAS bajo un esquema bidimensional. La geometría del río y sus planicies de inundación se definió con base en información topográfica, incorporando también las defensas ribereñas existentes. De este modo, se delimitaron zonas de amenaza por inundación y se evaluó el comportamiento hidráulico frente a distintos escenarios de caudal.

Los resultados permitieron identificar áreas vulnerables y valorar la suficiencia de las infraestructuras actuales, lo que sirvió de sustento para la propuesta de medidas de mitigación. Estas incluyeron tanto acciones estructurales, orientadas a reforzar las defensas existentes, como medidas no estructurales, enfocadas en la gestión del riesgo, la planificación territorial y la implementación de sistemas de alerta temprana.

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Análisis de los registros históricos de variables climáticas

7.1.1 Disponibilidad de datos hidrometeorológicos

Para la investigación se emplearon datos hidrometeorológicos de la estación meteorológica Cotagaita Mosoj Lljta (Longitud -65,65891°, Latitud -20,820648° y Altitud 2 616 m.s.n.m.), abarcando un periodo histórico de 34 años (1990-2024). Con el propósito de evaluar el impacto de las inundaciones en escenarios de cambio climático, se utilizó información climática proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Estos registros permitieron caracterizar la variabilidad climática regional y sustentar la modelación hidrológica e hidráulica del estudio.

7.1.2 Análisis de patrones climáticos

El relleno de las series históricas diarias de la zona de estudio se realizó mediante el Cuadrado del Inverso de la Distancia (IDW) que estima el valor de una variable desconocida basándose en la ponderación inversa de la

distancia a valores cercanos conocidos. Utilizando el software RStudio.

En la Fig. 3, se muestra la serie histórica de datos de precipitación mensual de la estación Cotagaita Mosoj Llajta considerando los datos originales.

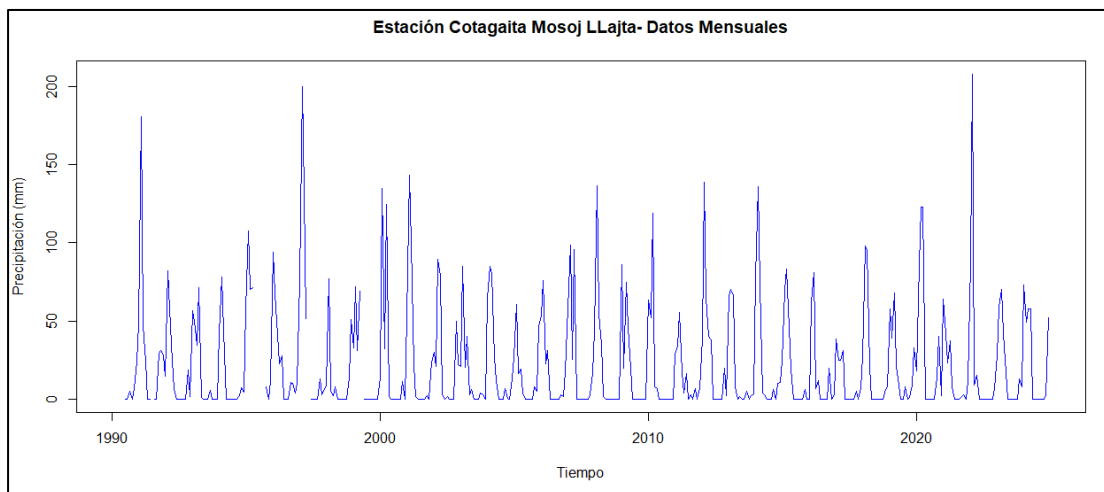


Figura 3. Precipitación mensual estación Cotagaita Mosoj Llajta con datos faltantes

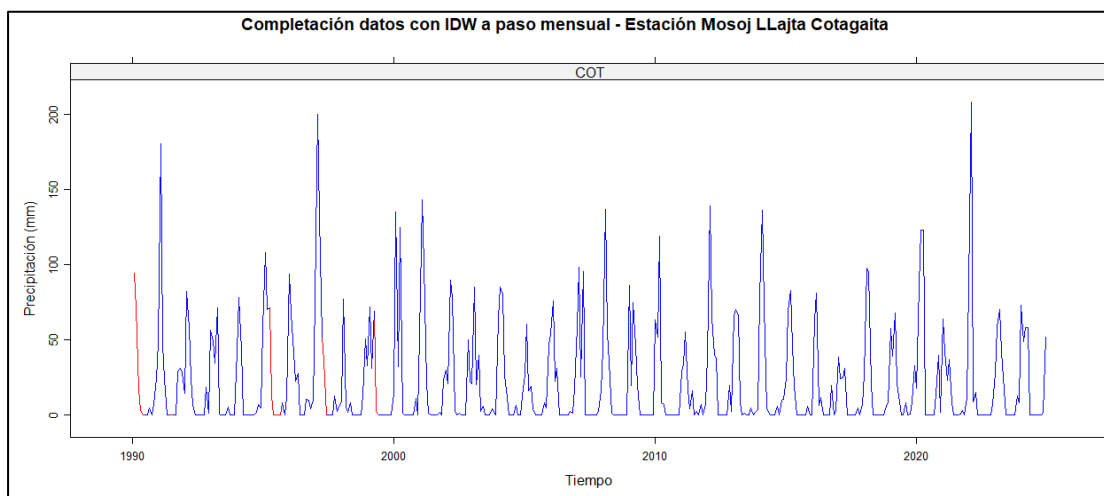


Figura 4. Precipitación mensual estación Cotagaita Mosoj Llajta sin datos faltantes

De la anterior figura, se evidencia que existen datos faltantes entre los periodos 1990-1991 y 1995-2000, entre otros, los cuales fueron procesados para realizar el relleno de datos tanto para los datos de precipitación (Fig. 4), temperatura máxima y temperatura mínima. De esa manera procedió con el análisis de patrones climáticos.

7.1.2.1 Distribución de la precipitación

La variabilidad de la precipitación en la estación Cotagaita Mosoj Llajta muestra fluctuaciones significativas a lo largo de los años, con valores que oscilan por encima y por debajo del promedio general anual.

Años como 1997 y 2020 presentan picos de precipitación inusualmente altos, mientras que los años 2011 y 2017 reflejan déficits marcados (Fig. 5). Estos picos evidencian que el comportamiento de las precipitaciones no sigue una tendencia uniforme, lo que puede estar relacionado con factores climáticos regionales y globales de variabilidad climática.

Asimismo, esta irregularidad implica una mayor incertidumbre en la disponibilidad hídrica. La ocurrencia de años extremadamente húmedos o secos sugiere la necesidad de incorporar criterios de variabilidad y riesgo climático en los estudios hidrológicos.

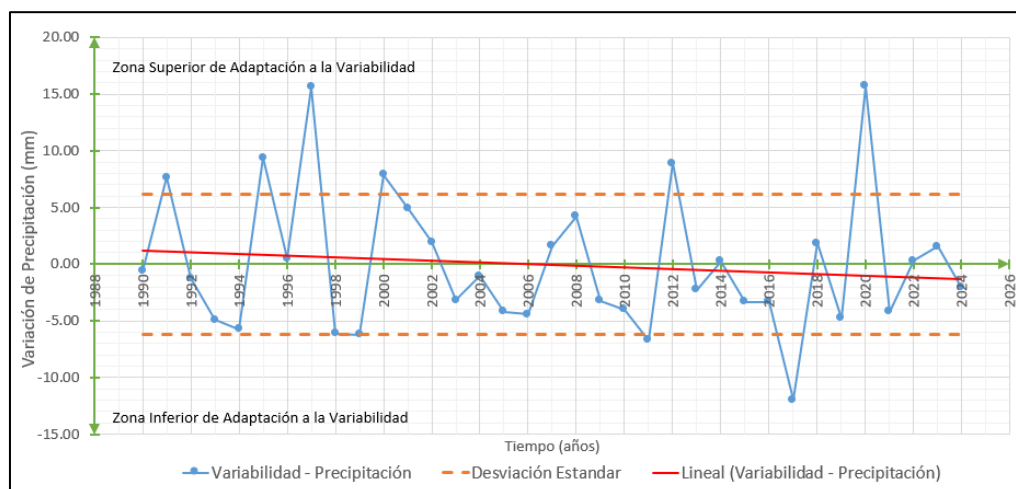


Figura 5. Variación de precipitación estación Cotagaita Mosoj Lajta

Por otro lado, el análisis de la desviación estándar permite delimitar las zonas de adaptación a la variabilidad climática, representadas por las líneas punteadas en la Fig. 5. La mayor parte de los valores de precipitación anual se encuentran dentro de estas zonas, lo que indica que, pese a las variaciones, las precipitaciones suelen mantenerse dentro de los rangos esperados. Sin embargo, los picos extremos, tanto positivos como negativos, reflejan eventos de alta intensidad de precipitaciones o sequías asociados a fenómenos de la Niña y el Niño que podrían tener implicaciones significativas para la gestión hídrica y la producción agrícola en la zona de estudio.

