

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 4
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2020-12-10
		PAGINA: 1 de 8

16-

FECHA	jueves, 28 de enero de 2021
--------------	-----------------------------

Señores
UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
 BIBLIOTECA
 Ciudad

UNIDAD REGIONAL	Extensión Facatativá
TIPO DE DOCUMENTO	Trabajo De Grado
FACULTAD	Ciencias Agropecuarias
NIVEL ACADÉMICO DE FORMACIÓN O PROCESO	Pregrado
PROGRAMA ACADÉMICO	Ingeniería Ambiental

El Autor(Es):

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS	No. DOCUMENTO DE IDENTIFICACIÓN
ALFONSO JIMENEZ	KEVIN DANIEL	1026594703
SIERRA MARTIN	DANIEL SANTIAGO	1073161259

Diagonal 18 No. 20-29 Fusagasugá – Cundinamarca
 Teléfono: (091) 8281483 Línea Gratuita: 018000180414
www.ucundinamarca.edu.co E-mail: info@ucundinamarca.edu.co
 NIT: 890.680.062-2

*Documento controlado por el Sistema de Gestión de la Calidad
 Asegúrese que corresponde a la última versión consultando el Portal Institucional*

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 4
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2020-12-10
		PAGINA: 2 de 8

Director(Es) y/o Asesor(Es) del documento:

APELLIDOS COMPLETOS	NOMBRES COMPLETOS
ANGELICA	BRAVO BOHÓRQUEZ
KAREL ALDRIN	SANCHEZ HERNANDEZ

TÍTULO DEL DOCUMENTO
MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL TRAMO 2 DEL RÍO BOTELLO ENTRE LAS VEREDAS PRADO Y MOYANO, DEL MUNICIPIO DE FACATATIVÁ.

SUBTÍTULO (Aplica solo para Tesis, Artículos Científicos, Disertaciones, Objetos Virtuales de Aprendizaje)

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Aplica para Tesis/Trabajo de Grado/Pasantía
INGENIERO AMBIENTAL

AÑO DE EDICION DEL DOCUMENTO	NÚMERO DE PÁGINAS
08/12/2020	69

DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS (Usar 6 descriptores o palabras claves)	
ESPAÑOL	INGLÉS
1. Eventos hidrológicos extremos	Extreme hydrological events,
2. Modelación hidrodinámica	Hydrodynamic modeling,
3. Gestión del recurso hídrico	Water resources management
4. Gestión del riesgo	Risk management.
5. HEC-RAS	HEC-RAS

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 4
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2020-12-10
		PAGINA: 3 de 8

RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS
(Máximo 250 palabras – 1530 caracteres, aplica para resumen en español):

Una de las fuentes principales de agua del municipio de Facatativá es el Río Botello, el cual se ve afectado por eventos hidrológicos extremos asociados a factores tanto naturales como antrópicos. Para entender estos fenómenos, se llevó a cabo la modelación hidrodinámica en un tramo del Río Botello, que comprende las veredas Prado, Moyano y parte del sector urbano del municipio. Para esto, se contó con información geográfica y un modelo digital de elevación, así como con información recolectada en campo para caracterizar la zona de estudio. Luego, Mediante el software HEC-RAS, se evaluaron en 1D y 2D los periodos de retorno estimados a partir de una distribución de probabilidad de los registros históricos de caudal. Igualmente, en 1D se simularon los caudales más bajos registrados correspondientes a los años 1980 y 1997. Se encontraron 5 zonas de inundación aguas arriba del tramo que afectan hasta 2,91 Ha de zonas agrícolas, y niveles mínimos en un rango de 18 cm y 40 cm a lo largo del cauce. Con estos resultados se hace un aporte importante de información antes no disponible y la cual puede servir de insumo para la toma de decisiones sobre la gestión del recurso hídrico y la gestión del riesgo en el territorio.

ABSTRACT

One of Facatativá's mayor water sources is Botello river, which is affected by Extreme hydrological events related to natural and anthropic factors. In order to understand these phenomena, it was built a hydrodynamic model to assess a reach of Botello River, which covers part of the urban sector, and rural areas of Prado and Moyano, in Facatativá. For this, it was characterized the studying area using available geographical information and a Digital Elevation Model, as well as data obtained by field work. Furthermore, return periods for flood events were estimated by a probability distribution of historical flow data. Therefore, using HEC-RAS software, 1D and 2D assessments of flood events were performed. In addition, minimum flows, occurred in 1980 and 1997, were assessed through a 1D simulation. As results, 5 flood areas were identified upstream the reach, affecting up to 2,91 Ha of agricultural areas; also, water surface elevations for minimum flows, which are between 18 cm and 40 cm along the reach. These results produce important information, not available before, that could serve as basis in decision making about water resources management and risk management.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 4
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2020-12-10
		PAGINA: 4 de 8

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Por medio del presente escrito autorizo (Autorizamos) a la Universidad de Cundinamarca para que, en desarrollo de la presente licencia de uso parcial, pueda ejercer sobre mí (nuestra) obra las atribuciones que se indican a continuación, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, la finalidad perseguida será facilitar, difundir y promover el aprendizaje, la enseñanza y la investigación.

En consecuencia, las atribuciones de usos temporales y parciales que por virtud de la presente licencia se autoriza a la Universidad de Cundinamarca, a los usuarios de la Biblioteca de la Universidad; así como a los usuarios de las redes, bases de datos y demás sitios web con los que la Universidad tenga perfeccionado una alianza, son: Marque con una "X":

AUTORIZO (AUTORIZAMOS)	SI	NO
1. La reproducción por cualquier formato conocido o por conocer.	X	
2. La comunicación pública por cualquier procedimiento o medio físico o electrónico, así como su puesta a disposición en Internet.	X	
3. La inclusión en bases de datos y en sitios web sean éstos onerosos o gratuitos, existiendo con ellos previa alianza perfeccionada con la Universidad de Cundinamarca para efectos de satisfacer los fines previstos. En este evento, tales sitios y sus usuarios tendrán las mismas facultades que las aquí concedidas con las mismas limitaciones y condiciones.	X	
4. La inclusión en el Repositorio Institucional.	X	

De acuerdo con la naturaleza del uso concedido, la presente licencia parcial se otorga a título gratuito por el máximo tiempo legal colombiano, con el propósito de que en dicho lapso mi (nuestra) obra sea explotada en las condiciones aquí estipuladas y para los fines indicados, respetando siempre la titularidad de los derechos patrimoniales y morales correspondientes, de acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

Para el caso de las Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, de manera complementaria, garantizo(garantizamos) en mi(nuestra) calidad de estudiante(s) y por ende autor(es) exclusivo(s), que la Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía en cuestión, es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi(nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 4
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2020-12-10
		PAGINA: 5 de 8

autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestra) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “*Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores*”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Universidad de Cundinamarca está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: (Para Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía):

Información Confidencial:

Esta Tesis, Trabajo de Grado o Pasantía, contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de la investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado.

SI ___ NO X.

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

LICENCIA DE PUBLICACIÓN

Como titular(es) del derecho de autor, confiero(erimos) a la Universidad de Cundinamarca una licencia no exclusiva, limitada y gratuita sobre la obra que se integrará en el Repositorio Institucional, que se ajusta a las siguientes características:

a) Estará vigente a partir de la fecha de inclusión en el repositorio, por un plazo de 5 años, que serán prorrogables indefinidamente por el tiempo que dure el derecho

 UDECA UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 4
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2020-12-10
		PAGINA: 6 de 8

patrimonial del autor. El autor podrá dar por terminada la licencia solicitándolo a la Universidad por escrito. (Para el caso de los Recursos Educativos Digitales, la Licencia de Publicación será permanente).

b) Autoriza a la Universidad de Cundinamarca a publicar la obra en formato y/o soporte digital, conociendo que, dado que se publica en Internet, por este hecho circula con un alcance mundial.

c) Los titulares aceptan que la autorización se hace a título gratuito, por lo tanto, renuncian a recibir beneficio alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente licencia y de la licencia de uso con que se publica.

d) El(Los) Autor(es), garantizo(amos) que el documento en cuestión es producto de mi(nuestra) plena autoría, de mi(nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy(somos) el(los) único(s) titular(es) de la misma. Además, aseguro(aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Universidad de Cundinamarca por tales aspectos.

e) En todo caso la Universidad de Cundinamarca se compromete a indicar siempre la autoría incluyendo el nombre del autor y la fecha de publicación.

f) Los titulares autorizan a la Universidad para incluir la obra en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

g) Los titulares aceptan que la Universidad de Cundinamarca pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

h) Los titulares autorizan que la obra sea puesta a disposición del público en los términos autorizados en los literales anteriores bajo los límites definidos por la universidad en el "Manual del Repositorio Institucional AAAM003"

i) Para el caso de los Recursos Educativos Digitales producidos por la Oficina de Educación Virtual, sus contenidos de publicación se rigen bajo la Licencia Creative Commons: Atribución- No comercial- Compartir Igual.

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAR113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 4
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2020-12-10
		PAGINA: 7 de 8



j) Para el caso de los Artículos Científicos y Revistas, sus contenidos se rigen bajo la Licencia Creative Commons Atribución- No comercial- Sin derivar.



Nota:

Si el documento se basa en un trabajo que ha sido patrocinado o apoyado por una entidad, con excepción de Universidad de Cundinamarca, los autores garantizan que se ha cumplido con los derechos y obligaciones requeridos por el respectivo contrato o acuerdo.

La obra que se integrará en el Repositorio Institucional está en el(los) siguiente(s) archivo(s).

Nombre completo del Archivo Incluida su Extensión (Ej. PerezJuan2017.pdf)	Tipo de documento (ej. Texto, imagen, video, etc.)
1. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL TRAMO 2 DEL RÍO BOTELLO ENTRE LAS VEREDAS PRADO Y MOYANO, DEL MUNICIPIO DE FACATATIVÁ. pdf	Texto
2.	
3.	
4.	

En constancia de lo anterior, Firmo (amos) el presente documento:

APELLIDOS Y NOMBRES COMPLETOS	FIRMA (autógrafo)
KEVIN DANIEL ALFONSO JIMENEZ	

	MACROPROCESO DE APOYO	CÓDIGO: AAAr113
	PROCESO GESTIÓN APOYO ACADÉMICO	VERSIÓN: 4
	DESCRIPCIÓN, AUTORIZACIÓN Y LICENCIA DEL REPOSITORIO INSTITUCIONAL	VIGENCIA: 2020-12-10
		PAGINA: 8 de 8

DANIEL MARTIN	SANTIAGO	SIERRA	

Código Serie Documental (Ver Tabla de Retención Documental).

**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL TRAMO 2 DEL RÍO BOTELLO ENTRE
LAS VEREDAS PRADO Y MOYANO, DEL MUNICIPIO DE FACATATIVÁ.**

DANIEL SANTIAGO SIERRA MARTIN

KEVIN DANIEL ALFONSO JIMÉNEZ



UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
INGENIERÍA AMBIENTAL
FACATATIVÁ
2020

**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL TRAMO 2 DEL RÍO BOTELLO ENTRE
LAS VEREDAS PRADO Y MOYANO, DEL MUNICIPIO DE FACATATIVÁ.**

DANIEL SANTIAGO SIERRA MARTIN

KEVIN DANIEL ALFONSO JIMÉNEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de
Ingeniero Ambiental

Directores

ING. KAREL ALDRIN SANCHEZ HERNANDEZ

LIC. ANGELICA BRAVO BOHÓRQUEZ

UNIVERSIDAD DE CUNDINAMARCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
INGENIERÍA AMBIENTAL
FACATATIVÁ
2020

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecemos a Dios por darnos la fuerza y posibilidad de alcanzar un objetivo más.

También a nuestras familias y amigos ya que, con su apoyo, convirtieron las derrotas y desaciertos en nuevas oportunidades para conseguir abrir las puertas que permitieron la culminación del presente proyecto.

A todas las personas que de una u otra forma tocaron nuestra vida y nos convirtieron en las personas que hoy culminan una importante etapa para dar continuidad a nuevos caminos.

Y finalmente, destacamos y agradecemos el apoyo brindado por la Universidad de Cundinamarca por ofrecer un buen espacio de formación y contar con personas calificadas como la profesora Angélica Bravo y el ingeniero Karel Sánchez, los cuales fueron fundamentales en el desarrollo de la presente tesis.

RESUMEN

Una de las fuentes principales de agua del municipio de Facatativá es el Río Botello, el cual se ve afectado por eventos hidrológicos extremos asociados a factores tanto naturales como antrópicos. Para entender estos fenómenos, se llevó a cabo la modelación hidrodinámica en un tramo del Río Botello, que comprende las veredas Prado, Moyano y parte del sector urbano del municipio. Para esto, se contó con información geográfica y un modelo digital de elevación, así como con información recolectada en campo para caracterizar la zona de estudio. Luego, Mediante el software HEC-RAS, se evaluaron en 1D y 2D los periodos de retorno estimados a partir de una distribución de probabilidad de los registros históricos de caudal. Igualmente, en 1D se simularon los caudales más bajos registrados correspondientes a los años 1980 y 1997. Se encontraron 5 zonas de inundación aguas arriba del tramo que afectan hasta 2,91 Ha de zonas agrícolas, y niveles mínimos en un rango de 18 cm y 40 cm a lo largo del cauce. Con estos resultados se hace un aporte importante de información antes no disponible y la cual puede servir de insumo para la toma de decisiones sobre la gestión del recurso hídrico y la gestión del riesgo en el territorio.

Palabras clave: Eventos hidrológicos extremos, modelación hidrodinámica, Gestión del recurso hídrico, gestión del riesgo, HEC-RAS.

ABSTRACT

One of Facatativá's mayor water sources is Botello river, which is affected by Extreme hydrological events related to natural and anthropic factors. In order to understand these phenomena, it was built a hydrodynamic model to assess a reach of Botello River, which covers part of the urban sector, and rural areas of Prado and Moyano, in Facatativá. For this, it was characterized the studying area using available geographical information and a Digital Elevation Model, as well as data obtained by field work. Furthermore, return periods for flood events were estimated by a probability distribution of historical flow data. Therefore, using HEC-RAS software, 1D and 2D assessments of flood events were performed. In addition, minimum flows, occurred in 1980 and 1997, were assessed through a 1D simulation. As results, 5 flood areas were identified upstream the reach, affecting up to 2,91 Ha of agricultural areas; also, water surface elevations for minimum flows, which are between 18 cm and 40 cm along the reach. These results produce important information, not available before, that could serve as basis in decision making about water resources management and risk management.

Key words: Extreme hydrological events, hydrodynamic modeling, water resources management, risk management.

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	11
2.	ANTECEDENTES	12
3.	PROBLEMÁTICA	14
4.	JUSTIFICACIÓN	15
5.	OBJETIVOS	16
5.1.	General.....	16
5.2.	Específicos	16
6.	METODOLOGÍA GENERAL	17
7.	CASO DE ESTUDIO	17
7.1.	Introducción	17
7.2.	Metodología.....	17
7.3.	Ubicación área de estudio.....	18
7.4.	Descripción del tramo	19
7.5.	Información hidrológica.....	20
7.5.1.	<i>Información de precipitación</i>	20
7.5.2.	<i>Información de caudales</i>	21
7.5.3.	<i>Identificación de eventos extremos</i>	21
7.6.	Hidrogramas.....	23
7.7.	Datos de campo.....	26
7.7.1.	<i>Batimetría</i>	26
7.7.2.	<i>Caudal</i>	27
8.	MODELACIÓN HIDRÁULICA	29
8.1.	Introducción	29
8.2.	Fundamento teórico	29
8.3.	Metodología.....	34
8.4.	Herramientas de modelación.....	34
8.5.	Métodos de Cálculo.....	35
8.5.1.	<i>Método del paso estándar</i>	35
8.5.2.	<i>Diferencias finitas</i>	36
8.5.3.	<i>Volúmenes finitos</i>	37
8.6.	Geometría.....	37
8.7.	Condiciones de contorno.....	38
8.7.1.	<i>Pendiente</i>	38

8.7.2.	<i>Coeficiente de rugosidad de Manning (n)</i>	38
8.7.3.	<i>Hidrogramas</i>	40
8.8.	Análisis de sensibilidad.....	40
8.10.	Modelación	43
8.10.1.	<i>Modelación unidimensional de eventos extremos</i>	43
8.10.2.	<i>Modelación bidimensional de eventos máximos</i>	44
8.11.	Resultados y análisis	45
8.11.1.	<i>Modelación 1D</i>	46
8.11.2.	<i>Modelación 2D</i>	50
9.	CONCLUSIONES	53
10.	RECOMENDACIONES	55
11.	DIVULGACIÓN	56
12.	REFERENCIAS	57
13.	ANEXOS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de segmentación del tramo a evaluar.	12
Figura 2. Descripción de la metodología para la caracterización del caso de estudio	17
Figura 3. Fuentes Superficiales de Facatativá	18
Figura 4. Mapa del tramo a evaluar.	19
Figura 5. Diagrama del comportamiento anual de precipitación.....	20
Figura 6. Registros de caudal de los años 2006, 2007 y 2009 de la estación El Recreo	21
Figura 7. Ajuste entre la distribución Gumbel y la probabilidad empírica de la serie de datos de caudales máximos.	22
Figura 8. Interpretación gráfica de un hidrograma unitario.....	23
Figura 9. Hidrograma unitario adimensional	24
Figura 10. Visualización micro-cuenca quebrada Yerbabuena.	25
Figura 11. Hidrogramas de eventos de caudales máximos.....	25
Figura 12. Estaciones para la medición de batimetrías.....	26
Figura 13. Batimetría elaborada con estación total (izquierda), y con nivel topográfico (derecha).	27
Figura 14. Medición del área transversal.	28
Figura 15. Diagrama conceptual de fundamentos teóricos la modelación matemática ..	30
Figura 16. Relación gráfica de flujos unidimensional y multidimensional.	31
<i>Figura 17. Flujograma del proceso de modelación</i>	34
Figura 18. Derivadas direccionales de las celdas	36
Figura 19. Geometría empleada en la modelación	37
Figura 20. Pendiente obtenida a partir de HEC-RAS	38
Figura 21. Vista satelital del área de estudio	40
Figura 22. Visualización 3D de las inundaciones para los periodos de retorno de 5, 43 y 100 años	46
Figura 23. Mapa del área inundada para los periodos de retorno.	47
Figura 24. Perfil transversal obtenida en la modelación en 1D para los periodos de retorno	47
Figura 25. Perfil transversal obtenida en la modelación en 1D para los periodos de retorno	48
Figura 26. Niveles de agua para la temporada seca.....	50
Figura 27. Mapa de las áreas inundadas obtenidas a partir de a modelación 2D.	51
Figura 28. Distribución de velocidades para la modelación 2D	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caudales calculados por el método Gumbel para diferentes periodos de retorno.....	23
Tabla 2. Parámetros iniciales para el cálculo de un hidrograma unitario.....	65
Tabla 3. Parámetros morfológicos quebrada Yerbabuena.....	24
Tabla 4. Resultados de las mediciones	27
Tabla 5. Coeficientes de variación de los tiempos de recorrido de los flotadores observados en campo.	28
Tabla 6. Resultado de las variables de medición en campo	29
Tabla 7. Criterios para el coeficiente de manning	39
Tabla 8. Análisis de sensibilidad con la pendiente	41
Tabla 9. Análisis de sensibilidad con el coeficiente de manning	42
Tabla 10. Resumen de los datos de calibración del modelo	43
Tabla 11. Área inundada en 1D para los diferentes periodos de retorno	46
Tabla 12. Resumen de los datos obtenidos en la evaluación de los periodos de retorno.	49
Tabla 13. Resumen de los datos obtenidos en la simulación de sequía en 1D.....	50
Tabla 14. Resumen de las áreas inundadas en la modelación 2D.....	52

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Cartera de campo de la estación 1 del levantamiento de batimetría con nivel topográfico.....	62
Anexo 2. Cartera de campo de las estaciones 14 y 15 del levantamiento de batimetría con estación total.....	63
Anexo 3. Coordenadas XY de los perfiles batimétricos en las estaciones 18, 19, 20 y 21.	63
Anexo 4. Cartera de campo para la medición del parámetro hidráulicos por el método de flotadores y vadeo.	64
Anexo 5. Vista en 3D de las sesiones transversales, inundación periodo de retorno 43 años en 1D régimen permanente.	65
Anexo 6. Resumen extendido del proceso de calibración del modelo.....	67

1. INTRODUCCIÓN

Dada la ocurrencia de eventos extremos de inundaciones y sequías, mediados por factores climatológicos, orográficos, antrópicos, entre otros, se hace determinante el desarrollo de estrategias y herramientas que permitan una adecuada gestión del recurso hídrico y en últimas, prevenir los impactos derivados de dichos eventos.

