

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Antecedentes

El planeta tierra se encuentra en un constante cambio, algunas causas del cambio son naturales y otras causas tienen un origen antrópico, que han originado un cambio brusco de acuerdo a los registros históricos de la emisión de gases de efecto invernadero. Aunque las inundaciones han estado presentes en la historia de civilizaciones antiguas, son uno de los eventos naturales que cada vez más afectan de manera contundente a las poblaciones y que provocan incomunicación, pérdidas humanas, materiales y económicas.

La identificación y estimación de los eventos extremos, es fundamental para preservar vidas, y proteger infraestructuras y bienes, los cuales hacen posible el desarrollo digno de los seres humanos. Al margen de los factores climáticos, otro problema de las inundaciones radica, en gran parte, en la planeación inadecuada y las circunstancias económicas que implican los asentamientos poblacionales en zonas susceptibles a la inundación. Bolivia cuenta con información hidrológica limitada, y son necesarios los estudios de determinación de eventos climáticos. Es importante la búsqueda de herramientas y metodologías que permitan el procesamiento de la información disponible para la previsión de desastres.

El municipio de Cotagaita ubicado en el noroeste del departamento de Potosí ha sufrido pérdidas importantes a raíz de las inundaciones, de las cuales encontramos algunos de los más importantes en reportes de la prensa, como se muestran a continuación.

En 2007, en el departamento de Potosí se evaluaron 9 municipios, donde la mayor afectación se dio en Cotagaita cuya pérdida se estima en Bs5,4 millones para una superficie afectada de 571 hectáreas, de acuerdo a la Evaluación de Daños y Pérdidas por eventos Climáticos, publicado el 2013 por UDAPE (Unidad de Análisis de Políticas Sociales y Económicas), donde también se cataloga a Cotagaita con un riesgo “medio” de inundación, al sector de agua y saneamiento. (UDAPE, pág. 57, 150, 235 y 344. 2014).

El año 2015, las lluvias en Cotagaita dejaron cinco muertos y 120 familias damnificadas, de acuerdo al reporte de Defensa Civil. En este reporte se menciona que los daños fueron menores a los del año 2014, sin embargo, no se encontraron registros del año anterior.

En función del informe de 2018 de Defensa Civil, cuatro personas han perdido la vida por culpa del lodo y la crecida de ríos: una en Cotagaita (Potosí), dos en Tiquipaya (Cochabamba) y una niña en La Paz, al colapsar una vivienda. (RT. 8 de febrero de 2018).

Encontramos el siguiente reporte de 2019: “Con las recientes declaratorias de emergencias de Cotagaita (Potosí) y Reyes (Beni) son 18 (el 4.4%) los municipios en emergencia, mientras que el número de regiones en situación de desastre se mantiene en 32 (el 7.9%), según el último reporte del Ministerio de Defensa. En total, suman 50 las poblaciones afectadas por la época de lluvias.” (La Razón, 14 de febrero de 2019).

El 6 de febrero de 2020 el municipio de Cotagaita del departamento de Potosí fue arrasado en casi un 50 % por la torrencial lluvia y posterior riada que destruyó 150 viviendas, 50 vehículos y tuvo 1.500 damnificados, según informe de Defensa Civil y de autoridades del lugar. (El Diario, 7 de febrero 2020).

Este trabajo tiene como propósito, analizar el comportamiento del flujo y los niveles de agua que puedan ser producidos por una inundación en la ciudad en el tramo del Río Cotagaita correspondiente a la ciudad de Cotagaita, con la aplicación del modelo IBER para diferentes períodos de retorno.

IBER tiene variados módulos, ha sido desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente, GEAMA (Universidad de A Coruña¹) y el Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). IBER fue patrocinado inicialmente por el Centro de Estudios Hidrográficos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en el marco de un Convenio de Cooperación entre el CEDEX y la Dirección General del Agua. Es un Software libre, accesible en los idiomas de español, inglés y francés.

¹ La Universidad de A Coruña, es una institución pública que tiene como fin la generación, gestión y difusión del conocimiento científico, tecnológico y profesional a través del desarrollo de investigación y de docencia.

1.2.El Problema

1.2.1. Planteamiento

La escasa información hidrométrica es uno de los obstáculos más importantes al realizar estudios de eventos extremos más específicamente para la predicción de máximas avenidas y la modelación de inundaciones. El crecimiento urbano no planificado, genera una vulnerabilidad mayor, y nos da la necesidad de realizar estudios de inundación con mayor frecuencia debido al cambio de uso de suelos, y en varios casos la invasión urbana a sitios cercanos a los afluentes naturales.

Los motivos planteados, hacen que los estudios de inundación, en varias regiones del país sean inexistentes, y por lo tanto no se actúe de manera oportuna al plantear obras de protección óptimas y planificación urbana.

La ciudad de Cotagaita ha sido afectada por las inundaciones en varias ocasiones, a pesar de ser un evento relativamente frecuente, no se han realizado acciones oportunas que resguarden la ciudad y por tanto la calidad de vida y la integridad de sus habitantes. En la última década se destacan grandes pérdidas, que en lugar de reducirse en el transcurso del tiempo, son cada vez más grandes. Es por ello que surge la necesidad de realizar estudios de inundación de manera práctica, entender cuáles son los principales elementos para su determinación, y que a través del uso de herramientas digitales se pueda prescindir de la información inexistente como los aforos de caudales y estudios de suelos.

El modelo IBER, a través de su módulo hidrodinámico nos ofrece practicidad en su proceso y en la visualización exportación de sus resultados.

1.2.2. Formulación

Cuáles serán las áreas inundables de la ciudad de Cotagaita mediante la aplicación del modelo bidimensional IBER.

1.2.3. Sistematización

De acuerdo a la formulación del problema, se plantea que para la modelación se requieren parámetros que no son comúnmente medidos o encontrados. Entonces:

- ¿Cuáles serán las ventajas de emplear el modelo IBER al realizar una modelación de inundación?
- ¿La información hidrometeorológica de la zona de estudio es consistente y suficiente para el estudio?
- ¿Los datos históricos de las estaciones meteorológicas nos servirán para estimar caudales máximos?
- ¿Cuáles son las afectaciones que resultan de la modelación?

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Generar un modelo bidimensional de inundación de la ciudad de Cotagaita ubicada en el departamento de Potosí, aplicando el modelo IBER para identificar áreas inundables de la zona.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analizar la información hidrometeorológica disponible en la cuenca de estudio.
- Estudiar las características del modelo IBER y sus variables.
- Realizar el estudio hidrológico de máximas avenidas.
- Modelar la inundación la ciudad de Cotagaita con distintos periodos de retorno.
- Analizar los resultados y cuantificar las áreas inundables.

1.4.Justificación

1.4.1. Teórica

Las inundaciones son una amenaza histórica en la ciudad de Cotagaita, y la soluciones que se han brindado son de corto plazo y de corto alcance.

Este tipo de eventos, deben ser analizados desde un punto de vista técnico, donde se tomen en cuenta las características del suelo, la urbanización, la intensidad de las lluvias y sus características temporales, mediante la utilización de herramientas digitales que tomen en cuenta los parámetros mencionados, que puedan ejecutarse de manera práctica. En este proyecto además del software del modelo, también se emplearán softwares complementarios.

La facilitación metodológica del modelo podrá facilitar el uso del modelo para otros estudios con fines similares.

1.4.2. Metodológica

Se utilizará el programa IBER para la modelación de inundación en la ciudad de Cotagaita, aplicando conocimientos y criterios de la ingeniería civil, en la determinación de los parámetros necesario para el estudio.

Las herramientas digitales precisan de un seguimiento analítico, en cuanto a la información que se sube, y la interpretación de los resultados que brindan.

1.4.3. Práctica

La determinación de las áreas de inundación mediante el modelo bidimensional, permite realizar un análisis técnico que contemple soluciones de ingeniería, resguardando el bienestar y la integridad de los habitantes.

1.5.Hipótesis

El análisis de flujo aplicado en una zona poblada, con la dinámica de fluidos computacional en IBER, puede optimizar la identificación de zonas de inundación.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II

MARCO DE REFERENCIA

2.1. Marco Teórico

2.1.1. *Modelo IBER*

IBER es un modelo hidrodinámico bidimensional para la simulación de flujo turbulento, superficie libre, régimen no permanente, morfodinámica, procesos de transporte y hábitat en ríos y estuarios.

Cuenta con 6 módulos: turbulencia, transporte de sedimentos, calidad del agua, procesos hidrológicos, hábitat e hidrodinámica.

Para el fin de este trabajo se utilizará el módulo hidrodinámico, el cual fue desarrollado integrando un modelo numérico hidráulico (CARPA) con una interfaz (GiD). También cuenta integrado un modelo numérico hidráulico (TURBILLON). Teniendo como resultado las siguientes características del modelo.

- Basado en la última generación de esquemas numéricos de volumen finito.
- Proporcionado por una interfaz potente y amigable.
- Adaptado a las características de los ríos torrenciales.

El módulo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de aguas someras (de poca profundidad), conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE), también llamadas ecuaciones de Saint-Venant 2D. En las cuales se asume una distribución de presión hidrostática y una distribución uniforme de la velocidad en profundidad.

2.1.2. *Modelación matemática*

En hidráulica, la modelación se usa para la simulación de situaciones reales que se producen en el prototipo y cuyo comportamiento se desea conocer; puesto que modelo y prototipo están ligados el uno con el otro, las observaciones y estudio del modelo constituyen la información necesaria para comprender la naturaleza del prototipo, debiendo para ello, estar ambos relacionados.

Los estudios en modelos de ríos son usados para resolver problemas de regulación de ríos o desarrollos hidro-energéticos, determinar el tiempo de desplazamiento de ondas de inundación por los cauces de los ríos, métodos para el mejoramiento de canales para la transmisión de inundaciones con menos riesgo de desbordamiento sobre las orillas, los efectos de los acortamientos de los ríos, efecto de diques, paredes de contención sobre la erosión de los lechos, altura de los remansos provocados por estructuras permanentes o temporales, construidas en medio de un cauce; dirección y fuerzas de corriente en ríos y puertos y sus efectos sobre la navegación.

Existen diferentes maneras de clasificar los modelos matemáticos, sin embargo, para la finalidad de este trabajo veremos la dimensión, dentro del cual tenemos la unidimensional, bidimensional y tridimensional.

Los modelos bidimensionales, consideran las variaciones en las dos dimensiones del plano horizontal. Las variaciones de la velocidad u otra magnitud de interés en la columna vertical de agua se promedian y se asumen como un único valor.

Estos modelos son especialmente útiles en flujos muy extendidos, donde la variación vertical de velocidad es pequeña, por eso suelen llamarse modelos de aguas someras o poco profundas.

Los problemas 2D y 3D requieren resolver las ecuaciones diferenciales y por tanto una discretización más fina mediante el uso de mallas. Los métodos principales son el Método de Elementos Finitos, el Método de Diferencias Finitas y el Método de Volúmenes Finitos.

2.1.3. Ecuaciones de Saint-Venant

Las ecuaciones de Saint-Venant son un conjunto de ecuaciones diferenciales que modelan los cambios de caudal en el espacio y en el tiempo, el nombre de las ecuaciones, fue dado en honor al matemático e ingeniero francés Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant² y son conocidas también como un conjunto de ecuaciones hiperbólicas.

² Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant (1797-1886) fue un matemático y científico mecánico francés que contribuyó al nacimiento de la mecánica de medios continuos, tanto en la mecánica de sólidos deformables como en la mecánica de fluidos. Aunque su apellido completo era Barré de Saint-Venant, es conocido en la bibliografía no francesa simplemente como Saint-Venant.

Estas ecuaciones pueden ser utilizadas en la transformación de lluvia en escorrentía en una cuenca para luego ser transitada o trasladada a través de una corriente de agua como un río, para transitar flujos de agua superficiales (someras) y otros contextos donde sea necesaria la conservación de energía y momento.

El sistema de ecuaciones de Saint-Venant está compuesto por dos conjuntos de ecuaciones: las ecuaciones de continuidad y las ecuaciones de cantidad de movimiento o momentum. (Bladé, E. 2014, p. 7).

Ecuación de Continuidad. Es la ecuación de conservación de masa sobre un volumen de control, el principio indica que la entrada neta de masa por unidad de tiempo debe ser igual al cambio de almacenamiento dentro de dicho volumen.

Que en su forma conservativa se puede representar en términos del caudal y área (Szymkiewicz, R. 2010, p. 27-28).

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

Forma no conservativa.

$$v \frac{\partial y}{\partial x} + y \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

Donde:

Q = Caudal

A = Área

v = Velocidad del flujo

∂t = diferencial parcial de tiempo

∂x = diferencial del componente del eje x

∂y = diferencial del componente del eje y

La diferencia entre las dos formas, es que la última, considera a la velocidad del flujo como variable independiente en vez del caudal, lo que es útil para algunos métodos de solución.

Ecuación de Momentum. Es una ecuación diferencial parcial en función de una variable vectorial propuesta por Cauchy que describe el transporte no relativista de momentum en cualquier medio continuo.

Forma conservativa.

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

Forma no conservativa (Elemento de ancho unitario).

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

Donde:

g = Fuerza gravitacional

S_0 = Pendiente inicial

S_f = Pendiente final

En el modelo hidrodinámico se resuelven estas ecuaciones y se incluyen los siguientes términos:

- Presión hidrostática
- Pendiente del fondo
- Tensiones tangenciales viscosas y turbulentas
- Rozamiento de fondo
- Rozamiento superficial por viento
- Precipitación
- Infiltración

También se considera la modelación de los frentes seco-mojado, sean estacionarios o no estacionarios que se encuentren en el dominio. Esto es fundamental para la modelación de zonas inundables en ríos y estuarios.

Ecuaciones de Saint-Venant en 2D. Las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant son las siguientes:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = ghS_{0x} - ghS_{fx} + \frac{\tau_{wx}}{\rho} + h\zeta v$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) = ghS_{0y} - ghS_{fy} + \frac{\tau_{wy}}{\rho} - h\zeta u$$

Donde:

h = Profundidad del agua.

u = Velocidad promediada en profundidad en la dirección x .

v = Velocidad promediada en profundidad en la dirección y .

ρ = Densidad del agua.

τ_{wx} = Esfuerzo cortante superficial por efecto de viento en la dirección x .

τ_{wy} = Esfuerzo cortante superficial por efecto de viento en la dirección y .

ζ = Parámetro de Coriolis.

S_{fx} = Pendiente de fricción en x .

S_{fy} = Pendiente de fricción en y .

(Salas, D. y Govindaraju, S. 2014, p. 142).

Si no se considera la fuerza de Coriolis, que para cauces de ríos no suele ser significativa, ni las tensiones efectivas, que tienen poca importancia con respecto a los otros términos, ni las tensiones producidas por el viento en la superficie libre, se pueden escribir las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = gh(S_{0x} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) = gh(S_{0y} - S_{fy})$$

La forma vectorial de la ecuación de Saint-Venant se expresa como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = B$$

Donde:

$$U = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, F = \begin{pmatrix} uh \\ u^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \\ uvh \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} vh \\ uvh \\ v^2 h + \frac{1}{2} gh^2 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ Cv h + \frac{\tau_{sx}}{\rho} + gh(S_{0x} - S_{fx}) + S_{t1} \\ Cu h + \frac{\tau_{sf}}{\rho} + gh(S_{0y} - S_{fy}) + S_{t2} \end{pmatrix}$$

Las tensiones tangenciales en la superficie “ τ_{sx} ”, “ τ_{sy} ” debidas al viento, se suelen despreciar a no ser que el tamaño de la superficie sometida a la acción del viento sea muy grande. En estos casos hay diferentes expresiones que por lo regular son de la forma:

$$\tau_{sx} = kW^2 \cos \theta_x$$

$$\tau_{sy} = kW^2 \cos \theta_y$$

Donde:

k = Coeficiente empírico.

W = Velocidad del viento.

θ_x, θ_y = Ángulos que forma la dirección del viento con los ejes.

Hay casos en que el exponente de “ W ” es distinto de 2 y se ajusta de manera experimental. Se denomina pendiente geométrica “ S_0 ” según “ x ” o “ y ” a la derivada cambiada de signo de la cota del fondo respecto a “ x ” o “ y ”; es decir, positiva si el fondo desciende en el sentido de las x ; crecientes y negativa en caso contrario y que están definidas en función de la cota

geométrica z_b , se expresan en función de H (ver Figura 1), que representa la distancia al fondo desde un nivel de referencia fijo, con sentido positivo hacia abajo, esto es:

$$S_{0x} = -\frac{\partial z_b}{\partial x}, \quad S_{0y} = -\frac{\partial z_b}{\partial y}$$

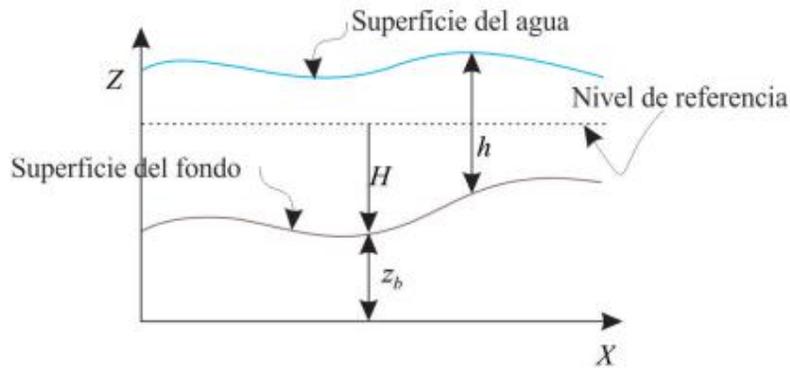


Figura 1. Gráfico del flujo en plano vertical.

Fuente: Elaborado a partir de Vázquez-Cendón (2015).

Las tensiones en el fondo “ τ_{bx} ”, “ τ_{by} ” se calculan por medio de la fórmula de Chézy cuyo valor para las tensiones según “ x ” y “ y ” son:

$$\tau_{bx} = \rho g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2}, \quad \tau_{by} = \rho g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{C^2}$$

El coeficiente C de Chézy depende del coeficiente de Manning n y está dado por:

$$C = \frac{R_h^{\frac{1}{6}}}{n}$$

Donde:

R_h = Radio Hidráulico, en metros.

n = Coeficiente de rugosidad de manning.

Se denominan como S_{fx} , S_{fy} a los términos (o pendientes) de fricción del agua con el fondo del cauce en cada una de las direcciones.

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}}$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{4}{3}}}$$

Se denomina término turbulento a las siguientes expresiones:

$$S_{t1} = \frac{\partial}{\partial x} \left(2v_t h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t h \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right)$$

$$S_{t2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t h \left[\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(2v_t h \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

Las ecuaciones de Saint-Venant son un caso concreto de sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales hiperbólico, cuasi-lineal y con término independiente. En su forma conservativa presentan grandes ventajas a la hora de plantear esquemas de resolución que permitan obtener soluciones con discontinuidades, una opción es recurrir a los métodos numéricos (Método de volúmenes finitos).

2.1.4. Solución de las ecuaciones de Saint-Venant

Las ecuaciones de Saint-Venant, no disponen de una solución analítica, salvo para tipos de flujo y situaciones muy específicas (Chow, V. T. 1994, p. 282). Generalmente, la solución de estas ecuaciones se obtiene con el uso de los métodos numéricos, clasificados en cuatro grupos: El método de las características, el método de diferencias finitas, el método de elementos finitos y el método de volúmenes finitos. (Chaudhry, 2008, p. 362).

Entre los métodos mencionados el de los volúmenes finitos es muy adecuado para sistemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, hiperbólicos y no lineales como son las ecuaciones de Saint-Venant. Este método es una herramienta ampliamente utilizada en la actualidad para resolver problemas hidrodinámicos y es de interés en la presente investigación mostrar el desarrollo e interpretación, de tal forma se pueda aplicar en el modelamiento de cuencas y ríos con el programa IBER.

El proceso de discretización del dominio geométrico y los fenómenos físicos de interés siguen los procedimientos que se muestran en la Figura 2.

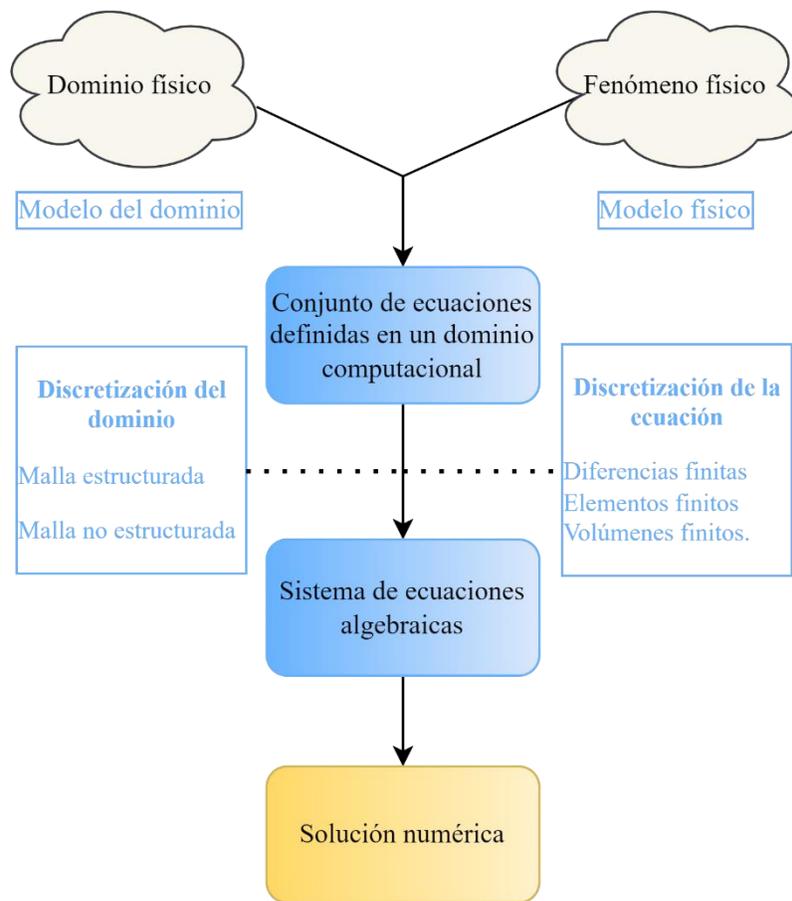


Figura 2. *Proceso de discretización.*

Fuente: Elaborado a partir de Moukalled; Mangani y Darwish (2016).