La tendencia lineal mostrada en la Fig. 5 (línea roja) sugiere una leve disminución de las precipitaciones a lo largo del tiempo, aunque esta tendencia no es muy pronunciada. Este comportamiento podría indicar una ligera estabilización en los patrones de precipitación, pero la presencia de eventos extremos aún representa un desafío

para la planificación y adaptación a las condiciones climáticas en la región

7.1.2.2 Distribución de la temperatura

La variabilidad de la temperatura media anual en la estación Cotagaita Mosoj Lajta muestra fluctuaciones alrededor de un promedio histórico de 15,58 °C. Años como 1995 y 2023 presentan valores altos, lo que podría deberse a eventos climáticos específicos que incrementaron las temperaturas. Años como 2013 y 2016 se encuentran por debajo del promedio, reflejando periodos más fríos. Estas variaciones evidencian un comportamiento climático variable influenciado por factores tanto locales como globales (Fig. 6). Las zonas de adaptación a la variabilidad, representadas por las líneas punteadas naranjas que delimitan los límites superior e inferior ($\pm 0,79$ °C), reflejan el rango de temperaturas esperadas en condiciones normales

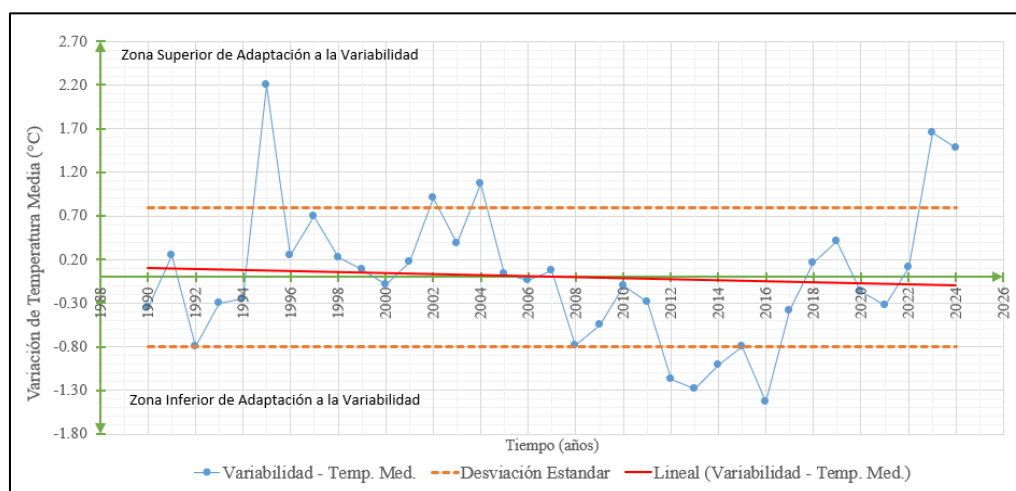


Figura 6. Variación de temperatura media estación Cotagaita Mosoj Lajta

La mayoría de los años se encuentran dentro de este rango, lo que indica que las fluctuaciones térmicas suelen ser moderadas. Sin embargo, años como 1995 y 2024 superan estos límites, lo que señala eventos extremos que podrían estar relacionados con cambios climáticos.

La tendencia lineal (línea roja) muestra un leve descenso en la temperatura media a lo largo del tiempo, lo que indica una posible disminución gradual en los valores promedio. Este comportamiento podría reflejar patrones locales específicos, en contraste con las tendencias globales de calentamiento. Este cambio destaca la necesidad de realizar un análisis más profundo para comprender los factores subyacentes y sus impactos en los recursos naturales y actividades humanas de la región (Fig. 6).

7.1.3 Régimen de precipitación media mensual por décadas

Si bien la distribución de las precipitaciones en el historial climático (Fig. 5) muestra una leve tendencia de disminución en los totales anuales, el análisis de los patrones de lluvia por décadas evidencia cambios significativos en su distribución temporal. En particular, durante el período 1990–2010 las precipitaciones presentan valores menores en comparación con la década 2010–2020, en la cual se observa un incremento de las lluvias concentrado principalmente en los meses más húmedos (Fig. 7). Esta discrepancia se explica por una mayor concentración estacional de la precipitación, caracterizada por eventos más intensos en períodos más cortos.

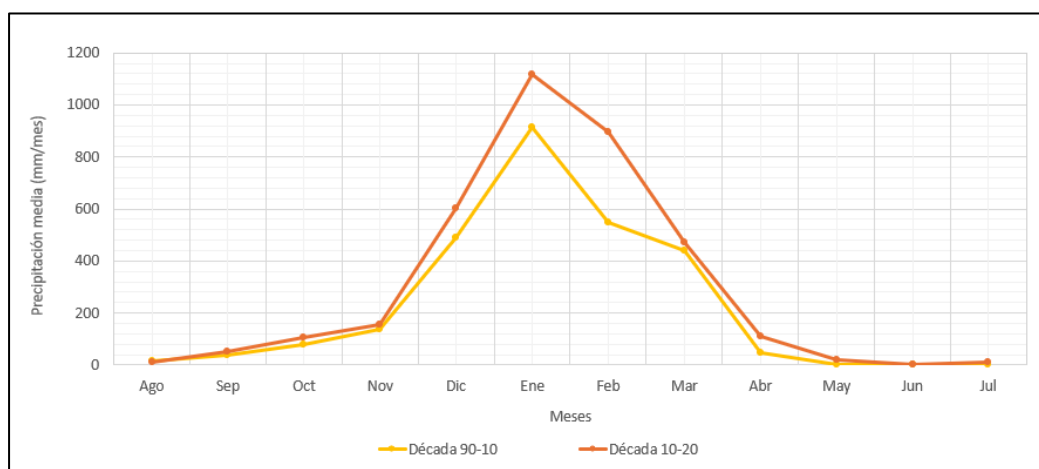


Figura 7. Régimen de precipitación media mensual estación Cotagaita Mosoj Lljta

7.2 Determinación de caudales de máxima crecida bajo escenarios de cambio climático

7.2.1 Delimitación de la cuenca hidrográfica

Basado en el modelo digital de elevación ALOS PALSAR, con una resolución espacial de 12,5 m y generado a partir del satélite ALOS de la JAXA, se realizó la delimitación de la cuenca hidrográfica del río Chorolque utilizando el software HEC-HMS v.4.12. Con el fin de representar de manera más detallada el comportamiento hidrológico del área de estudio, la cuenca fue subdividida en siete subcuencas, lo que permitió analizar de forma independiente las características propias de cada una de ellas (Fig. 8). Posteriormente, se calcularon y evaluaron los principales parámetros morfométricos.

La delimitación de la cuenca y su división en subcuencas resultan importantes para identificar las áreas que aportan escorrentía al río principal, así como la red natural de drenaje que conduce el agua durante los eventos de lluvia. Este proceso permite reconocer que no todas las

zonas de la cuenca responden de la misma manera ante una precipitación, ya que existen diferencias en pendientes, longitudes de flujo y tiempos de respuesta. Considerar estas variaciones mejora la representación del comportamiento real del río Chorolque frente a eventos de lluvia intensa y evita generalizaciones que podrían subestimar o sobreestimar los caudales generados.