El municipio de Facatativá cuenta con una fuente limitada de recurso hídrico, el Río Botello es una de ellas; el cual durante las temporadas de sequía generan problemas de abastecimiento, y en temporada húmeda riesgos de inundaciones (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2019). Puntualmente, desde el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del 2002, se plantea como uno de los objetivos ambientales, el manejo adecuado de los recursos naturales del municipio, donde la conservación es de especial relevancia desde la estructura ecológica y en el potencial de oferta hídrica (Oficina de Planeación Municipal, Municipio de Facatativá, 2002). Por lo anterior, es importante generar iniciativas de investigación que mejoren el entendimiento de los sistemas hídricos y así fortalecer los procesos para su gestión y ordenamiento.

Desde el semillero Axioma de la Universidad de Cundinamarca se ha generado una iniciativa que busca fortalecer el conocimiento sobre la dinámica hídrica del Río Botello. Dicha iniciativa se estructuró en tres fases por localización (parte alta, media y baja), como se representa en la figura 1. En el tramo 1, evaluado por Antonio & Monroy (2015), y el tramo 3 evaluado por Marulanda & Rodriguez (2020), se describe el comportamiento hidrodinámico y la calidad de agua del río Botello aguas arriba y en el sector urbano. La presente investigación tiene el objetivo de determinar el comportamiento hidrodinámico (unidimensional y bidimensional) de la sub-cuenca del río Botello en el tramo 2 mediante la herramienta HE-RAS.

Tramo comprendido entre las veredas Prado, Moyano y parte del área urbana del municipio de Facatativá.

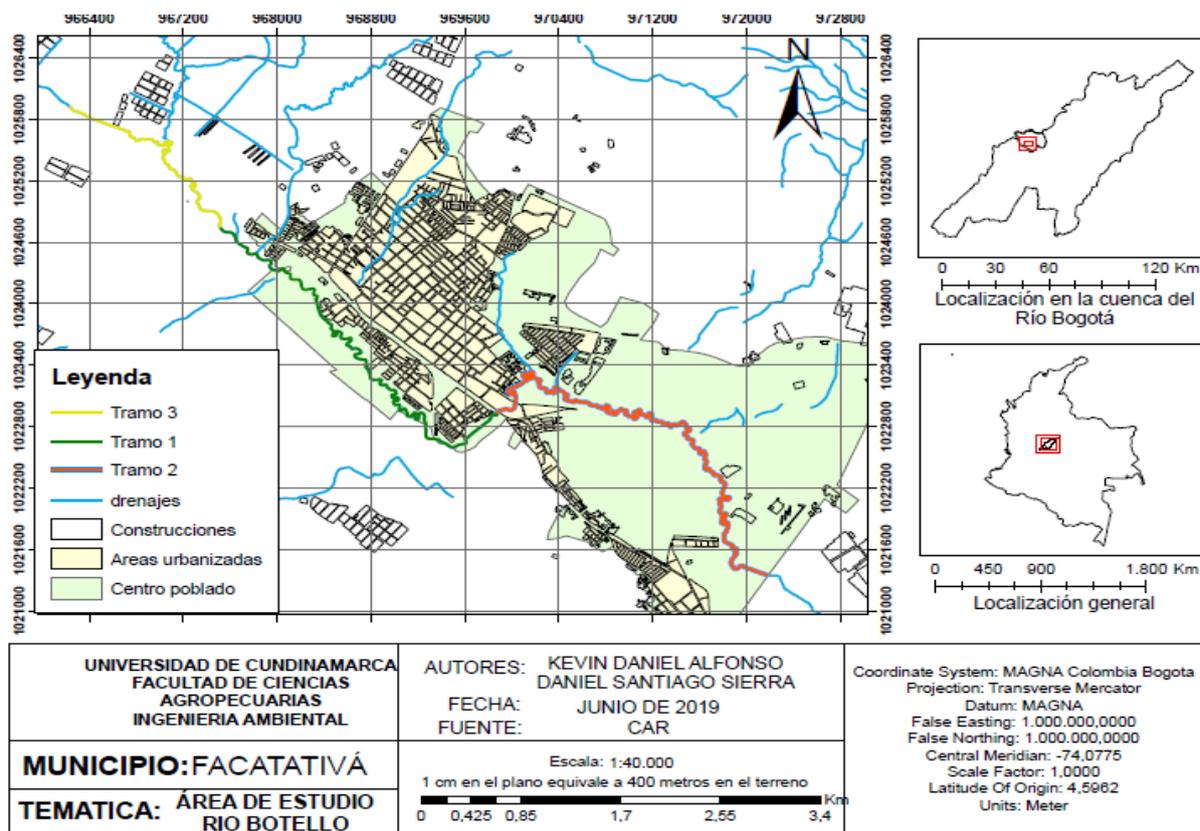


Figura 1. Mapa de segmentación del tramo a evaluar.
 Elaborado por: Autores. Fuente: Geo visor de la CAR.

2. ANTECEDENTES

El campo de la modelación hidráulica cada vez cobra mayor importancia en los procesos de toma de decisiones, al constituirse como una herramienta que permite caracterizar y analizar las transformaciones que ocurren en los sistemas hídricos mediante la simulación de diferentes escenarios, lo que conduce a una adecuada gestión del recurso y de sus riesgos asociados (Buitrago, Hernández, & Gonzáles, 2018).

Dadas sus ventajas, la modelación hidráulica se ha aplicado en múltiples estudios de caso, por ejemplo, el protocolo de Modelación hidrológica e hidráulica del IDEAM (2018) menciona varios estudios de caso realizados en Colombia, empleados para la evaluación de temas como análisis de amenazas, identificación de zonas de inundaciones, pronósticos de niveles para alertas tempranas, alternativas de intervención, planificación y gestión, entre otros. Dichos casos fueron evaluados mediante diversas herramientas de modelación como lo son SOBEK RURAL R2.13, MIKE 11 y HEC RAS 5. Lo anterior deja ver la variedad de

escenarios que se pueden abarcar, así como la disponibilidad de diferentes herramientas para la modelación de cauces naturales.

Un ejemplo particular es el de la modelación del río Frío en el municipio de Chía, Cundinamarca, elaborada por Torres Quintana (2017), utilizando el software HEC-RAS para la determinación de zonas de inundación. En su trabajo, evaluó las inundaciones para diferentes periodos de retorno definidos mediante el método de distribución de Gumbel y Pearson III, y empleando un terreno basado en curvas de nivel para definir la geometría del cauce. A partir de los resultados de este proyecto se concluyó que, solo las inundaciones modeladas con los caudales de los periodos de retorno de 50 y 100 años, afectaba el casco urbano del municipio de Chía.

Respecto al Río Botello en Facatativá, Antonio y Monroy (2015), llevaron a cabo la modelación del tramo 1, que comprende la cabecera municipal, con el objetivo de determinar el comportamiento del río durante temporadas seca y seca-lluviosa. Los autores concluyen que en la zona denominada como punto 9 se presentan inundaciones cada vez que ocurren precipitaciones intensas. Así mismo, concluyen que, después de las inundaciones presentadas en el 2006, las adecuaciones hidráulicas realizadas por la administración municipal han reducido la ocurrencia de dichos eventos. Por otro lado, evaluaron la calidad del agua en el tramo e identificaron el impacto antrópico sobre el río, provocado principalmente por las actividades agropecuarias e industriales de la zona.

En línea con la investigación anterior, Marulanda y Rodríguez (2020), realizaron la modelación en 1D, y evaluaron la calidad del agua en el tramo 3 del Río Botello, ubicado aguas arriba de la zona urbana. Evaluaron el comportamiento del río en épocas de sequía, altas lluvias, y de transición, a partir de datos de campo, donde no evidenciaron casos donde se presenten desbordamientos a lo largo del tramo. En cuanto a la calidad de agua determinaron que en el tramo no se cumplen con los límites permisibles para aguas superficiales en el 50% de parámetros de calidad evaluados.

3. PROBLEMÁTICA

En 2015, mediante el decreto 386 se declaró alerta roja en el municipio debido a que la disponibilidad de agua llegó a ser menor al 45% por lo que fue necesario tomar medidas para el racionamiento del recurso (Duque, 2015). De forma similar, en agosto de 2020, se declara alerta naranja mediante decreto 178 de 2020 por las condiciones hidrometeorológicas, el bajo nivel de los embalses y la alta demanda de agua (Alcaldía Municipal de Facatativá, 2020). Por otro lado, en el Plan Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (PMGRD) de Facatativá del 2019, se hace referencia a 10 eventos de emergencias por inundaciones ocurridas entre 2006 y 2018 con un saldo de 2.689 personas afectadas, además de afectaciones a viviendas, cultivos, entre otros bienes (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2019).

Los anteriores ejemplos son un reflejo de la problemática que se presenta en el municipio respecto al recurso hídrico y su comportamiento durante la ocurrencia de eventos de precipitación extremos asociados a factores climatológicos como temporadas de lluvias más intensas, fenómenos de la niña y cambio climático (Vega, 2011).

A lo anterior, se suman otros factores que favorecen la ocurrencia de estos fenómenos o que intensifican sus efectos, por ejemplo, el taponamiento de cauces por mala disposición de residuos o la deforestación en los nacimientos de los ríos y quebradas son factores que favorecen la ocurrencia de inundaciones (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2019). Por otra parte, el aumento de la población y la contaminación de las fuentes de agua son factores que, en épocas de sequía, afectan con mayor intensidad la disponibilidad del recurso.

Dada esta situación, es importante generar iniciativas que permitan comprender adecuadamente el comportamiento del río Botello, y así garantizar una suficiente oferta de agua y una mejor respuesta a eventos extremos.

4. JUSTIFICACIÓN

Desde el POT (Alcaldía Municipal de Facatativá, 2020) y el Plan de Gestión del Riesgo el municipio de Facatativá (Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2019), se reconoce la problemática que se genera durante eventos hidrológicos extremos y la necesidad de implementar estrategias para gestionar sus efectos; por esta razón, resulta importante el desarrollo de investigaciones que contribuyan al entendimiento del comportamiento de los cauces naturales, como el Río Botello, pues permiten fortalecer los procesos de toma de decisión de los organismos de control municipales y regionales en torno a la prevención y mitigación de riesgos.

Al localizar y estimar la extensión de las zonas vulnerables a ser inundadas, se da paso a una implementación más efectiva de las estrategias de prevención y/o mitigación. Además, los resultados de esta investigación pueden servir de base para la construcción e implementación de un sistema de monitoreo y de alerta temprana que permita mejorar la respuesta de las autoridades ante la amenaza de eventos hidrológicos extremos en el municipio.

Con este trabajo, también se da respuesta a los compromisos internacionales y nacionales sobre la responsabilidad e importancia de desarrollar proyectos investigativos que promuevan la conservación, la gestión y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales, y la mitigación y reducción de los impactos ambientales.

Finalmente, este trabajo generará aportes en el ámbito científico e investigativo relacionados con la modelación de procesos ambientales, aportes pertinentes para impulsar acciones contra muchas de las problemáticas ambientales, que, además, puede fortalecer las bases para futuras investigaciones que contribuyan al mejoramiento de la gestión del recurso hídrico.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Determinar el comportamiento hidrodinámico del tramo 2 de la sub-cuenca del Río Botello (Río Bojacá) que comprende las veredas Prado, Moyano y parte del área urbana de Facatativá.

5.2. Específicos

- Identificar las características topográficas e hidráulicas del tramo 2, comprendido entre las veredas Prado, Moyano y parte del área urbana de Facatativá.
- Determinar los caudales máximos y mínimos multi-temporales a partir de registros históricos de la estación limnimétrica de la zona.
- Calibrar el modelo hidráulico con base en los datos de campo.
- Identificar las zonas de inundación y los niveles máximos de agua en el tramo 2 resultantes de la modelación en 1D y 2D.
- Identificar los niveles mínimos de agua en el tramo 2 resultantes de la modelación en 1D.

6. METODOLOGÍA GENERAL

La presente investigación es de carácter descriptivo, ya que se realizó una caracterización de la dinámica hídrica en la cuenca baja del río Botello (tramo 2), mediante el uso de software especializado. El diseño metodológico implementado involucró tres fases: la fase I, donde se construyó una base de información tanto práctica como teórica, sobre la cual se sustentaron los procesos de modelación, la fase II, que implicó todo lo relacionado con el manejo y procesamiento de la información recolectada, orientado a la construcción, validación y calibración del modelo y la consecuente modelación de los escenarios de caudales mínimos e inundaciones, y finalmente, en la fase III, se analizaron los resultados obtenidos, identificando manchas de inundación, niveles máximos y mínimos, velocidades, entre otros, y se discuten sus efectos en el área de influencia.

7. CASO DE ESTUDIO

7.1. Introducción

En este capítulo se exponen las principales características del caso de estudio, las cuales se asocian a la ubicación geográfica, la información hidrológica, el levantamiento batimétrico y las actividades de aforo de caudal.

7.2. Metodología

En el desarrollo de esta metodología se buscó definir las características geográficas, topográficas e hidrológicas de la zona de estudio, utilizando tanto información existente como información obtenida en campo como se expone en la figura 2.

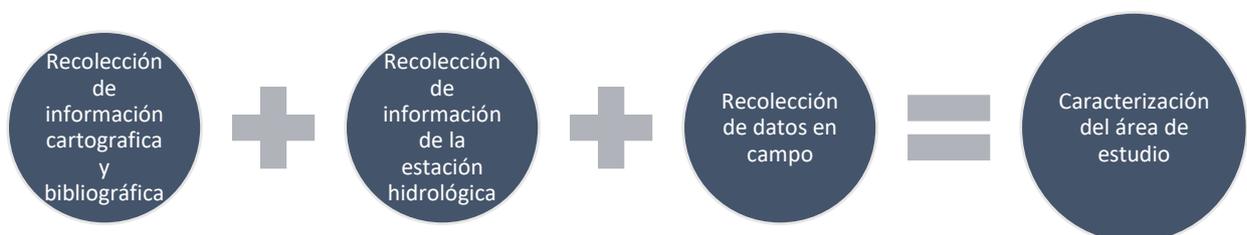


Figura 2. Descripción de la metodología para la caracterización del caso de estudio
Fuente: Autores

7.3. Ubicación área de estudio

El área de estudio se encuentra sobre la cuenca del río Botello, localizada dentro de la jurisdicción del municipio de Facatativá (Cundinamarca); nace en el cerro Peñas del Aserradero, en la vereda La Tribuna, a una altura de 3.000 m s. n. m. Su recorrido es de aproximadamente 20 km e irriga las veredas La Tribuna, La Selva, Los Manzanos y Pueblo Viejo del municipio de Facatativá Según Hernández (2019).

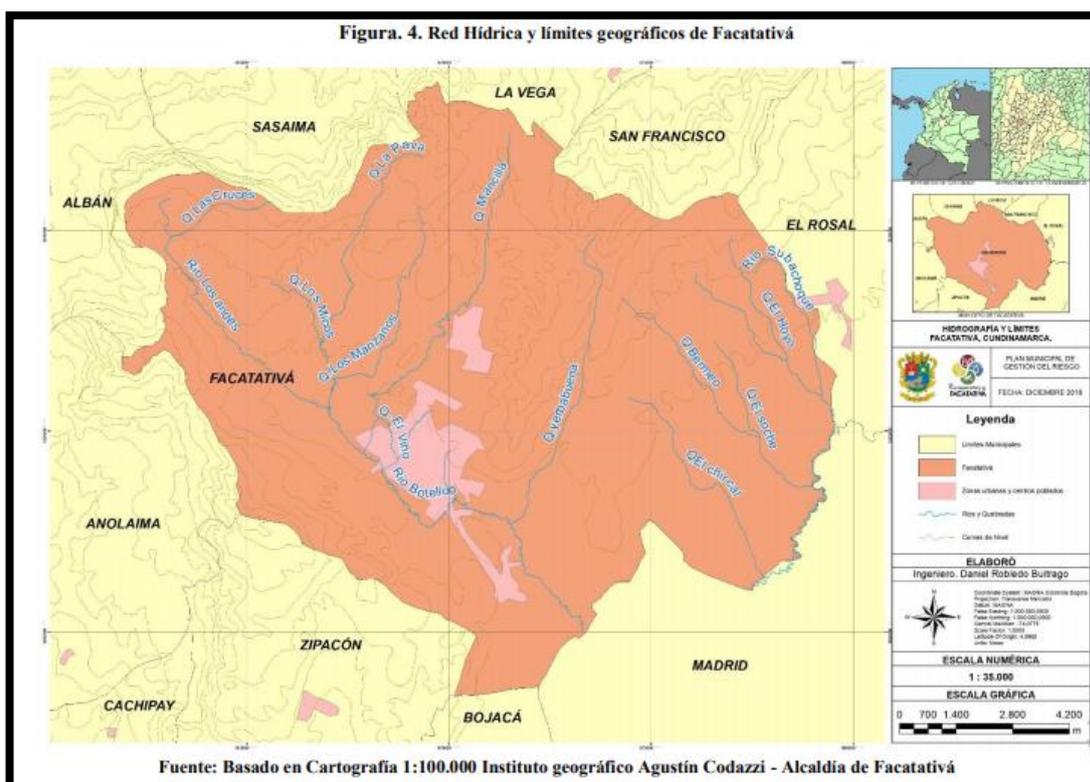


Figura 3. Fuentes Superficiales de Facatativá

Fuente: Plan de gestión del riesgo de Facatativá 2019

La micro-cuenca del Río Botello pertenece al complejo de drenajes de la sub-cuenca del Río Balsillas, y esta a su vez, pertenece a la cuenca del Río Bogotá (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2006). El área de drenaje del río Botello dentro del municipio de Facatativá se estima en 10.893 Ha, según la Empresa De Aguas de Occidente Cundinamarquez SAS ESP (citado en Figueroa, 2015), y tiene como afluentes a las quebradas: La Pava, La Laja, Mancilla, El Vino, Los Manzanos y Yerbabuena como se evidencia en la figura 3, así, como algunos drenajes directos que aportan caudal adicional al río y conforman las fuentes de

agua del acueducto municipal (Secretaria de Cultura y Juventud de Facatativá, 2010).