Discretización del dominio. La discretización geométrica consiste en transformar el dominio en una malla de nodos. Esto se logra mediante una variedad de técnicas que dan lugar a una amplia gama de tipos de malla.

Estas mallas se clasifican de acuerdo con varias características: Estructura, ortogonalidad, bloques, forma de célula, disposición variable, etc. En todos los casos la malla se compone de elementos discretos definidos por un conjunto de vértices y delimitados por caras.

Malla Estructurada. Es el tipo de malla más simple y es equivalente a una malla cartesiana, comúnmente denominadas mallas de diferencias finitas, su mayor desventaja de este tipo de mallas es que no se adaptan muy bien en dominios con geometrías irregulares y acumulan puntos en regiones que no son de interés (Cardesa, 2014, p.22-26). Véase figura 3.

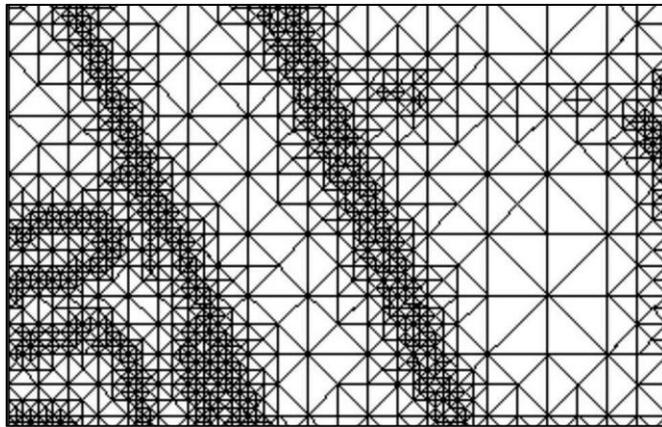


Figura 3. *Ejemplo de malla estructurada.*

Fuente: IBER, Manual básico de usuario (2012).

Malla no estructurada. Este tipo de mallas comprende triángulos generados a base de puntos aleatorios, como es el caso de la metodología de triangulación de Delaunay y es recomendado para dominios con geometría irregular (Chapra y Canale, 2007, p. 907). Véase figura 4.

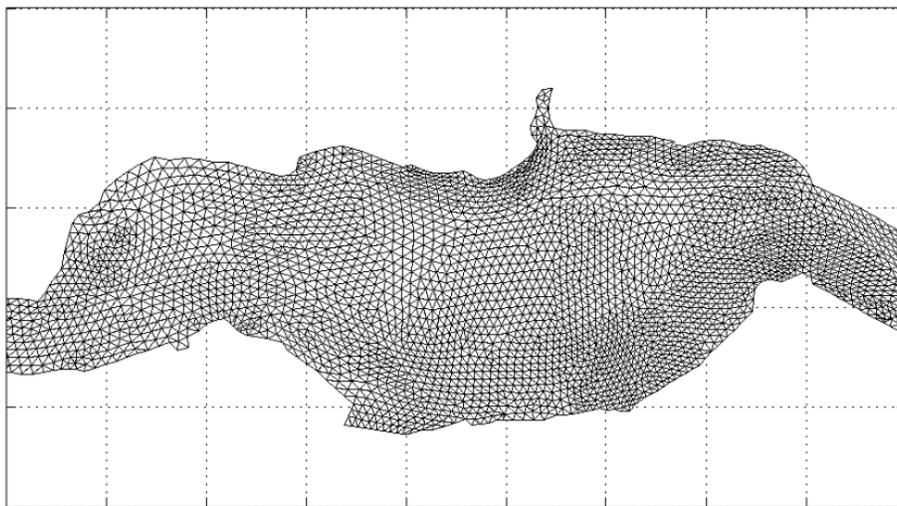


Figura 4. *Ejemplo de malla no estructurada.*

Fuente: IBER, Manual básico de usuario (2012).

Método de Volúmenes Finitos. Conocido también como método de volumen de control y método de volumen integral, es un camino alternativo para la aproximación numérica de las ecuaciones diferenciales parciales (Versteeg y Malalasekera, 2007, p. 9). Fue inicialmente introducido por investigadores como McDonald (1971) y MacCormack y Paullay (1972) para la solución de las ecuaciones bidimensionales de Euler dependientes del tiempo, y posteriormente fue extendido a flujos tridimensionales por Rizzi e Inouye (1973) (Tu; Yeoh

y Liu, 2008, p. 134). Una característica importante de este método es que se puede usar una malla de tipo “elemento finito”, en la que la malla puede estar formada por la combinación de triángulos o cuadriláteros en el caso de dos dimensiones.

Arreglo de variables. Para la generación o construcción de los volúmenes finitos en 2D, existen diferentes metodologías para definir la forma y posición del volumen de control con respecto a la malla. La más sencilla consiste en utilizar la discretización espacial y ubicar el nodo de la celda o volumen finito en el centroide de cada elemento, conocida como generación de volúmenes finitos tipo celda. Otra opción es la generación de volúmenes de control tipo vértice donde el nodo se ubica en la misma.

2.1.5. Condiciones de contorno hidrodinámicas

Para la caracterización del modelo es necesario asignar las condiciones de contorno, que sirven como una delimitación, y en las cuales se brindan condiciones de entrada o salida. Existen dos tipos, condiciones de contorno: cerradas y abiertas.

Los contornos cerrados, también llamados contornos de tipo pared, son impermeables, no permitiendo el paso del fluido a través de ellos. Se genera una fuerza de rozamiento lateral en el fluido, de manera similar a la fricción ejercida por el rozamiento del fondo.

En los contornos abiertos se pueden imponer diferentes tipos de condiciones de contorno, depende de si se trata de un contorno de entrada o de salida de flujo, así como del tipo de régimen en el contorno. En un contorno de entrada es necesario imponer tres condiciones de contorno si el régimen es supercrítico, mientras que si se produce régimen subcrítico es suficiente con imponer dos condiciones. Las condiciones concretas a imponer pueden ser el tirante, las componentes de la velocidad, o una combinación de ambos. En el contorno aguas arriba se suele imponer el caudal total de entrada y la dirección del flujo, a falta de estos datos, se asume que la dirección del flujo es perpendicular al contorno de entrada; también es posible introducir aguas arriba las componentes de la velocidad o del caudal específico.

La primera versión del modelo IBER, es la v2.4.0 y la última v2.6.0; inicialmente sólo tenía el módulo hidrodinámico, con el desarrollo de nuevas versiones se solucionaron algunos errores, y se implementaron cinco módulos más, que incorpora el modelo en su última actualización.

Para el propósito de este trabajo se utilizará el modelo IBER v2.4.3, que es la versión más reciente en cuanto a modelación hidrodinámica.

El proceso de caracterización del modelo, requiere los siguientes pasos:

- Crear o importar una geometría.
- Asignar una serie de parámetros de entrada.
- Asignar condiciones de contorno e iniciales.
- Asignar opciones generales de cálculo.
- Construir una malla de cálculo.
- Lanzar el cálculo.

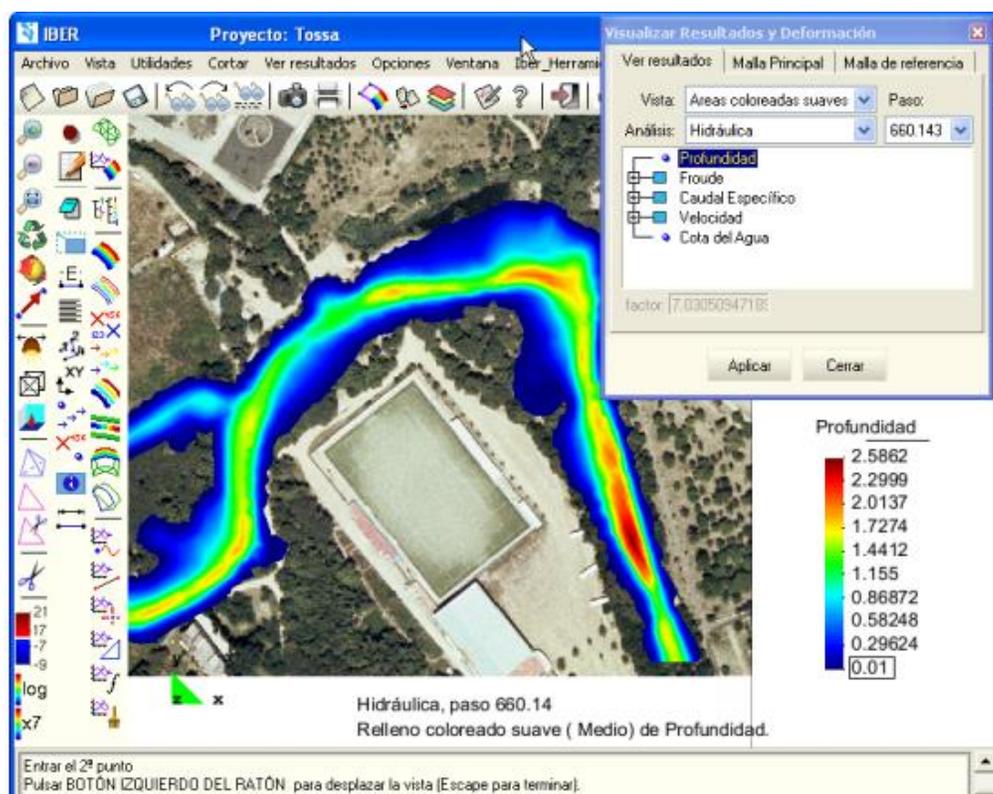


Figura 5. Ejemplo de visualización de resultados.

Fuente: IBER, Manual básico de usuario (2012).

2.2.Marco Conceptual

2.2.1. Flujo en canales abiertos

El flujo en canal abierto debe tener una superficie libre, una superficie está sometida a la presión atmosférica directa. Las condiciones de flujo en canales abiertos se complican por el hecho de que la posición de la superficie libre puede cambiar con el tiempo y con el espacio, y también por el hecho de la profundidad de flujo. Podemos decir que en este tipo de flujo se consideran más variables, dependientes e independientes para realizar estudios en el área de la hidráulica, por ejemplo, nos encontramos con la rugosidad, que variará de acuerdo al tramo, la topografía del área de estudio, la presión atmosférica antes mencionada, los volúmenes de agua existente, y los que son generados por la lluvia, y entre otros los que son parte del ciclo hidrológico. (Chow, V. T. 1994, p. 3).

En un río, riachuelo o quebrada nos encontramos con un flujo en canal abierto, dadas las condiciones que pueden afectar y definir sus características.

2.2.2. Inundación

“Un fenómeno natural es toda manifestación de la naturaleza y se refiere a cualquier expresión que adopta la naturaleza como resultado de su funcionamiento interno. Los hay de cierta regularidad o de aparición extraordinaria y sorprendente” (Maskrey, A. y Romero, G. 1993, p. 7).

Los fenómenos naturales pueden ser de ocurrencia ordinaria o extraordinaria, de esta manera, también se puede decir que no necesariamente provocan un desastre. Es por eso que se deben considerar como elementos activos.

Por lo tanto, se mitiga al riesgo de inundación para evitar el desastre (disminución de sus efectos negativos en la comunidad) con la Gestión del riesgo por inundación, que se refiere a la implementación y ejecución de acciones, con la articulación de los actores para mitigar dicho desastre.

Así es como, una lluvia torrencial y avenidas pueden ocasionar erosiones o sedimentaciones cambiando el paisaje natural, pero estos resultados no pueden considerarse desastrosos o catastróficos por si solos. Sin embargo, dadas las condiciones espacio temporales en la que

exista una comunidad en el lugar de la inundación (comunidad con riesgo de inundación), puede tener pérdidas materiales, daños a la vivienda e incluso pérdidas humanas.

“Una inundación es una sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada” (Aldana-Valverde, 2016. p. 57).

Definimos a partir de esto que las inundaciones son el resultado de precipitaciones fuertes o continuas que causan encharcamientos, una vez que la capacidad de absorción del suelo se encuentra sobrepasada: cuando el nivel del agua aumenta en magnitud se considera una inundación.

En Bolivia se observan dos de los fenómenos climáticos más representativos de la región, denominados “La Niña” y “El Niño”, los efectos climáticos de estos fenómenos varían de acuerdo a la ubicación y las características geográficas, y representan grandes pérdidas socio-económicas en el país.

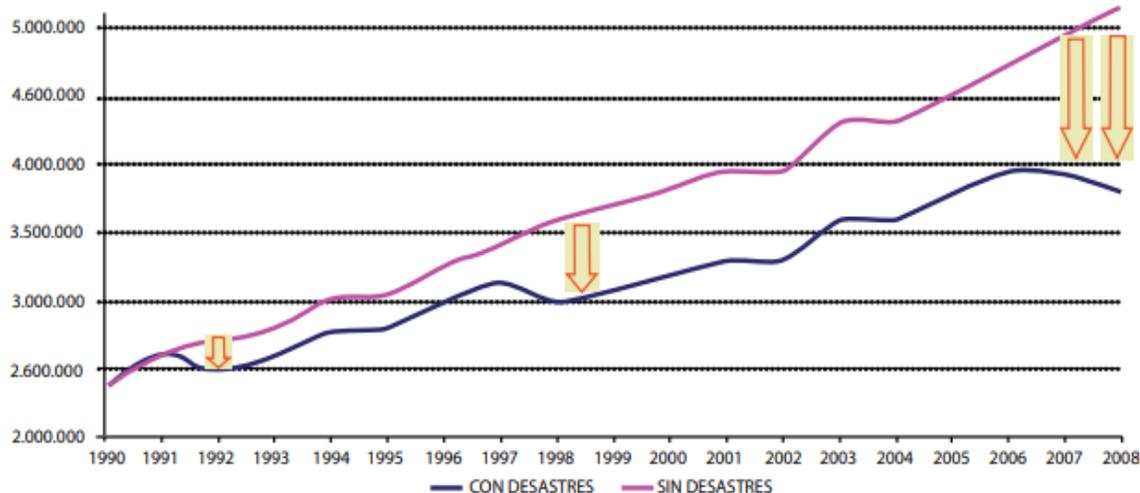


Figura 6. El Niño/La Niña y episodios neutros y su impacto en el PIB agrícola en miles de bolivianos en 1990.

Fuente: CEPAL (2007).

El Niño presenta anomalías de precipitación positivas en el oriente, que dan lugar a inundaciones y anomalías negativas en la región del chaco y en el altiplano, lo que provoca sequías y heladas. De acuerdo al informe del IPCC del 2007, el cambio climático aumentará la frecuencia de eventos extremos como sequías e inundaciones.

2.2.3. Modelo de elevación digital (DEM)

El DEM se origina a partir de la modelación digital de terreno. El término Modelo Digital del Terreno (MDT) fue acuñado, según Petrie y Kennie (1990) por Miller y La Flamme, dos ingenieros del Instituto Tecnológico de Massachusetts, a finales de los años 50. Según estos investigadores un modelo digital del terreno es una representación estadística de una superficie continua del terreno mediante un conjunto infinito de puntos cuyos valores en X, Y y Z son conocidos y están definidos en un sistema de coordenadas arbitrario.

En este caso la palabra elevación enfatiza el concepto de medición de altura con respecto a un datum y la generación por parte del modelo de valores absolutos de altura.

Este término se utiliza con frecuencia en los Estados Unidos para describir un arreglo rectangular o hexagonal de puntos con valores de elevación obtenidos por métodos fotogramétricos o cartográficos. (Kennie, T. J. M. y Petrie, G., 2014, p. 56).

2.2.4. Satélite ALOS PALSAR

El Satélite Avanzado de Observación de la Tierra, por sus siglas en inglés denominado “ALOS”, fue lanzado en enero del 2006, es un satélite japonés, a cargo de la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón, con sus siglas “AJAX”.

Posee dos componentes ópticos, para el radar de apertura sintética (SAR) de banda L. Phased Array (PALSAR). El instrumento PALSAR brinda características de sensor mejoradas, que incluyen polarimetría completa, visualización variable fuera del nadir y operaciones ScanSAR, así como un rendimiento radiométrico y geométrico significativamente mejorado. Este satélite es pionero para el monitoreo ambiental global es la estrategia sistemática de adquisición de datos que se ha implementado para ALOS.

Con una prioridad sólo superada por las observaciones de emergencia, la estrategia de observación de PALSAR ha sido diseñada para proporcionar observaciones coherentes de pared a pared con una resolución fina de todas las áreas terrestres de la Tierra de forma repetitiva, de una manera que antes se concebía únicamente para instrumentos de resolución gruesa y media. (Rosenqvist, A.; Shimada, M.; Ito, N. y Watanabe, M. 2007, p. 3).

Tabla 1. *Características del satélite ALOS PALSAR.*

Artículo	Características
Lanzamiento	24 enero, 2006
Orbita	Polar, sincrónico solar
Altitud	694 km
Inclinación	98,16°
Ciclo de recurrencia	46 días
Control orbital (objetivo)	Transversal < +/-500m
Precisión de la posición orbital	0,78 m (fuera de línea)
Sólido de alta velocidad	Capacidad: 96 GB
Registrador estatal (HSSR)	Velocidad de datos: 360 Mbps (grabación) 240 Mbps (reproducción)

Fuente: Rosenqvist, A.; Shimada, M.; Ito, N. y Watanabe, M. (2007).

Monitoreo del suelo. El mapeo y el monitoreo de los cambios en la distribución de las tierras de cultivo brindan información que ayuda a los enfoques sostenibles de la agricultura y respalda la alerta temprana de amenazas a la seguridad alimentaria mundial y regional. El satélite nos brinda multipolarización y datos polarimétricos para la clasificación de cultivos.

Con un conjunto de datos multifrecuencia, se alcanzó una precisión general del 88,7 % y muchos cultivos individuales se clasificaron con una precisión superior al 90 %. Estos resultados fueron competitivos con la precisión general lograda utilizando tres imágenes Landsat cuya precisión alcanzaba un 88,0 %.

Los parámetros de banda L derivados de tres enfoques de descomposición (Cloude-Pottier, Freeman-Durden y Krogager) produjeron precisiones de clasificación de cultivos superiores en relación con las logradas con polarizaciones lineales. (McNairn, H.; Shang, J.; Jiao, X. y Champagne, C. 2009, p. 434).

2.2.5. Rugosidad

La rugosidad de la superficie de la tierra continuamente sirve de sumidero de la cantidad de movimiento para el flujo atmosférico. Para la descripción, modelización y predicción del comportamiento de los vientos y la turbulencia a todas las escalas, un conocimiento adecuado de la fuerza de este sumidero es necesario para la condición límite. A grandes escalas, la rugosidad superficial influye en el desarrollo de las tormentas y de la circulación atmosférica global.

A pequeña escala, cuanto más rugosa es la superficie, mayor es la mezcla turbulenta. De acuerdo con la teoría del transporte turbulento, el ritmo de mezcla no depende de la velocidad del viento sino de la gradiente vertical de la velocidad de viento.

“El grado de rugosidad de las superficies es importante, en ocasiones es deseable tener una rugosidad alta y en otras ocasiones es indeseable”. (Rivera, H. y Melo, R. M. 2001, p. 27).

De acuerdo a la rugosidad de las superficies que contemplen la zona de estudios, algunas incidirán directamente en el comportamiento dinámico de los fluidos.

2.2.6. Modelación Hidrológica

Los modelos hidrológicos son aproximaciones, el sistema real no se puede pronosticar con certeza, los fenómenos hidrológicos dependen de cinco fuentes de variación, tres que son dimensiones espaciales, la aleatoriedad y el tiempo. Un modelo práctico usualmente considera una o dos fuentes de variación.

2.2.7. Modelo HEC-HMS

El modelo HEC-HMS es un modelo de eventos, es decir nos permite simular un evento hidrológico concreto, en el caso de aplicación de este proyecto, se precisa un modelo de lluvia-escorrentía.

El software nos permite calcular el hidrograma producido por una cuenca si facilitamos datos de la cuenca, como área, número de curva, precipitación y duración de lluvias.

Las diversas fases de trabajo del programa pueden esquematizarse como se muestra en la Figura 7.