A partir de esta caracterización física, se contó con la información necesaria para construir el modelo lluvia–escorrentía y estimar los caudales de crecida asociados a distintos periodos de retorno. Asimismo, esta base permitió incorporar de manera coherente los escenarios de cambio climático mediante el uso de curvas Intensidad–Duración–Frecuencia ajustadas, facilitando la evaluación de posibles incrementos en la magnitud de las crecidas. De esta manera, el análisis hidrológico se apoya en una representación más cercana a la realidad, fortaleciendo la interpretación de los resultados y su aplicación en la gestión del riesgo de inundaciones en la cuenca del río Chorolque.

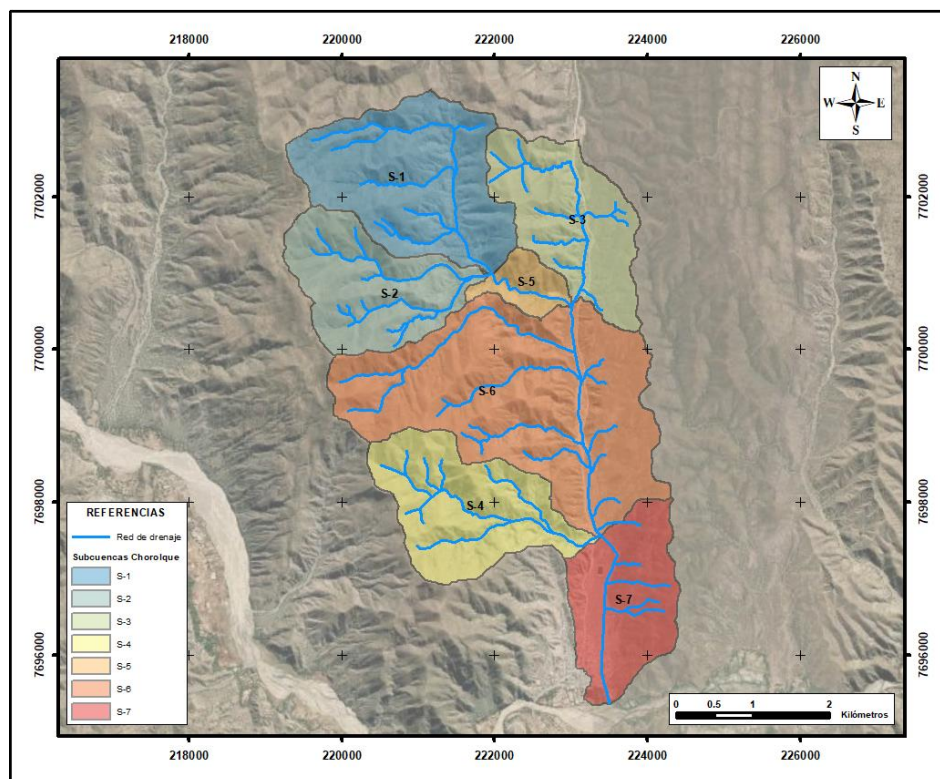


Figura 8. Subcuencas del río Chorolque

7.2.2 Curvas I-D-F considerando cambio climático

7.2.2.1 Modelo Climático Global

Se tomó como referencia el Balance Hídrico Superficial de Bolivia (2017), el cual empleó los resultados del proyecto CMIP5 para identificar a los modelos CESM1-CAM5 y MPI-ESM-MR como los más representativos de las condiciones climáticas húmedas y secas del país. En concordancia con las directrices del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC, en el presente estudio se seleccionó el modelo CESM2, una versión actualizada que incorpora mejoras en la representación de los procesos atmosféricos y en la simulación de la precipitación, especialmente en la variabilidad y los eventos extremos.

Con el fin de adaptar las proyecciones climáticas globales a la escala local de la cuenca del río Chorolque, se aplicó un proceso de reducción de escala estadística (downscaling) mediante la librería GCMClimTool en RStudio. Este procedimiento consistió en extraer la señal de cambio del modelo climático global y transferirla a las series históricas locales mediante técnicas de corrección de sesgo. Se utilizaron métodos de ajuste de medias y análisis de percentiles, logrando una adecuada correspondencia entre las salidas del modelo CESM2 y los registros observados de precipitación de la estación Cotagaita Mosoj Llajta para el período 1990–2024. Los resultados muestran que el modelo reproduce

correctamente la estacionalidad de las precipitaciones, con mayores valores durante los meses húmedos (diciembre a febrero) y un incremento en la dispersión y magnitud de los eventos extremos en las proyecciones futuras. El análisis espectral evidencia que se conservan las principales periodicidades presentes en la serie observada, incluyendo señales asociadas a la variabilidad interanual y a la influencia del fenómeno ENSO. Asimismo, el análisis de anomalías de precipitación indica una mayor frecuencia de valores positivos hacia finales del siglo XXI, lo que sugiere un aumento progresivo de años con precipitaciones por encima del promedio histórico.

La selección del escenario SSP5-8.5 responde a la alta vulnerabilidad de la zona de estudio frente a inundaciones, evidenciada por el evento extremo de febrero de 2020, y permite incorporar un margen de seguridad frente a la incertidumbre climática. Además, este escenario facilita la evaluación de condiciones críticas que podrían presentarse bajo un contexto de intensificación del ciclo hidrológico. El aumento proyectado en la frecuencia e intensidad de las lluvias implica una mayor generación de escorrentía superficial, lo que incrementa el riesgo de crecidas súbitas en cuencas de respuesta rápida como la del río Chorolque. En conjunto, los resultados presentados en los gráficos constituyen un insumo para el ajuste de las curvas I-D-F y la posterior estimación de caudales máximos.

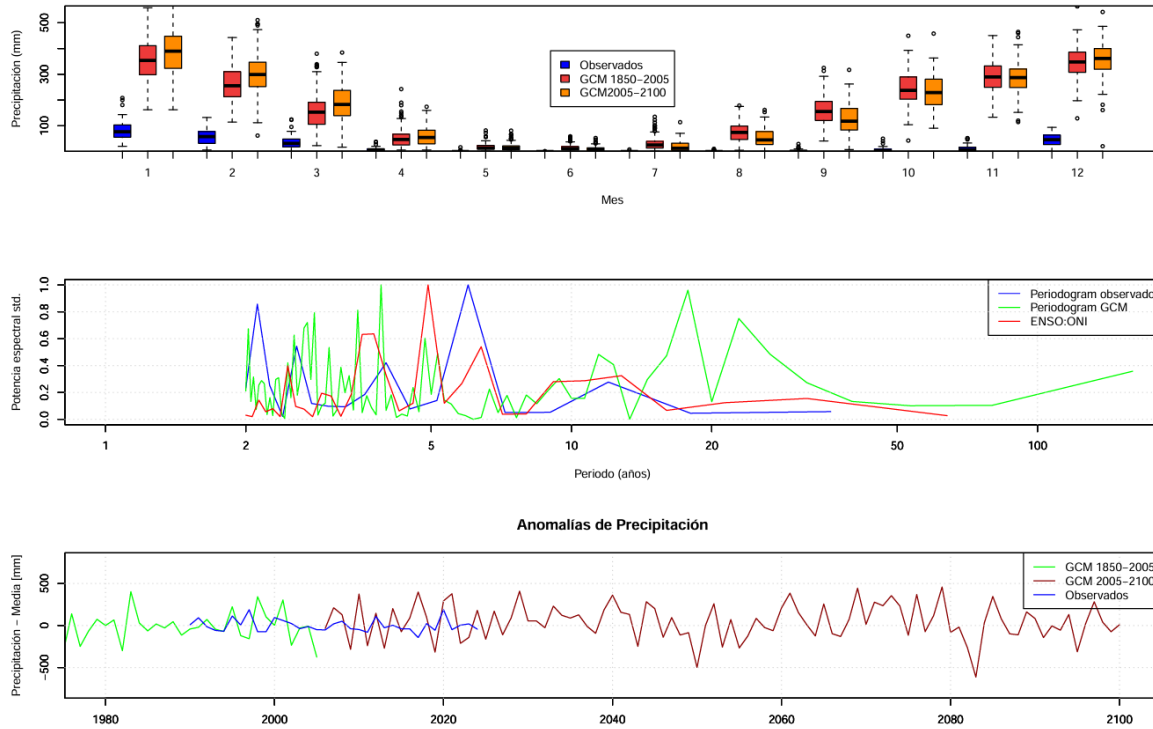


Figura 9. Series sintéticas del modelo CESM2 escenario SSP 5–8.5

7.2.2.2 Ecuaciones P-D-F e I-D-F

Para realizar el cálculo de las curvas P-D-F (Precipitación – Duración – Frecuencia), se usó la ecuación de la Ley de Gumbel Modificada que permite calcular la lluvia máxima asociada a un periodo de retorno y una duración de tormenta menor a 24 horas.