7.4. Descripción del tramo

El tramo 2 como se muestra en la figura 4 (color violeta) se extiende desde el punto conocido localmente como el puente de los micos, saliendo de Facatativá, hasta el centro poblado de Cartagenita, teniendo una longitud aproximada de 5.12 km, ubicándose aguas abajo del tramo 1.

Adicionalmente, el tramo cuenta con la presencia de un río tributario correspondiente a la quebrada Yerbabuena la cual cuenta con una extensión de 6,719 km.

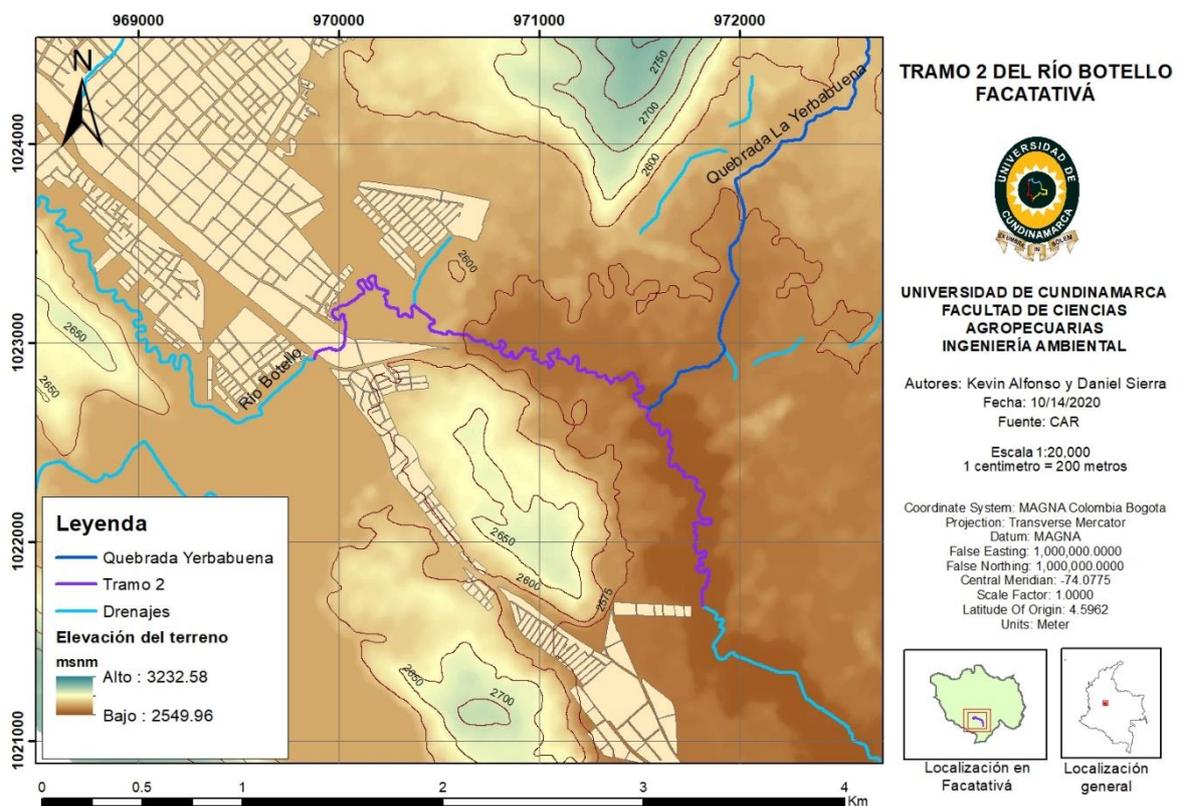


Figura 4. Mapa del tramo a evaluar.
Elaborado por: Autores. Fuente: Geo visor de la CAR.

Como insumos para la caracterización inicial del tramo se contó con una base de datos cartográfica escala 1:25.000 recuperada del portal web de la CAR, (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2017) y un Modelo Digital de Elevación (DEM) de resolución espacial de 20 m, obtenido de la plataforma LandViewer (EOS data analytic, INC, 2020).

De acuerdo con la caracterización topográfica de la Sub-Cuenca del Río Balsillas, descrita en el POMCA del río Bogotá del 2006 (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2006), la cabecera municipal de Facatativá presenta un relieve plano y ligeramente inclinado con un grado de inclinación de entre 0 y 3%.

7.5. Información hidrológica

En este apartado se presenta inicialmente el histórico de datos de caudal registrados por la estación limnimétrica EL RECREO de la CAR, ubicada dentro del tramo evaluado. A partir de dicha información se definen los eventos extremos para luego establecer los hidrogramas y los periodos de retorno.

7.5.1. Información de precipitación

Para obtener los datos de precipitación de la zona de estudio, se solicitó a la CAR por medio de correo electrónico, información de la estación pluviométrica El Tesoro [2120069]. Entre la información entregada, se encuentran registros diarios de precipitación a desde 1971 hasta el año 2019.

Tomando como referencia los registros de precipitación 2006, 2007 y 2009 (figura 5), se pudo observar que, en el año, se presentan dos temporadas de altas lluvias, una entre marzo y junio, y otra entre octubre y diciembre; por otro lado, las temporadas secas se pueden presentar dos veces al año entre julio y septiembre, y entre enero y marzo.

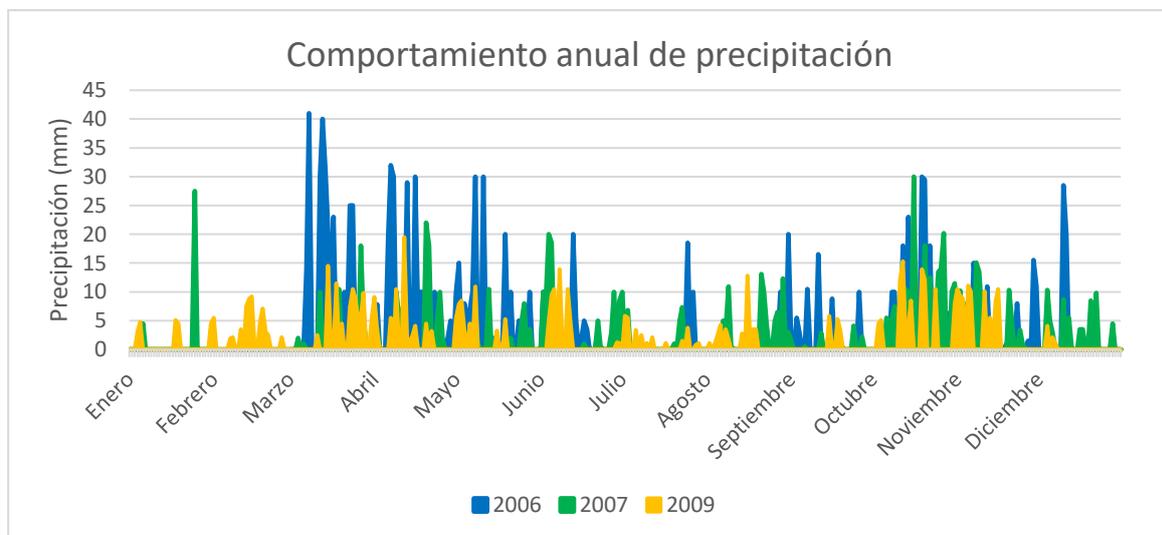


Figura 5. Diagrama del comportamiento anual de precipitación
Fuente: Hecho por autores con datos de la estación El Tesoro de la CAR

7.5.2. Información de caudales

Para obtener los datos de caudal existentes del tramo, se solicitó a la CAR por medio de correo electrónico, información de la estación limnimétrica EL RECREO [21207560], la cual registra datos sobre el comportamiento hidrodinámico. Entre la información entregada por la corporación se encuentran registros diarios de caudal desde 1966 hasta el año 2019. Además, se entregan registros históricos mensuales de caudales y niveles máximos, medios y mínimos de más de 20 años de la misma estación.

Tomando como referencia los registros de caudal de los años 2006, 2007 y 2009 (figura 6), se observó que el comportamiento de los caudales coincide con las épocas de altas y bajas lluvias.

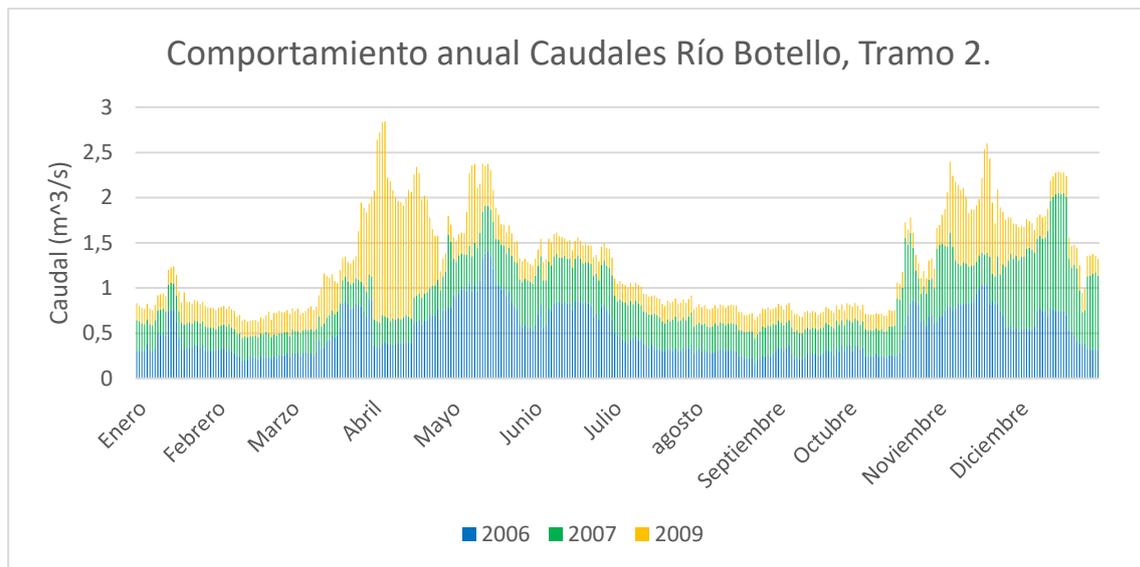


Figura 6. Registros de caudal de los años 2006, 2007 y 2009 de la estación EL RECREO
Fuente: (CAR, 2020)

7.5.3. Identificación de eventos extremos

7.5.3.1. Distribuciones de probabilidad

Las distribuciones de probabilidad presentan el conjunto de todos los valores que puede tomar una variable aleatoria, y se pueden asociar a una función que permite calcular la probabilidad de que dicha variable tome o supere un valor dado. (Bacchini, Vásquez, Bianco, & García 2018; Walpole, Myers, Myers, & Kenying Ye, 2012). La aplicación de métodos de distribución de probabilidad en la evaluación de variables hidrológicas permite predecir la ocurrencia de eventos extremos como crecientes o sequías, lo cual es útil, por ejemplo, para el diseño y

planeación de estructuras hidráulicas (Chereque, 1989). Aguilera (2007) explica algunos de los métodos de distribución más aplicados en hidrología, entre los cuales están el método de distribución normal, el Logarítmico-Normal, el de Distribución Pearson Tipo III y Gumbel.

De estas se utilizó el método de Gumbel dado que es frecuentemente usado en el análisis de frecuencia hidrológico para valores extremos, los cuales representan el comportamiento de crecientes y sequías (García, 2013).

7.5.3.2. Caudales máximos

A partir de la información de la estación limnimétrica EL RECREO, 42 años de registros históricos de caudales diarios fueron procesados para determinar los caudales máximos en diferentes periodos de retorno estimados a partir de la distribución Gumbel, su ajuste se muestra en la figura 7.

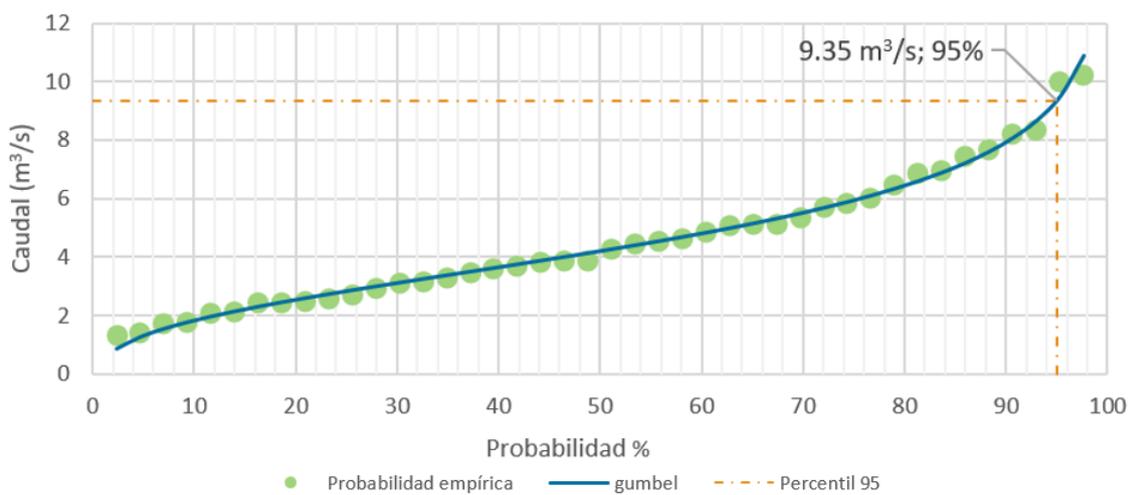


Figura 7. Ajuste entre la distribución Gumbel y la probabilidad empírica de la serie de datos de caudales máximos.
Fuente: Autores

En la distribución se definió el percentil 95 que indica que, aquellos caudales iguales o superiores a 9,35 m³/s, representan los eventos más extremos. Los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno se establecen en la tabla 1.

Periodo de retorno (años)	Caudal (m³/s)
2	4,20
5	6,44
10	7,92
25	9,80

43	10,89
50	11,19
100	12,57

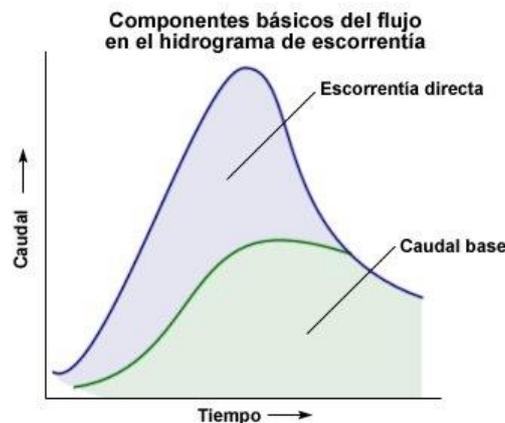
**Tabla 1. Caudales calculados por el método Gumbel para diferentes periodos de retorno.
Fuente: Autores**

7.5.3.3. Caudales mínimos

Para identificar los eventos extremos de mínimos caudales se aplicó el método de la distribución de Gumbel a los registros mínimos anuales de caudal de la estación EL RECREO. Posteriormente se hallaron aquellos datos que se encontraban por debajo del percentil 5 ($0,01\text{m}^3/\text{s}$) con la finalidad de asegurar que el dato usado en la modelación este muy por debajo de la media de la distribución.

7.6. Hidrogramas

Según (Ayuso, Montesinos, & Peña, 1994) “este es un hidrograma de escorrentía directa originado por un volumen de 1 mm de precipitación efectiva uniforme sobre una cuenca durante un periodo de tiempo determinado”, está conformado principalmente por dos partes, El caudal base, y la escorrentía directa como se representa en la figura 8.



**Figura 8. Interpretación gráfica de un hidrograma unitario.
Fuente: (Andrade, 2020).**

Para su cálculo existen varias metodologías como la SNYDER o la CLARK, sin embargo el más usado y extendido es el del Servicio de Conservación de Suelos (Campos A. , 2016), el cual se basa en comprender la dinámica hidrográfica a partir de parámetros morfológicos de la cuenca, según (Kumar, 2003).

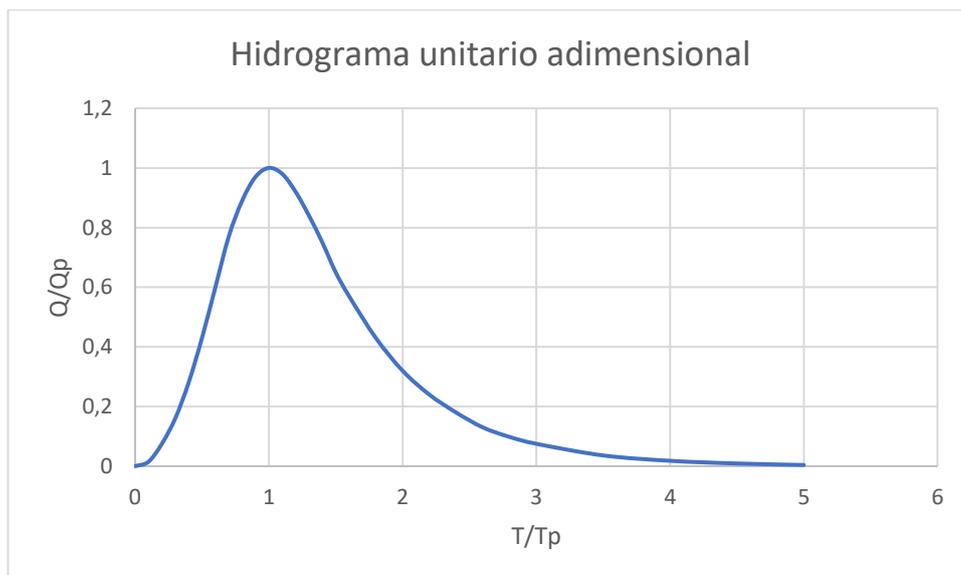


Figura 9. Hidrograma unitario adimensional
Fuente: (Campos A. , 2016).

Al no existir registros de caudal de la quebrada Yerbabuena, se empleó el método del hidrograma unitario del SCS para estimar el caudal que aporta esta microcuenca, a partir de sus parámetros morfológicos; se empleó la relación Q/Q_p y T/T_p del hidrograma unitario adimensional (figura 9) para obtener el hidrograma que representa un evento de crecida; la metodológica se explica con más detalle en el anexo 5. Los parámetros morfológicos (longitud del cauce, área de la cuenca, etc.) fueron definidos con base en la cartografía recolectada y mediante el programa ArcGIS 10 (ver tabla 2).