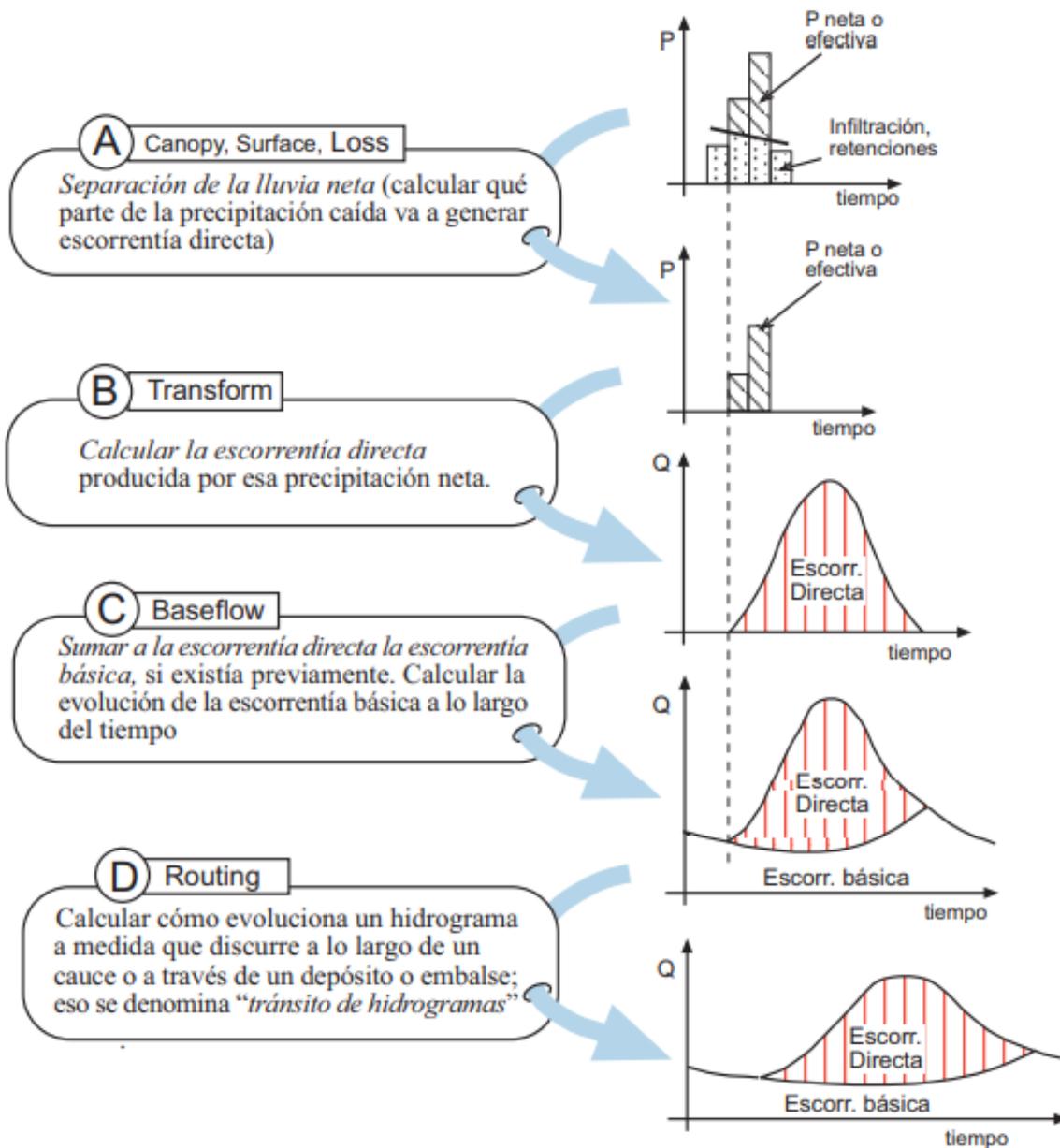


Figura 7. Esquema de trabajo HEC-HMS.

Fuente: Sánchez F. J. (2017).

Componentes del modelo. Los componentes del modelo son utilizados para simular la respuesta hidrológica en una cuenca. Estos incluyen; modelos de cuencas, modelos meteorológicos, especificaciones de control y datos de entrada. En una simulación se calcula la respuesta de la cuenca dada a una precipitación, una vez definido el modelo meteorológico, las especificaciones de control definen el tiempo, y el intervalo de tiempo para el cual se realizará la simulación.

- **Modelo de cuenca.** El modelo de cuenca es utilizado para representar la parte física de la cuenca. El usuario desarrolla un modelo de cuenca agregando y conectando elementos hidrológicos. Los elementos hidrológicos usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos en la cuenca.
- **Modelo Meteorológico.** Calcula la precipitación requerida en una subcuenca. Se puede utilizar precipitación puntual o por grillas, tiene la capacidad de modelar precipitación sólida y líquida junto con evapotranspiración. También posee un método de cálculo de derretimiento de nieve utilizando un algoritmo de temperatura. Los métodos para la evapotranspiración incluyen el promedio mensual, el método de Priestel y Taylor, y el mismo método en forma de grilla. Un método de evapotranspiración es requerido solo cuando se modelan respuestas hidrológicas en largos períodos de tiempo.
- **Especificaciones de control.** Fijan el tiempo de duración de cada corrida de una simulación. La información en las especificaciones de control incluye una fecha de inicio, una fecha de finalización y el intervalo de tiempo de la simulación.
- **Datos de entrada.** Las series de tiempo, las series de pares, los datos de las grillas son requeridos generalmente como condiciones de borde en los modelos de cuencas y meteorológicos.

2.3. Marco Espacial

2.3.1. Ubicación

El área de estudio está localizada en el municipio de Cotagaita, provincia Nor - Chichas, del departamento de Potosí - Bolivia. Se encuentra a 180 km de la ciudad de Potosí.

La cuenca de aporte tiene un área de 4.203,79 km² y es parte de la cuenca del Río Pilcomayo.

Coordenadas geográficas:

Latitud: 20°49'60" S

Longitud: 65°40'60" O

X: 65,678494

Y: 20,814482

Altitud de Cotagaita: 2.648 msnm.

Población: 31.801 habitantes.

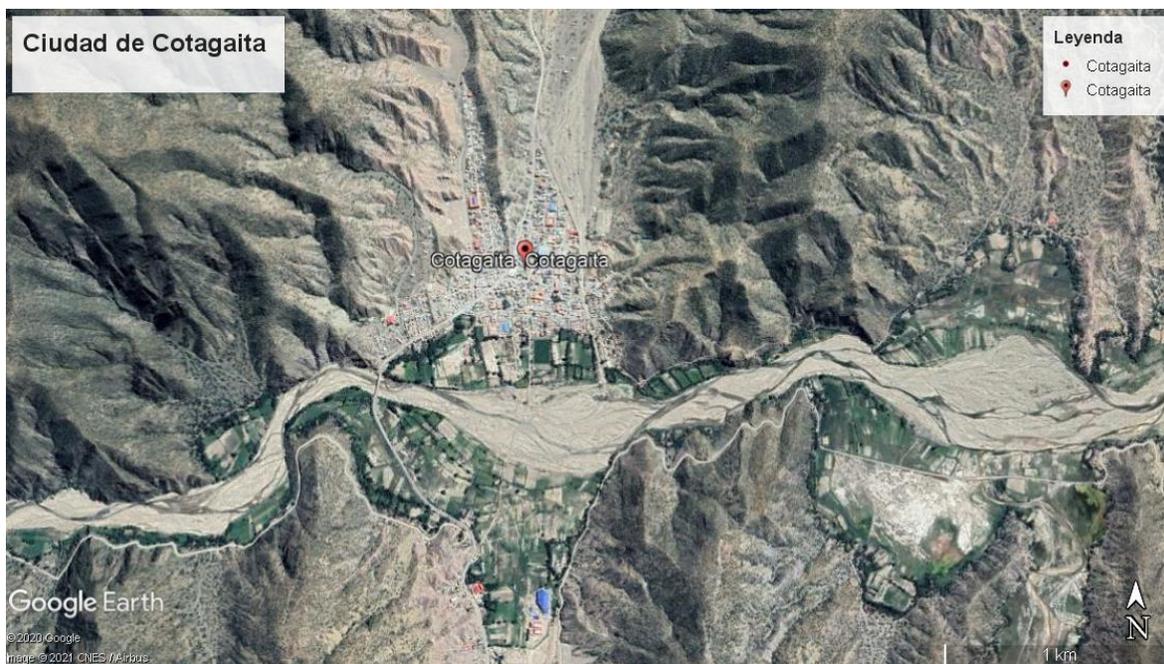


Figura 8. Zona de Estudio Ciudad de Cotagaita.

Fuente: Elaborado desde Google Earth (2020).

2.3.2. Contexto Histórico

Bolivia posee diversas regiones climáticas en toda la extensión de su superficie; las inundaciones son un tema común en todo el territorio durante la época de lluvias. Es un peligro latente en varias localidades del país, puesto que se registran pérdidas materiales que intervienen en la calidad de vida de los habitantes, y en los peores casos donde se la vida de las personas se ve vulnerada.

De acuerdo a la ubicación geográfica, algunos centros urbanos se ven más afectados que otros, siendo de importancia las medidas que toman los municipios para encarar el riesgo que representan las inundaciones. Como vemos en la Figura 10, Bolivia es de los países más afectados por las inundaciones, esto apunta a fallas en la prevención de desastres.

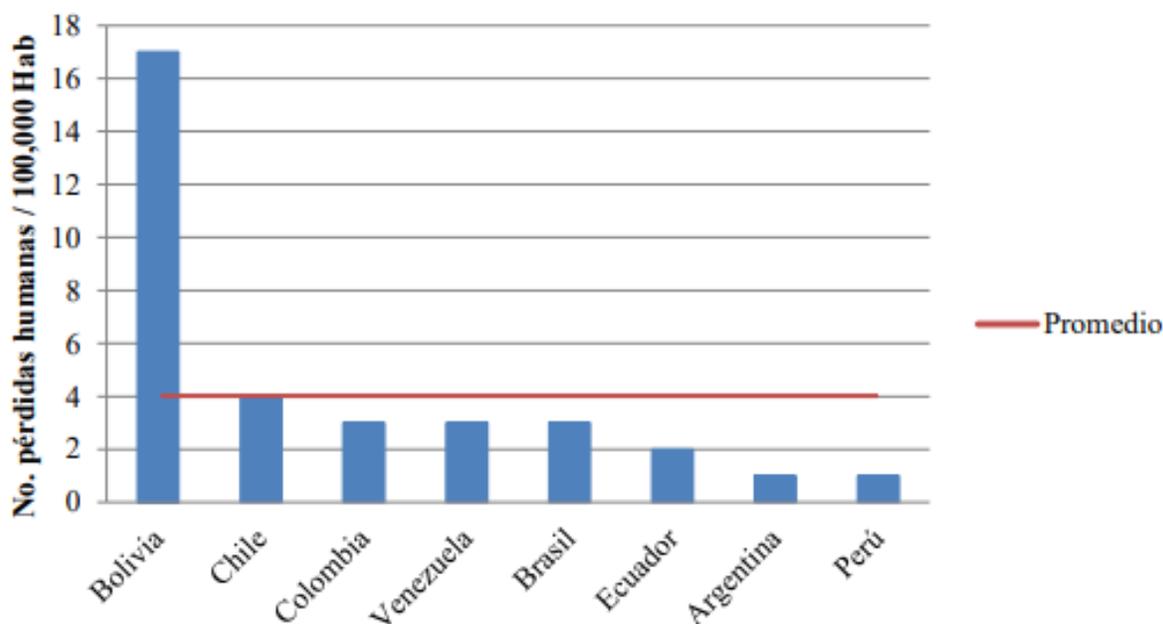


Figura 10. N° de pérdidas humanas por cada 100.000 afectados por inundación en países de Sudamérica.

Fuente: Ingeniería Técnica y Científica S.A.S. (2015).

El río Cotagaita, a lo largo de su cauce, ha representado en repetidas ocasiones una amenaza para los agricultores y habitantes de las ciudades aledañas, al sur del departamento de Potosí.

De acuerdo al estudio realizado en “El Plan de Contingencias para el fenómeno La Niña 2010/2011”, se identificaron 242 municipios con un riesgo recurrente a inundaciones desde el año 2006, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. *Municipios de afectación recurrente a inundación 2006-2010.*

Departamento	Municipio
Beni	Trinidad, Riberalta, Reyes, Rurrenabaque, Santa Ana, San Ignacio.
Chuquisaca	Villa Zudañes (Tacopaya), Las Carreras.
Cochabamba	Cliza, Sipe Sipe, Colcapirhua, Vinto, Villa Tunari, Totora, Chimoré, Puerto Villaroel, Tiraque.
Santa Cruz	Santa Cruz de la Sierra, El Torno, Warnes, Okinawa, Yapacaní, Santa Rosa.
La Paz	La Paz, Mecapaca, El Alto, Chuma, Guanay, Apolo, Viacha, San Buenaventura.
Oruro	El Choro, Paria (Sorocachi), Challapata.
Pando	Cobija
Potosí	Betanzos, Ravelo, Pocoata, Cotagaita, Tupiza, Villazón.
Tarija	Tarija

Fuente: VIDECI (2010).

2.4. Marco Temporal

2.4.1. Periodo de estudio

Para este proyecto es importante tomar en cuenta aspectos históricos, especialmente para el análisis hidrológico y la generación de caudales máximos.

Nos encontramos con seis estaciones meteorológicas y una estación hidrológica en el área de estudio. Para la estimación de caudales máximos se plantea utilizar el modelo HEC-HMS, en el cual se recomienda trabajar con información de al menos 10 años.

Con ese precedente, se pretende evaluar los registros de las estaciones contemplando periodos entre los años 1974 a 2020.

CAPÍTULO III

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y enfoque de investigación

Esta investigación es aplicada de tipo cuantitativa y deductiva.

De acuerdo al propósito de la investigación, es aplicada, porque se realiza y traza un proceso para afrontar y resolver un problema específico.

En función al tratamiento de los datos, se considera cuantitativa, porque los datos que se manejan a través de herramientas matemáticas, informáticas y estadísticas.

De acuerdo al tipo de inferencia, la investigación es deductiva, porque se desarrolla desde una idea general a un concepto específico.

Esta investigación es aplicada de tipo cuantitativa y deductiva.

Es de tipo descriptiva porque busca mostrar un evento natural y sus afectaciones: y es no experimental debido a que no se tiene control sobre las variables que influyen en el estudio.

3.2. Materiales

Para esta investigación se ha utilizado de manera principal el software IBER v2.4.3, y de manera secundaria pero indispensable, los siguientes softwares: ArcGIS Pro, HEC-HMS 4.8. Como equipo una laptop Legion Lenovo con un procesador Ryzen 5 y tarjeta de vídeo GTX 1660 TI.

3.3. Métodos y técnicas de investigación

Para este estudio se empleará el método de investigación analítico, puesto que se deberá determinar y procesar los factores necesarios para la modelación de acuerdo a los requerimientos del modelo.

Se desarrolló la investigación mediante el siguiente proceso:

- Estimación de parámetros
- Simulación del modelo, y observación.
- Evaluación de los resultados y análisis de los escenarios.

3.4.Operacionalización de variables

Variables independientes. Para la investigación se consideraron como variables independientes, los parámetros de la cuenca del área de estudio. Consiste en el conjunto de parámetros obtenidos y estimados, como el uso de suelos, la geometría, los datos geográficos, las lluvias y los caudales para los distintos periodos de retorno.

Variables dependientes. Se consideran variables dependientes a los resultados de las simulaciones computacionales efectuadas en IBER v2.4.3, en todos los puntos del área de estudio.

3.5.Recolección de información

Para el modelo es indispensable contar con datos de geometría, la rugosidad y el caudal que se simulará.

3.5.1. Geometría

IBER nos permite crear o importar la geometría, en este caso, la geometría se importará a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM). Los Sistemas de Información Geográfica (SIG), pueden representar objetos geográficos, como divisiones políticas, y superficies. Las superficies se suelen modelar con data sets ráster.

Un ráster es una matriz de celdas, denominas píxeles, y se organizan en filas y columnas, que cubren una superficie determinada. El modelo digital de elevación, en un mapa, no es representado en una matriz de celdas como un SIG. En lugar de eso, se ve una capa de variación de color, en distintas tonalidades, los softwares que procesan los DEMs distinguen las elevaciones de acuerdo a esa variación de color.

Existen diversas fuentes para la obtención del modelo de elevación digital, entre satélites y dispositivos: ASTER, ALOS PALSAR, STRM, LiDAR, GTOPO30, 3DEP; estas fuentes varían en cuanto a resolución, y en algunos casos es necesario hacer la compra de algunos modelos determinados.

Se ha previsto recurrir a uno de los recursos del satélite ALOS de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), ALOS PALSAR, con una resolución de 12,5 m × 12,5 m, por su accesibilidad y definición en relación a otras fuentes.

3.5.2. Rugosidad

En IBER, la rugosidad se asigna a través del coeficiente de rugosidad de Manning. Se puede realizar la asignación del coeficiente según los usos del suelo. Con la posibilidad de escoger el uso del suelo y asignarlo a las superficies que forman la geometría. Existen unos valores predeterminados asignados a cada uso del suelo, que pueden ser modificados. En este trabajo se utilizará un mapa de uso de suelo generado a partir de imágenes satelitales. (Bladé, E. 2014, p. 19).

3.5.3. Caudales

Para la estimación de caudales máximos, se utilizará el modelo de eventos, que simula un evento hidrológico concreto, tomando en cuenta la precipitación neta.

Es esencial para el estudio hidrológico, la determinación de las características físicas y morfológicas de la cuenca, para esta etapa se utilizará el software ArcGIS de acuerdo a los siguientes pasos.

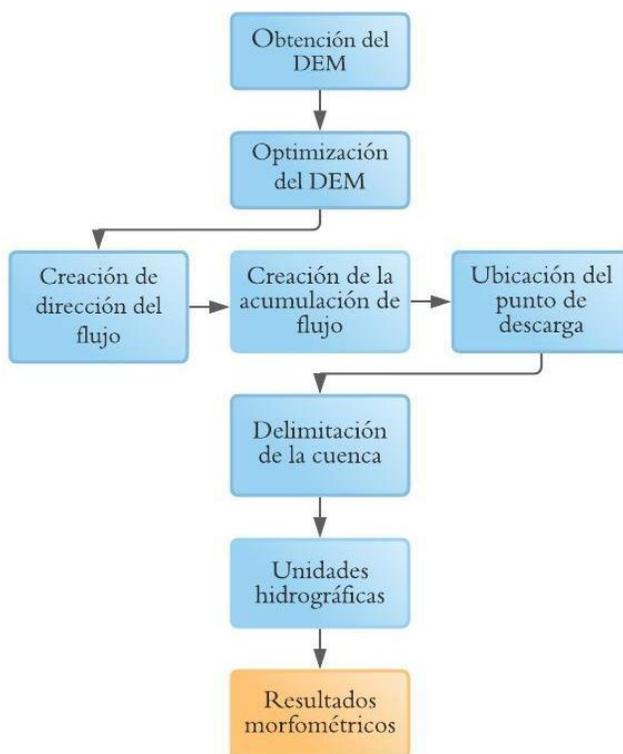


Figura 11. Esquema de pasos en ArcGIS para la obtención de las características morfométricas de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia.

Para generar los hidrogramas se empleará el software HEC-HMS. El HEC-HMS es un modelo de lluvia-escorrentía, se encuentra en descarga gratuita, de dominio público y fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EE.UU. Tiene una interfaz gráfica que facilita al usuario las labores de pre y post-proceso y la posibilidad de conectarse a un sistema de información geográfica como ArcGIS. El modelo HEC-HMS presenta un beneficio importante en relación a la información que se cuenta de las estaciones, se puede trabajar a partir de la precipitación neta diaria.

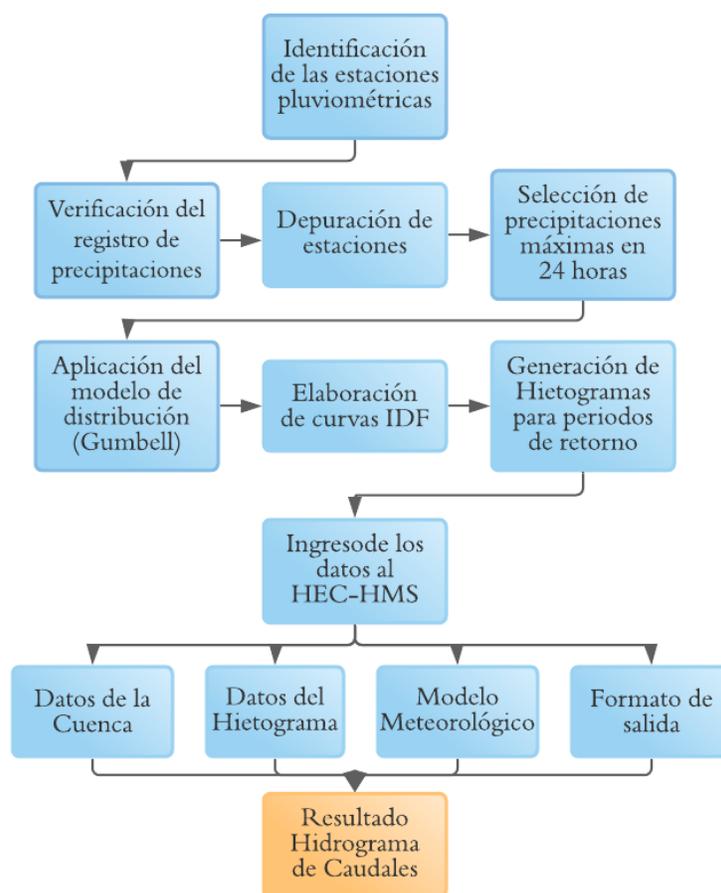


Figura 12. *Flujograma del proceso del HEC-HMS para la obtención de hidrogramas.*

Fuente: Elaboración propia.

Los datos de las estaciones serán obtenidos del SISMET, base de datos del SENAMHI, tomando en cuenta las estaciones que se encuentran dentro y en cercanía al área de la cuenca delimitada. Las estaciones seleccionadas se muestran en la Tabla 3, y se pueden observar en el mapa del Anexo A.

Tabla 3. Estaciones para la cuenca del río Cotagaita.