$$h_{tT} = E_{dp} * \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} * [1 + K_{dp} * \text{Log}(T)]$$

Donde, h_{tT} es la altura de lluvias máximas horarias, en mm, E_{dp} es la media ponderada, K_{dp} es la característica ponderada, T es el periodo de retorno medido en años y t es la duración expresada en minutos, α es el equivalente de lluvia diaria igual a 12 cuando el área es mayor a 10 km^2 y 2 cuando el área es menor a 10 km^2 , β es el coeficiente angular que varía entre 0,20 y 0,30.

Las curvas reflejan el incremento de la precipitación acumulada con la duración del evento y cómo varía según el periodo de retorno, los periodos más frecuentes (TR 2 años y TR 10 años) tienen valores más bajos de precipitación acumulada,

Por su parte, los periodos más extremos y con baja probabilidad (TR 100 años, TR 150 años, TR 500 años) muestran acumulaciones significativamente mayores, indicando eventos de precipitación más intensos y prolongados asociados a escenarios de menor probabilidad, pero mayor impacto para luego calcular la

intensidad máxima para distintos periodos de retorno (Fig. 10).

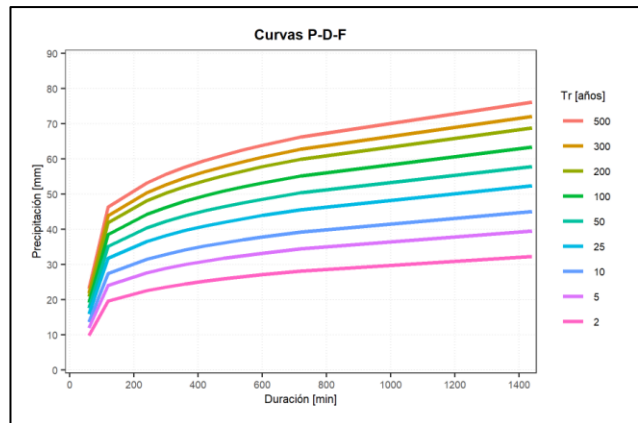


Figura 10. Curvas P-D-F estación Cotagaita Mosoj Lajta

De esta manera se obtuvo las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia. Mismas que se las pueden representar de forma matemática mediante Análisis de Correlación Lineal Múltiple (Mínimos Cuadrados). Las curvas I-D-F (Intensidad-Duración-Frecuencia) de la estación Cotagaita Mosa Lajta muestran la relación entre la intensidad de la precipitación (eje Y, en mm/h), la duración del evento (eje X, en mm) y el periodo de retorno (TR). Estas curvas indican que la intensidad de la precipitación disminuye a medida que aumenta la duración del evento, lo cual es un patrón típico de las

lluvias: eventos más cortos tienden a ser más intensos, mientras que eventos más largos son menos intensos, pero acumulan mayores volúmenes de agua. Los periodos de retorno más largos (TR 100 años, TR 500 años) corresponden a eventos con baja probabilidad, pero con mayor intensidad, reflejando su naturaleza extrema y potencial impacto en el diseño de infraestructura hidráulica e implementación de medidas de reducción de riesgo de desastres por inundaciones (Fig. 11).

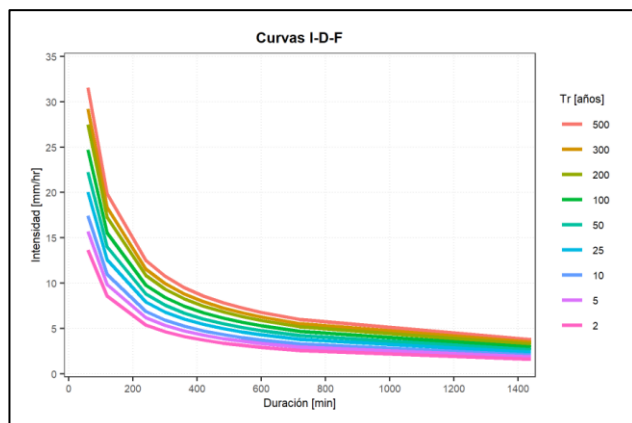


Figura 11. Curvas I-D-F estación Cotagaita Mosoj Llahta

El procedimiento previamente explicado para la obtención de las curvas P-D-F e I-D-F se realizó para la misma estación meteorológica, pero sin considerar el cambio climático, bajo el cual se obtuvieron ecuaciones de Intensidad – Duración – Frecuencia. Estas ecuaciones son fundamentales para describir el comportamiento histórico de la precipitación y establecer una línea base de análisis.

Además, permiten comparar los efectos potenciales del cambio climático sobre la intensidad y frecuencia de los eventos de precipitación extrema en el futuro.

7.2.3 Modelo lluvia – escorrentía y estimación de caudales

7.2.3.1 Tormentas de diseño: Bloques Alternos

Se elaboraron hietogramas de precipitación mediante el método de Bloques Alternos para cada periodo de retorno y subcuenca analizada. En particular, el hietograma con periodo de retorno de 50 años representa la distribución temporal de un evento extremo, donde la mayor intensidad ocurre en los primeros 2 minutos (207,80 mm/h, con 6,93 mm acumulados), disminuyendo progresivamente hasta 49,07 mm/h y 16,36 mm acumulados al minuto 20. El mayor bloque de precipitación acumulada se registra en el minuto 16, con un valor de 7,748 mm.

A partir de estos hietogramas se generaron hidrogramas utilizando un intervalo temporal de 2 minutos y la intensidad específica de cada subcuenca. Este

procedimiento se aplicó a las 7 subcuencas, considerando escenarios con y sin cambio climático, para periodos de retorno de 50 y 100 años. Los hidrogramas obtenidos constituyeron los datos de entrada para la simulación hidrológica en el software HEC-HMS.

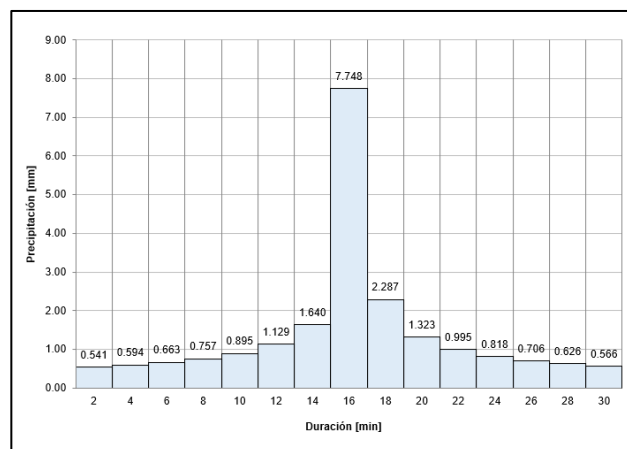


Figura 12. Hietograma Subcuenca 1 – Tr 50 años

7.2.3.2 Caudales máximos para diferentes periodos de recurrencia

El hidrograma muestra un pico de caudal máximo de 87,10 m³/s. El volumen total de agua asociado al evento es de 18,59 mm en términos de precipitación equivalente. La gráfica de líneas continuas y discontinuas refleja las contribuciones de diferentes elementos o subcuencas del modelo al punto de análisis. En el lado izquierdo, se muestran las subcuencas, ríos y nodos involucrados en el análisis, es decir, el modelo en HEC-HMS (Fig. 13).