Parámetros morfológicos quebrada Yerbabuena	
área (km ²)	7,193
longitud (m)	6719
delta H (m)	307
Pendiente	0,046
T. de concentración (h)	0,944
T. retardo (h)	0,566
Duración lluvia (h)	1,943
T. pico (h)	1,538
T. base (h)	4,101
Q pico (m³/s)	0,973

Tabla 2. Parámetros morfológicos quebrada Yerbabuena
Fuente: Aproximaciones hechas por los autores a partir el software ArcGis 10.3

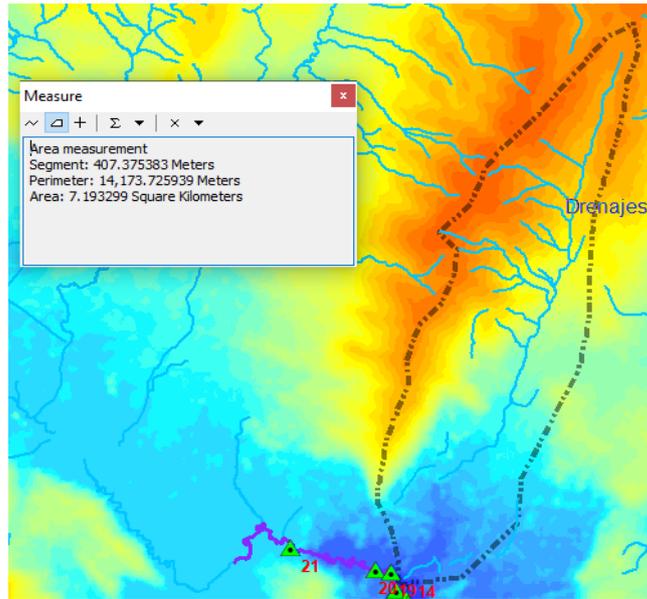


Figura 10. Visualización micro-cuenca quebrada Yerbabuena.
Fuente: Aproximaciones hechas por los autores a partir el software ArcGis 10.3

Los hidrogramas del tramo 2 se construyeron con el mismo método, tomando como caudal pico los caudales máximos registrados por la estación limnimétrica EL RECREO en 1991 y 2011 para una duración del evento de 8 horas aproximadamente. Se evalúan dichos eventos dado que en 1991 se registró el caudal más alto en el tramo, y en el 2011 se presentó la época invernal más intensa a nivel regional (CAR, s.f.), por lo que son de interés para evaluar inundaciones.

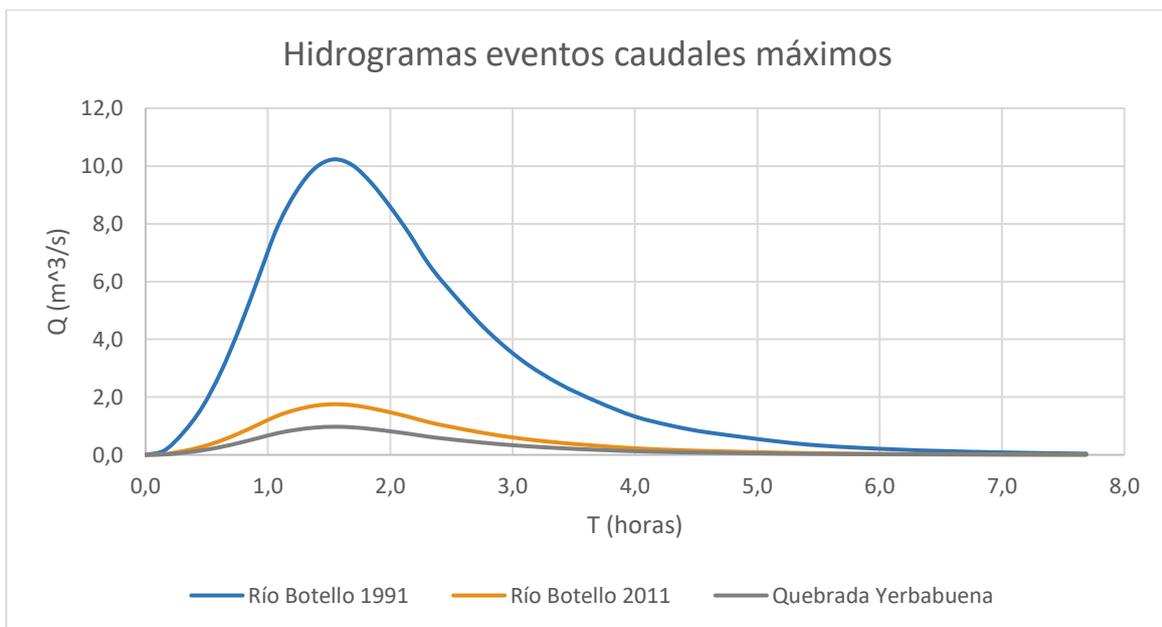


Figura 11. Hidrogramas de eventos de caudales máximos
Fuente: Autores

Los hidrogramas del tramo 2 del cauce tributario se representan en la figura 11 y sus parámetros principales se muestran en la tabla 3.

Escenario	Q pico (m ³ /s)	Tiempo del evento	Periodo de retorno
1991	10,23	7,7 horas	43 años
2011	1,753		2,53 años
Tributario	0,973		N/A

Tabla 3. Descripción de los hidrogramas para modelación 2D.
Fuente: Autores

7.7. Datos de campo

7.7.1. Batimetría

La elección de la ubicación de las estaciones para el levantamiento del terreno obedeció a factores de accesibilidad a la zona; las estaciones georreferenciadas se muestran en la figura 12.

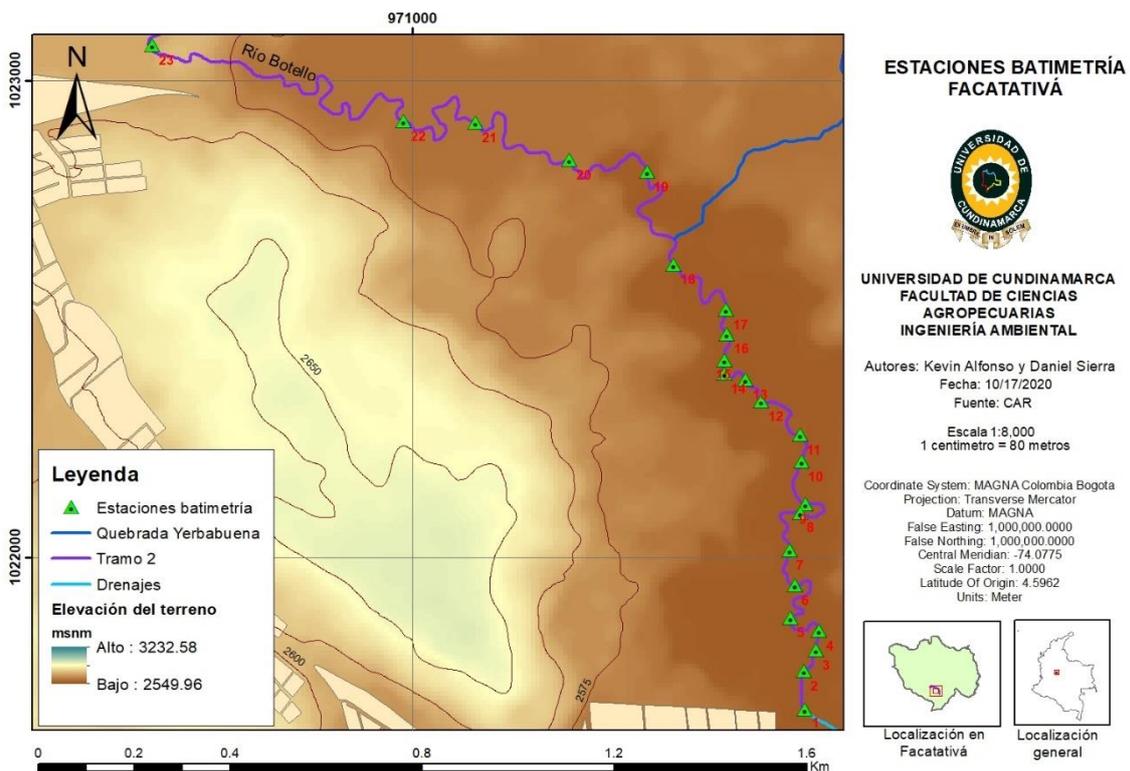


Figura 12. Estaciones para la medición de batimetrías
Fuente: Autores

Para el levantamiento de información batimétrica se realizaron dos jornadas de levantamiento de datos, donde se levantaron datos en 23 estaciones con la metodología de nivelación con estación total y prisma; el levantamiento se detalla en la tabla 4, y se presentan evidencias fotográficas en la figura 13.

Jornada	Puntos muestreados	Método de Muestreo
1	7	Nivel topográfico
2	16	Estación total

Tabla 4. Jornadas de toma de datos para el levantamiento batimétrico
Fuente: Autores

De esta actividad es importante resaltar que se tuvieron en cuenta los puntos de mayor elevación que se presentaron a cada lado del cauce.



Figura 13. Batimetría elaborada con estación total (izquierda), y con nivel topográfico (derecha).
Fuente: Autores

7.7.2. Caudal

Para la obtención de los datos de caudal se realizaron los aforos por el método de flotadores, mientras que el área transversal fue determinada por el método de vadeo con ayuda de una barra aforada. Las mediciones se tomaron en dos estaciones, una, aguas arriba en las coordenadas 4.804492, -74.342428 y otra, aguas abajo en las coordenadas 4.792320, -74.331629 (WGS84).

Parámetros			
Estación	Fecha	Longitud (L)	Tiempo promedio
Aguas arriba	8/3/2020	8,21 m	65,32 s
	8/19/2020		62,22 s
Aguas abajo	8/3/2020	14,62 m	70,81 s
	8/19/2020		70,79 s

Tabla 5. Resultados mediciones
Fuente: Autores



Figura 14. Medición del área transversal.
Fuente: Autores

En cada jornada se tomaron más de 4 muestras de tiempo (ver anexo 4), las cuales fueron promediadas; Los resultados de dichas mediciones se observan en la tabla 5.

Se evaluó la representatividad de los tiempos promedio que tardaron los flotadores en recorrer los tramos definidos en cada estación con el coeficiente de variación (ver tabla 6). Los datos detallados se muestran en el anexo 4.

Estación	Fecha	Tiempo promedio	Coefficiente de variación
Aguas arriba	8/3/2020	65,32 s	5,8%
	8/19/2020	62,22 s	4,7%
Aguas abajo	8/3/2020	70,81 s	7,7%
	8/19/2020	70,79 s	3,2%

Tabla 6. Coeficientes de variación de los tiempos de recorrido de los flotadores observados en campo.
Fuente: Autores

Para el cálculo del área transversal (A), se ubicaron las coordenadas espaciales tomadas por el método de vadeo en un plano cartesiano formando el polígono correspondiente para luego resolver el área con la ecuación del área de Gauss, disponiendo las coordenadas como se establece en la ecuación 1.

$$A = 0.5 * \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_1 & y_2 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & y_n \\ x_1 & y_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Con los parámetros necesarios ya definidos se procedió a calcular la velocidad (V) y el caudal (Q) de acuerdo con las ecuaciones 2 y 3. Los resultados se muestran en la tabla 7.

$$V = \frac{L}{t} \quad (2) \quad Q = A * V \quad (3)$$

Estación	Fecha	Velocidad (m/s)	Área (m ²)	caudal (m ³ /s)
Aguas arriba	8/3/2020	0,125	0,166	0,021
	8/19/2020	0,132	0,18	0,025
Aguas abajo	8/3/2020	0,21	1,22	0,25
	8/19/2020	0,21	1,39	0,29

Tabla 7. Resultado de las variables de medición en campo

Fuente: Autores

8. MODELACIÓN HIDRÁULICA

8.1. Introducción

En este capítulo se plantea una base teórica de los procesos y las principales herramientas de modelación hidráulica, con el fin de estructurar e implementar la metodología de modelación para evaluar el tramo.

8.2. Fundamento teórico

La modelación matemática, la cual *“busca la interpretación de fenómenos mediante la aplicación de principios científicos apoyado en la cuantificación de variables, lo cual genera una estructura matemática que permite su comprensión con algún grado de incertidumbre”* y dependiendo de las cualidades matemáticas consideradas, se pueden tipificar dos clases de modelos, los lineales y los no lineales (Lestón, 2008). Los conceptos relacionados se sintetizan en la figura 15.

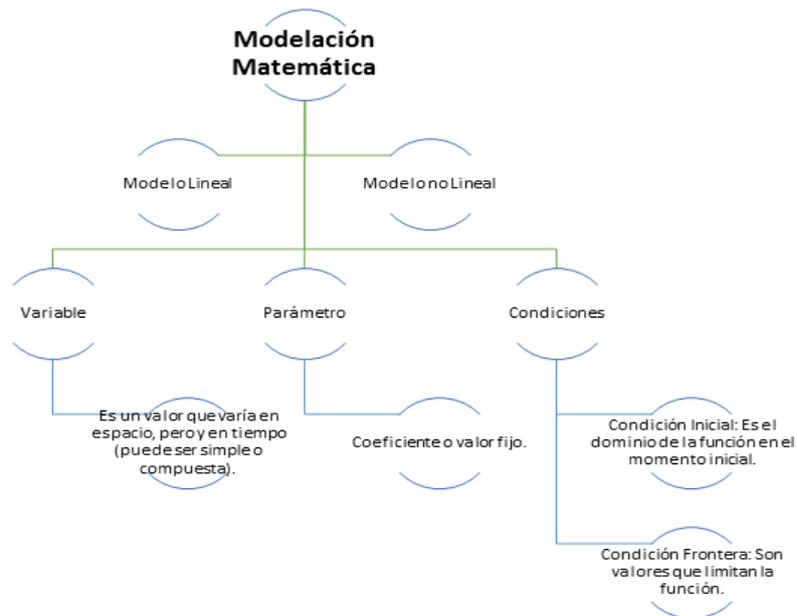


Figura 15. Diagrama conceptual de fundamentos teóricos la modelación matemática
Elaborado por: Autores. Fuente: (Kreyszing, 2011)

Con respecto al caso de estudio, según el protocolo de modelación hidráulica e hidrológica del IDEAM (2018), la modelación hidrodinámica (hidráulica) “*consiste en un procedimiento técnico que busca reproducir un fenómeno natural (mundo real) que, para el caso de interés, se enfoca en determinar el movimiento o dinámica del agua, utilizando modelos (simplificación) físicos y/o matemáticos*” y se clasifican de acuerdo con las cualidades del flujo, para lo cual se utiliza como referencia la dirección y dimensión que describen el cuerpo de interés (figura 16). Según Velásquez (2017), los flujos 1D dependen de una sola variable espacial similar a un canal sin estructuras de por medio; mientras que los flujos 2D y 3D dependerán de 2 (X y Y) y 3 (X, Y y Z) variables espaciales respectivamente, pues consideran las variaciones de flujo en direcciones distintas a las del flujo principal originadas por diferentes estructuras que se pueden presentar en el canal del cauce.

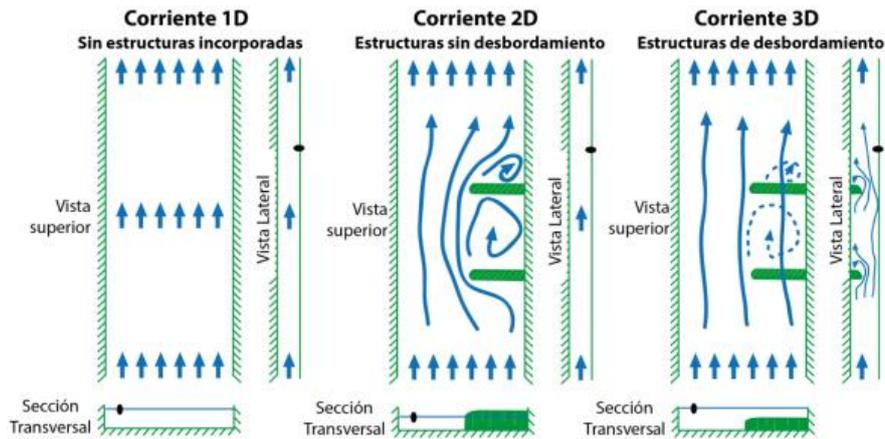


Figura 16. Relación gráfica de flujos unidimensional y multidimensional.
Fuente: Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica (IDEAM, 2018).

En canales abiertos, el flujo del agua se puede clasificar según diferentes comportamientos; si se evalúa el comportamiento de la profundidad a través del tiempo, el flujo puede ser permanente cuando la profundidad no cambia, o no permanente cuando la profundidad cambia con el tiempo (Modon, 2017). Por otro lado, al considerar el efecto de la gravedad el flujo se puede clasificar de acuerdo con la relación de las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales (White, 2016). Dicha relación está representada por el número de Froude (ecuación 4) y permite la siguiente clasificación:

Si $F < 1 \rightarrow$ Flujo sub – crítico

Si $F = 1 \rightarrow$ Flujo crítico

Si $F > 1 \rightarrow$ Flujo super – crítico

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (4)$$

Los flujos en canales abiertos pueden estar gobernados por tres principios, el de conservación de la masa, el de conservación de la energía y el de conservación de la cantidad de movimiento, dependiendo de la clasificación del flujo. Estos principios se aplican mediante la ecuación de la energía y las ecuaciones de Saint-Venant (Ponce, 2015).

Los fenómenos hidráulicos en 1D en régimen permanente para canales abiertos se basa esencialmente en el principio de conservación de la energía (Brunner G. W., 2016) expresado en la ecuación 5.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (5)$$

Donde:

$Z_2 - Z_1$ = Elevación del canal

Y_1, Y_2 = Profundidad del agua en las secciones

V_1, V_2 = Velocidad promedio

a_1, a_2 = Coeficiente de ponderación de velocidad

g = Aceleración gravitacional

h_e = Pérdidas de energía

Las ecuaciones de Saint-Venant se basan en los principios de conservación de la masa y conservación de cantidad de movimiento (*momentum*) para describir el comportamiento de un flujo permanente o no permanente gradualmente variado (Saint-Venant, 1871 citado en Ponce, 2015); estas ecuaciones se escriben como sigue:

- Ecuación de continuidad (permanente)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Dónde: h es la profundidad de flujo y varía a lo largo del río con el tiempo, y u es la velocidad de flujo que varía a lo largo del río.

- Ecuación de continuidad (no permanente)

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + u \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

Donde Q es la descarga o caudal y A es el área transversal.

- Ecuación de conservación de *momentum*

$$\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{g} \cdot \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + (S_f - S_o) = 0 \quad (8)$$

<i>Término de fuerza gravitacional</i>	<i>Término de aceleración local</i>	<i>Término de aceleración convectiva</i>	<i>Término de fuerza de Presión</i>	<i>Término de fuerza de fricción</i>
--	---	--	---	--

Donde g es la aceleración de la gravedad, h es la profundidad de flujo, u es la velocidad de flujo, S_f es la pendiente de fricción y S_o es la pendiente de fondo.

Dependiendo de si se usa completa o si se eliminan algunos términos de la ecuación de *momentum*, se pueden obtener varios modelos que, en pocas palabras, describen como se desplaza una variación del flujo de agua a lo largo del canal, conocidos como modelos de tránsito distribuido (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Concretamente, se pueden obtener tres modelos, el de **onda cinemática**, donde se desprecian los términos de presión y los de aceleración local y convectiva en la ecuación 8, este se aplica a flujos superficiales con pendientes de fondo pronunciadas; el de **onda dinámica**, donde se consideran todos los términos de la ecuación de *momentum* y aplica a las ondas que se producen en una rotura de presa, o en canales con pendientes menores a 0.0001; y el modelo de **onda difusiva** donde se desprecian los términos de aceleración y aplica para el tránsito de avenidas en arroyos y ríos con pendientes intermedias entre 0.0001 y 0.01 (Ponce, 2015).