Estación	Departamento	Provincia	Municipio	Latitud (°)	Longitud (°)
Tica Tica	Potosí	Antonio Quijarro	Tomave	20,1833	66,0167
Ñoquejza	Potosí	Nor Chichas	Cotagaita	20,6667	65,6667
Ramadas	Potosí	Nor Chichas	Cotagaita	21,0833	65,6333
Cotagaita	Potosí	Nor Chichas	Cotagaita	20,823	65,6380
Salo	Potosí	Sud Chichas	Tupiza	21,2333	65,7667
Atocha	Potosí	Sud Chichas	Atocha	20,9300	66,2189
Kocani	Potosí	Nor Lípez	Colchaka	21,1828	66,5658

Fuente: SENAMHI (2020).

Para generar los hietogramas se utilizará el método del bloque alterno.

Los resultados del análisis serán validados con datos de las últimas crecidas registradas.

3.6. Periodo de retorno

Se consideró trabajar con tres periodos de retorno, de 5 y 50 años para objeto de comparación, y de 75 años como tiempo óptimo para un estudio de inundación, de acuerdo al estudio realizado por Juan Pablo Quijano Barón, denominado “Análisis técnico y económico para la determinación del periodo de retorno óptimo de diseño para mitigación de inundaciones mediante herramientas computacionales”, donde se comparan factores económicos y daños causados por las inundaciones, para encontrar el periodo de retorno óptimo.

3.7. Análisis e interpretación de los resultados

Una vez introducidos los datos al programa, y lanzado el cálculo, se tratará de validar el resultado con las crecidas más importantes registradas de los últimos años.

IBER permite visualizar la simulación de inundación de forma secuencial, y se puede exportar en un formato de vídeo, en cualquier instante de la simulación se puede analizar los factores del estudio.

Así mismo, identificados los sitios de mayor riesgo a la ciudad de Cotagaita, se propondrá la ubicación de obras de protección, las mismas que serán simuladas para garantizar que se impida el rebalse agua del lecho del río.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

4.1. Delimitación de la cuenca

Existen maneras de delimitar o delinear cuencas hidrográficas, cada una de ellas se utiliza de acuerdo del carácter ulterior o propósito que se desee alcanzar. Las maneras de delimitar van desde las realizadas manualmente, sobre un plano topográfico o directamente en pantalla, hasta las que se realizan digitalmente de forma semiautomática, con las herramientas SIG y con la información base geo-espacial.

Para la delimitación de la cuenca, se utilizó un Modelo Digital de Elevación (DEM) que es un Modelo Digital del Terreno cuyos datos almacenados representan valores de altitud. En la actualidad es posible caracterizar la superficie y, sobre todo, delimitar cuencas hidrográficas a partir de DEM's.

Estos modelos son simbólicos, establecen relaciones de correspondencia con el objeto real, mediante algoritmos matemáticos que son tratados mediante programas de Sistemas de Información Geográfica (Software SIG). Son estructuras de datos, no son sólo acumulaciones de cifras, sino que tienen una estructura interna con la cual deben interpretarse dichos datos.

En este proyecto se utilizó el software ArcGIS para la delimitación y la obtención de características físicas de la cuenca. El proceso de delimitación de unidades hidrográficas, se ha efectuado mediante dos subprocesos:

- Generación de áreas de drenaje (cuencas de captación) o Watersheds.
- Generación vectorial de unidades hidrográficas.

La generación de áreas de drenaje (cuencas de captación) o Watersheds consiste en determinar las áreas de drenaje, basado en la información de dirección y acumulación de flujo. Se emplea para generar unidades hidrográficas de diferente tamaño.

La generación Vectorial de Unidades Hidrográficas, consiste en convertir las unidades hidrográficas o Watersheds (ráster) obtenidos, al formato vectorial de tipo polígono. En algunos casos este proceso podría ser simple o directo, sin embargo, de acuerdo a la complejidad y cantidad de cuencas que se desee delimitar a la vez.

Luego de la edición lineal, se procederá a la reconversión al tipo polígono, quedando de esta forma listo para el análisis de características morfológicas.

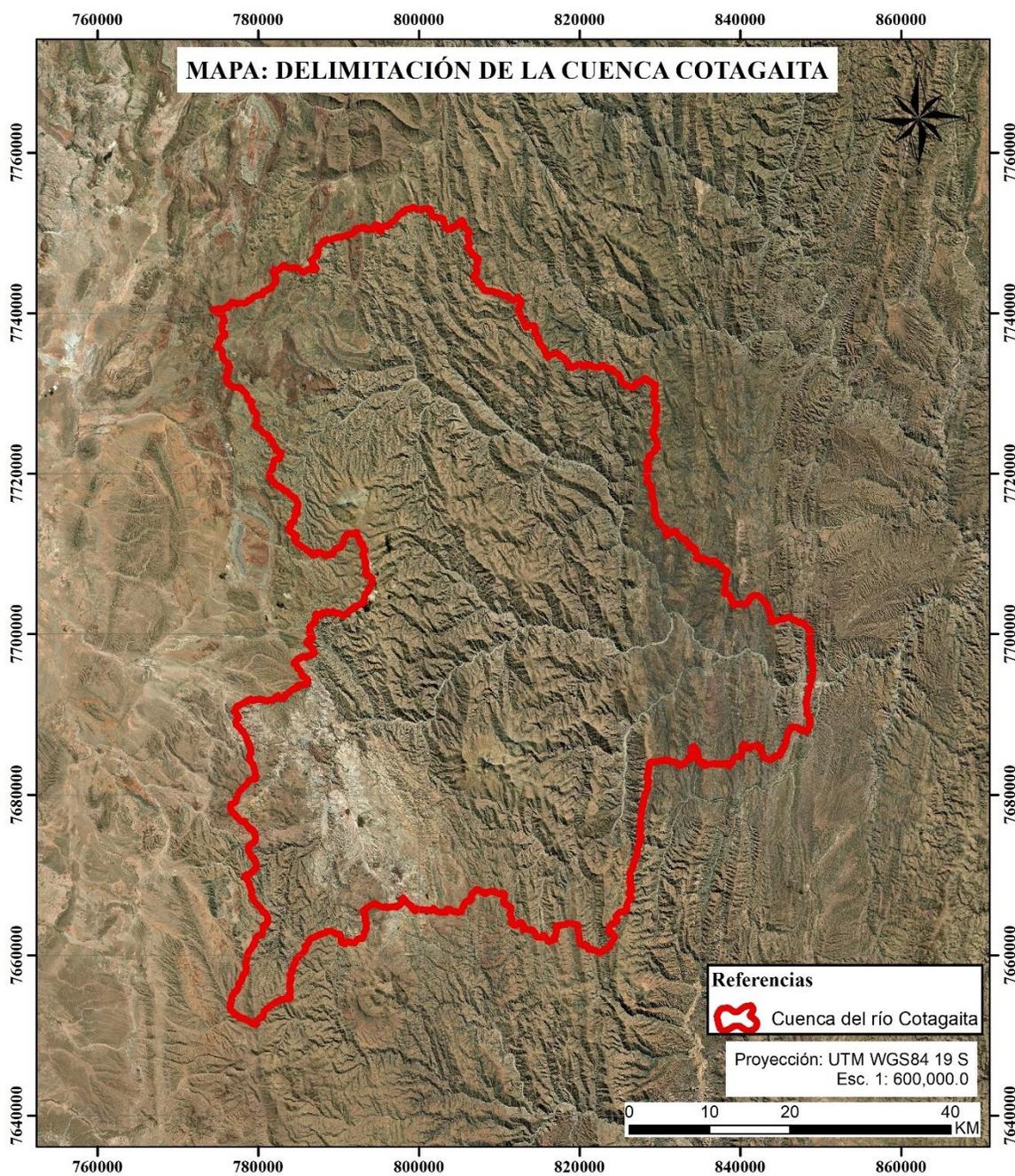


Figura 13. Mapa de la delimitación de la Cuenca de Cotagaita

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de precipitación se hizo una división de la cuenca, resultando con cinco subcuencas, las cuales también tendrán un estudio propio de sus características. (Anexo A).

4.2. Parámetros geomorfológicos de la cuenca del Río Cotagaita

4.2.1. Parámetro de forma

- a) Área de la cuenca

$$A_c = 4204,14 \text{ km}^2$$

Tabla 4. Clasificación de cuencas hidrográficas por su tamaño.

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
< 25	Muy pequeña
25 a 250	Pequeña
250 a 500	Intermedia - pequeña
500 a 2500	Intermedia - grande
2500 a 5000	Grande
> 5000	Muy Grande

Fuente: Campos Aranda (1992).

La cuenca del Río Cotagaita se caracteriza como intermedia – grande.

- b) Perímetro de la cuenca

$$P = 453,28 \text{ km}$$

- c) Longitud de la cuenca

La longitud del eje mayor de la cuenca, generalmente es paralelo a su cauce principal.

Para la determinación de la longitud de la cuenca, se utilizó el programa ArcGIS.

$$L = 104,36 \text{ km}$$

- a) Ancho promedio

$$B = \frac{A_c}{L_c}$$

Donde:

A_c : Área de la cuenca, en km².

L_c : Longitud de la cuenca, en km.

$$B = \frac{4204,14 \text{ km}^2}{104,36 \text{ km}} = 40,28 \text{ km}$$

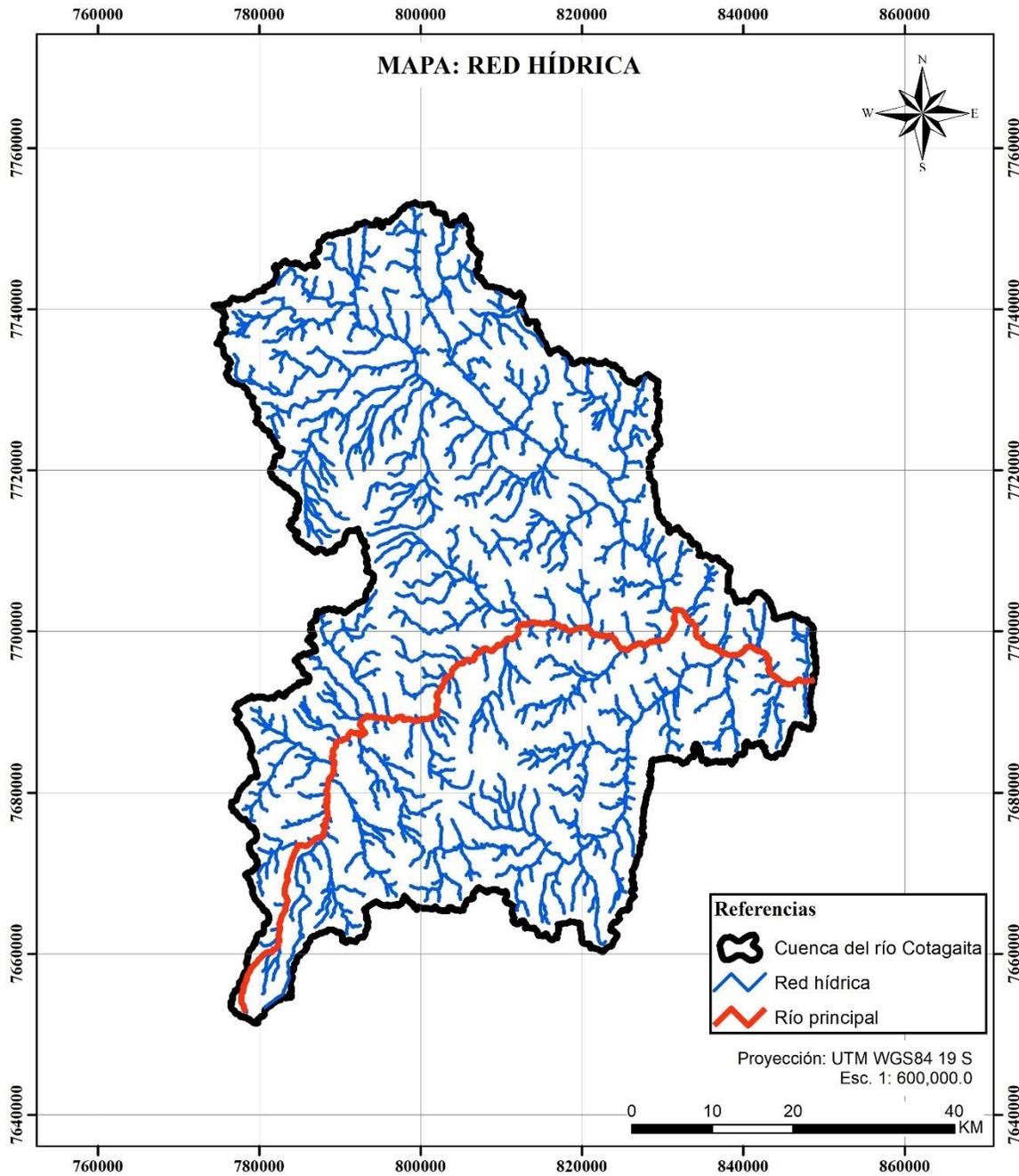


Figura 14. Mapa Red Hídrica de Cotagaita.

Fuente: Elaboración propia.

b) Factor de forma

$$Ff = \frac{Ac}{Lc^2}$$

Donde:

Ac: Área de la cuenca, en km².

Lc: Longitud de la cuenca, en km.

Ff: Factor de forma.

$$Ff = \frac{4204,14 \text{ km}^2}{(104,36 \text{ km})^2} = 0,39 \text{ km}$$

Tabla 5. Clasificación a partir del factor de forma.

Rangos	Forma de la Cuenca
> 0,22	Muy alargada
0,22 – 0,30	Alargada
0,30 – 0,37	Ligeramente alargada
0,37 – 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 – 0,60	Ligeramente ensanchada
0,6 – 0,80	Ensanchada
0,80 – 1,20	Muy ensanchada
> 1,20	Rodeando el desagüe

Fuente: Gaspari (2012).

De acuerdo al factor de forma, la cuenca presenta una forma ni alargada ni ensanchada lo cual nos indica que no es propensa a presentar crecidas súbitas.

c) Coeficiente de Gravelius – Índice de forma

$$I_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

Ac: Área de la cuenca, en km².

P: Perímetro de la cuenca, en km.

$$I_c = 0,28 \frac{453,28 \text{ km}}{\sqrt{4204,14 \text{ km}^2}}$$

$$I_c = 1,96$$

Tabla 6. Valores interpretativos del Índice de forma.

Rangos	Compacidad de la Cuenca
1,00-1,25	Redonda
1,26 a 1,50	Ovalada
1,51 a 1,75	Oblonga a rectangular

Fuente: Gaspari (2012).

La cuenca tiene una compacidad de tipo oblonga o rectangular, lo que se interpreta como una cuenca con tiempo de concentración alto y drenaje lento.

d) Relación de elongación

El cálculo de la razón o relación de elongación (Re) es de gran interés ya que se relaciona con la forma de la cuenca. Se determina como la razón entre el diámetro de un círculo que posee la misma área que la cuenca y la longitud del cauce principal que la drena (Sala y Gay, pág. 41-65. 1981).

$$Re = 1,1284 \frac{\sqrt{A}}{L_c}$$

Ac: Área de la cuenca, en km².

Lc: Longitud de la cuenca, en km.

$$Re = 1,1284 \frac{\sqrt{4204,14 \text{ km}^2}}{104,36 \text{ km}}$$

$$Re = 0,701$$

e) Rectángulo equivalente o rectángulo de Gravelius

El rectángulo equivalente es una transformación geométrica que permite representar una cuenca con la forma de un rectángulo (Villón, 2004). El rectángulo debe tener la misma área y perímetro que la cuenca.

$$L = \frac{Ic * \sqrt{Ac}}{1,128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{Ic} \right)^2} \right)$$

$$l = \frac{Ic * \sqrt{Ac}}{1,128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{Ic} \right)^2} \right)$$

Donde:

L: Lado mayor del triángulo equivalente, en km.

l: Lado del rectángulo equivalente, en km.

Ic: Índice de Gravelius, adimensional.

A: Área de la cuenca en km².

$$L = \frac{1,96 * \sqrt{4204,14 \text{ km}^2}}{1,128} \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{1,96} \right)^2} \right)$$

$$L = 204,47 \text{ km}$$

$$l = \frac{1,96 * \sqrt{4204,14 \text{ km}^2}}{1,128} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{1,96} \right)^2} \right)$$

$$l = 20,56 \text{ km}$$

4.2.2. *Parámetros de relieve*

- a) Pendiente media de la cuenca
- Método del rectángulo equivalente

$$S = \frac{H}{L}$$

Donde:

H: Desnivel total entre el punto más alto de la cuenca y el punto de aforo, en metros.

L: Lado mayor de rectángulo equivalente, en metros.

Elevaciones:

Cota mayor = 5563 msnm

Cota menor = 2671 msnm

$$S = \frac{5563 \text{ m} - 2671 \text{ m}}{204469,57 \text{ m}}$$

$$S = 0,014 \text{ m/m}$$

$$S = 1,41 \%$$

Las áreas de las elevaciones se obtuvieron a partir de un ráster de la cuenca procesado en el software ArcGIS.

Tabla 7. *Pendientes de la cuenca.*

Pendiente (%)	Clase	Área (km²)	Área (%)
0-10	Plano	367,42	8,74
10-20	Mod. Inclinado	504,45	12,00
20-30	Inclinado	631,10	15,01
30-45	Mod. Empinado	1043,44	24,82
>45	Fuerte Empinado	1657,73	39,43
Total		4204,14	100

Fuente: Campos Aranda (1992)

Pendiente media de la cuenca es:

$$S = 39,15 \%$$

La cuenca presenta una pendiente moderadamente empinada.

b) Curva hipsométrica, cálculo de altitud media

Esta curva nos permite conocer la distribución de masa en la cuenca desde arriba hacia abajo. Se obtiene colocando en las ordenadas los valores de las diferentes alturas de la cuenca y, en las abscisas, los valores de área que se encuentran por encima de las alturas correspondientes, referidos al área total de la cuenca. De esta forma se utilizan valores porcentuales, lo que hace posible comparar curvas de diferentes cuencas. (Racca, J. M. G. 2007, p. 32).

Utilizando el programa ArcGIS, generamos un mapa, con las elevaciones de la cuenca, las cuales utilizamos para realizar la curva hipsométrica. Se encuentra en el Anexo B.

Tabla 8. *Tabla de curva hipsométrica.*

Nº	Altitud (msnm)	Áreas Parciales (km ²)	Áreas Acumuladas (km ²)	Áreas que quedan sobre las altitudes (km ²)	% del total	% del total quedan sobre las altitudes
1	2671	0,00	0,00	4204,13	0,00	100,00
2	2700	2,81	2,81	4201,32	0,07	99,93
3	2800	22,62	25,43	4178,71	0,54	99,40
4	2900	38,33	63,76	4140,38	0,91	98,48
5	3000	56,89	120,64	4083,49	1,35	97,13
6	3100	71,27	191,91	4012,23	1,70	95,44
7	3200	92,53	284,44	3919,70	2,20	93,23
8	3300	115,16	399,59	3804,54	2,74	90,50
9	3400	138,64	538,23	3665,90	3,30	87,20
10	3500	171,02	709,26	3494,88	4,07	83,13
11	3600	210,91	920,16	3283,97	5,02	78,11
12	3700	286,51	1206,68	2997,46	6,82	71,30
13	3800	434,17	1640,85	2563,29	10,33	60,97
14	3900	555,54	2196,39	2007,74	13,21	47,76
15	4000	551,42	2747,81	1456,32	13,12	34,64
16	4100	527,35	3275,16	928,98	12,54	22,10
17	4200	371,86	3647,02	557,11	8,85	13,25
18	4300	236,07	3883,08	321,05	5,62	7,64
19	4400	149,37	4032,45	171,68	3,55	4,08
20	4500	77,32	4109,77	94,36	1,84	2,24
21	4600	39,19	4148,96	55,17	0,93	1,31
22	4700	23,78	4172,74	31,40	0,57	0,75
23	4800	15,29	4188,02	16,11	0,36	0,38
24	4900	8,21	4196,23	7,90	0,20	0,19
25	5000	4,31	4200,55	3,59	0,10	0,09
26	5100	1,89	4202,43	1,70	0,04	0,04
27	5200	0,70	4203,14	0,99	0,02	0,02
28	5300	0,43	4203,57	0,56	0,01	0,01
29	5400	0,33	4203,90	0,24	0,01	0,01
30	5500	0,18	4204,08	0,05	0,00	0,00
30	5563	0,05	4204,13	0,00	0,00	0,00
Total		4204,13			100,000	

Fuente: Elaboración propia.