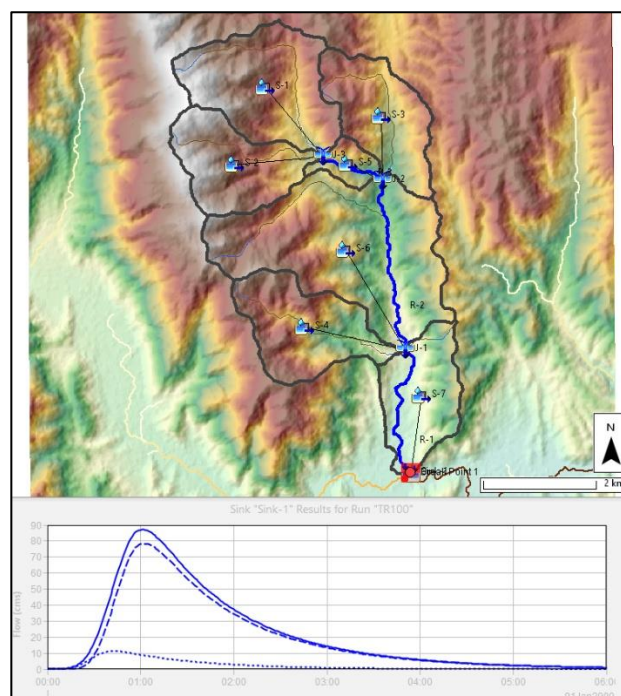


Figura 13. Resultado modelo hidrológico – TR 100 años

7.3 Determinación del nivel de amenaza de inundación considerando las variables provocadas por el cambio climático

7.3.1 Condiciones de borde

Para la modelación hidráulica del río Chorolque, es esencial contar con información topográfica detallada del

cauce y de sus planicies de inundación. Aunque se dispone de curvas de nivel de Santiago de Cotagaita, el software HEC-RAS requiere un Modelo Digital de Terreno (DEM) como base (Fig. 14). La zona actualmente cuenta con muros de contención que actúan como defensas ribereñas frente a avenidas máximas: en el lado oeste se identifican dos tramos con alturas de 3,00 m y 3,80 m, y en el lado este un tramo de 3,00 m.

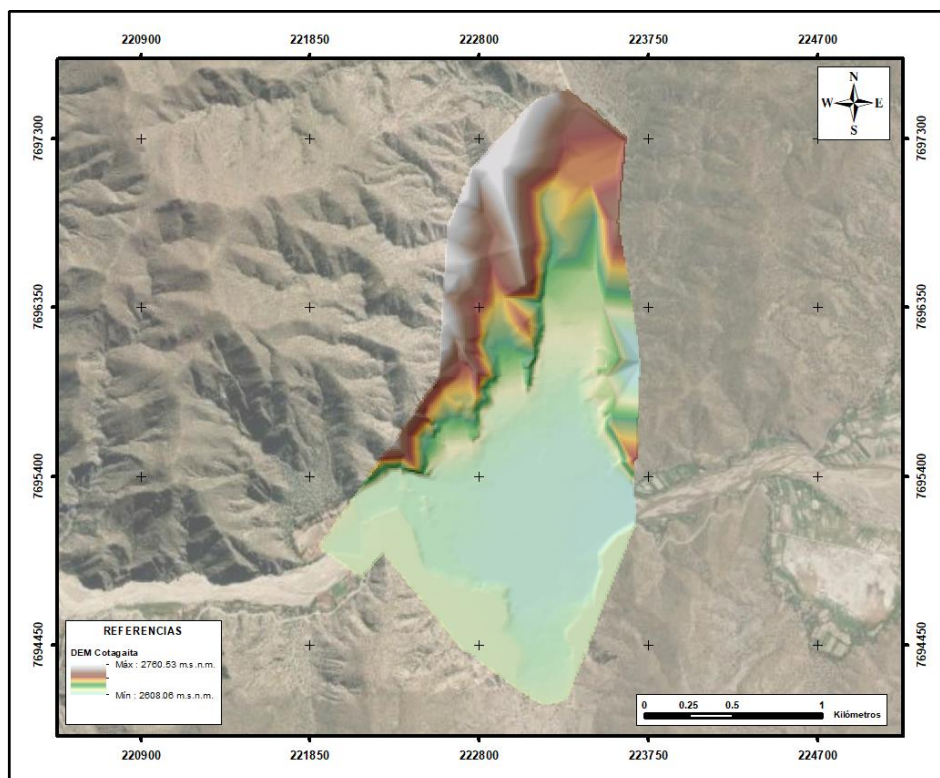


Figura 14. Modelo digital de elevación para modelación hidráulica

Para la simulación, se adoptó un coeficiente de rugosidad de 0,03 para el cauce, mientras que en las planicies de inundación se estimó el valor según la metodología de Ven Te Chow, apoyada en análisis fotográfico.

7.3.2 Modelación hidráulica

La modelación hidráulica se realizó considerando un período de retorno de 50 años, con base en los antecedentes del evento ocurrido el 6 de febrero de 2020, el cual fue catalogado por autoridades locales como el más intenso de los últimos 70 años. De acuerdo con datos del SENAMHI y testimonios locales, durante dicho evento se registró una precipitación de 22 mm en un intervalo de 25 minutos, lo que corresponde a una intensidad de 52,80 mm/h y a un evento con un período de retorno aproximado de 50 años según las curvas Intensidad–Duración–Frecuencia (I-D-F).

La visualización de los resultados muestra que, para este período de retorno, el río Chorolque, bajo las condiciones

actuales de los muros de contención, presenta desbordamientos que generan inundaciones en la localidad de Santiago de Cotagaita. En los tramos más críticos se registran tirantes máximos de hasta 3,25 m, superando el muro de contención de 3,00 m en el primer tramo, y de 3,85 m, rebasando el muro de 3,80 m en el segundo tramo, tal como se observa en la Fig. 15.

El comportamiento hidráulico simulado indica que el desbordamiento del cauce se propaga rápidamente hacia las áreas urbanas, incrementando tanto la profundidad del agua como la extensión de las zonas afectadas. Esta situación se ve agravada por la estrechez del cauce en ciertos sectores y por la proximidad de infraestructura urbana a la ribera. En consecuencia, incluso crecidas asociadas a períodos de retorno del orden de 50 años generan impactos negativos, evidenciando la necesidad de incorporar medidas complementarias que permitan reducir la vulnerabilidad de Santiago de Cotagaita frente a futuras inundaciones.