De los modelos descritos se utilizó el modelo de onda difusiva, dado que la herramienta HEC-RAS, soluciona esta aproximación con más facilidad, obtiene modelaciones más estables y requiere un tiempo de computación mucho menor, (Brunner, Savant, & Heath, 2020); el modelo se describe por la siguiente ecuación:

$$S_f = S_o - \frac{\partial h}{\partial x} \quad (9)$$

Esta ecuación se puede adecuar de una forma más conveniente reemplazando en la ecuación de Manning algunos términos de manera que quede en función de Q , quedando de así (Ponce, 2015):

$$\frac{1}{T} \frac{\partial A}{\partial x} + mQ^2 - S_o = 0 \quad (15) \quad K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (10)$$

Donde A es el área transversal, Q es el caudal, S_o es la pendiente de fondo, T es el ancho de la superficie y m es el recíproco de la conducción K . R es el Radio hidráulico y n es el coeficiente de Manning.

8.3. Metodología

El proceso de modelación abarca el análisis de la información recolectada y la definición de los parámetros necesarios que permiten construir el modelo y confirmar su viabilidad, para finalmente evaluar los escenarios planteados.

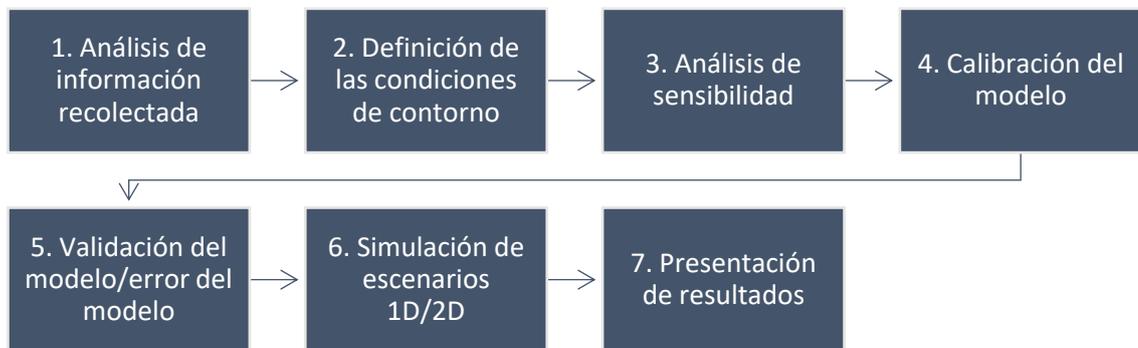


Figura 17. Flujograma del proceso de modelación
Fuente: Autores

8.4. Herramientas de modelación

Actualmente se pueden encontrar una gran diversidad de herramientas numéricas para la modelación hidrodinámica en 1D, 2D o 3D de distintos sistemas acuáticos. Algunas de las más conocidas son TUFLOW, SOBEK, DELFT3D, MIKE11, MIKE21, JFLOW y HEC-RAS (Teng, y otros, 2017). Muchas son de acceso libre y otras son de uso comercial, y cada una presenta debilidades y fortalezas de acuerdo con los objetivos que busque el modelador (Nkwunonwo, Whitworth, & Baily, 2020).

En este caso, se empleó el software HEC-RAS el cual soluciona las ecuaciones de Saint-Venant de forma numérica mediante la aplicación de los métodos de diferencias finitas y volúmenes finitos para régimen no permanente, y para permanente soluciona directamente la ecuación de la energía por el método del

paso estándar (Brunner G. W., 2016). Adicionalmente, según Blade, Sánchez, Sánchez, Niñerola & Gómez (2009), posibles escenarios pueden ser evaluados mediante la adición de parámetros hidráulicos, tales como: Caudal, condiciones de frontera, datos de geometría y de las secciones transversales.

HEC-RAS es un software de acceso libre, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC por sus siglas en inglés) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, su primera versión fue lanzada en 1995 y en la actualidad se encuentra en la versión 5.0.7. El programa integra varios módulos que permiten evaluar escenarios hidrodinámicos en 1D y 2D tanto en régimen permanente como en no permanente. También cuenta con módulos para evaluar modelos de transporte de sedimentos y modelos de calidad de agua. Además, incluye otras herramientas, como “RAS Mapper”, que permite la manipulación de información cartográfica directamente dentro del programa y presenta compatibilidad con programas como ArcGIS o autoCAD (Brunner G. W., 2016).

8.5. Métodos de Cálculo

A continuación, se describen los métodos empleados por el modelo HEC-RAS para solucionar la ecuación de la energía y las ecuaciones de Saint-Venant durante el proceso de simulación los escenarios en régimen permanente y no permanente.

8.5.1. Método del paso estándar

Este método se desarrolló para calcular la elevación de la lámina de agua solucionando la ecuación de la energía; se caracteriza por dividir el dominio en diversos tramos por medio de secciones transversales y soluciona la ecuación iterativamente de una sección transversal a la siguiente; cuando el flujo es subcrítico, se itera sentido aguas arriba, por el contrario si el flujo es súper-crítico los cálculos se realizan iterando en sentido aguas abajo (Molina, 2011). Como se basa en la ecuación de la energía evaluada entre una sección y otra, el método se expresa como sigue (Artichowicz & Szymkiewicz, 2014):

$$h_{i+1} + \frac{a_{i+1} \cdot Q^2}{2g \cdot A_{i+1}^2} = h_i + \frac{a_i \cdot Q^2}{2g \cdot A_i^2} - \Delta x_i \cdot \bar{S} \quad (11)$$

Donde Δx_i es el tamaño de paso (distancia entre secciones transversales), h es la altura de la lámina de agua, Q es el caudal, A es el área de flujo, g es la aceleración de la gravedad, a es un coeficiente de corrección de energía, \bar{S} es la pendiente media de la energía y los subíndices i e $i + 1$ indican las secciones transversales consideradas.

8.5.2. Diferencias finitas

En primera medida la aproximación por el método de diferencias finitas expresa una derivada como la diferencia de dos ecuaciones; para discretizar la derivada del volumen con respecto al tiempo se realiza la diferencia de volúmenes en los tiempos n y $n-1$ sobre el delta del tiempo Δt . Las diferencias finitas funcionan de manera similar, dadas dos celdas j_1 y j_2 con una elevación de la lámina de H_1 y H_2 respectivamente, se obtendrá que la derivada direccional en la dirección n' será determinada por el centro de cada celda, en este sentido la expresión resultante es (Brunner G. W., 2016):

$$\nabla H \cdot n' = \frac{\partial H}{\partial n'} \approx \frac{H_1 - H_2}{\Delta n'} \quad (12)$$

Donde el $\Delta n'$ es la distancia entre los centros de las celdas; la orientación de las derivadas es muy importante, ya que la orientación de la derivada va de la celda 1 a la celda 2 como se ve en la siguiente imagen:

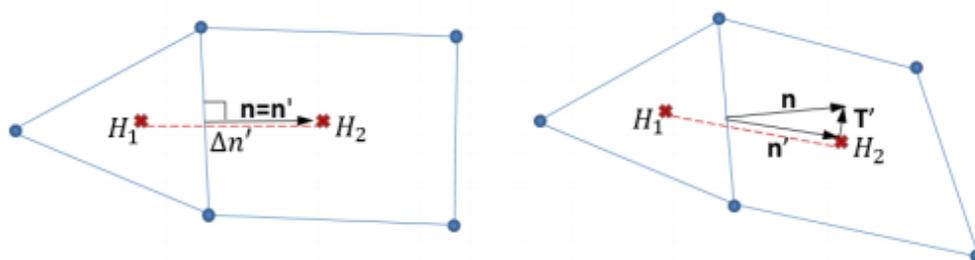


Figura 18. Derivadas direccionales de las celdas
Fuente: Manual de referencia hidráulica de HEC-RAS, versión 5.0

Si la dirección n' resulta ser ortogonal a la cara entre las celdas, se dice que la grilla es localmente ortogonal a estas caras, esto se puede observar en la imagen de la izquierda en la figura 18, esta condición de ortogonalidad en muchos casos no se cumple, por lo que se recurre a usar como complemento el método de volúmenes finitos.

8.5.3. Volúmenes finitos

Se trata de una técnica numérica que transforma ecuaciones diferenciales parciales, en ecuaciones algebraicas para pequeños volúmenes o celdas. Para este método se plantea una malla de discretización que permite analizar un objeto o un espacio (dominio); alrededor de los puntos o nodos que conforman la malla, se construyen pequeños volúmenes de forma tal que la suma de dichos volúmenes será igual al volumen total del objeto o espacio bajo análisis. Para cada volumen construido se resuelven las ecuaciones diferenciales que describen el fenómeno que se quiere analizar mediante una aproximación numérica. La ventaja de este método es que se puede aplicar a problemas que no pueden resolverse con el método de diferencias finitas, como aquellos que presentan geometrías irregulares (Moukalled, Mangani, & Darwish, 2016).

8.6. Geometría

Previo a la modelación, fue necesario hacer una adecuación de las características del terreno para aportar un nivel de detalle adecuado para la modelación. Para esto, se tomaron los datos de la batimetría levantados en campo y se integraron al modelo de elevación digital siguiendo el método descrito por Chris Goodell (2018), definido como “modificación de terreno” utilizando el módulo RAS Mapper de HEC-RAS versión 5.0.7. El terreno resultante se puede apreciar en la figura 19.

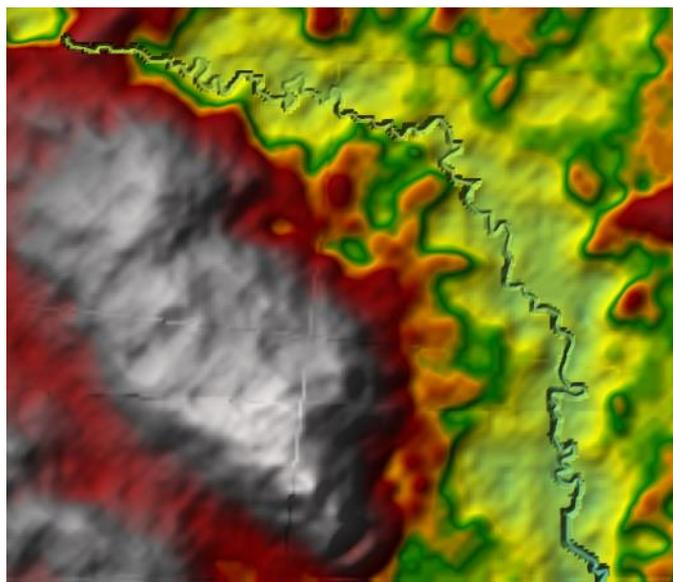


Figura 19. Geometría empleada en la modelación
Fuente: Autores

8.7. Condiciones de contorno

A continuación, se definen las condiciones de contorno, los cuales son los parámetros de entrada necesarios para construir el modelo.

8.7.1. Pendiente

La pendiente se calculó a partir del perfil longitudinal del tramo del río desde el programa HEC-RAS dibujando una línea recta desde el extremo aguas arriba hasta el extremo aguas abajo, arrojando una pendiente media aproximada de **0.0021 m/m**, como se observa en la figura 20.

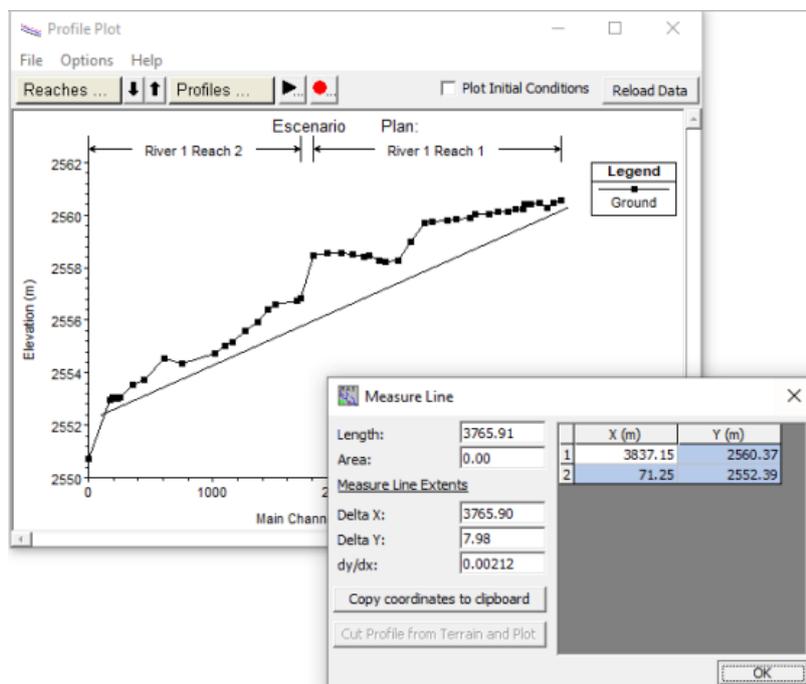


Figura 20. Pendiente obtenida a partir de HEC-RAS
Fuente: Autores

8.7.2. Coeficiente de rugosidad de Manning (n)

El coeficiente de rugosidad de Manning expresa la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces naturales o artificiales (Fernández, León, & Martínez, 2018). Una forma de estimar n es mediante el método de Cowan (1956), el cual considera factores como la aspereza del lecho, la vegetación, obstrucciones, forma del cauce, entre otros, y que se evalúan mediante la ecuación 13:

$$n = m (n_0 + n_1 + n_2 + n_4) \quad (13)$$

n_0 : Valor de n para un canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea.

n_1 : Corrección por irregularidades del perímetro mojado a lo largo del tramo estudiado.

n_2 : Corrección por variación de forma y de dimensiones de las secciones.

n_3 : Corrección por obstrucciones: troncos, rocas, etc.

n_4 : Corrección por presencia de vegetación.

m : Factor que mide la frecuencia de meandros o curvas.

Los valores y los rangos de los anteriores coeficientes propuestos por (Cowan, 1956) son:

Condiciones del canal	Variable	Leve	Moderado	Marcado	Muy marcado
1. Grado de Irregularidad	n_0	0.000	0.005	0.010	0.020
2. Cambios en las secciones	n_1	0.000	0.005	0.010	0.0145
3. Obstrucciones	n_3	0.000	0.010-0.015	0.020-0.030	0.040-0.060
4. Vegetación	n_4	0.005-0.0010	0.010-0.025	0.025-0.050	0.050-0.100
5. Meandros	n_5	1.000	1.000	1.150	1.300

Tabla 8. Valores para el cálculo del coeficiente de rugosidad

Fuente: (Chow V. , 2004)

Para el tramo en cuestión se determinaron los siguientes valores de Cowan teniendo en cuenta una fotografía satelital obtenida en el geovisor de SastPlanet (figura 21) en conjunto con observaciones realizadas en campo empleado como referencia la tabla 8; estos son:

$$n_0 = 0,010$$

$$n_1 = 0,010$$

$$n_2 = 0,015$$

$$n_3 = 0,025$$

$$n_4 = 0,03$$

$$m = 1,3$$

Aplicando la ecuación 13 con los anteriores factores Cowan se obtuvo:

$$n = 1,3 (0,010 + 0,010 + 0,015 + 0,025)$$

$$n = 0,078$$



Figura 21. Vista satelital del área de estudio
Fuente: Microsoft, 2020.

Adicionalmente se tuvieron en cuenta los valores de coeficiente de Manning típicos establecidos a partir de observaciones de diferentes experimentos (Chow V. , 2004). Teniendo en cuenta las características del área de estudio (Tramos lentos con maleza), los valores de Manning están en el rango de 0,05 a 0,08.

Evaluando tanto el resultado de la metodología de Cowan y los valores típicos, se determinó que el valor del coeficiente de Manning para el canal central oscila entre un rango **0,07 y 0,08**.

8.7.3. Hidrogramas

Los hidrogramas evaluados fueron definidos en el capítulo 6.6.1., los cuales son las condiciones de contorno requeridas para la modelación bidimensional.

8.8. Análisis de sensibilidad

Con la finalidad de estimar la sensibilidad del modelo a los parámetros de entrada se realizaron diez pruebas evaluando los parámetros de pendiente y coeficiente

de rugosidad de Manning; a cada prueba se le asignó un valor dentro de un rango definido de acuerdo con los valores establecidos en el apartado 8.7 para usar como condiciones de contorno. En este sentido, el rango establecido para los valores de pendiente es de 0,001 a 0,009, y para los valores de Manning entre 0,06 y 0,09. Las pruebas se corrieron en régimen permanente con el caudal máximo registrado por la estación limnimétrica EL RECREO (10,23 m³/s).

Los parámetros de salida para evaluar la sensibilidad son: el área de flujo, la velocidad y la altura de lámina de agua en una de las estaciones de las secciones transversales aguas abajo.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON LA PENDIENTE				
Datos fijos				
Caudal (m³/s)			Coefficiente de Manning	
10,23			0,075	
n prueba	datos de entrada	datos de salida		
	Pendiente	Área de flujo (m ²)	Velocidad (m/s)	Altura de la lámina de agua (m)
1	0,001	9,82	1,08	1.48
2	0,002	9,82	1,08	1.48
3	0,003	9,82	1,08	1.48
4	0,004	9,8	1,09	1.48
5	0,005	9,73	1,09	1.47
6	0,006	9,72	1,1	1.47
7	0,007	9,73	1,09	1.47
8	0,008	9,73	1,09	1.47
9	0,009	9,73	1,09	1.47
10	0,010	9,73	1,09	1.47
Media		9,763	1,088	1,474
Desviación estándar		0,045	0,006	0,005
Coefficiente de variación		0,46%	0,58%	0,35%

Tabla 9. Análisis de sensibilidad con la pendiente
Fuente: Autores

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON EL COEFICIENTE DE MANNING				
Datos fijos				
Caudal (m³/s)			Pendiente	
10,23			0,0021	
n prueba	Datos de entrada	Datos de salida		
	Coefficiente de Manning	Área de flujo (m ²)	Velocidad (m/s)	Altura de la lámina de agua (m)
1	0,060	8,67	1,23	1.37
2	0,063	8,91	1,19	1.4
3	0,067	9,22	1,15	1.42
4	0,070	9,45	1,13	1.44
5	0,073	9,68	1,1	1.46
6	0,077	9,97	1,07	1.49
7	0,080	10,19	1,05	1.51
8	0,083	10,39	1,03	1.53
9	0,087	10,68	1	1.55
10	0,090	10,88	0,98	1.57
media		9,804	1,093	1,474
desviación estándar		0,746	0,082	0,067
Coefficiente de variación		7,61%	7,51%	4,54%

Tabla 10. Análisis de sensibilidad con el coeficiente de Manning.

Fuente: Autores

Al analizar los resultados de las variables de salida (ver tablas 9 y 10), se evidenció que el modelo presenta una mayor sensibilidad al parámetro de coeficiente de rugosidad de Manning, ya que arroja un coeficiente de variación entre 4,54% y 7,61% en los parámetros de salida, frente a una variación hasta de un 0,58% causada por la pendiente. Por ende, se puede inferir que el coeficiente de rugosidad es el parámetro de entrada con mayor influencia en la incertidumbre del modelo.

8.9. Calibración y validación

Para la calibración se tomaron como referencia los datos obtenidos en campo frente al resultado del modelo, de esta forma se obtuvo el error de las diferentes variables (velocidad, área del fluido y altura de lámina de agua) para posteriormente realizar un promedio aritmético de éstos con el fin de obtener un único valor representativo del error. En este proceso se realizaron 6 pruebas en régimen permanente donde se varió en el modelo los valores de pendiente y coeficiente de Manning teniendo como referencia los valores definidos para las condiciones de contorno, el resultado de esto se muestra a en la tabla 11.