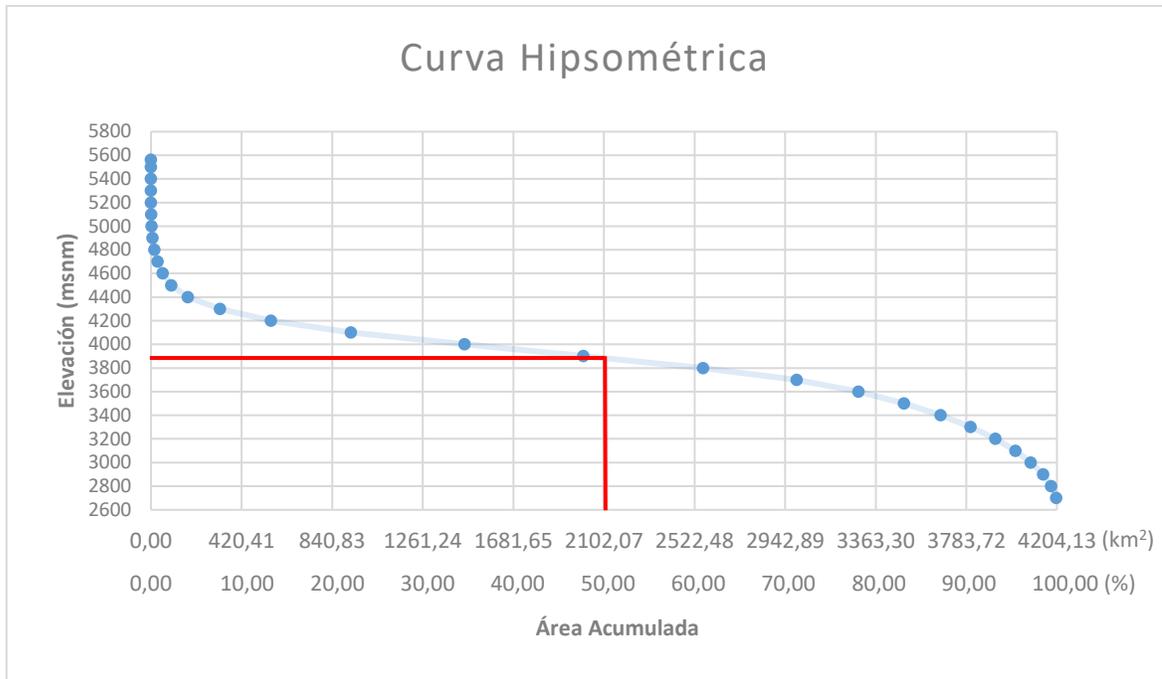
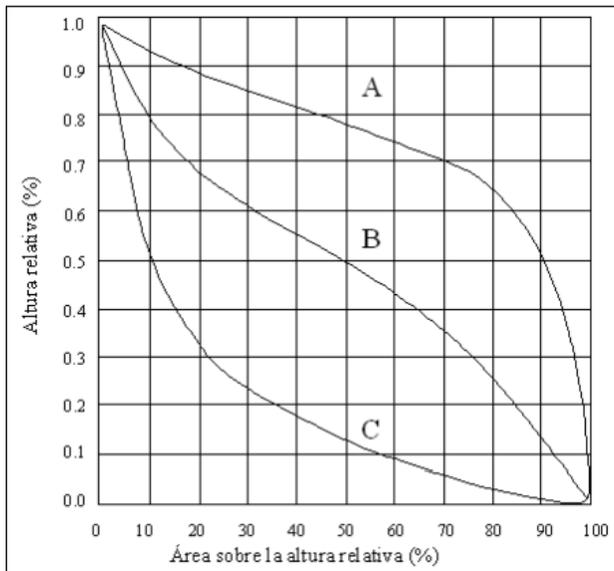


Figura 15. Curva hipsométrica.

Fuente: Elaboración propia.

La elevación media de la cuenca al 50% de área acumulada es de 3850 msnm.



Curva A: Refleja una Cuenca con gran potencial erosivo (fase de juventud).

Curva B: Es una cuenca en equilibrio (fase de madurez).

Curva C: Es una cuenca sedimentaria (fase de vejez).

Figura 16. Curvas Hipsométricas características del ciclo de erosión

Fuente: Strahler (1952).

La cuenca de estudio se encuentra en fase de desequilibrio (juventud), lo que representa que es una cuenca en equilibrio.

- c) Pendiente promedio del cauce principal
 - Normal

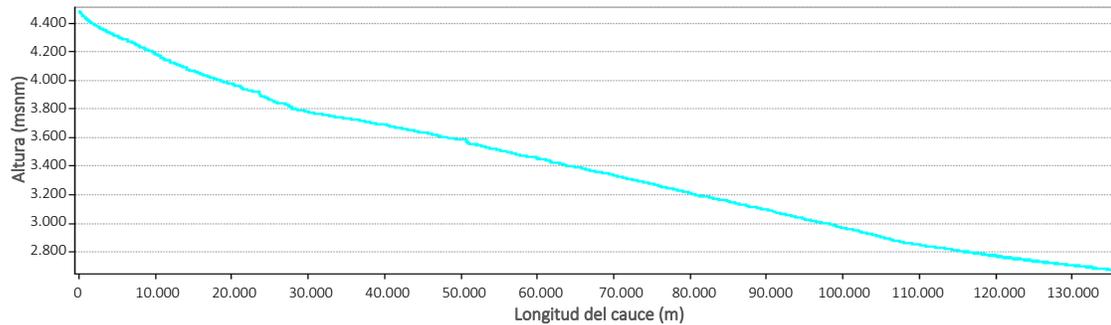


Figura 17. Perfil del río principal.

Fuente: Elaboración propia.

$$S = \frac{H}{L}$$

Donde:

H: Desnivel entre el punto más alto de la cuenca y punto de aforo, en metros.

L: Longitud del cauce principal, en metros.

Elevaciones:

Cota mayor = 5563 msnm

Cota menor = 2671 msnm

L = 135691,34 m

$$S = \frac{5563 \text{ m} - 2671 \text{ m}}{135691,34 \text{ m}}$$

$$S = 0,021 \text{ m/m}$$

$$S = 2,13\%$$

4.2.3. Sistema de drenaje

- a) Red Hídrica

El sistema de drenaje está constituido por un cauce principal y sus cauces tributarios. Mientras más largo sea el cauce de agua principal, más ramificaciones tendrá la red de drenaje.

b) Orden de los afluentes

La clasificación de arroyos es un método que asigna un orden numérico a los vínculos en una red de arroyos. Este orden es un método para identificar y clasificar los tipos de arroyos basado en la cantidad de afluentes.

Se empleó el método Strahler, en el cual la clasificación de arroyos aumenta cuando los arroyos del mismo orden intersecan. Por lo tanto, la intersección de dos vínculos de primer orden creará un vínculo de segundo orden, la intersección de dos vínculos de segundo orden creará un vínculo de tercer orden, y así sucesivamente. Sin embargo, la intersección de dos vínculos de distintos órdenes no aumentará el orden.

Se determinó el orden, identificando los afluentes con el software ArcGIS, estos se pueden observar en el mapa de orden de afluentes en el Anexo C. La cuenca del río Cotagaita se clasifica en orden 6.

c) Razón de bifurcación

Del orden de los afluentes se obtuvieron los siguientes datos de los diferentes tributarios.

$$Rb = \frac{N_n}{N_{n+1}}$$

Donde:

Rb: Razón de bifurcación.

N_n = Número de cauces de un orden dado.

N_{n+1} = Número de cauces del orden inmediatamente superior.

Tabla 9. Longitud y número de afluentes de acuerdo a su orden.

	Orden 1	Orden 2	Orden 3	Orden 4	Orden 5	Orden 6
Long. (km)	1323,6	1409,89	591,27	248,52	213,67	54,19
Nº afluentes	713	406	203	97	85	27
Rb	1,76	2,00	2,09	1,14	3,15	-

Fuente: Elaboración propia.

Valores muy altos de esta relación, está determinado a terrenos escarpados, los suelos son muy erosionables. Además, estas cuencas presentan una amplia red hidrográfica con muchos cauces tributarios con rápida respuesta a la precipitación (Aparicio, 1996, p. 22).

d) Densidad de drenaje

$$D = \frac{\sum L}{A_c}$$

Donde:

$\sum L$: Sumatoria de los cauces principales y secundarios, en metros.

A_c : Área total de la cuenca, en km^2 .

$\sum L = 3841.20 \text{ km}$.

$A_c = 4204.14 \text{ km}^2$.

$$D = \frac{3841,20 \text{ km}}{4204,14 \text{ km}^2} = 0,91 \text{ km}/\text{km}^2$$

La densidad de drenaje es baja. Finalmente se destaca que, en la medida que los parámetros asociados al sistema de drenaje de la cuenca hidrográfica son de menor magnitud, se espera que el Tiempo de Concentración tienda a ser mayor con en relación a la capacidad de producción de caudal superficial por parte de la cuenca.

4.2.4. Tiempo de concentración

En hidrología el tiempo de concentración (T_c) representa el tiempo de viaje de una gota de lluvia que cae en el punto hidráulicamente más alejado de la cuenca y escurre superficialmente hasta su salida, es decir, el tiempo a partir del cual toda la cuenca contribuye al caudal en el punto de salida de la cuenca.

Por lo tanto, suponiendo una lluvia de intensidad constante, el T_c es el tiempo de equilibrio o duración necesaria, para que se alcance el caudal máximo. Si se analizan hidrogramas u hietogramas el T_c se define, alternativamente, como el tiempo desde el baricentro y también desde el final de la lluvia neta hasta el final de la esorrentía directa, la diferencia entre ambas es mínima para tormentas de corta duración (Hotchkiss y Mc Callum, 1995, p. 36).

a) Kirpich

$$T_c = 0,06626 \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0,385}$$

b) Témez

$$T_c = 0,126 \left(\frac{L}{S^{0,35}} \right)^{0,75}$$

c) Pizarro

$$T_c = 13,548 \left(\frac{L^2}{H} \right)^{0,77}$$

d) Bransby-Williams

$$T_c = 14,6 * L * A^{-0,1} * S^{-0,2}$$

e) Ven Te Chow

$$T_c = 0,213 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,64}$$

Donde:

T_c: Tiempo de concentración (h).

L: Longitud del cauce principal (km).

S: Pendiente del curso principal (m/m).

A: Área de drenaje (área de la cuenca, en km²).

H: Diferencia de cotas entre el punto más alto y el de estudio (m).

Para la obtención del tiempo de concentración utilizamos tres métodos que son los que se encontraban en un rango aproximado, estos son el método Kirpich, Témez y Ven Te Chow, calculamos cada uno de ellos para cada subcuenca del área de estudio y promediamos los valores obtenidos.

Tabla 10. *Resumen de tiempos de concentración y parámetros de cálculo.*

Subcuenca N°	1	2	3	4	5
Área (km²)	212,18	69,87	688,28	1732,26	1501,55
Long, Cauce principal (km)	30,11	16,71	74,13	95,65	108,62
Cota mayor (msnm)	4041	4194	5560	5203	5563
Cota menor (msnm)	2671	2778	2778	2861	2861
Desnivel (m)	1370	1416	2782	2342	2702
Pendiente (m/m)	0,05	0,08	0,04	0,02	0,02
Kirpich (h)	3,00	1,50	6,46	9,26	10,15
Témez (h)	3,64	1,99	7,54	10,20	11,18
Ven Te Chow (h)	5,06	2,85	9,58	12,93	13,95
Tc promedio (h)	3,90	2,11	7,86	10,80	11,76

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Número de curva y datos de tormenta

Para encontrar el número de curva se utilizó la información del mapa de uso de suelos y los grupos hidrológicos. Los valores de número de curva encontrados corresponden a las condiciones de humedad previa II (normal), que se denominan como CN(II).

Tabla 11. *Número de curva ponderado.*

Uso de Suelo	Grupo Hidrológico	CN	Área (km²)
Agricultura Múltiple	B	72	0,777
Agricultura Múltiple	D	85	2,490
Bosque o Monte Ralo Andino Subpuna Semiárida	B	55	0,485
Bosque o Monte Ralo Andino Subpuna Semiárida	C	70	0,001
Bosque o Monte Ralo Andino Subpuna Semiárida	D	77	1,228
Cuerpos y cursos de agua	B	100	0,066
Humedales, herbazales	B	59	0,001

Matorral, Subpuna Semiárida	B	48	48,941
Matorral, Subpuna Semiárida	C	65	0,798
Matorral, Subpuna Semiárida	D	73	130,904
Vegetación Dispersa Vivaz en arenales Puna semiárida	B	59	559,443
Vegetación Dispersa Vivaz en pedregales Puna Altoandina semiárida	C	75	1983,377
Pradera, pasto continuo	B	35	384,090
Pradera, pasto, continuo	C	70	0,337
Pradera, Pasto continuo	D	79	1083,630
Zona Poblada	B	84	0,927
Zona Poblada	D	92	3,588
CN ponderado			69,894

Fuente: Elaboración propia,

En la Tabla 11, se muestra como resultado el CN(II) ponderado para la cuenca, el mapa de número de curva se encuentra en el Anexo E; para objeto del estudio hidrológico, calculamos los números de curva para las subcuencas que, a su vez, nos permitirán estimar otros parámetros que son necesarios en la modelación de tormentas dentro del HEC-HMS.

Determinación del Número de Curva para condiciones de humedad previa II (normal), para las subcuencas.

Tabla 12. *Número de curva para de las sub cuencas CN(II).*

Sub Cuenca	CN
Sub Cuenca 1	60,31
Sub Cuenca 2	70,91
Sub Cuenca 3	67,01
Sub Cuenca 4	73,45
Sub Cuenca 5	68,45

Fuente: Elaboración propia.

Con estos datos calculamos la abstracción inicial, la retención potencial de humedad del suelo y el tiempo de retardo que nos servirán para el diseño de tormenta.

CN(I): Número de curva para condiciones de Humedad previa I (seco).

$$CN (I) = \frac{4,2 * CN(II)}{10 - 0,058 * CN(II)}$$

CN(III): Número de curva para condiciones de humedad previa III (húmedo).

$$CN (III) = \frac{23 * CN(II)}{10 + 0,13 * CN(II)}$$

S: Retención potencial de humedad del suelo, se calcula con la siguiente expresión.

$$S = \frac{25400}{CN(II)} - 254$$

Ia: La abstracción inicial es una fracción de la retención potencial máxima y se la puede determinar cómo:

$$Ia = 0,2 * S$$

Tr: Tiempo de retardo, es el tiempo entre la mitad de la duración de lluvia efectiva y el tiempo al pico.

$$Tr = 0,6 * Tc$$

Tabla 13. Datos de número curva, retención potencial máxima, abstracción potencial y tiempo de retardo para las subcuencas del proyecto.

Subcuenca N°	1	2	3	4	5
CN (II)	60,31	70,91	67,01	73,65	68,45
CN (I)	38,95	50,59	46,04	54,00	47,68
CN (III)	77,75	84,87	82,37	86,54	83,30
S (normal) (mm)	167,18	104,18	125,05	90,86	117,08
S (seca) (mm)	398,04	248,05	297,74	216,33	278,76

S (húmeda) (mm)	72,69	45,30	54,37	39,50	50,90
Ia (normal) (mm)	33,44	20,84	25,01	18,17	23,42
Ia (seca) (mm)	79,61	49,61	59,55	43,27	55,75
Ia (húmeda) (mm)	14,54	9,06	10,87	7,90	10,18
Tc (min)	234,02	126,68	471,47	647,87	705,72
Tiempo de retardo (h)	2,34	1,27	4,71	6,48	7,06
Tiempo de retardo (min)	140,41	76,01	282,88	388,72	423,43
Duración de la tormenta (h)	3,83	2,17	7,83	11,00	11,67
Duración de la tormenta (min)	230,00	130,00	470,00	660,00	700,00

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Análisis de consistencia

Al trabajar con estaciones hidrológicas, es necesario corroborar las estaciones, para trabajar los datos con confianza, por lo tanto, se debe realizar un estudio de consistencia de las estaciones con las que se va a trabajar a lo largo del desarrollo del estudio hidrológico.

4.4.1. Análisis doble masa

Con este método se analiza la consistencia de la serie de valores de algún elemento hidrometeorológico medido en la estación "X", con base en los datos tomados en otra estación o grupo de estaciones "Y".

Este sistema de homogenización de series, se utiliza cuando puede suceder un cambio relativo en la variable observada, medida o registrada en una estación meteorológica. Graficando las dos variables observamos si se presenta un cambio de pendiente, el cual solo puede deberse a causas diferentes a las meteorológicas.

En caso de presentarse cambio de pendiente es necesario reestablecer la homogeneidad bajo las condiciones del tramo más confiable, generalmente es el primero, o sea el correspondiente al último período y realizar el ajuste con base en la relación de las pendientes de los dos segmentos de la curva de dobles masas. (Montealegre, B. J. E. 1990, p. 12).

4.4.2. Resumen de los análisis de consistencia

El proceso del análisis, se encuentra en el Anexo F.

Tabla 14. Resumen de resultados análisis de consistencia.

Resultados Análisis de Consistencia.		
Estación	R²	Resultado
Atocha	0,9898	Consistente
Cotagaita	0,9971	Consistente
Ramadas Potosí	0,9933	Consistente
Ñoquejza	0,9955	Consistente
Salo	0,9739	Consistente
Tica Tica	0,9942	Consistente
Kocani	no tiene registro	inconsistente

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Análisis de homogeneidad

4.5.1. Test de Mann-Kendall

La prueba de homogeneidad de Mann-Kendall es un test no paramétrico, tiene un hipótesis nula y fácil de satisfacer. Este test detecta forma de tendencia, ya sean lineales o en forma de saltos, siempre que den una tendencia global, este test no es adecuado para series que presentan un componente estacional.

La prueba consiste en calcular un índice de desviación “S” de la serie, y a partir de este valor se calcula el valor de “V” luego se elige un nivel de significancia α o valor de confiabilidad en función al cual se definirá la condición de homogeneidad. Este índice se relaciona con un valor de “V_{crit}” a través de la función de distribución normal, se compara “V” y “V_{crit}”; si V es menor que “V_{crit}” se acepta la hipótesis nula, es decir que la serie es homogénea con un nivel de significancia de $\alpha\%$, de lo contrario se asume la hipótesis alternativa.

4.5.2. Análisis de las estaciones

Para el desarrollo seguimos los siguientes pasos:

- 1) Se listan los valores de las variables (precipitaciones máximas anuales), de forma ordenada (x_1, x_2, \dots, x_n).
- 2) Se obtiene el signo de la diferencia de cada par de valores al comparar sus magnitudes ($x_j - x_k$) con ($j > k$) de acuerdo con lo siguiente.

3) Obtención del estadístico S de Mann Kendall, mediante la ecuación:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{si } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{si } (x_j - x_k) < 0 \end{cases}$$

Donde:

n = Tamaño de muestra.

x_j y x_k = Datos secuenciales.

Tabla 15. *Precipitaciones máximas e índice de desviación Atocha.*

ATOCHA							
n	P _{max} (mm)	S _i	t _i	n	P _{max} (mm)	S _i	t _i
1	20,50	18	5	13	65,98	0	11
2	15,50	21	0	14	50,50	1	9
3	19,50	19	2	15	16,50	9	0
4	28,67	12	8	16	62,34	0	8
5	41,86	4	15	17	35,50	0	7
6	22,18	14	4	18	30,60	0	6
7	31,28	5	12	19	30,50	0	5
8	22,75	12	4	20	28,70	0	4
9	29,80	8	7	21	23,32	1	2
10	46,50	3	11	22	20,70	1	1
11	15,50	13	0	23	25,03	0	1
12	30,50	5	6	24	20,48	n-1	

Fuente: Elaboración propia.

$$I = \sum_{i=1}^{i=n-1} t_i = 128$$

$$T = \sum_{i=1}^{i=n-1} S_i = 146$$

$$n = 24$$

$$S = T - I = 18$$

$$V = \frac{S - 1}{\sqrt{\frac{n * (n - 1) * (2 * n + 5)}{18}}} = 0,4217$$

Tabla 16. Valores de varianza crítica para diferentes niveles de significancia.

V_{crit} para diferentes niveles de significancia:					
α	0,0058	0,01	0,025	0,05	0,1
V_{crit}	2,58	2,33	1,96	1,64	0,128

Fuente: Spiegel, M. y Stephens, R. (2009).

Se escoge un nivel de significancia de 5%. Se tiene que V_{crit} se encuentra entre 1,64 y -1,64.

Teniendo que:

$$V = 0,4217$$

Entonces la hipótesis es Válida, por lo tanto, los datos son homogéneos.

4.5.3. Resumen de resultados test de Mann Kendall

El test de Mann Kendall para las demás estaciones, se encuentra en el Anexo G.

Tabla 17. Resumen del análisis de homogeneidad.

Resultados Análisis de Homogeneidad			
Estación	V	V_{crit}	Test
Atocha	0.422	1,64	Homogénea
Cotagaita	0	1,64	Homogénea
Ramadas Potosí	0,434	1,64	Homogénea
Ñoquajza	1,341	1,64	Homogénea
Salo	-1,113	1,64	Homogénea
Tica Tica	-1,581	1,64	Homogénea
Kocani	(No cuenta con datos suficientes)		No homogénea

Fuente: Elaboración propia.

4.6. Determinación de curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia

Para la determinación de las curvas de Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF), se utilizó la metodología de Crobe o Dyck, para esto se utilizó el software Hidroesta 2, del Ing. Máximo Villón.

4.6.1. Estación Atocha

a) Recopilación de información de precipitaciones máximas en 24 horas

Tabla 18. *Precipitaciones anuales máximas en 24 horas, estación Atocha.*

Año	P _{máx 24 h.} (mm)	Año	P _{máx 24 h.} (mm)
1996-1997	20,50	2008-2009	65,98
1997-1998	15,50	2009-2010	50,50
1998-1999	19,50	2010-2011	16,50
1999-2000	28,67	2011-2012	62,34
2000-2001	41,86	2012-2013	35,50
2001-2002	22,18	2013-2014	30,60
2002-2003	31,28	2014-2015	30,50
2003-2004	22,75	2015-2016	28,70
2004-2005	29,80	2016-2017	23,32
2005-2006	46,50	2017-2018	20,70
2006-2007	15,50	2018-2019	25,03
2007-2008	30,50	2019-2020	20,48

Fuente: Elaborado a partir de registro del SENAMHI (2020).

$$K = 176,109$$

$$a = 0,4734$$

$$b = 0,750$$

Llegando así a la ecuación de intensidad

$$I_{\max} = \frac{176,1088 * T^{0,4734}}{D^{0,750}}$$

b) Generación de Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF)

Tabla 19. Intensidad y duración de lluvias, estación Atocha.