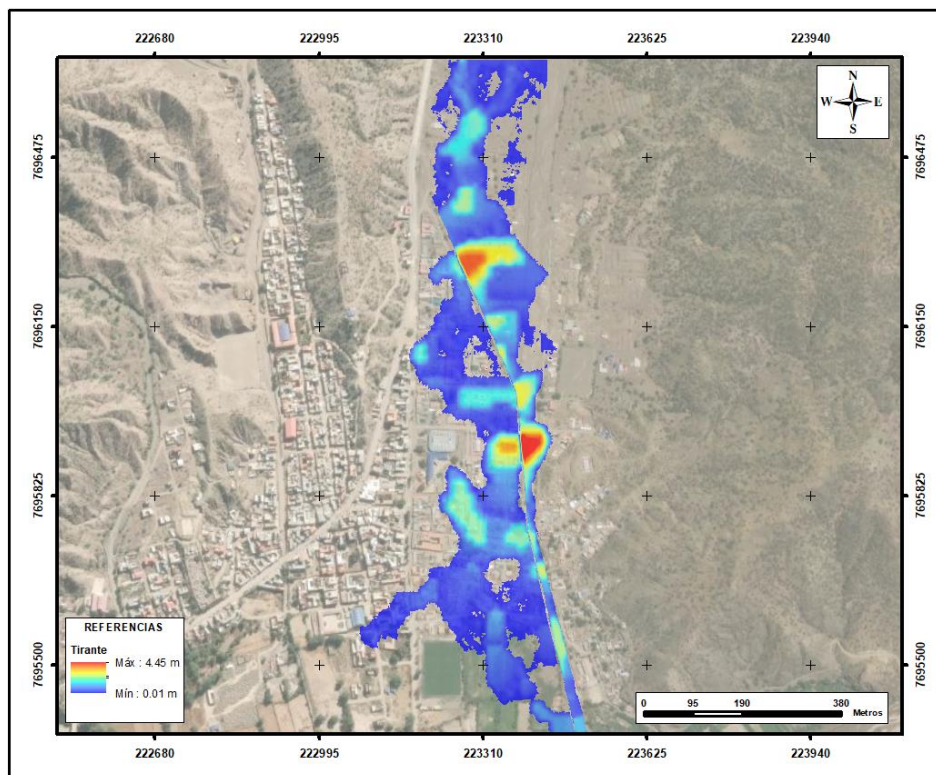


Figura 15. Zonas de inundación para un $Tr = 50$ años

7.3.3 Validación del modelo

Ante la ausencia de estaciones fluviométricas con registros históricos de caudales en el río Chorolque, la validación del modelo hidráulico se realizó a partir de evidencias indirectas obtenidas en campo, tomando como referencia el evento extremo ocurrido en febrero de 2020. Durante este evento se identificó una huella de agua en la estructura de la Catedral, ubicada en el centro urbano de Santiago de Cotagaita, donde se registró un tirante aproximado de 1,35 m tras el desborde del río. Este registro constituye un punto de control confiable, al corresponder a una estructura permanente, estable y fácilmente reconocible dentro del área urbana.

Al comparar este valor con los resultados de la simulación hidráulica para el mismo evento, el modelo estimó un nivel de agua de 1,49 m en dicha sección. La diferencia de 14 cm equivale a un error relativo cercano al 10 %, valor que se considera aceptable dentro de los estándares de modelación hidráulica en cuencas con limitada instrumentación. Este grado de concordancia confirma que los coeficientes de rugosidad de Manning y los parámetros hidrológicos adoptados representan adecuadamente la capacidad de conducción del cauce y el comportamiento hidráulico de las zonas urbanas inundables. Asimismo, la comparación espacial entre las áreas inundadas simuladas y las huellas de agua observadas en campo muestra una buena

correspondencia tanto en la extensión lateral del flujo como en la localización de los sectores afectados. Tal como se aprecia en la Fig. 16, las zonas de inundación generadas por el modelo coinciden con áreas donde se identificaron acumulaciones de sedimentos y marcas visibles del nivel alcanzado por el agua durante el evento extremo, lo que refuerza la confiabilidad del modelo para representar no solo los niveles de agua, sino también la dinámica del flujo en zonas urbanizadas.

7.3.4 Áreas de amenaza de inundación

En este apartado se presenta la delimitación de la zona bajo amenaza de inundación en el Municipio de Santiago de Cotagaita. Se identifica un área aproximada de 22 hectáreas, representada mediante un achurado de color rojo en la Fig. 17. Se destaca que el sector con mayor nivel de vulnerabilidad corresponde al lado oeste de la comunidad, debido a su colindancia directa con la margen derecha del río Chorolque, condición que incrementa significativamente el riesgo de afectación durante eventos de crecida.

El área de amenaza delimitada representa las zonas con mayor probabilidad de impacto frente a crecidas del río Chorolque, considerando tanto la magnitud del evento modelado como las condiciones actuales del cauce y de la infraestructura existente. Como se observa en la Fig. 17, la amenaza se concentra principalmente en sectores

urbanizados ubicados en la margen derecha del río, donde la proximidad de viviendas, equipamientos y vías de circulación aumenta el nivel de exposición y vulnerabilidad frente a eventos de inundación. Esta situación evidencia la

necesidad de priorizar medidas de gestión del riesgo y ordenamiento territorial orientadas a reducir daños potenciales y proteger a la población asentada en estas áreas.



Figura 16. Validación de modelo hidráulico con huellas de agua

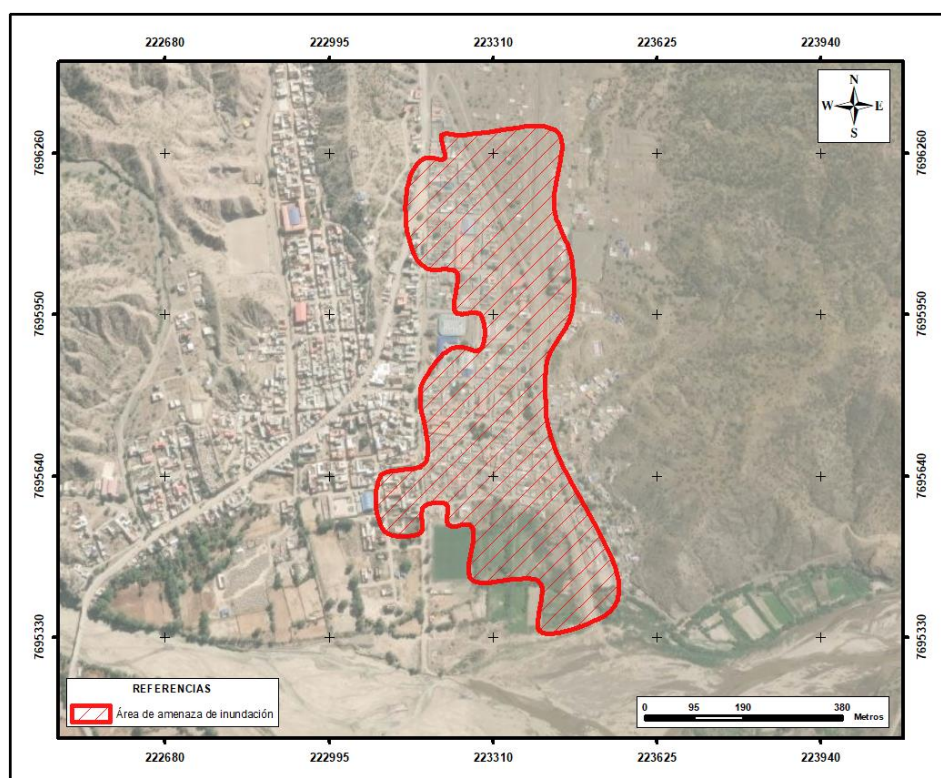


Figura 17. Área de amenaza de inundación

7.4 Análisis de medidas de reducción de riesgos de desastres por inundaciones

El análisis de las medidas de reducción del riesgo se fundamenta en los resultados obtenidos a partir de la modelación hidrológica e hidráulica, los cuales permitieron identificar los sectores con mayor vulnerabilidad frente a eventos de crecida del río Chorolque. Con base en esta información, se plantearon soluciones orientadas a disminuir la exposición de la población y a mejorar la capacidad hidráulica del cauce, priorizando intervenciones que resulten técnica y económicamente viables dentro del contexto local. Estas medidas tienen como objetivo reducir los niveles de inundación y minimizar los daños potenciales sobre la infraestructura urbana y los servicios básicos.

Asimismo, las medidas propuestas se enfocan en incrementar el nivel de protección frente a eventos extremos, considerando un período de retorno de 100 años como criterio de diseño. Este enfoque permite incorporar un margen de seguridad adicional frente a la incertidumbre asociada a la variabilidad y al cambio climático. La implementación de estas acciones contribuye no solo a la reducción del riesgo inmediato, sino también al fortalecimiento de la resiliencia del municipio ante futuros eventos hidrometeorológicos extremos.

7.4.1 Medidas estructurales

Para mitigar el riesgo de desbordamiento frente a eventos de máxima avenida, considerando un periodo de retorno

de 100 años, se ha diseñado una modelación hidráulica bidimensional. Este modelo incorpora las características actuales del terreno, garantizando una representación precisa de las condiciones naturales, e incluye el incremento de la altura de los muros de contención.

El lado oeste, está compuesto por: Tramo 1 (progresivas 0+000 a 0+456), se propone un muro con corona de 1,00 m, altura de 3,50 m y desplante de 0,50 m. El Tramo 2 (progresivas 0+456 a 0+656), el muro tendrá una corona de 2,00 m, altura de 4,50 m y el mismo desplante. Finalmente, el Tramo 3 (progresivas 0+656 a 1+056) retoma las características del Tramo 1: corona de 1,00 m, altura de 3,50 m y desplante de 0,50 m. Por su parte el lado este: Tramo 1 (progresivas 0+000 a 0+316), se proyecta un muro con corona de 1,00 m, altura de 3,50 m (Fig 18, 19).