	S	n	Error de Velocidad	Error de la Altura de Lamina	Error del Área de Flujo	Error del Modelo
Prueba 1	1%	0,07	10,7%	17,0%	6,1%	11,3%
Prueba 2	0,55%	0,07	6,7%	17,0%	5,7%	9,8%
Prueba 3	0,21%	0,07	9,1%	15,3%	8,4%	10,9%
Prueba 4	1%	0,075	6,7%	14,4%	7,2%	9,4%
Prueba 5	0,55%	0,075	6,7%	14,3%	6,7%	9,2%
Prueba 6	0,21%	0,075	5,7%	16,1%	4,6%	8,8%

Tabla 11. Resumen de los datos de calibración del modelo

Fuente: Autores

8.10. Modelación

8.10.1. Modelación unidimensional de eventos extremos

Los modelos 1D suelen ser aplicados en casos donde no se requiera mayor detalle en la solución, como por ejemplo el pronóstico de niveles y cotas de inundación en tiempo real, o para evaluación de escenarios futuros para el manejo y mantenimiento de cuencas (IDEAM, 2018). También resultan favorables si el dominio del modelo es de gran extensión y/o cuando los eventos son de larga duración (Brunner, Savant, & Heath, 2020).

Para evaluar escenarios de flujo unidimensional mediante HEC-RAS, es necesario definir la geometría del cauce mediante una serie de secciones transversales, puesto que este modelo resuelve la ecuación de la energía de una sección transversal a otra para calcular la altura de la lámina de agua.

Por lo anterior, para el caso de estudio, se definieron alrededor de 120 secciones transversales a lo largo del tramo de la forma más uniforme posible, procurando ubicarlas en las partes más irregulares del cauce y evitando que se crucen entre sí.

Ya con todas las condiciones definidas y la configuración del modelo establecida (anexo 7), se simularon los periodos de retorno establecidos en el Capítulo 6.5.2.2. (tabla 1), los cuales representan **escenarios de inundaciones**.

Para los **escenarios asociados a sequía** se tuvieron en cuenta dos datos de referencia, el primero se asocia al caudal mínimo de la serie histórica registrada por la estación limnimétrica, el cual ocurrió en el año 1980 y es de **0,01 m³/s**; y el segundo pertenece al caudal mínimo registrado en el año de 1997 el cual es

conocido como uno de los más secos para Colombia según Hurtado (2012), en concreto el caudal es de **0,03 m³/s**.

Adicionalmente, se promediaron los valores de caudal diario registrados por la estación EL RECREO, para obtener un valor de **0,54 m³/s** como caudal medio, el cual se usó para determinar el nivel medio del cauce.

Tanto los escenarios de inundaciones como los de caudales mínimos se simularon en régimen mixto, ya que esta configuración permite identificar si se ha producido un salto hidráulico en algún punto del cauce, para continuar la modelación con el régimen que corresponde.

8.10.2. Modelación bidimensional de eventos máximos

Los problemas de flujo bidimensional se pueden solucionar mediante el método de volúmenes finitos (Versteeg & Malalasekera, 2007), el cual, como se explicó con anterioridad, requiere de la división del dominio en pequeñas celdas que en conjunto configuran una malla bidimensional de discretización.

En HEC-RAS es posible construir una malla 2D, donde, en cada celda que la conforma, se resuelve la forma difusiva de la ecuación de *momentum* (ecuación 14) en combinación con la ecuación de continuidad (también llamadas ecuaciones de aguas poco profundas) (Brunner G. W., 2016); de esta forma, el modelo se resuelve requiriendo menor tiempo computacional y de forma más estable (Brunner, Savant, & Heath, 2020).

Para el caso de estudio, donde se evaluaron los años 1991 y 2011, se dibujó una malla 2D estructurada sobre el área de estudio compuesta en su mayoría por celdas de 10 m x 10 m; el tamaño de celda se definió tratando de mantener un valor inferior al ancho promedio de las secciones transversales (16.03 m) medidas en campo, para garantizar que fuese lo suficientemente fina para las características del canal (figura 22), siendo éste la superficie más detallada del terreno. La configuración adicional de la modelación se muestra en el anexo 9.

Para el desarrollo de esta modelación se definieron las condiciones de contorno aguas arriba, que corresponden a los **hidrogramas** establecidos para los años a

evaluar, mientras que aguas abajo se estableció la **pendiente media** como condición de contorno.

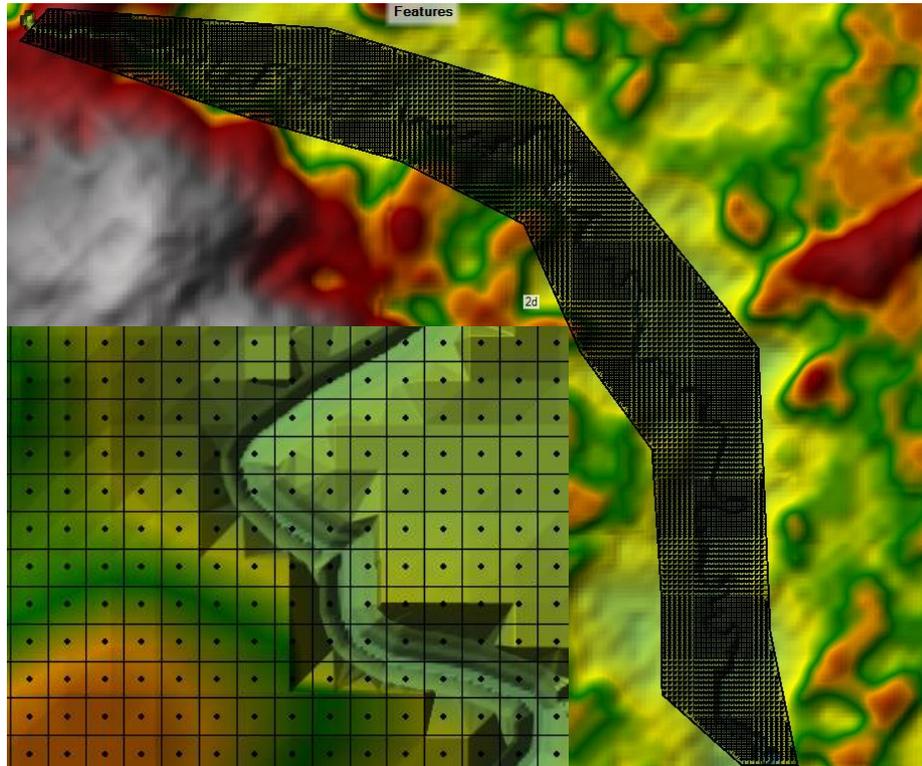


Figura 22. Malla para la modelación en 2D
Fuente: Autores

Como la modelación implica un proceso numérico, es importante establecer su estabilidad, es decir, su sensibilidad frente a errores de cálculo o en los datos (Vigueras, 2016). Se evaluó la condición de Courant (ecuación 14), la cual permite establecer si la solución de ecuaciones diferenciales parciales, a partir de un esquema numérico, es estable o no (Courant, Friedrichs & Lewy, 1928, citado en Gnedin, Semenov, & Kravtsov, 2018). En el modelo se estableció un tamaño de paso Δt de 10 s y un tamaño de celda Δx de 10 m. Al evaluar la condición de Courant (C) se obtuvo un valor de 1, valor que respeta y cumple la condición. Al evaluar el modelo con dicho tamaño de paso no se generaron inestabilidades.

$$C = \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (14)$$

8.11. Resultados y análisis

Se ejecutaron las simulaciones en 1D y 2D en donde entre los resultados principales se obtuvieron las manchas de inundación, niveles de agua y velocidades promedio para el flujo del río en el tramo 2.

8.11.1. Modelación 1D

8.11.1.1. Inundaciones en régimen permanente.

Con base en las simulaciones realizadas para los diferentes periodos de retorno (PR), el análisis de la extensión de las manchas de inundación fue llevado a cabo empleando el software QGIS versión 3.14 como se describe en la tabla 12.

Área Inundada 1D		
Periodo de Retorno	m ²	ha
2 años	13053,84	1,31
5 años	18810,51	1,88
10 años	21628,64	2,16
25 años	24818,44	2,48
43 años	26710,83	2,67
50 años	27104,92	2,71
100 años	29082,99	2,91

Tabla 12. Área inundada en 1D para los diferentes periodos de retorno
Fuente: Autores

Se evidenció que las manchas de inundación pueden abarcar desde 1,31 Ha hasta 2,91 Ha, aguas arriba del tramo evaluado. En las figuras 22 y 23 se muestran los resultados de la simulación de los periodos de retorno, de los cuales, se destaca que las manchas de inundación se concentraron en 5 zonas, las cuales se resaltan en la figura 22 para el periodo de retorno de 100 años.

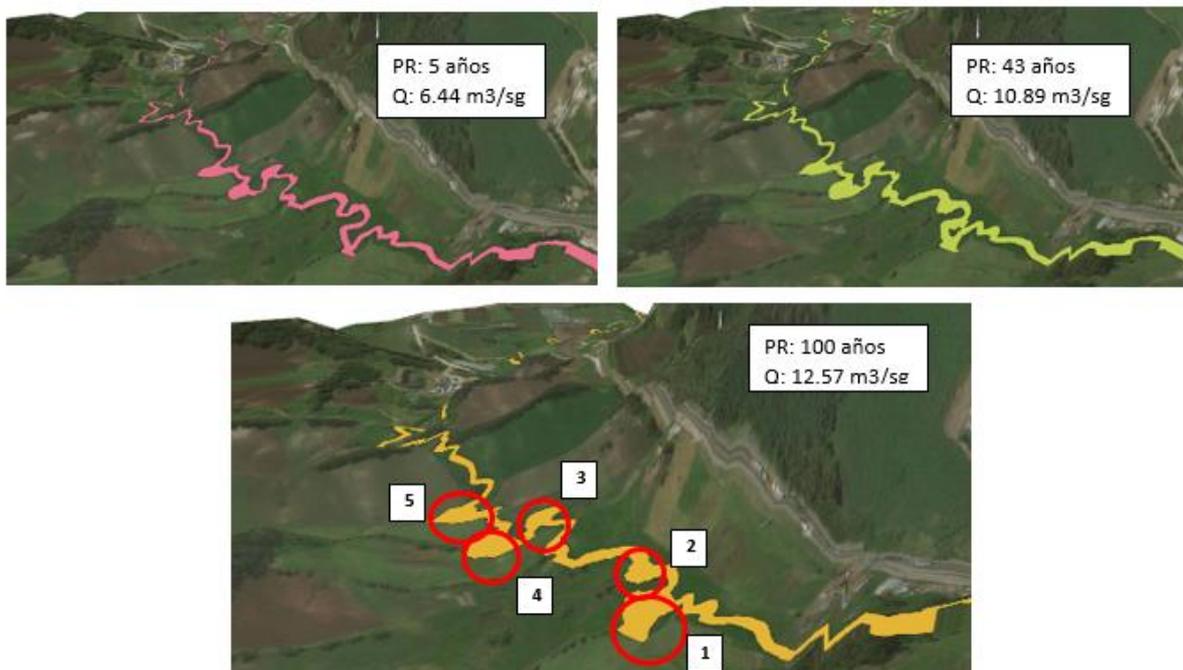


Figura 22. Visualización 3D de las inundaciones para los periodos de retorno de 5, 43 y 100 años

Fuente: Autores

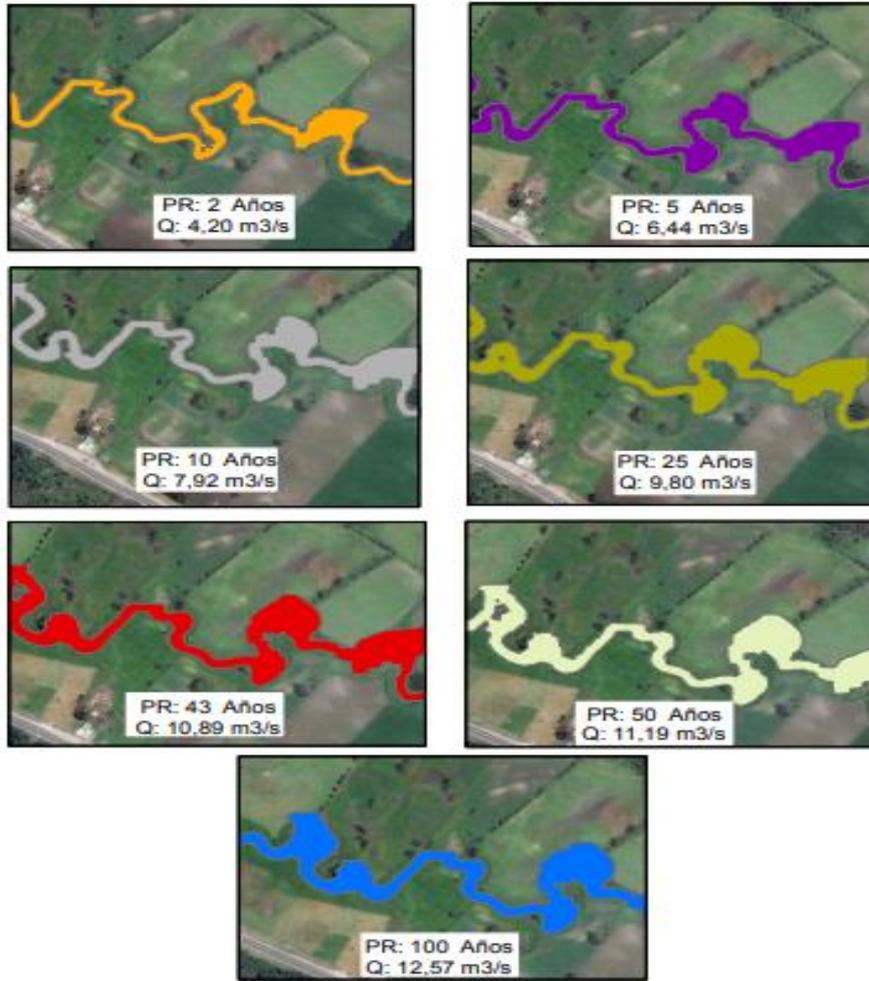


Figura 23. Mapa del área inundada para los periodos de retorno.
Fuente: Autores

Adicionalmente, se obtuvieron los niveles máximos para los diferentes periodos de retorno en las secciones transversales correspondientes a las zonas de mayor inundación, que muestran como superan las cotas de las llanuras de inundación.

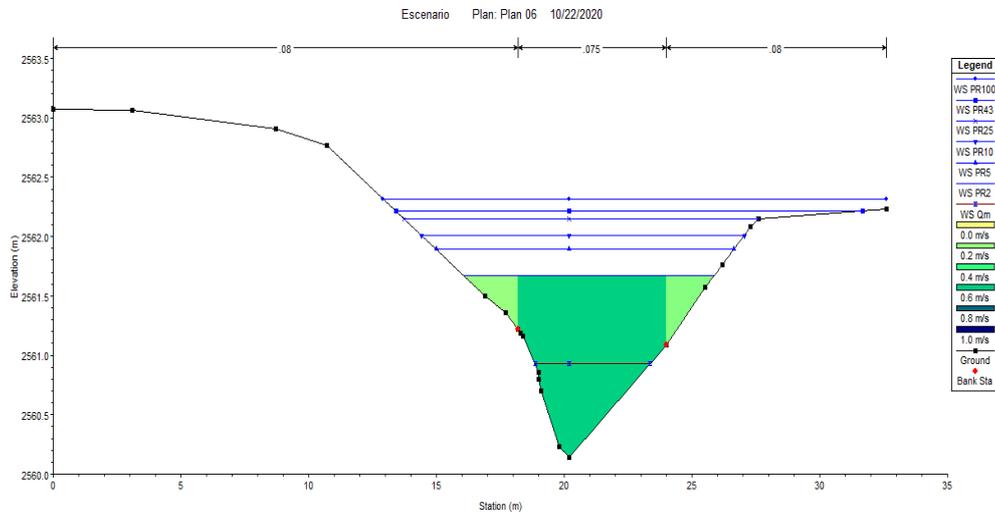


Figura 24. Perfil transversal obtenida en la modelación en 1D para los periodos de retorno
Fuente: Autores

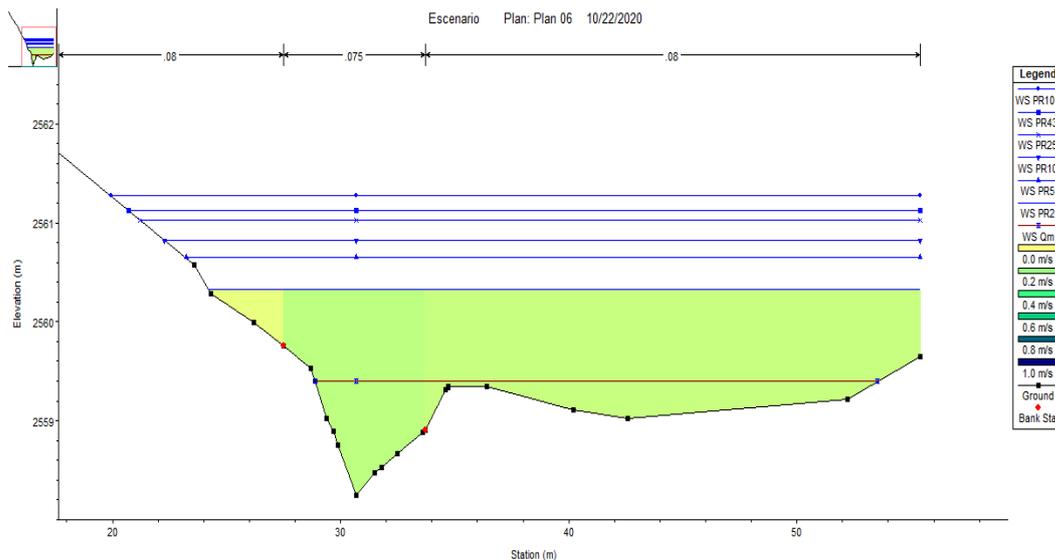


Figura 25. Perfil transversal obtenida en la modelación en 1D para los periodos de retorno
Fuente: Autores

Así mismo, para cada periodo de retorno, se evaluaron los resultados de elevación de agua en cada sección transversal obteniendo los rangos y los niveles promedio de cada escenario, donde se destaca que para el periodo de retorno de 100 años se pueden alcanzar elevaciones de hasta 3 m en la lámina de agua.

Igualmente, al evaluar la velocidad promedio a lo largo del tramo, la cual, en el escenario más extremo, alcanza a ser de 1,25 m/s (ver tabla 13), se puede deducir que el río se caracteriza por presentar un flujo lento.

Al evaluar los valores del número Froude a lo largo del tramo se observó que en todas las secciones es menor a 1, por lo que el comportamiento obedece a un régimen subcrítico, donde predominan las fuerzas inerciales y de fricción dadas las condiciones de baja pendiente y la rugosidad.