Duración (min)	Período de Retorno en años				
	5	20	50	100	500
5	112,84	217,50	335,62	465,97	998,27
10	67,09	129,33	199,56	277,06	593,57
20	39,89	76,90	118,66	164,74	352,94
30	29,43	56,73	87,55	121,55	260,39
40	23,72	45,72	70,56	97,96	209,86
50	20,07	38,68	59,68	82,86	177,52
60	17,50	33,73	52,05	72,27	154,83
70	15,59	30,05	46,37	64,38	137,93
80	14,10	27,19	41,95	58,25	124,78
90	12,91	24,89	38,41	53,32	114,23
100	11,93	23,00	35,49	49,27	105,55
110	11,11	21,41	33,04	45,87	98,27
120	10,41	20,06	30,95	42,97	92,06

Fuente: Elaboración propia.

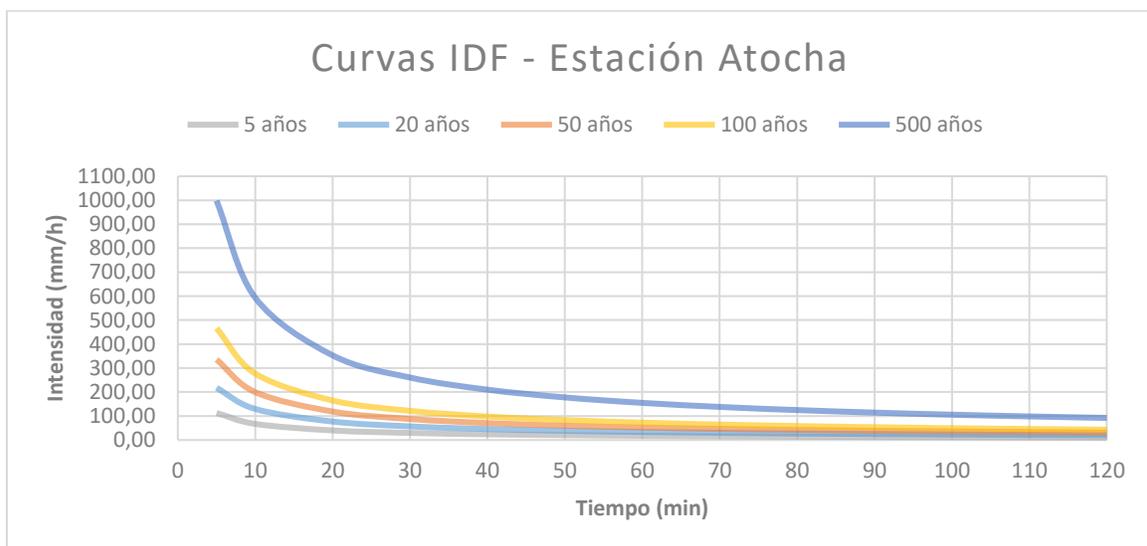


Figura 18. Curvas IDF, estación Atocha.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.2. Estación Cotagaita

a) Recopilación de información de precipitaciones máximas en 24 horas

Tabla 20. *Precipitaciones anuales máximas en 24 horas, estación Cotagaita.*

Año	P_{máx} 24 h. (mm)	Año	P_{máx} 24 h. (mm)
1974-1975	30,0	1980-1981	21,2
1975-1976	15,9	1981-1982	19,2
1976-1977	20,4	1982-1983	16,2
1977-1978	35,5	1983-1984	23,2
1978-1979	60,1	1984-1985	46,8
1979-1980	29,9		

Fuente: Elaborado a partir de registro del SENAMHI (2020).

$$K = 154,780$$

$$a = 0,5707$$

$$b = 0,750$$

Llegando así a la ecuación de intensidad
$$I_{max} = \frac{154,7801 * T^{0,5707}}{D^{0,750}}$$

b) Generación de Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF)

Tabla 21. *Intensidad y duración de lluvias, estación Cotagaita.*

Duración (min)	Período de Retorno en años				
	5	20	50	100	500
5	115,98	255,85	431,61	641,04	1606,16
10	68,96	152,13	256,64	381,17	955,03
20	41,01	90,46	152,60	226,64	567,86
30	30,25	66,74	112,58	167,21	418,96
40	24,38	53,79	90,73	134,76	337,65
50	20,62	45,50	76,75	114,00	285,62
60	17,99	39,68	66,94	99,43	249,12
70	16,02	35,35	59,63	88,57	221,92
80	14,50	31,98	53,95	80,13	200,77
90	13,27	29,28	49,39	73,36	183,80
100	12,26	27,05	45,64	67,78	169,83
110	11,42	25,19	42,49	63,11	158,11
120	10,70	23,60	39,80	59,12	148,13

Fuente: Elaboración propia.

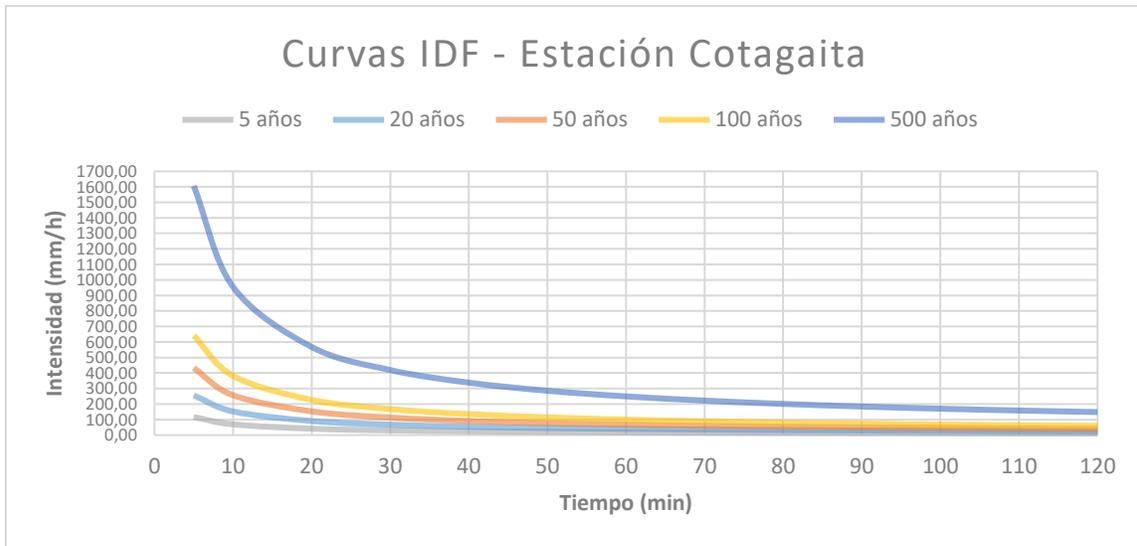


Figura 19. Curvas IDF, estación Cotagaita.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.3. Estación Ñoquejza

- a) Recopilación de información de precipitaciones máximas en 24 horas

Tabla 22. Precipitaciones anuales máximas en 24 horas, estación Ñoquejza.

Año	P _{máx 24 h.} (mm)	Año	P _{máx 24 h.} (mm)
2010-2011	26,0	2015-2016	36,1
2011-2012	20,0	2016-2017	30,2
2012-2013	28,0	2017-2018	40,2
2013-2014	30,0	2018-2019	40,1
2014-2015	40,2	2019-2020	23,0

Fuente: Elaborado a partir de registro del SENAMHI (2020).

$$K = 228,585$$

$$a = 0,2974$$

$$b = 0,750$$

Llegando así a la ecuación de intensidad

$$I_{max} = \frac{228,585 \cdot T^{0,2974}}{D^{0,750}}$$

b) Generación de Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF)

Tabla 23. Intensidad y duración de lluvias, estación Ñoquejza.

Duración (min)	Período de Retorno en años				
	5	20	50	100	500
5	110,33	166,63	218,82	268,92	434,00
10	65,60	99,08	130,11	159,90	258,06
20	39,01	58,91	77,37	95,08	153,44
30	28,78	43,46	57,08	70,15	113,21
40	23,19	35,03	46,00	56,53	91,24
50	19,62	29,63	38,91	47,82	77,18
60	17,11	25,84	33,94	41,71	67,31
70	15,24	23,02	30,23	37,16	59,97
80	13,79	20,83	27,35	33,61	54,25
90	12,63	19,07	25,04	30,77	49,66
100	11,67	17,62	23,14	28,43	45,89
110	10,86	16,40	21,54	26,47	42,72
120	10,18	15,37	20,18	24,80	40,03

Fuente: Elaboración propia.

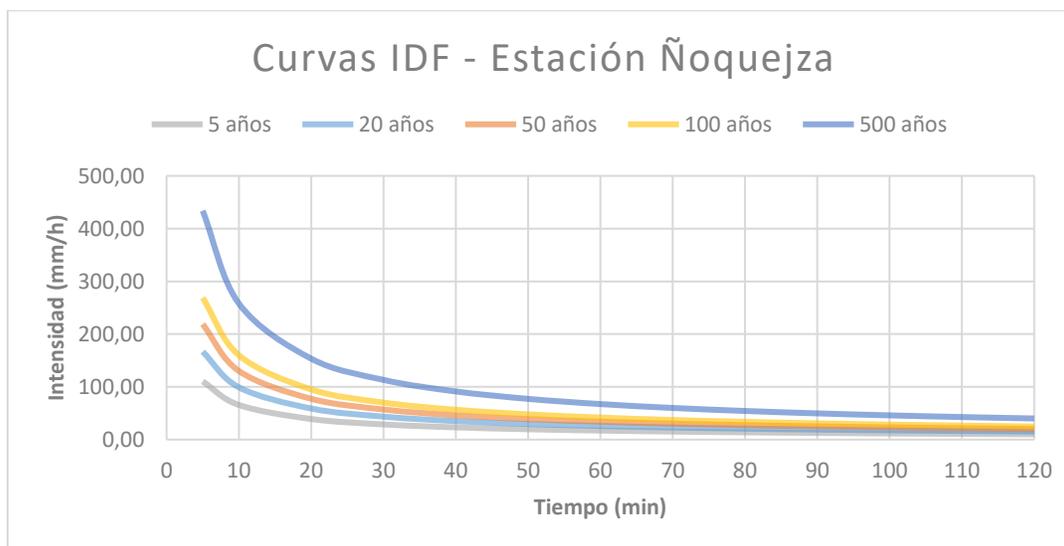


Figura 20. Curvas IDF, estación Ñoquejza.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.4. Estación Ramadas

a) Recopilación de información de precipitaciones máximas en 24 horas

Tabla 24. *Precipitaciones máximas en 24 horas, estación Ramadas.*

Año	P _{máx 24 h.} (mm)	Año	P _{máx 24 h.} (mm)
1977-1978	32,0	2004-2005	26,6
1978-1979	38,9	2005-2006	28,0
1979-1980	19,2	2006-2007	33,0
1980-1981	53,6	2007-2008	36,0
1981-1982	42,0	2008-2009	58,8
1982-1983	25,2	2009-2010	31,0
1983-1984	40,7	2010-2011	25,5
1984-1985	20,0	2011-2012	55,6
1995-1996	25,0	2012-2013	20,0
1996-1997	24,0	2013-2014	60,0
1997-1998	19,0	2014-2015	28,5
1998-1999	28,0	2015-2016	32,4
1999-2000	25,5	2016-2017	20,8
2000-2001	37,3	2017-2018	29,2
2001-2002	19,8	2018-2019	22,3
2002-2003	27,9	2019-2020	30,6
2003-2004	20,3		

Fuente: Elaborado a partir de registro del SENAMHI (2020).

$$K = 202,614$$

$$a = 0,3748$$

$$b = 0,750$$

Llegando así a la ecuación de intensidad

$$I_{\max} = \frac{202,614 * T^{0,3748}}{D^{0,750}}$$

b) Generación de Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF)

Tabla 25. Intensidad y duración de lluvias, estación Ramadas.

Duración (min)	Período de Retorno en años				
	5	20	50	100	500
5	110,77	186,24	262,55	340,44	622,32
10	65,86	110,74	156,11	202,43	370,03
20	39,16	65,84	92,83	120,36	220,02
30	28,89	48,58	68,49	88,80	162,33
40	23,29	39,15	55,19	71,57	130,83
50	19,70	33,12	46,69	60,54	110,67
60	17,18	28,89	40,72	52,80	96,52
70	15,30	25,73	36,28	47,04	85,98
80	13,85	23,28	32,82	42,56	77,79
90	12,68	21,31	30,04	38,96	71,21
100	11,71	19,69	27,76	36,00	65,80
110	10,90	18,33	25,85	33,51	61,26
120	10,22	17,18	24,21	31,40	57,39

Fuente: Elaboración propia.

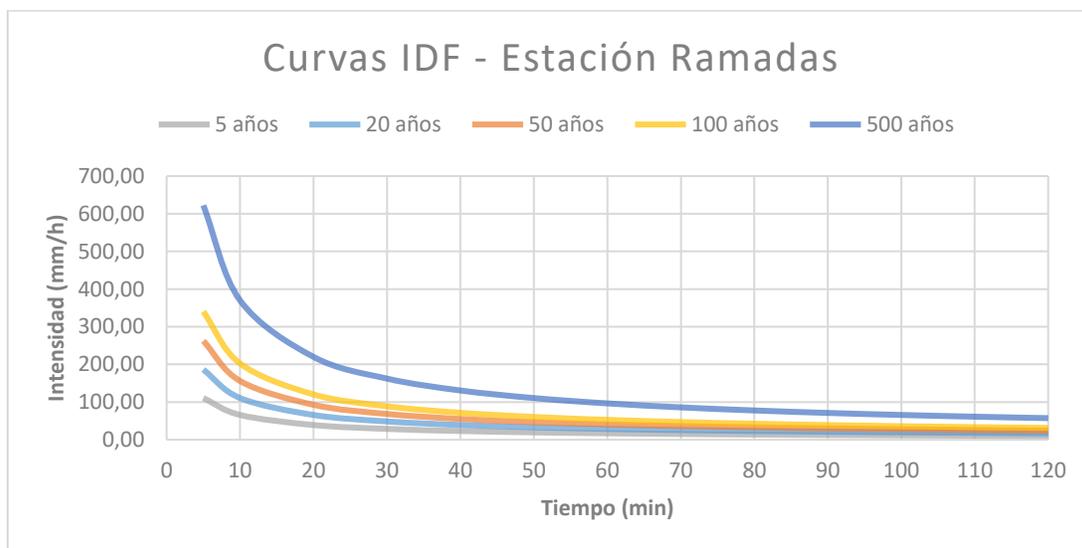


Figura 21. Curvas IDF, estación Ramadas.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.5. Estación Salo

c) Recopilación de información de precipitaciones máximas en 24 horas

Tabla 26. *Precipitaciones máximas en 24 horas, estación Salo.*

Año	P_{máx 24 h.} (mm)
2008-2009	28,0
2009-2010	37,1
2010-2011	24,6
2011-2012	20,0
2012-2013	20,0
2013-2014	20,5
2014-2015	20,5
2015-2016	22,2

Fuente: Elaborado a partir de registro del SENAMHI (2020).

$$K = 176,075$$

$$a = 0,3047$$

$$b = 0,750$$

Llegando así a la ecuación de intensidad
$$I_{max} = \frac{176,075 * T^{0,3047}}{D^{0,750}}$$

d) Generación de Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF)

Tabla 27. *Intensidad y duración de lluvias, estación Salo.*

Duración (min)	Período de Retorno en años				
	5	20	50	100	500
5	85,99	131,19	173,44	214,23	349,82
10	51,13	78,00	103,13	127,38	208,01
20	30,40	46,38	61,32	75,74	123,68
30	22,43	34,22	45,24	55,88	91,25
40	18,08	27,58	36,46	45,04	73,54
50	15,29	23,33	30,84	38,10	62,21

60	13,34	20,35	26,90	33,23	54,26
70	11,88	18,13	23,96	29,60	48,33
80	10,75	16,40	21,68	26,78	43,73
90	9,84	15,01	19,85	24,51	40,03
100	9,09	13,87	18,34	22,65	36,99
110	8,47	12,91	17,07	21,09	34,44
120	7,93	12,10	16,00	19,76	32,26

Fuente: Elaboración propia.

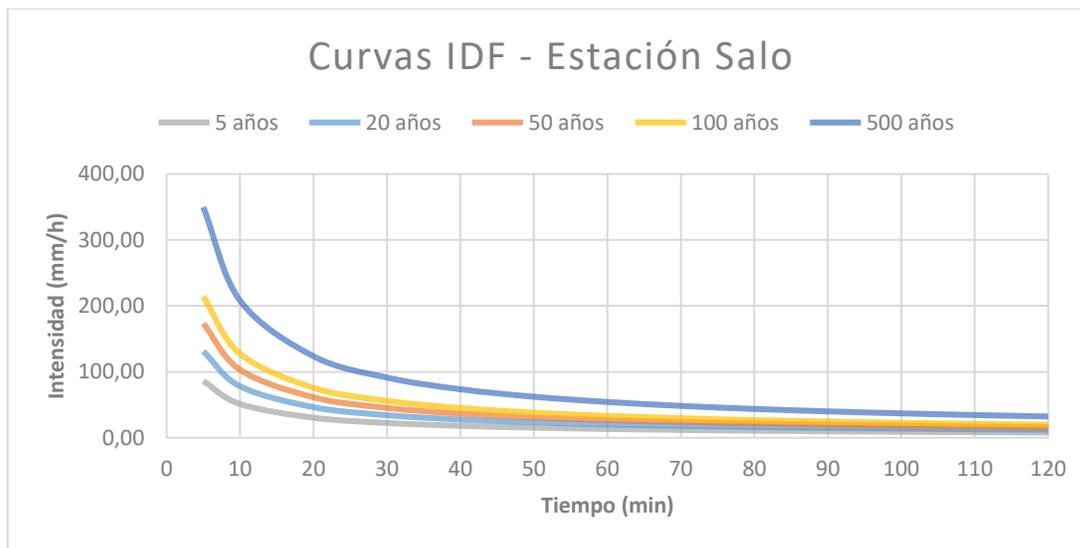


Figura 22. Curvas IDF, estación Salo.

Fuente: Elaboración propia.

4.6.6. Estación Tica Tica

- e) Recopilación de información de precipitaciones máximas en 24 horas

Tabla 28. Precipitaciones máximas en 24 horas, estación Tica Tica.

Año	P_{máx} 24 h. (mm)	Año	P_{máx} 24 h. (mm)
2005-2006	29,4	2013-2014	26,8
2006-2007	32,0	2014-2015	18,0
2007-2008	26,0	2015-2016	20,3
2008-2009	60,9	2016-2017	21,5
2009-2010	29,0	2017-2018	28,5

2010-2011	35,0	2018-2019	23,1
2011-2012	57,5	2019-2020	18,9
2012-2013	16,0		

Fuente: Elaborado a partir de registro del SENAMHI (2020).

$$K = 172,454$$

$$a = 0,4777$$

$$b = 0,750$$

Llegando así a la ecuación de intensidad
$$I_{max} = \frac{172,454 * T^{0,4777}}{D^{0,750}}$$

f) Generación de Curvas Intensidad – Duración - Frecuencia (IDF)

Tabla 29. Intensidad y duración de lluvias, estación Tica Tica.

Duración (min)	Período de Retorno en años				
	5	20	50	100	500
5	111,26	215,75	334,23	465,42	1004,02
10	66,16	128,28	198,73	276,74	597,00
20	39,34	76,28	118,17	164,55	354,98
30	29,02	56,28	87,18	121,40	261,90
40	23,39	45,36	70,26	97,84	211,07
50	19,79	38,37	59,44	82,76	178,54
60	17,26	33,46	51,84	72,19	155,72
70	15,37	29,81	46,18	64,31	138,72
80	13,91	26,97	41,78	58,18	125,50
90	12,73	24,69	38,25	53,26	114,89
100	11,76	22,81	35,34	49,21	106,16
110	10,95	21,24	32,90	45,82	98,84
120	10,26	19,90	30,82	42,92	92,59

Fuente: Elaboración propia.

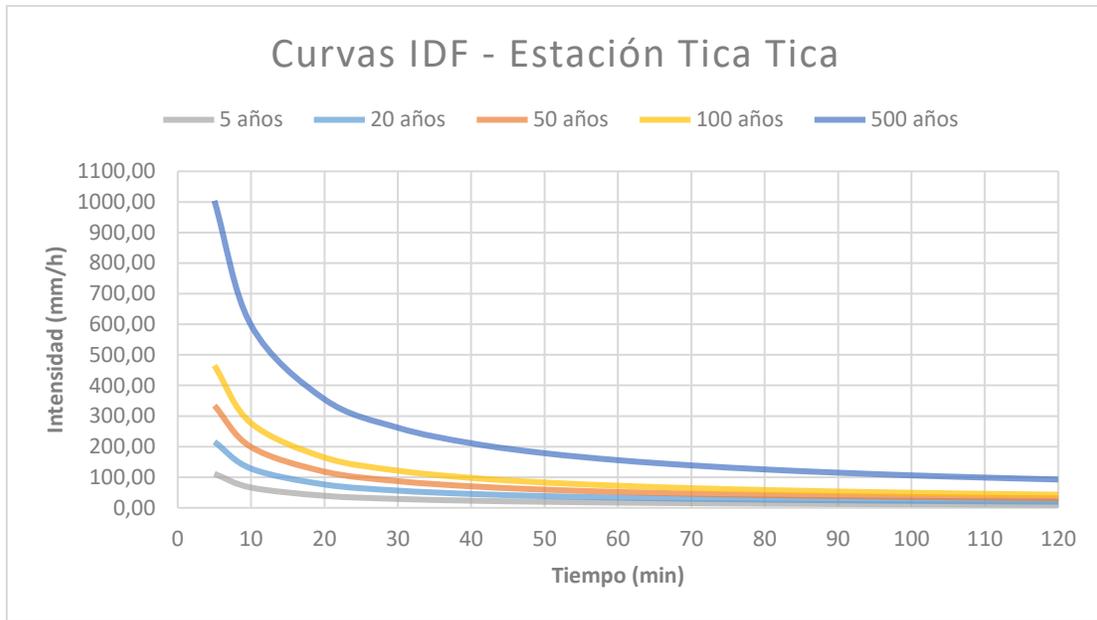


Figura 23. Curvas IDF, estación Tica Tica.