En la Fig. 18 podemos apreciar que el río Chorolque está controlada con los muros con una altura mayor a los que se tiene actualmente para un periodo de retorno de 100 años, de esta manera se evitaría que la localidad aledaña no vuelva a sufrir un desastre por inundación. Es de importancia realizar el cálculo estructural, en este caso particular, muros de gaviones. Cabe mencionar que se hicieron distintas verificaciones (volteo, deslizamiento y capacidad portante) tomando en cuenta el muro en su totalidad y al tratarse de muros de gaviones, también se realizará las verificaciones al volteo y deslizamiento entre bloques, tomando en cuenta para los mencionados, un coeficiente de rugosidad de 0,60.



Figura 18. Ubicación de medidas estructurales para el proyecto

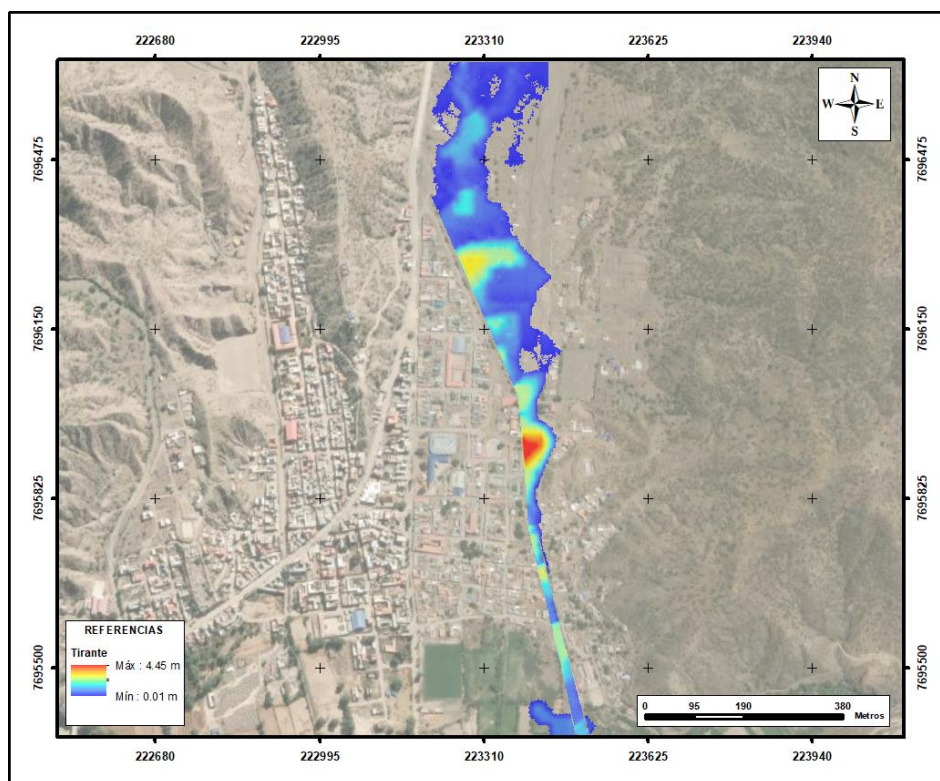


Figura 19. Zonas de inundación para un $Tr = 100$ años

7.4.2 Medidas no estructurales

Las medidas no estructurales abarcan estrategias como políticas, programas de concienciación, desarrollo de conocimientos, establecimiento de reglas de operación y mecanismos de participación pública e información a la población. Estas medidas buscan reducir el riesgo existente y mitigar los impactos derivados de inundaciones. A continuación, se describen algunas de las acciones propuestas:

7.4.2.1 Capacitación (Educación Ambiental)

Consiste en la implementación de programas educativos orientados a informar, sensibilizar y formar a la población sobre la importancia de la sostenibilidad y la gestión de riesgos ambientales. Esto incluye la difusión de conocimientos y la promoción de buenas prácticas para la preservación del entorno natural y la adaptación ante eventos extremos.

7.4.2.2 Sistema de Monitoreo

Se centra en la recopilación, análisis y difusión de información clave que permita anticipar, prevenir y gestionar inundaciones de manera oportuna. Esto incluye el uso de tecnologías avanzadas, como imágenes satelitales y datos meteorológicos, para identificar patrones de riesgo.

7.4.2.3 Sistemas de Alerta Temprana (S.A.T.)

Estos sistemas están diseñados para proporcionar advertencias anticipadas a la población y a las autoridades responsables ante la inminencia de inundaciones. Un aspecto fundamental es el uso de datos satelitales, como los proporcionados por CHIRPS y GPM, que ofrecen información precisa sobre precipitaciones tanto en tiempo real como histórica. Estos datos permiten detectar cambios en los patrones de lluvia, identificar áreas críticas y emitir alertas con mayor precisión. Además, pueden integrarse otros sistemas de observación remota para complementar el monitoreo y mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias.

7.4.2.4 Planes de contingencia y emergencia

Instrumentos de procedimientos operativos preestablecidos para salvar vidas humanas, reducir y/o prevenir daños, coordinación y alianzas estrategias para una respuesta oportuna y eficiente ante eventos climáticos adversos.

7.4.2.5 Cumplimiento de normativas

Cumplimiento a normativas locales como la Ley 602 de Gestión de Riesgos y la Ley 1333 de Medio Ambiente en el cumplimiento de franjas de seguridad.

8. CONCLUSIONES

- Se realizó una descripción general de la zona de estudio y se utilizaron datos hidrometeorológicos de la estación Cotagaita Mosoj Llajta, que tiene total influencia en el área de estudio, abarcando un periodo histórico de 34 años (1990 – 2024).
- Se analizó una variabilidad climática en la zona de Santiago de Cotagaita, con eventos de precipitación y temperatura que sugieren una disminución en el periodo de evaluación entre 1990 a 2024.
- Se delimitó la cuenca hidrográfica, misma que tiene un área de 25,48 km² y se procedió con la división en 7 subcuencas con el que se logró una modelación hidrológica más detallada en el software HEC-HMS.
- Se generó las curvas Precipitación – Duración – Frecuencia e Intensidad – Duración – Frecuencia de la estación Cotagaita Mosoj Llajta, mismas que sirvieron para realizar el modelo lluvia – escorrentía para obtención de caudales máximos.
- Los resultados indican que el caudal máximo estimado para un periodo de retorno de 50 años es de 85,70 m³/s bajo condiciones de cambio climático y de 87,10 m³/s sin considerar cambio climático. Para un periodo de retorno de 100 años, los caudales proyectados alcanzan hasta 89,50 sin considerar cambio climático y 100,2 m³/s, en el caso opuesto, lo que confirma la vulnerabilidad de la zona ante eventos extremos.
- La modelación hidráulica (HEC-RAS) mostró que los muros de contención actuales no son suficientes para evitar inundaciones, ya que, en un evento con periodo de retorno de 50 años, la altura del agua supera los muros existentes en varias secciones.
- Se determinó que las áreas más vulnerables abarcan aproximadamente 22 hectáreas, con mayores riesgos en el sector Este de la localidad.
- Se propuso la implementación de medidas estructurales, incluyendo la construcción de muros de gaviones que abarcan alturas entre 3,50 y 4,50 metros, reduciendo el riesgo de desbordamiento en eventos de hasta 100 años de retorno. Además, se hizo la verificación estructural de los mismos para prevenir futuros colapsos por el empuje del agua.
- Las medidas no estructurales incluyen programas de educación ambiental, monitoreo hidrometeorológico y la implementación de

sistemas de alerta temprana (SAT) y planes de contingencia y emergencia que permitirían una respuesta oportuna y más efectiva ante eventos climáticos extremos como las inundaciones.

9. Recomendaciones

Dada su efectividad, esta aproximación puede ser adoptada en estudios hidrológicos e hidráulicos en zonas con desafíos similares, asegurando que las soluciones sean sostenibles y adaptativas al cambio climático.