Altura Máxima (m)			
PR	Rango	Promedio	Coefficiente de Variación
2	0,88-2,13	1,49	11,9%
5	1,12-2,45	1,75	15,0%
10	1,33-2,63	1,94	14,5%
25	1,41-2,83	2,10	15,4%
43	1,49-2,89	2,18	14,4%
50	1,51-2,91	2,21	14,5%
100	1,72-3,03	2,31	15,9%
Velocidad (m/s)			
PR	Rango	Promedio	Coefficiente de Variación

2	0,13-0,87	0,52	2,6%
5	0,15-1	0,61	3,2%
10	0,16-1,07	0,68	3,7%
25	0,18-1,16	0,71	4,3%
43	0,18-1,19	0,71	4,3%
50	0,19-1,2	0,72	4,5%
100	0,33-1,25	0,77	5,0%
Froude			
PR	Rango	Promedio	Coeficiente de Variación
2	0,03-0,32	0,17	0,52%
5	0,04-0,31	0,18	0,50%
10	0,04-0,31	0,19	0,51%
25	0,04-0,32	0,18	0,51%
43	0,04-0,32	0,18	0,55%
50	0,04-0,32	0,18	0,55%
100	0,04-0,32	0,18	0,54%

Tabla 13. Resumen de los datos obtenidos en la evaluación de los periodos de retorno.
Fuente: Autores

La elevación del agua y las velocidades fueron computadas por el modelo HEC-RAS en cada sección transversal del tramo, solucionando la ecuación de la energía y asumiendo que el flujo se da siempre perpendicular a estas secciones. Asumir dicha condición genera resultados aproximados con cierto grado de error (8,8 %) pues no es un comportamiento que se da en la realidad. No obstante, como la presencia de factores que pueden hacer más complejo el sistema (presencia de estructuras hidráulicas, múltiples cauces de flujo, pendientes empinadas y/o escarpadas) es baja, y teniendo en cuenta que el objetivo principal es localizar y estimar las manchas de inundación, los resultados de una modelación en 1D, para este caso, son plausibles para representar el sistema (Brunner, Savant, & Heath, 2020).

8.11.1.2. Escenarios de temporada seca

Como se estableció en el apartado 7.10.2., Para esta simulación en 1D en régimen permanente se evaluaron los eventos de 1980 y 1997; los resultados principales se observan en la tabla 14. Se calcularon los niveles promedio de elevación del agua a lo largo del cauce, siendo éstos en promedio de 0,18 m y 0,4 m para 1980 y 1997 respectivamente; además, se obtuvieron los valores promedio de velocidad y número de Froude donde, para ambos casos, corresponden a características de un flujo lento con un régimen subcrítico.

Niveles Mínimos (m)			
Año	Rango	Promedio	Coefficiente de Variación
1980	0,02-0,61	0,18	1,6%
1997	0,09-0,76	0,40	2,3%
Velocidades (m/s)			
Año	Rango	Promedio	Coefficiente de Variación
1980	0,01-0,62	0,11	1,4%
1997	0,04-0,77	0,13	0,9%
Froude			
Año	Rango	Promedio	Coefficiente de Variación
1980	0-1,13	0,16	6,2%
1997	0,02-1,01	0,11	1,6%

Tabla 14. Resumen de los datos obtenidos en la simulación de caudales mínimos en 1D
Fuente: Autores

Al observar el perfil longitudinal (figura 28), se puede distinguir claramente como se ubican por debajo del nivel medio y como, en términos generales, se presentan niveles bajos a lo largo del cauce.

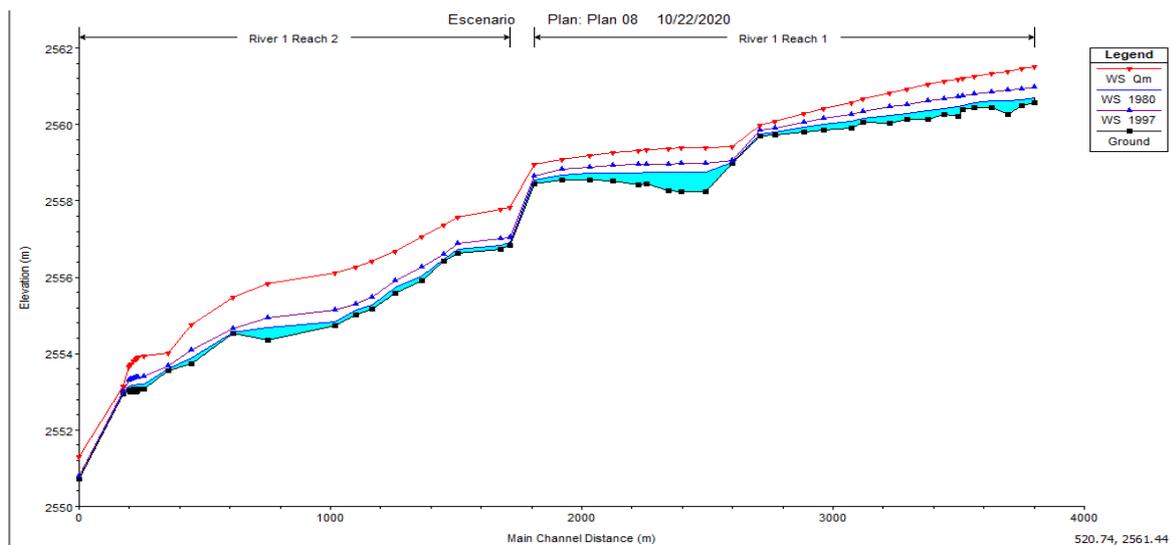


Figura 26. Niveles de agua para la temporada seca
Fuente: Autores

Estos resultados muestran las potenciales afectaciones del recurso hídrico en función de su disponibilidad para las actividades agrícolas que se desarrollan a lo largo del tramo y las funciones ecológicas, originando impactos negativos económicos a los agricultores de la zona, y limitando la prestación de servicios ambientales asociados al cauce.

8.11.2. Modelación 2D

8.11.2.1. Inundaciones en régimen no permanente

De la modelación de los eventos de 1991 y 2011, se obtuvieron las manchas de inundación en los momentos pico de los hidrogramas, las cuales se representan en la figura 29.

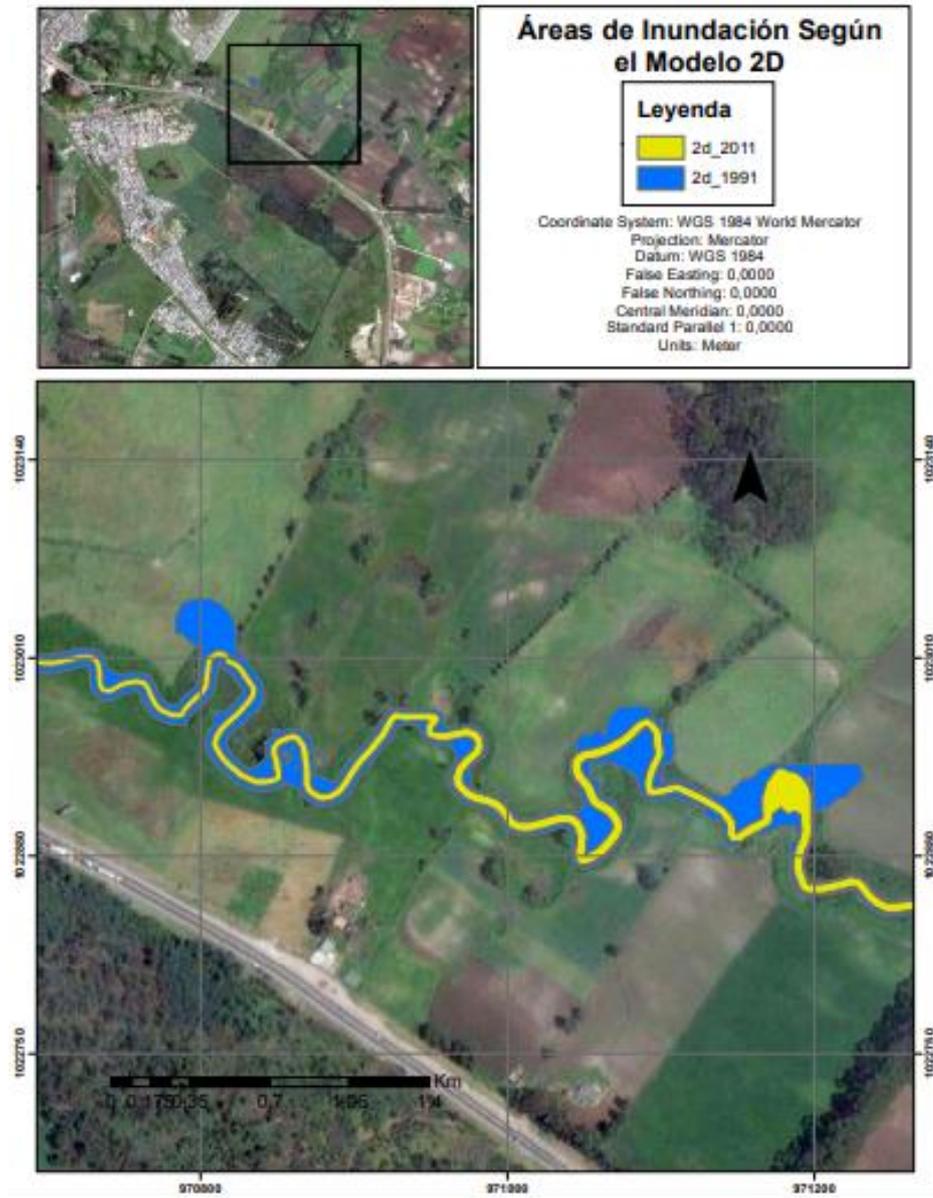


Figura 27. Mapa de las áreas inundadas obtenidas a partir de una modelación 2D.
Fuente: Autores

Al analizar los resultados mediante el software QGIS, se estimó la extensión de las manchas de inundación de los dos eventos, datos que se presentan en la tabla 15. Comparando los dos escenarios, es evidente que, a pesar de que en el año 2011 fue el más húmedo a nivel regional, tuvo poca influencia a nivel local, ya que una mancha de agua de 0.17 ha. Por el contrario, las inundaciones resultantes

para 1991 se extendieron por una mayor área del terreno con un valor aproximado de 2,21 Ha, es decir, un 92% mayor respecto al evento del 2011.

Área Inundada 2D		
Año	m ²	Ha
1991	22092,38	2,21
2011	1741,30	0,17

Tabla 15. Resumen de las áreas inundadas en la modelación 2D.
Fuente: Autores

De la misma manera, se obtuvo la distribución de velocidad a lo largo del cauce en el momento pico del hidrograma, donde se evidencia que gran parte del tramo presenta bajas velocidades (color azul), con algunas zonas puntuales donde se presentan velocidades más altas, como por ejemplo en la zona donde se une el cauce tributario en la mitad del cauce, o las partes más rectilíneas del cauce; en general las velocidades que predominan se encuentran entre 0 y 1,5 m/s.

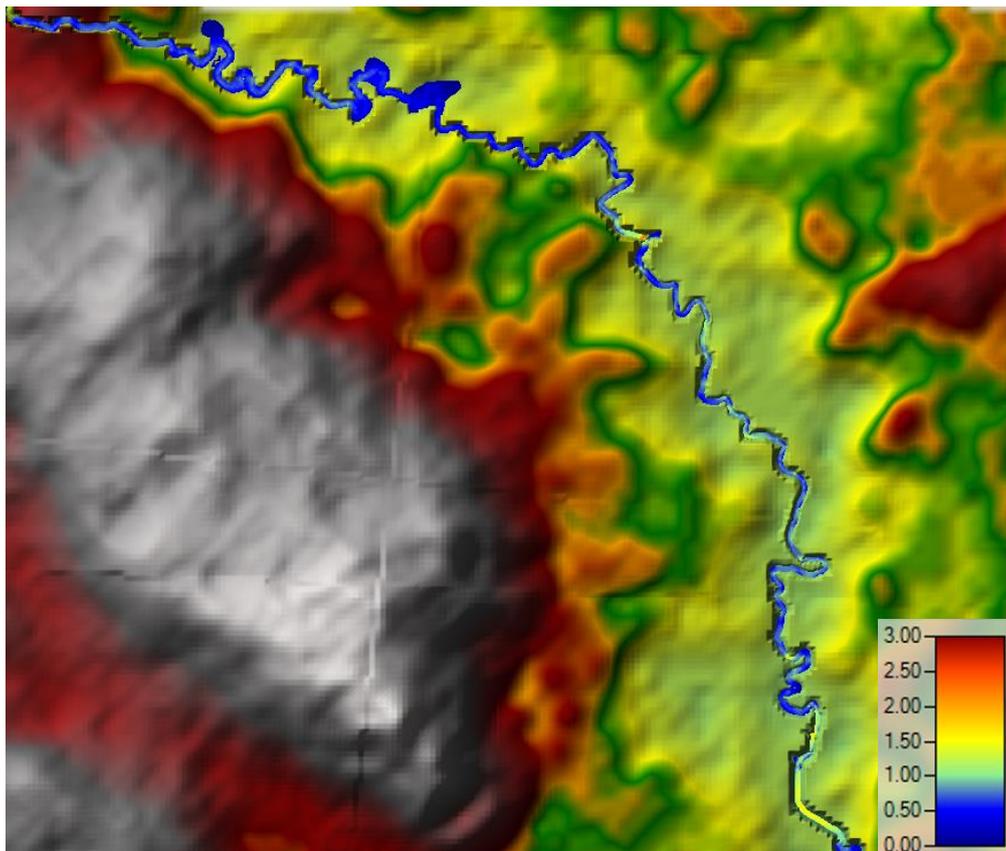


Figura 28. Distribución de velocidades para la modelación 2D
Fuente: Autores

De acuerdo con estos resultados, la magnitud y ubicación de las áreas de inundación obtenidas en los procesos de modelación no representan un alto riesgo debido a que se dan en zonas de cultivos y su afectación sobre estas no se

extiende significativamente. Dada su extensión, podría ser adecuada y viable la implementación de estrategias de conservación y restauración ecológica en dichas zonas, las cuales pueden entenderse como zonas de amortiguamiento natural ante eventos de inundación, restringiendo allí el desarrollo de actividades agrícolas o de otra clase.

Durante el levantamiento batimétrico se observaron formaciones de diques en algunas zonas del tramo, en especial en la zona baja, las cuales se tuvieron en cuenta para la construcción del terreno o la geometría. La presencia de dichas formaciones pudo contribuir al hecho de que no se observaran inundaciones en la zona media y baja del tramo en los eventos extremos evaluados.

Este tipo de modelación permite encontrar soluciones más precisas pues considera el comportamiento del flujo de agua en dos dimensiones y en el tiempo. Aun así, la precisión de los resultados también depende del detalle del terreno, pues a mayor nivel de detalle mayor precisión en los resultados (Brunner, Savant, & Heath, 2020). Dicho lo anterior, los resultados de la modelación pueden ser representativos del comportamiento real del Río Botello en el tramo 2.

9. CONCLUSIONES

- Los resultados de la modelación son acordes con las características morfológicas y el comportamiento del río Botello en el tramo evaluado, ya que es un río con baja pendiente, flujo lento y gran presencia de meandros. El modelo obtenido arroja un error del 8,8% de acuerdo con el proceso de calibración y validación, indicando que es un acercamiento aceptable al comportamiento hidrodinámico en escenarios de eventos extremos.
- En los eventos de caudales máximos, evaluados tanto en 1D permanente, como en 2D no permanente, se identificaron 5 zonas principales de inundación aguas arriba del tramo; cuya área de influencia está comprendida entre 1,31 hasta 2,91 Ha, afectando únicamente zonas de actividad agrícola. En la parte media y baja del tramo no se presentan inundaciones, debido a que las formaciones de diques presentes a los lados

del cauce influyen en la altura de las llanuras de inundación evitando así posibles desbordamientos.

- Con respecto a la simulación para caudales mínimos se obtuvo un tirante promedio de 0,18 m, indicando niveles por debajo del nivel medio del cauce, esta situación genera una afectación sobre la disponibilidad del recurso hídrico en escenarios extremos de sequía, lo que puede conllevar a un deterioro de las funciones ecológicas del río, impactando de igual forma las actividades agrícolas que se desarrolla en el área de influencia.
- El análisis hidrológico de la microcuenca de la quebrada Yerbabuena permitió determinar el caudal que aportaba al tramo 2, a partir de los parámetros morfológicos. Esto permitió tener una mejor aproximación a las condiciones reales del tramo en los procesos de modelación. Sin embargo, es necesario realizar un análisis hidrológico que incluya una mejor información de la distribución espacio-temporal de la precipitación.
- La distribución de las velocidades a lo largo del tramo obtenidas en la modelación 2D, permitió ver que en su mayoría se presentan bajas velocidades que se encuentran entre 0 y 1,5 m/s, por lo que se mantiene un comportamiento característico de régimen subcrítico aun en la ocurrencia de escenarios extremos.
- Los resultados de la modelación de los tramos 1, 2 y 3, indican que el municipio de Facatativá es susceptible a la ocurrencia de inundaciones en épocas de altas precipitaciones, y de escasez del recurso en los periodos de bajas lluvias, lo que podría generar situaciones de pérdidas de cultivos, daños de muebles y enceres, racionamiento del agua, debilitación de estructuras hidráulicas, entre otras.
- Los resultados obtenidos enriquecen la información disponible relacionada con el Río Botello y permiten una mejor comprensión de su comportamiento hidrodinámico, por lo que pueden considerarse como insumo en los

procesos de toma de decisiones para la gestión del recurso hídrico y la gestión del riesgo por parte de la administración municipal y las autoridades ambientales.

10.RECOMENDACIONES

- Se recomienda empalmar los modelos construidos para los tramos 1, 2 y 3 en un único modelo hidráulico, que pueda articularse con modelos de calidad de agua, transporte de sedimentos o hidrológicos, lo que permitirá ampliar la capacidad de análisis de diferentes procesos que se desarrollan en el río. De esta forma se pueden formular estrategias integrales para mejorar la gestión del recurso.
- Se recomienda la construcción de un modelo hidrológico que permita evaluar de manera más precisa los escenarios relacionados con la distribución de la lluvia, esto con el objetivo de generar estrategias de prevención escasez del recurso hídrico que se presenta en el municipio durante épocas de sequía, esto con el objetivo de formular estrategias de prevención más precisas y eficientes.
- Para futuras investigaciones que impliquen modelación en 2D, se debe contar con información del terreno de la mayor resolución posible, dado que un mayor detalle en el terreno permite construir mallas 2D más refinadas, lo que implica una mejor representación del fenómeno que se quiera evaluar.
- Se recomienda a la administración municipal y las autoridades ambientales evaluar alternativas de control y mitigación del riesgo de inundaciones en las zonas identificadas en el presente proyecto; se sugiere la consideración de procesos de restauración ecológica como estrategia de control de inundaciones.
- Realizar jornadas de Educación Ambiental y capacitaciones a los usuarios del cuerpo hídrico frente al consumo, aprovisionamiento y mitigación ante eventos de inundación y escasez de agua.

- Los resultados de esta investigación pueden servir de base para la construcción e implementación de un sistema de monitoreo o de alerta temprana, permitiendo así mejorar la respuesta de las autoridades ante la amenaza de eventos hidrológicos extremos en el municipio.
- Para la selección del esquema de modelación, ya sea 1D, 2D o 3D, en régimen permanente o no permanente, se deben establecer claramente los objetivos de la modelación y tener un entendimiento claro de las características y la complejidad del sistema hídrico y los escenarios que se quieran evaluar; de esta forma, se conseguirá un proceso de modelación adecuado con el menor costo computacional posible.