Fuente: Elaboración propia.

4.7. Tormenta de proyecto

Para generar una tormenta de diseño se requieren predicciones confiables de hietogramas. Debido a la información limitada que se encuentra en la zona de estudio de este proyecto, es necesario optar por un método para desarrollar los hietogramas.

4.7.1. Método del bloque alterno

El método del bloque alterno es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva IDF. El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación que ocurre en “n” intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt sobre una duración total de $T_d = n \Delta t$. Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones, y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida y que los demás bloques queden en orden descendente en torno al bloque central.

4.7.2. Factor de Reducción por Área (FRA)

El FRA se define como un coeficiente que se emplea para extrapolar las precipitaciones puntuales a precipitaciones sobre un área, siendo una forma de considerar el efecto de la variabilidad espacial de las lluvias. (Guichard, D.; Domínguez, R. y García R. 2004)

El análisis de eventos máximos de precipitación en una cuenca permite estimar relaciones entre la altura de precipitación con el área y la duración, a partir de las cuales es posible determinar un factor que indica el porcentaje de precipitación puntual a tomar como promedio sobre la cuenca. Tal factor es conocido como Factor de Reducción por Área el cual está en función del área de aporte y de la duración de lluvia.

Este factor puede ser calculado con las siguientes funciones.

$$FRA = 1 - e^{-1,1d^{0,25}} + e^{-1,1d^{0,25}-0,01A}$$

$$FRA = 1 - \frac{\log A}{15}$$

Donde:

d = Duración de la tormenta en horas.

A = Magnitud del área de análisis en km².

Calculamos el FRA para las subcuencas del área de aporte.

Tabla 30. Factor de Reducción de Área para subcuencas del estudio.

Sub Cuenca	Área (km ²)	d (h)	FRA
Sub Cuenca 1	69,866	3,667	0,8771
Sub Cuenca 2	212,180	2,167	0,8449
Sub Cuenca 3	688,280	7,50	0,8108
Sub Cuenca 4	1732,264	11,00	0,7841
Sub Cuenca 5	1501,546	12,00	0,7882

Fuente: Elaboración propia.

Incorporamos el FRA en la generación de hietogramas con el método del bloque alterno, donde el factor altera directamente las alturas de precipitación.

Los hietogramas realizados con el método del bloque alterno se encuentran en el Anexo H.

4.7.3. Hidrogramas

El proyecto para modelar las tormentas de la cuenca, cuenta con 3 componentes: Modelo de la Cuenca, Modelo Meteorológico y Especificaciones de Control.

En el modelo de la cuenca, trazamos un esquema del aporte de cinco subcuencas y como estas confluyen y se descargan, es decir, un esquema del proceso físico de la cuenca.

El componente de modelo meteorológico, precisa los registros pluviográficos de la cuenca, en el caso de nuestro estudio, introducimos los hietogramas generados a partir de las intensidades máximas que generamos con las precipitaciones máximas. Para los métodos hidráulicos que emplea el software, empleamos el Método de Muskingum, que maneja relaciones de caudal y almacenamiento variables. (Villón Béjar, M. 2014, p. 24-66).

Utilizamos el modelo de Número de Curva del SCS (Servicio de Conservación de Suelos), que es un parámetro empírico estimado de la combinación del tipo de suelo, de la cobertura vegetal y la condición de humedad antecedente del suelo.

Las especificaciones de control nos indican como deben empezar y terminar los cálculos, y el intervalo de tiempo en el cálculo. Depende fundamentalmente de las exigencias del proyecto que se trabaja.

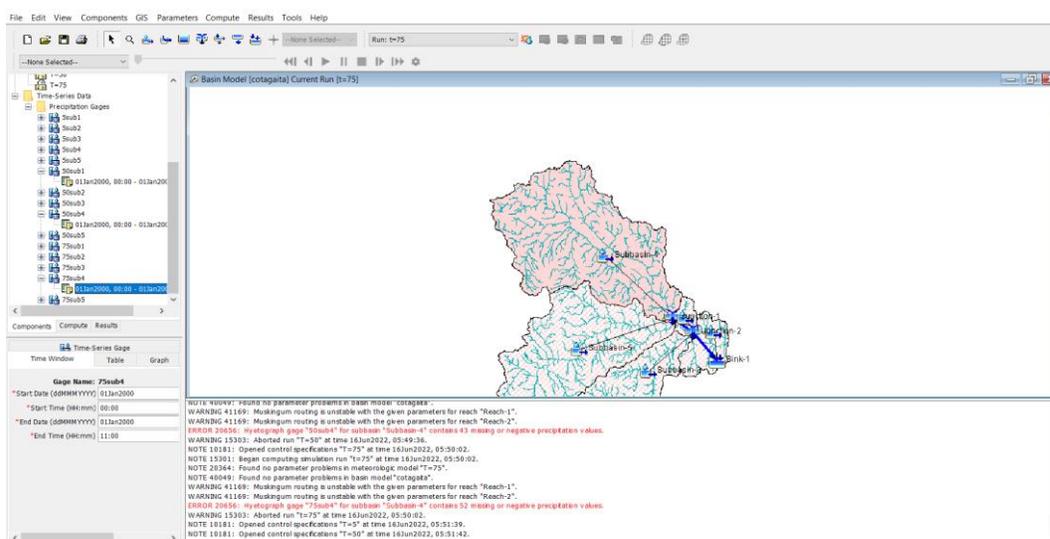


Figura 24. Ventana de proceso HEC-HMS.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron los hidrogramas sintéticos para este proyecto, utilizando el Software HEC-HMS, para periodos de retorno de 5, 50 y 75 años.

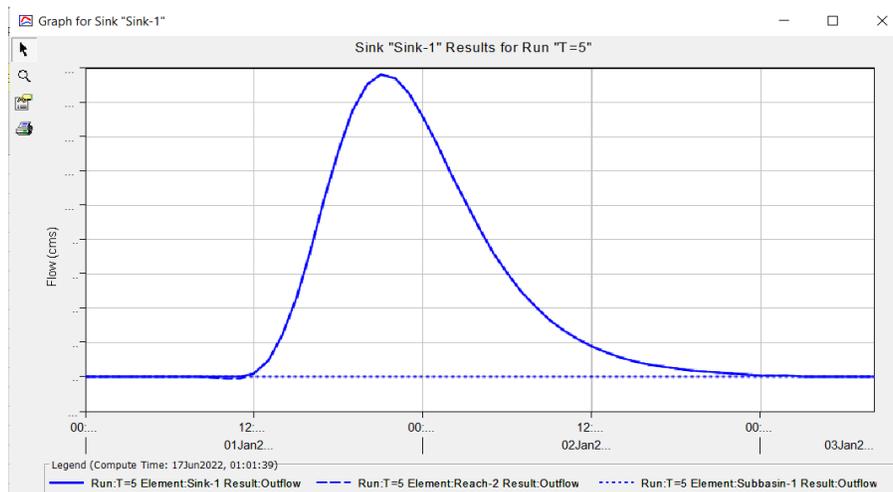


Figura 25. Hidrograma $T = 5$ años.

Fuente: Elaboración propia.

Obteniendo un caudal máximo de $41,5 \text{ m}^3/\text{s}$ con tiempo al pico de 21 horas para un periodo de retorno de 5 años.

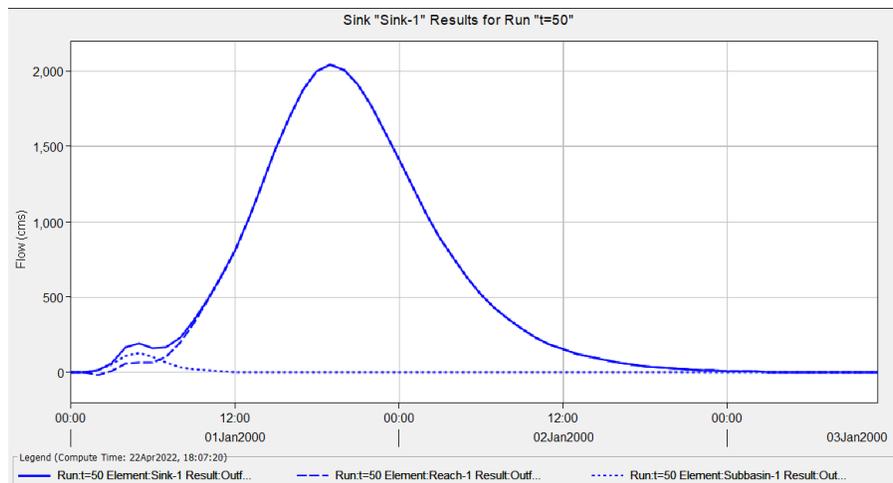


Figura 26. Hidrograma $T = 50$ años

Fuente: Elaboración propia.

Obteniendo un caudal máximo de $1277,1 \text{ m}^3/\text{s}$ con tiempo al pico de 20 horas para un periodo de retorno de 50 años.

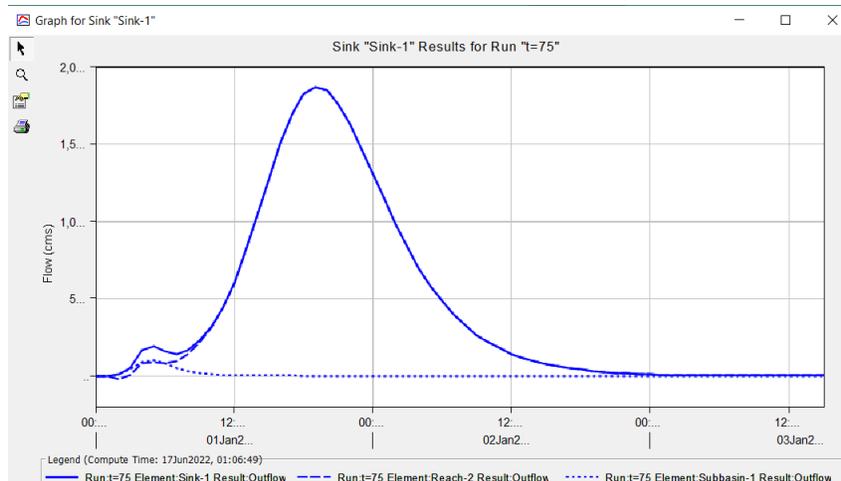


Figura 27. Hidrograma $T = 75$ años.

Fuente: Elaboración propia.

Obteniendo un caudal máximo de $1870,8 \text{ m}^3/\text{s}$ con tiempo al pico de 19 horas para un periodo de retorno de 75 años.

A objeto de comparación, se calcularon los caudales para cada período de retorno con el método del Hidrograma Unitario Triangular, el método Racional, y con el método Racional Modificado, esta comparación se encuentra en el Anexo I. Se eligió trabajar con el método del Hidrograma Unitario del SCS, con el uso del HEC-HMS, porque podemos trabajar con subcuencas por la magnitud de la cuenca y el tránsito de los afluentes principales.

4.8. Uso de Suelos

En la Clasificación de Suelos se refiere a la agrupación con un rango de propiedades similares (químicas, físicas y biológicas) a unidades que puedan ser geo-referenciadas y mapeadas. De hecho, los suelos se consideran como un recurso natural mucho más complejo que otros elementos como el aire y el agua.

Elaboración del mapa de uso actual de suelos

Para la elaboración del mapa de uso actual de suelos para la cuenca del río Cotagaita se siguieron los siguientes pasos.

1. Descarga de imágenes satelitales Sentinel 2, para ello se utilizó la página <https://scihub.copernicus.eu/>, debido al tamaño de la cuenca fue necesario descargar 4 imágenes satelitales.

2. Corrección atmosférica, para ello se utilizó el programa QGIS y su complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), una vez corregidas las 4 imágenes se las unió y recorto utilizando el contorno de la cuenca delimitada, esto con el objetivo de solo trabajar con la superficie de la cuenca en estudio.
3. Clasificación Supervisada, para ello se utilizó el programa QGIS y su complemento Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), el cual nos permite realizar clasificaciones no supervisadas y supervisadas, escogiéndose esta última para la elaboración del mapa de uso actual de suelos. Se escogieron 9 clases (Bosque, Matorral, Pradera, Uso Agrícola, Zonas Pobladas, Vegetación dispersa, Cuerpos de Agua y Humedales - Herbazales).
4. Poligonización del ráster de clasificación a vectorial, a partir del ráster generado con la clasificación supervisada se lo transforma en polígonos (shapefile) para así obtener las áreas para cada clase de uso, el resultado obtenido se lo presenta en el mapa de uso actual de suelos. El mapa de uso de suelo se encuentra en el Anexo D.

4.8.1. Rugosidad

Los valores del coeficiente de rugosidad fueron extraídos de la tabla de rugosidades del libro “Hidráulica de Canales Abiertos” (Ven Te Chow 1959). Anexo J.

Tabla 31. Rugosidades.

Tipo de Suelo	n
Áreas Agrícolas	0,035
Bosques	0,12
Caminos de tierra	0,017
Cancha de césped (pasto corto)	0,03
Cancha de concreto.	0,011
Carretera asfaltada (rugoso)	0,016
Cementerio (muros con mampostería de piedra)	0,025
Lecho del río	0,035
Plaza (losetas de cemento)	0,013
Viviendas (mampostería de piedra)	0,025
Suelo desnudo (terreno limpio con troncos sin retoño)	0,04
Baldíos (pastizales sin matorrales)	0,03

Fuente: Ven Te Chow (1959).

CAPÍTULO V

CAPÍTULO V

CARACTERIZACIÓN DEL MODELO

5.1. Características del modelo de simulación IBER

IBER es un modelo numérico bidimensional de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no-permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El rango de aplicación de IBER abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos y el flujo de marea en estuarios.

5.2. Formato de archivos

Para cargar la información en el programa, se deben preparar los archivos en los siguientes formatos:

El DEM debe ser convertido al formato ASCII.

El mapa de Uso de Suelos debe estar en formato SHP, se debe realizar una codificación numérica a cada unidad de uso, este se rasteriza con un tamaño de pixel, y posteriormente es convertido al formato ASCII. Adicionalmente se debe extraer el archivo de proyección que se tiene en este mapa.

Se debe crear un archivo CSV, la primera columna debe tener la nueva codificación numérica asignada en el anterior procedimiento y la segunda debe contener los nombres de las unidades de Uso de Suelos.

Para la imagen de fondo, que se utiliza como referencia visual, se precisa utilizar una imagen normal en formato TIF de preferencia, también se puede emplear una imagen en JPG, y debe tener su archivo en formato TWF.

5.3. Creación del proyecto

Iniciamos el software IBER, para este proyecto la versión v.2.4.3, comenzamos a guardar el proyecto, entrando al “Archivo” que contiene la opción “Guardar como...” donde accedemos, y le otorgamos una carpeta ubicada en el escritorio, nombramos el proyecto que se guardará con una extensión “gid”.

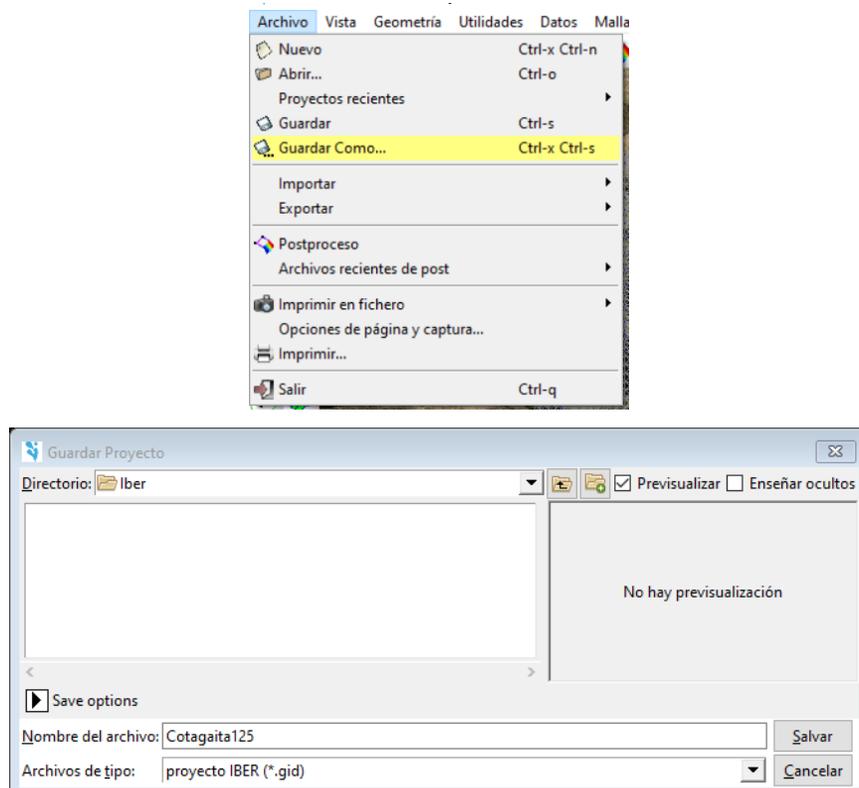


Figura 28. *Ventana creación del proyecto.*

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Modelo digital de elevación

Para que IBER muestre resultados satisfactorios es indispensable contar con un modelo digital de elevación con todos los detalles posibles, pues la simulación debe ser lo más cercano a la realidad.

Se utilizó un DEM del Satélite ALOS PALSAR, este es aceptable para poder realizar la modelación. El procesamiento de esta información se hizo de la siguiente manera:

- Procesamiento de toda la información topográfica de la zona de estudio.
- Generación de la superficie TIN.
- Conversión de la superficie TIN a ráster.
- Conversión del ráster a un archivo ASCII el cual es compatible con IBER.

Este ráster en formato TXT, permite que la malla generada en IBER, obtenga un relieve con la topografía obtenida, y se la inserta al final de la introducción de todos los datos del modelo.

5.5. Construcción de la malla de cálculo

Se refiere a la manera en que será discretizada la superficie de estudio para evaluar mediante volúmenes finitos cada celda de la malla generada.

En este primer procedimiento se definirá el tamaño de la celda que se utilizará en la modelación, este proceso consiste en discretizar la superficie del terreno en triángulos rectángulos isósceles, según la precisión indicada, luego el programa IBER indica que debemos de colapsar la geometría con la finalidad de eliminar líneas duplicadas. Este se realiza por medio del menú Herramientas IBER/RTIN/Crear RTIN.

Cargamos el modelo de elevación digital de terreno, desde la barra de herramientas.

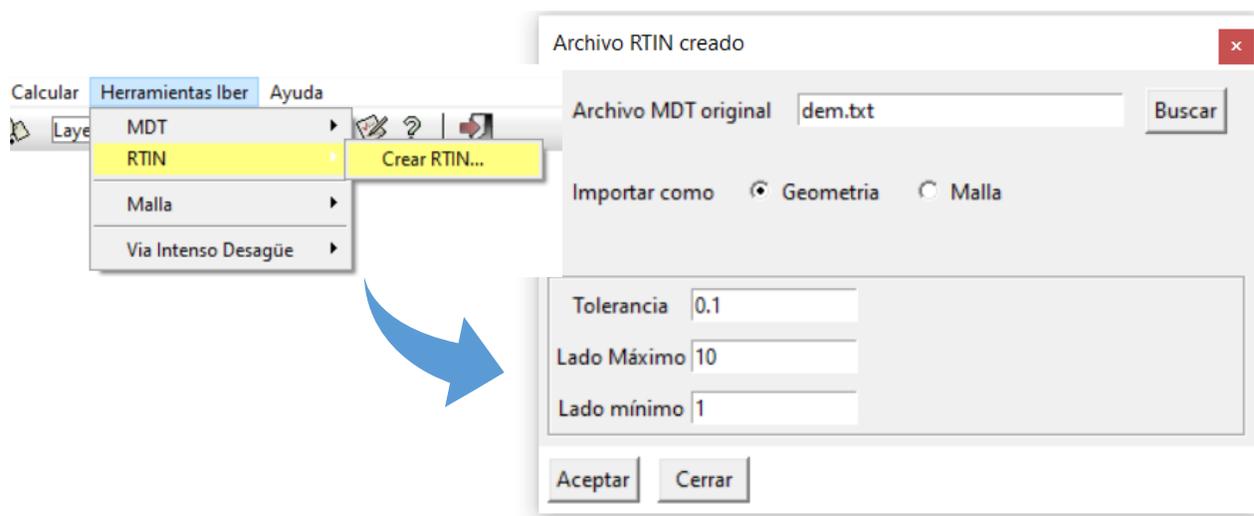


Figura 29. Barra de herramientas, crear RTIN.

Fuente: Elaboración propia.

Para el estudio se aplicó una malla estructurada la cual permite asignar diferentes tamaños los cuales dependen de la exactitud y precisión de los resultados que se requieran en algunos puntos clave.

Para la parte del río y las áreas aledañas se generó una malla estructurada de tamaño 2 considerando también que mientras más pequeñas sean las celdas de la malla más tiempo demora al ordenador procesarlas.