Se recomienda además el desarrollo e implementación de un Plan Integral de Gestión del Riesgo de Desastres de Inundaciones en Santiago de Cotagaita, que combine medidas estructurales y no estructurales. En el ámbito estructural, se sugiere la construcción y reforzamiento de muros de contención con mayor altura y estabilidad, diseñados para resistir eventos hidrológicos de hasta 100 años de recurrencia. Asimismo, se debe complementar con la reforestación de cuencas hidrográficas para mejorar la infiltración y reducir la escorrentía superficial. La implementación de estaciones hidrometeorológicas adicionales permitirá un monitoreo más preciso, mejorando la predicción de eventos extremos y facilitando la toma de decisiones para la gestión del riesgo.

Paralelamente, se recomienda fortalecer la educación y concienciación comunitaria sobre la gestión del riesgo, promoviendo campañas de sensibilización y capacitación en respuesta ante inundaciones. Además, la instauración de un Sistema de Alerta Temprana (SAT) basado en el monitoreo meteorológico y sensores de nivel de agua. Se recomienda el desarrollo e implementación de un Plan Integral de Gestión del Riesgo de Desastres de Inundaciones en Santiago de Cotagaita, que combine medidas estructurales y no estructurales.

BIBLIOGRAFÍA

- Almeida, L., & Valdés Serra, J. C. (2017). Modelos hidrológicos, tipos y aplicaciones más utilizadas. 129-137.
- Benito, G. (2007). *Riesgos de inundaciones: Tendencias históricas y perspectivas de acuerdo con el cambio climático*. Asociación Española para el Estudio del Cuaternario Sociedad Española de Geomorfología. <http://hdl.handle.net/10261/4381>
- Caicedo, Y. (2017). *Modelación hidrodinámica para la determinación de alertas tempranas por inundación en la ecoregión de la Mojana - Nechí, Antioquia*.
- Cardona, O. D. (2006). *Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo*.
- CENAPRED. (2009). *México: Centro Nacional de Prevención de Desastres*.

- Feldman, A. D. (2000). *Sistema de Modelado Hidrológico HEC-HMS, Manual de referencia técnica*.
- Fernandez, V. B. (2003). *Evaluación de Riesgos en Cuencas Urbanas*.
- García W., Delfín S., M., Ledezma P., M., & Arévalo S., B. (2021). Integrando métodos de evaluación de riesgos de deslizamientos e inundaciones en cuencas del Tunari y zona de Alto Cochabamba. *ACTA NOVA*, 10, 61-95.
- García W., Herbas B., E., & Suárez Lima, Y. (2017). Evaluación del riesgo y medidas de mitigación para eventos de inundación en el Municipio de Santa Ana Del Yacuma (Beni, Bolivia). *ACTA NOVA*, 2, 165-185.
- IPCC. (2017). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Ginebra, Suiza.
- Kingma, N. (2007). *Evaluación de la amenaza por inundación*.
- Maskrey, A. (1993). Los desastres no son naturales, Colombia, Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres Naturales. 95.
- Moreno, D., Quiñones, É., & Tobar, L. C. (2014). Los Sistemas de Alerta Temprana, SAT, una herramienta para la prevención de desastres por inundación y efectos del cambio climático. *Ciencias e Ingeniería al Día*, 07-24.
- Novillo López, D. (2012, Abril 26). *Blogosfera*. <https://www.eoi.es/blogs/danielnovillo/2012/04/26/el-riesgo-de-inundaciónmedidas-estructurales-y-medidas-no-estructurales-herramientas-para-lacuantificación>
- OMM. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. Suiza: Organización Meteorológica Mundial.
- Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de prácticas climatológicas OMM-Nº 100*. Suiza.
- Pérez, J. (2018). *Modelación hidráulica 2D de inundaciones en regiones con escasez de datos*.
- Romero Sánchez, M. E. (2016). Escenarios de Cambio Climático en el sector forestal. *Revista mexicana de ciencias forestales*(7).
- Yamanak, V. H. (2016). *Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas*.

ANEXOS

Tabla 1. Precipitación de precipitación media mensual

	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
Déc 90-10	13,85	39,75	78,10	138,30	488,05	913,63	549,90	439,90	48,15	3,00	0,75	-
Déc 10-20	12,00	49,60	107,50	155,40	601,50	1.116,60	895,50	469,80	109,50	18,00	-	10,50

Tabla 2. Parámetros morfométricos subcuencas río Chorolque

Sub- cuencas	Área	Perímetro	Pend. cuenca	Longitud río principal	Pend. río principal	Tiempo de concentración
	km ²	km	%	km	%	h
S-1	4,52	11,83	40,15%	4,74	12,42%	0,49
S-2	3,03	9,98	41,46%	3,58	15,37%	0,36
S-3	3,09	10,73	35,24%	3,80	9,74%	0,45
S-4	3,40	11,00	47,17%	3,99	15,76%	0,39
S-5	0,68	5,48	42,69%	1,76	17,80%	0,20
S-6	7,98	17,80	38,92%	7,03	9,16%	0,75
S-7	2,78	9,35	31,92%	3,95	9,46%	0,47

Tabla 3. Ecuaciones Intensidad – Duración – Frecuencia

Escenario	Ecuación I-D-F	Rango de validez
Sin Cambio Climático	$i = \frac{154,80 * T^{0,152}}{D^{0,627}}$	5 – 1 440 min
Con Cambio Climático	$i = \frac{170,50 * T^{0,162}}{D^{0,627}}$	5 – 1 440 min

Tabla 4. Hietograma Subcuenca 1 – Tr 50 años

Incremento de Precipitación [min]	Intensidad [mm/h]	P=i*t P [mm]	Bloques Alternos ΔP	Hietograma	Horas
2	207,80	6,93	6,9267	0,484	12:02:00 AM
4	134,58	8,97	2,0450	0,531	12:04:00 AM
6	104,37	10,44	1,4657	0,592	12:06:00 AM
8	87,15	11,62	1,1830	0,676	12:08:00 AM
10	75,78	12,63	1,0092	0,801	12:10:00 AM
12	67,59	13,52	0,8893	1,009	12:12:00 AM
14	61,37	14,32	0,8006	1,466	12:14:00 AM
16	56,44	15,05	0,7317	6,927	12:16:00 AM
18	52,43	15,73	0,6764	2,045	12:18:00 AM
20	49,07	16,36	0,6307	1,183	12:20:00 AM
22	46,23	16,95	0,5923	0,889	12:22:00 AM
24	43,78	17,51	0,5595	0,732	12:24:00 AM
26	41,63	18,04	0,5310	0,631	12:26:00 AM
28	39,74	18,55	0,5059	0,559	12:28:00 AM
30	38,06	19,03	0,4838	0,506	12:30:00 AM

Tabla 5. Caudales máximos para distintos periodos de retorno

Escenario	Caudal [m³/s]	
	TR 50 años	TR 100 años
sin CC	85,70	87,10
con CC	89,50	100,20

Tabla 6. Resumen de verificación estructural muro H = 3,50 m y Hf = 0,50 m

Fila de gaviones	Cantidad de gaviones	Fs (volteo)	Fs (deslizamiento)	Fs (capacidad portante)	
				$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$
1	1	6,60	2,64	-	-

Fila de gaviones	Cantidad de gaviones	Fs (volteo)	Fs (deslizamiento)	Fs (capacidad portante)	
				$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$
2	2	5,78	1,98	-	-
3	3	5,38	1,76	-	-
4	3	3,34	1,71	1,048	0,272
(Muro completo)					

Tabla 7. Resumen de verificación estructural muro H = 4,50 m y Hf = 0,50 m

Fila de gaviones	Cantidad de gaviones	Fs (volteo)	Fs (deslizamiento)	Fs (capacidad portante)	
				$\sigma_{\max}$	$\sigma_{\min}$
1	2	26,4	5,28	-	-
2	2	6,60	2,64	-	-
3	3	6,11	2,05	-	-
4	3	3,51	1,65	-	-
5	4	4,09	2,38	0,897	0,643
(Muro completo)					