Una vez conseguida la malla, insertamos una imagen satelital de fondo para facilitar la ubicación de los puntos de entrada y salida.

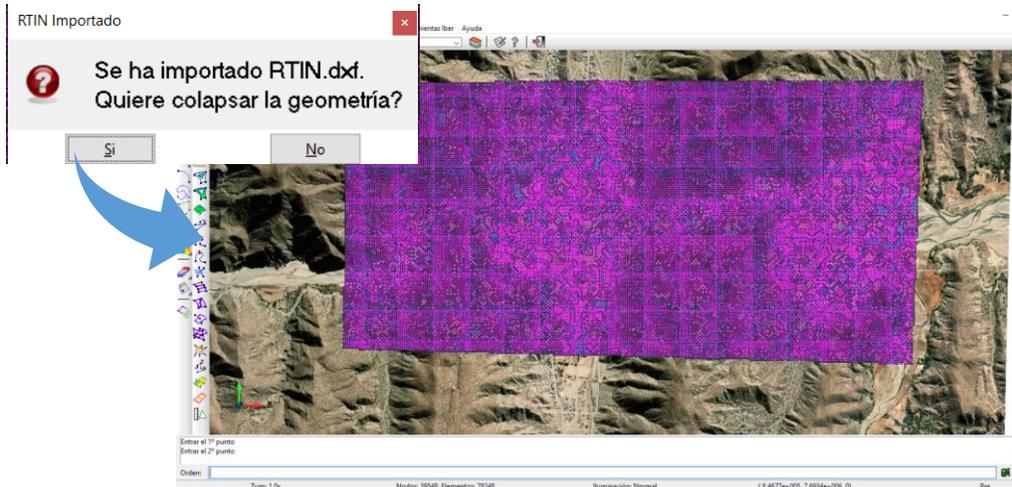


Figura 30. Ventana de proceso de construcción de la malla de cálculo.

Fuente: Elaboración propia.

5.6. Condiciones de contorno

Son, principalmente las condiciones de entrada y salida del modelo, específicamente las características de entrada de caudal y la salida del mismo. Se asignan las condiciones de contorno de ingreso y salida de flujo, en IBER, y se cargan los hidrogramas simultáneamente, mediante la barra de menú:

Datos/ Hidrodinámica/Condiciones de Contorno.

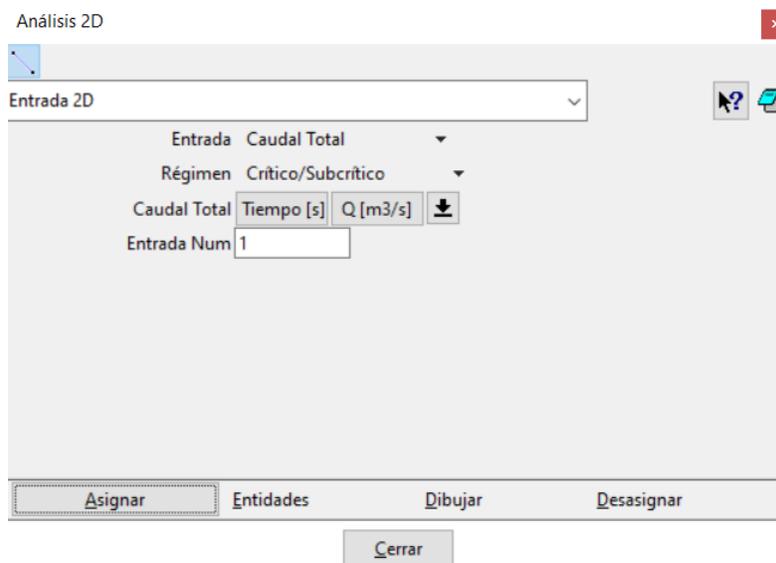


Figura 31. Ventana condiciones de contorno, ingreso de caudales $T = 75$ años.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la modelación hidrológica de la cuenca, realizada con el HEC-HMS, el caudal para un periodo de retorno $T = 5$ años es $41,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

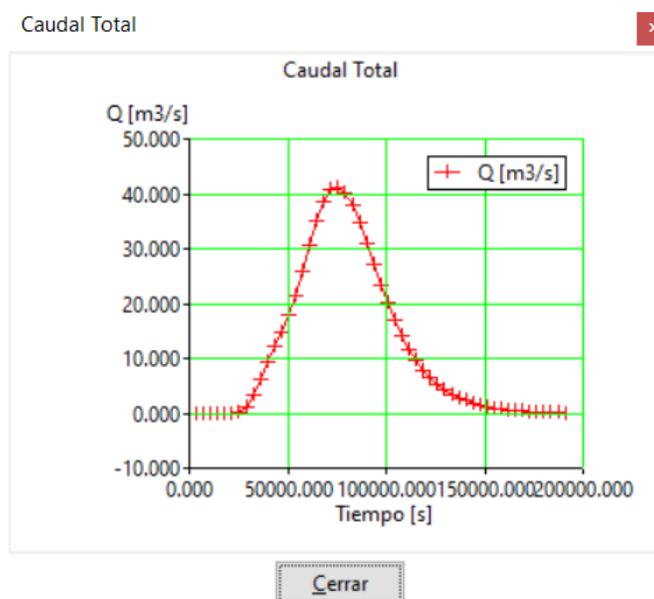


Figura 32. Ventana ingreso del hidrograma $T = 5$ años.

Fuente: Elaboración propia.

Ingresamos la condición del calado (tirante de agua), que para toda la superficie le damos el valor de 0, esto debido a la variación del flujo del agua, y que las alturas que inundación genera, son mucho mayores a los niveles de agua normales.

5.7. Coeficiente de rugosidad

El coeficiente de rugosidad fue asignado automáticamente con IBER, a partir de un mapa de uso de suelos que se elaboró para el proyecto procesado en ArcGIS, donde se asignó los atributos del mapa, una columna denominada "Class_Names" donde otorgamos el nombre del tipo de suelo, ejemplo: Río, y otro "Id" donde se asignó un número entero para ordenar la cantidad de tipos de suelo. Es muy importante los nombres de las columnas para que después puedan ser procesados en IBER.

Copiamos la tabla de atributos a una planilla Excel, donde la guardamos en formato CSV, y guardamos en la misma carpeta donde se encuentra el archivo ráster de ArcGIS.

Vamos a la barra de herramientas ingresamos en Datos/Rugosidad/Asignación Automática, y cargamos el archivo Excel en formato TXT.

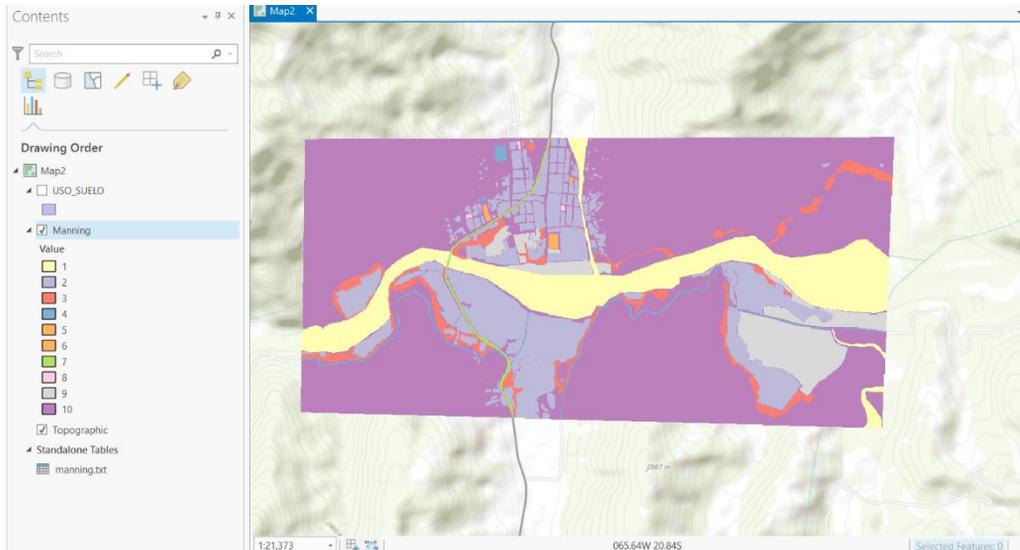


Figura 33. Ventana ArcGIS, rugosidades.

Fuente: Elaboración propia.

5.8. Cálculo del modelo bidimensional

Una vez introducido todos los datos anteriores se procede a modelar, mediante el menú Datos/Datos del Problema, se introduce como tiempo máximo de simulación el tiempo de duración del hidrograma, y el intervalo de tiempo para el reporte de resultados que se desea. Corremos el cálculo del modelo bidimensional con los datos introducidos.

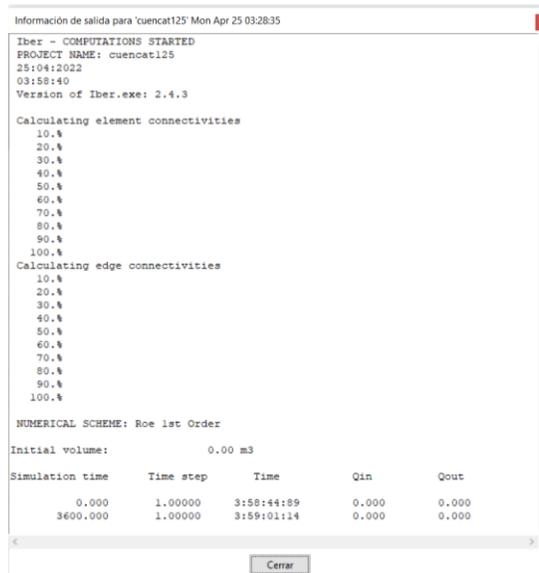


Figura 34. Ventana de proceso.

Fuente: elaboración propia.

El proceso de cálculo toma un tiempo considerable, de acuerdo a los intervalos de tiempo para el cálculo, y del tamaño de la malla. Una vez finalizado el cálculo, o durante el mismo, se puede acceder al post-proceso para visualizar y analizar los resultados. El cambio entre las interfaces de pre-proceso y postproceso se realiza mediante los botones correspondientes de la barra de herramientas. IBER dispone de multitud de opciones para visualizar y analizar los resultados, personalizar los colores, las leyendas, mostrar etiquetas de valores, etc. Los tipos de visualización y extracción de resultados suelen ser las “vistas in-situ” en el modelo, los gráficos y las animaciones.

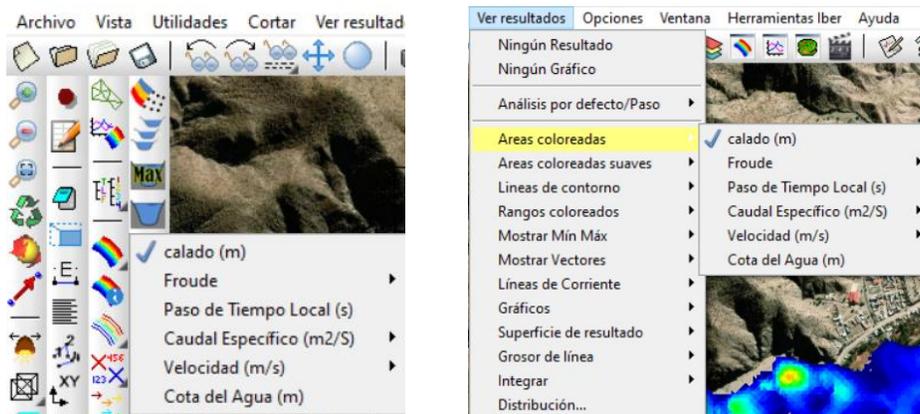


Figura 35. Ventanas con opciones de visualización.

Fuente: Elaboración propia.

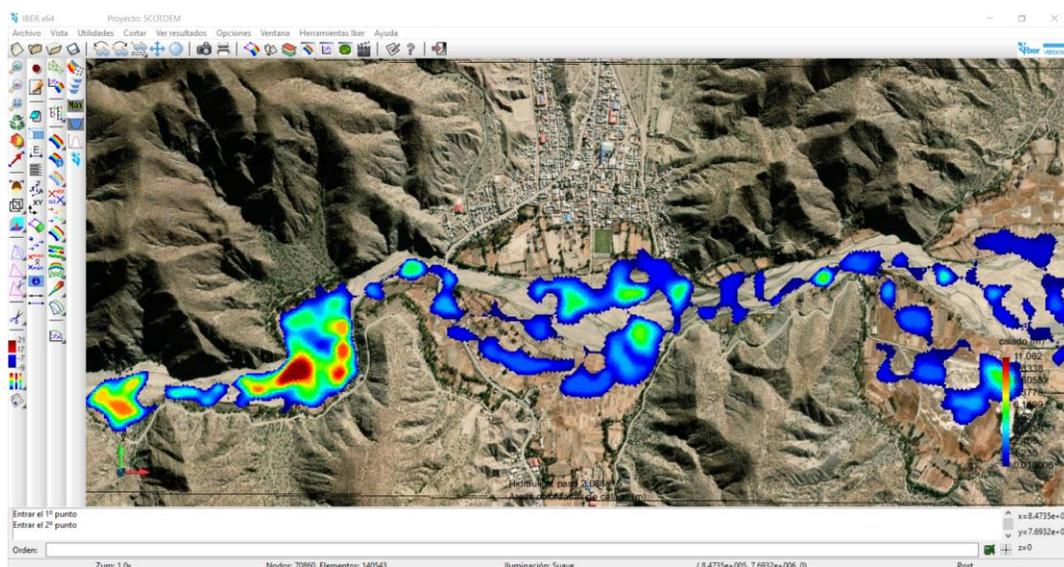


Figura 36. Ventana de visualización profundidades máximas.

Fuente: Elaboración propia.

5.9. Resultados de la modelación hidrodinámica

Guardamos los resultados de profundidad de la modelación en formato ASCII; exportamos esa información a ArcGIS, convertimos el archivo ASCII a Ráster, donde analizamos la afectación a la ciudad de acuerdo a las inundaciones con cada periodo de retorno.

5.9.1. Áreas de inundación

Al finalizar el proceso de identificamos las áreas de inundación, como se muestran en el Anexo K, y se obtuvieron las áreas inundación, que reflejan en las siguientes tablas.

Tabla 32. Áreas de afectación para $T = 5$ años.

Sector afectado	Área (Ha)
Viviendas	0,26
Áreas agrícolas	30,80
Bosques	2,63
Camino de tierra	0,46
Carretera	0,50
Lecho del río	47,42
Suelo desnudo	9,29
Baldíos	20,27

Fuente: Elaboración propia.

Para el periodo de retorno de 5 años encontramos que el área urbana es afectada en la zona más cercana al lecho del río, sin embargo, se muestra manchas de inundación considerables en el área agrícola.

Tabla 33. Áreas de afectación para $T = 50$ años.

Sector afectado	Área (Ha)
Viviendas	2,04
Áreas agrícolas	51,35
Bosques	7,46
Camino de tierra	1,14
Carretera	0,61
Cancha de césped	0,45
Lecho del río	67,35
Suelo desnudo	23,94
Baldíos	29,54

Fuente: Elaboración propia.

Con 50 años de periodo de retorno, tenemos el área urbana más considerable, donde la mancha de inundación llega a sitios de recreación.

Tabla 34. *Áreas de afectación para $T = 75$ años.*

Sector afectado	Área (Ha)
Viviendas	2,46
Áreas agrícolas	54,77
Bosques	7,97
Caminos de tierra	1,29
Carretera	0,63
Cancha de césped	0,58
Lecho del río	70,41
Suelo desnudo	26,58
Baldíos	30,72

Fuente: Elaboración propia.

Las manchas de inundación para 75 años de periodo de retorno, se incrementan levemente en comparación con el periodo de retorno de 50 años, sin embargo, las profundidades de agua en las zonas inundadas aumentan hasta en 1 metro de altura.

5.9.2. Análisis de los resultados

Obtuvimos los mapas de inundación, y las áreas de afectación, en base a las cuales, comparamos la profundidad del agua en los escenarios de inundación, y especialmente la afectación a las zonas que cuentan con viviendas.

De acuerdo a los resultados de las áreas de inundación, para la avenida más extrema ($T=75$ años) encontramos un área de 2,46 km² de viviendas afectadas, que son aproximadamente 31 viviendas.

De acuerdo a la información del Instituto Nacional de Estadística (INE) del CENSO 2012, contamos con 3,32 personas por hogar. Esto significa, aproximadamente, 103 personas afectadas.

En la ciudad de Cotagaita nos encontramos con estructuras de diversos materiales, como casas de adobe, cerramientos con calamina, estructuras bloques de hormigón y los

convencionales de ladrillo. Es complejo en este aspecto generalizar daños que una inundación pueda causar a las viviendas.



Figura 37. *Viviendas de la ciudad de Cotagaita.*

Fuente: Elaboración propia.

Nos enfocamos en el área de viviendas debido a la importancia en resguardar la vida de las personas, y el daño al bienestar que generaría una inundación. Notamos también que la inundación podría afectar a la carretera, y esto afectaría a la economía de la zona, por imposibilitar el transporte de producción y el ingreso de productos provenientes de las localidades colindantes.

La modelación para el período de retorno para 5 años nos muestra 6 viviendas afectadas y una pequeña zona en la carretera, a pesar de ser estas las afectaciones menores, son importantes tomarlas en cuenta por la repercusión que han tenido las inundaciones los años más recientes.

Observamos que la inundación con el periodo de retorno de 50 años, muestra cercanía de afectación de área urbana en relación a la mancha de inundación para 75 años. Por ello es importante tomar en cuenta la altura del agua sobre la superficie, donde se presentan diferencias más significativas, por ejemplo, en la relación de la modelación de 50 años de período de retorno se muestran valores menores que para 75 años de periodo de retorno, como se presenta en los mapas del Anexo K.

**CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se identificaron siete estaciones hidrometeorológicas en la zona de estudio, de las cuales se emplearon seis que contaban con registro de al menos diez años, mientras que la estación Kocani, solo contaba con un año de registro, por lo que fue descartada; se analizaron los datos de las seis estaciones donde se obtuvo que todas estas son homogéneas y consistentes.
- El tránsito hidráulico de flujo no permanente en canales, mediante la solución de las ecuaciones de Saint-Venant a nivel bidimensional, con la aplicación del modelo IBER, demuestran que es una alternativa adecuada para estudios hidrológicos e hidráulicos, por que permiten caracterizar la superficie por donde se transita la escorrentía superficial de una forma cercana a la realidad y de manera práctica. Razones por las cuales se cumple la hipótesis planteada.
- Encontramos múltiples ventajas en la aplicación del modelo IBER, al trabajar sobre volúmenes finitos, nos permite generar mallas irregulares, estas se adaptan mejor a los contornos del terreno de estudio, esto a su vez, nos permite apreciar con más precisión el riesgo asociado a una inundación. Podemos conocer el tirante de agua, y sus características en cualquier punto del terreno y en lapso de tiempo que deseemos, para este proyecto fue de importancia encontrar estos parámetros en el momento de máxima avenida. La precisión de los resultados se ajusta a la exigencia que tengamos al especificar los intervalos de tiempo para el cálculo, así también con la calidad de la malla.
- El modelo de pérdida utilizado es el número de curva del SCS, el modelo de transformación es el hidrograma unitario del SCS, y consideramos el Hietograma (bloques alternos) de diseño generado de las precipitaciones máximas diarias. Mediante el uso del programa HEC-HMS se generaron los hidrogramas para periodos de retorno de 5, 50 y 75 años, de los cuales se obtuvieron los caudales de 45,1 m³/s, 1277,1 m³/s y 1870,8 m³/s para cada periodo de retorno respectivamente.
- Los procesos hidrológicos e hidrodinámicos varían de acuerdo a la evolución de los factores locales, las afectaciones encontradas para 75 años son considerables, sin

embargo, no se pueden validar con la información que se recabó a raíz de inundaciones anteriores

- A partir de la modelación fue posible identificar alrededor de 31 viviendas afectadas con la avenida máxima para 75 años, con una profundidad máxima de 16 metros en el lecho del río, en la zona urbana de 0 a 1 metros. Teniendo en cuenta que la ingeniería civil, busca el bienestar y el desarrollo humano mediante el diseño, la construcción y mantenimiento de infraestructuras, la estimación de personas afectadas, que son 103, sugiere que se deban realizar obras de protección pertinentes, planes de mitigación de desastres y un mejoramiento en la planificación urbana.
- Se generaron mapas de inundación que sirvieron para identificar las afectaciones en área urbana, y que nos permiten visualizar la modelación.

Recomendaciones

- El uso de sistemas de información geográfica nos facilita el procesamiento de la información tanto para estudio hidrológicos, como hidráulicos por lo que su uso es ampliamente recomendado.
- IBER nos brinda varias ventajas en la modelación bidimensional, sin embargo, una de las desventajas es que necesita una capacidad de procesamiento grande y el tiempo de modelación es considerable y aumenta de acuerdo al tamaño del área de análisis.
- Para obtener una modelación más precisa se recomienda utilizar información hidrométrica. Esta recomendación aplica de gran manera a la topografía y al uso de suelos que pueden encontrarse con cambios constantes.
- El software IBER es bastante práctico, su interfaz es sencilla para comprender, se recomienda, para su uso, revisar el manual básico de usuario y el manual de referencia hidráulica que se encuentran para descargar de manera gratuita, en la web de IBER.
- El uso de este modelo, puede facilitar estudios de pre-inversión, de planificación, y en el área estudiantil para reforzar la comprensión de los proyectos que se realizan en el área de hidráulica e hidrología, al encontrarse de manera gratuita, se recomienda su uso en el área académica.