11. DIVULGACIÓN



Participación en el WEBINAR INTERNACIONAL: LA INGENIERÍA AMBIENTAL EN EL SIGLO XXI, organizada por los programas de Ingeniería Ambiental de la Universidad Libre y la Universidad de Cundinamarca, celebrado entre el 9 y 13 de noviembre del presente año. Dicha participación se realizó en modalidad oral en representación del semillero de investigación AXIOMA de la Universidad de Cundinamarca, Extensión Facatativá.

12. REFERENCIAS

- Aguilera Navarro, M. (2007). ESTIMACIÓN DE FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD, PARA CAUDALES MÁXIMOS, EN LA REGIÓN DEL MAULE. Universidad de Talca. Retrieved from http://ctha.utalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/tesis_de_grado/aguilera_a.pdf
- Alcaldía Municipal de Facatativá. (2020, agosto 14). Decreto No. 178 "Por medio del cual se declara la alerta naranja, por el desabastecimiento del recurso hídrico en el municipio de Facatativá Cundinamarca". Retrieved from https://facatativacundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/facatativacundinamarca/content/files/000712/35591_decreto-178-de-2020.pdf
- Andrade, E. (2020, 10 21). *civilgeeks.com*. Retrieved from Conceptos Básicos del Hidrograma Unitario: <https://civilgeeks.com/2011/09/23/conceptos-basicos-del-hidrograma-unitario/>
- Antonio, A., & Monroy, E. (2015). DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO BOTELLO EN LA ZONA URBANA DEL MUNICIPIO DE FACATATIVÁ.
- Artichowicz, W., & Szymkiewicz, R. (2014). Computational issues of solving the 1D steady gradually varied flow equation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(3). doi:10.2478/johh-2014-0031
- Ayuso, J., Montesinos, P., & Peña, A. (1994). ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA UNITARIO. ESTUDIO COMPARATIVO DE CUATRO MÉTODOS LINEALES. *Ingeniería del Agua*, 21-32.
- Batanero, P. (2015). *Utilización de Modelos Hidráulicos Bidimensionales en la Determinación del Tiempo de Concentración*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Bateman, A. (2007). *Hidrología Básica y Aplicada*. GITS.
- Blade, E., Sánchez, J., Sánchez, H., Niñerola, D., & Gómez, M. (2009). *Modelación Numérica en Ríos en Régimen Permanente y Variable*.
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. US Army Corps of Engineers. Retrieved from <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Brunner, G., Savant, G., & Heath, R. (2020). *Modeler Application Guidance for Esteady versus Unsteady, and 1D versus 2D versus 3D Hydraulic Modeling*. U.S. Army Corps of Engineers. Retrieved from <https://www.hec.usace.army.mil/publications/TrainingDocuments/TD-41.pdf>
- Campos, A. (2016). *Hidráulica e hidrología para ingeniería*. Moscú: Universidad de la Amistad de los Pueblos de Rusia de Moscú.
- Campos, D. (2002). Ajuste de la distribución log-Pearson tipo III por medio de optimización numérica no restringida. *Ingeniería Hidráulica en México*, 115-128.

- CAR, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (s.f.). *DIEZ RESPUESTAS SOBRE EL FENÓMENO DE LA NIÑA Y SUS IMPACTOS EN JURISDICCIÓN CAR*. Retrieved from <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b4d13c218017.pdf>
- Chow, V. (2004). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Colombia: McGraw-Hill.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Mc Graw Hill.
- Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2019). *PLAN MUNICIPAL DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES*. Facatativá: Alcaldía Municipal de Facatativá.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca . (2006). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá*. Bogotá.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2006). *Elaboración del Diagnóstico, Prospectivo y Formulación de la Cuenca Hdrográfica del Río Bogotá -Subcuenca Río Balsillas*. Bogotá.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2017). Fase de Diagnóstico. In C. A. Cundinamarca, *POMCA Río Bogotá* (Vol. Volumen I). Retrieved from <http://www.car.gov.co/vercontenido/94>
- Cowan, W. (1956). *Estimating hydraulic roughness coefficients:Agricultural Engineering*.
- Duque, J. (2015). Confirmado alerta roja en Facatativá por falta de agua. *Mutantes TV*. Retrieved from <https://www.mutantes.tv/2015/11/20/confirmado-alerta-roja-en-facatativa-por-falta-de-agua/>
- EOS data analytic, INC. (2020). *Modelo de Elevación Digital*. Retrieved from https://eos.com/landviewer/?lat=51.80861&lng=11.55762&z=3&preset=terrainTiles&id=S2A_tile_20190521_37SBB_1&b=Red,Green,Blue&anti=0
- Fernandez, C., León, A., & Martínez, P. (2018). Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning. *Ingeiería Hidráulica y Ambiental*, 17-31.
- Figueroa, E. (2015). EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LOS CONFLICTOS DEL USO DE LA TIERRA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO BOTELLO DEL MUNICIPIO DE FACATATIVÁ. Retrieved from <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/482/2015estebanfigueroa.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- García, A. (2013). *ANÁLISIS DE DISTRIBUCIONES ESTADÍSTICAS ALTERNATIVAS A LAS TRADICIONALES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LOS CAUDALES DE CÁLCULO EMPLEADOS EN LOS ESTUDIOS HIDROLÓGICOS*. Badajoz: UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA .
- Gevara, E. (2015). *MÉTODOS HIDROLÓGICOS PARA EL ANÁLISIS DE SEQUÍAS* . Carabobo: Universidad de carabobo.
- Gnedin, N. Y., Semenov, V. A., & Kravtsov, A. V. (2018). Enforcing the Courant–Friedrichs–Lewy condition in explicitly conservative local time stepping schemes. *Journal of Computational Physics*, 93-105. doi:10.1016/j.jcp.2018.01.008

- Goodell, C. (2018). *The RAS Solution*. Retrieved from Kleinschmidt Group Inc.: <https://www.kleinschmidtgroup.com/ras-post/terrain-modification-and-direct-rainfall-video-walk-through/>
- Guerrero, A., Buitrago, M., & Curiesses, M. (2007). *Estadística Básica*. Medellín: Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Hernandez, L. (2006). *Estadística Aplicada Probabilidad y Estadística*. Ciudad de México: Universidad Nacional de México.
- Hernandez, M. (2019). Análisis Territorial de la Problemática Ambiental Urbana: El caso del municipio de Facatativá, Cundinamarca, Colombia (1980-2010). *Perspectiva Geográfica*, 92-115.
- Hurtado, G. (2012). *Sequía Meteorológica y Sequía Agrícola en Colombia: Incidencia y Tendencias*. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (2018). *Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica*. Retrieved from [www.ideam.gov.co: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf)
- Kreyszing, E. (2011). *Matemáticas Avanzadas para la Ingeniería* (Tercera ed.). México: Limusa Wile.
- Kumar, S. (2003). *SOIL CONSERVATION SERVICE CURVE NUMBER (SCS-CN) METHODOLOGY*. Lousiana: Springer-Science-Bussines media B.V.
- Lestón, P. (2008). *Acta Latinoamericana de Matemática Educativa. Comité Latinoamericano de Matemática Educativa* (Vol. XXI).
- Llamas, J. (1993). *Hidrología general: Principios*. País Vasco: Universidad del País Vasco.
- Marulanda, E., & Rodriguez, C. (2020). *Modelación Hidrodinámica y Evaluación de la Calidad del agua en el Tramo 3 del Río Botello en el Municipio de Facatativá*. Universidad de Cundinamarca.
- Microsoft. (2020). *Microsoft product screenshot(s) reprinted with permission from Microsoft Corporation*. Retrieved from <https://www.bing.com/maps/aerial>
- Modon, A. (2017). *Teoría de la Mecánica de los Fluidos*. Provincia de Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- Molina, Y. (2011). *Proyecto de Ingeniería, Diseño de la Canalización del Estero Leña Seca*. Valdivia: Escuela Austral de Chile.
- Montes, F. (2007). *Introducción a la Probabilidad*. Valencia: Universidad de Valencia.
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. In: The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. Fluid*

Mechanics and Its Applications (Vol. 113). Cham: Springer.
doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6_21

Nkwunonwo, U., Whitworth, M., & Baily, B. (2020). A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. *Scientific African*, 7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269>

Oficina de Planeación Municipal, Municipio de Facatativá. (2002). *Decreto No. 069 Por medio del cual se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Facatativá - Cundinamarca*.

Paez, B., Armando, C., & De Los Cobos, S. (2000). *Introducción a la Probabilidad*. Ciudad de México: Universidad autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa.

Ponce, V. (2015). *Fundamentación Hidráulica de Canales*. Retrieved from <http://ponce.sdsu.edu/canales/>

Ruiz, E., & Martínez, M. (2020, 09 20). *Hidrología Aplicada: Escorrentía*. Retrieved from https://ocw.ehu.es/pluginfile.php/4576/mod_resource/content/1/Material_Docente/Tema_5.pdf

Secretaria de Cultura y Juventud de Facatativá. (2010). *Recopilación de la Historia de Facatativá*. Facatativá, Cundinamarca: Alcaldía de Facatativá.

Teng, J., Jakeman, A., Vaze, J., Croke, B., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling & Software*, 90. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>

The Comet. (2020, 09 20). *Teoría del hidrograma unitario: Versión internacional*. Retrieved from https://www.academia.edu/23081641/Teor%C3%ADa_del_hidrograma_unitario_Versi%C3%B3n_internacional

Vega, H. (2011). *Propuesta Para Promover el Manejo Eficiente del Recurso Hídrico en la Microcuenca Alta del Río Botello en el Municipio de Facatativá, Desde el Marco de la Gestión Integral del Agua*. Retrieved from <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/3644/VegaMendozaHelmer2011.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Velásquez, A. (2017). *Flujos Unidimensionales, Bidimensionales y Tridimensionales*. Retrieved from docit.tips: [https://docit.tips: https://docit.tips/download/tipos-de-flujo-mecanica-de-fluidos_pdf](https://docit.tips/download/tipos-de-flujo-mecanica-de-fluidos_pdf)

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* (Second ed.). Edinburgh Gate: Pearson Education Limited.

Vigueras, A. (2016). *Cálculo Numérico: Teoría, problemas y algunos programas con Máxima* (Primera ed.). Universidad Politécnica de Cartagena. Retrieved from <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5377/isbn9788460878674.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics* (Eighth ed.). New York: McGraw-Hill.

13. ANEXOS

Anexo 1. Cartera de campo de la estación 1 del levantamiento de batimetría con nivel topográfico

Cartera de campo				
Fecha		15/03/2020		
Responsables		Daniel Sierra/ Kevin Alfonso		
Estación	Coordenadas (N,W)	Punto	X (m)	Y (m)
1	4.792226, -74.331564	1	179,9	0
		2	245,3	1,5
		3	317,6	3
		4	418,2	4,5
		5	455,7	6
		6	458,2	7
		7	458,2	9,52
		8	468,3	13,32
		9	434,4	13,83
		10	303,5	16,12
		11	209,8	17,12
		12	149,5	18,87

En este anexo se presenta un ejemplo de la cartera de campo empleada en la toma de datos de batimetría en las primeras secciones transversales mediante la utilización de nivel topográfico. En ella se presentan las coordenadas cartesianas XY que representan el contorno de la sección transversal número 1.

Anexo 2. Cartera de campo de las estaciones 14 y 15 del levantamiento de batimetría con estación total.

Cartera de campo									
Fecha		15/03/2020			Responsables			Daniel Sierra/ Kevin Alfonso	
Estacion	punto	angulo			distancia	altura baston	altura instrumento		
		grados	min	seg					
15	1	250	47	59	3,098	1,6	1,36		
	2	246	28	49	6,475	1,6			
	3	242	6	39	7,678	1,6			
	4	256	41	40	11,866	2,5			
	5	260	34	33	12,527	2,5			
	6	266	3	43	14,209	2,5			
	7	274	11	17	17,188	2,5			
14	1	247	38	53	2,659	2	1,34		
	2	240	28	5	6,199	2			
	3	257	28	59	10,506	2,5			
	4	263	38	9	11,298	2,5			
	5	272	4	26	15,454	2,5			
	6	276	57	46	17,847	2,5			

En este anexo se presenta el modelo de la cartera de campo empleado en la toma de datos de batimetría en las secciones trasversales mediante la utilización de estación total. Con la estación total se determinó un ángulo y una distancia para luego por una relación trigonométrica determinar las coordenadas XY que definen el contorno de las secciones trasversales o perfiles batimétricos.

Anexo 3. Coordenadas XY de los perfiles batimétricos en las estaciones 18, 19, 20 y 21.

Estación	Coordenadas (N,W)	Punto	X (m)	Y (m)
21	4.804813, -74.343827	0	0,000	0,000
		1	3,347	-0,853
		2	7,930	-2,600
		3	9,892	-3,346
		4	11,166	-1,002
		5	13,532	-5,611
20	4.802640, -74.335990	0	0,000	0,000
		1	2,102	-0,554
		2	-2,888	1,678
		3	6,241	-2,860
		4	9,736	-1,963
		5	6,527	-9,632
19	4.802417, -74.334535	0	0,000	0,000
		1	3,442	-0,572
		2	5,166	-1,241
		3	5,404	-2,331
		4	10,421	-2,988
		5	12,606	-0,617
18	4.800660, -74.334031	0	0,000	0,000
		1	2,330	-0,691

		2	4,575	-2,114
		3	5,216	-2,945
		4	9,626	-2,990
		5	11,814	-1,585
		6	14,619	-0,563
		7	17,553	0,506

En este anexo se muestran las coordenadas XY para las estaciones 18,19, 20 y 21 después de solucionar las relaciones trigonométricas entre los ángulos y distancias recolectadas mediante estación total.

Anexo 4. Cartera de campo para la medición del parámetro hidráulicos por el método de flotadores y vadeo.

Toma de Datos de Caudal			
Fecha	8/3/2020	Responsables	Daniel Sierra/Kevin Alfonso
Coordenada	4.792320, - 74.331629	Longitud (m)	14,62
Coordenadas XY área transversal de flujo			
	X(m)		Y(m)
	2,91		0,27
	2,15		0,39
	1,6		0,46
	1,45		0,49
	0,94		0,45
	0,4		0,45
	0		0,45
TIEMPO			
Muestra	Centésimas de segundo		segundos
T1	8018		80,18
T2	7662		76,62
T3	7444		74,44
T4	7080		70,8
T5	6170		61,7
T6	6628		66,28
T7	6553		65,53
T8	7085		70,85
T9	7192		71,92
T10	6981		69,81
	T promedio		70,813

En este apartado se muestra un ejemplo de cartera de campo de las campañas de medición de parámetros hidráulicos para la determinación de caudales. Corresponde al tramo aguas abajo en la campaña del 8 de marzo del 2020, donde

se determinaron por vadeo las coordenadas XY de la sección transversal, la longitud del tramo y los tiempos que tardaban en recorrer los flotadores la distancia del tramo.

Anexo 5. Metodología de cálculo del hidrograma unitario del SCS

Para el cálculo del hidrograma unitario por el método SCS se requiere los siguientes parámetros iniciales:

Parámetro	Símbolo	Unidad
Área de la cuenca	A_c	Km^2
Longitud del río principal	L	m
Pendiente media del río principal	S	m/m

Tabla 16. Parámetros iniciales para el cálculo de un hidrograma unitario.

Fuente: (Campos A. , Hidráulica e hidrología para ingeniería , 2016)

En primera instancia se tiene que calcular una variable denominada tiempo de concentración T_c ; este se define “como el tiempo requerido para que, durante un aguacero uniforme, se alcance el estado estacionario; es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya eficazmente a la generación de flujo en el sitio de desagüe” (Llamas, 1993), su cálculo se da por:

$$T_c(Horas) = 0,000325 \frac{L^{0,77}}{S^{0,385}} \quad (1)$$

A partir del tiempo T_c se determina el tiempo de retardo T_r , “el cual se asocia al tiempo en el que la mayor parte de la escorrentía de la cuenca alcanza el punto de salida” (Batanero, 2015), para calcularlo se emplea la siguiente expresión:

$$T_r = 0,6 T_c \quad (2)$$

Otros parámetros asociados se definen a continuación:

Duración de la lluvia d_e :

$$d_e = 2 \sqrt[2]{T_c} \quad (3)$$

Tiempo pico T_p :

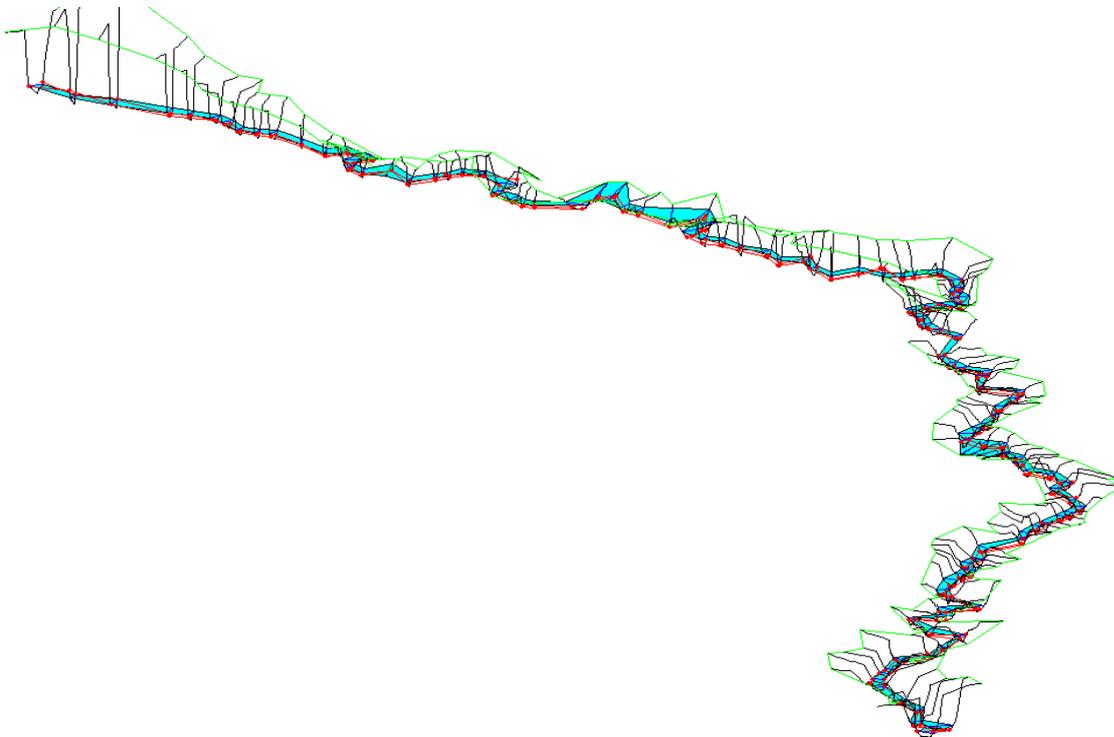
$$T_p = \frac{d_e}{2} + T_r \quad (4)$$

Caudal pico Q_p

$$Q_p = 0,208 \frac{A_c}{T_p} \quad (5)$$

El SCS para practicidad y acceso al cálculo ha estandarizado hidrograma unitario adimensional (figura 9) que permite realizar rápidamente el hidrograma unitario partiendo de las relaciones T/T_p y Q/Q_p ; con estas relaciones y usando los valores pico obtenidos se obtiene el hidrograma.

Anexo 6. Vista en 3D de las sesiones transversales, inundación periodo de retorno 43 años en 1D régimen permanente.



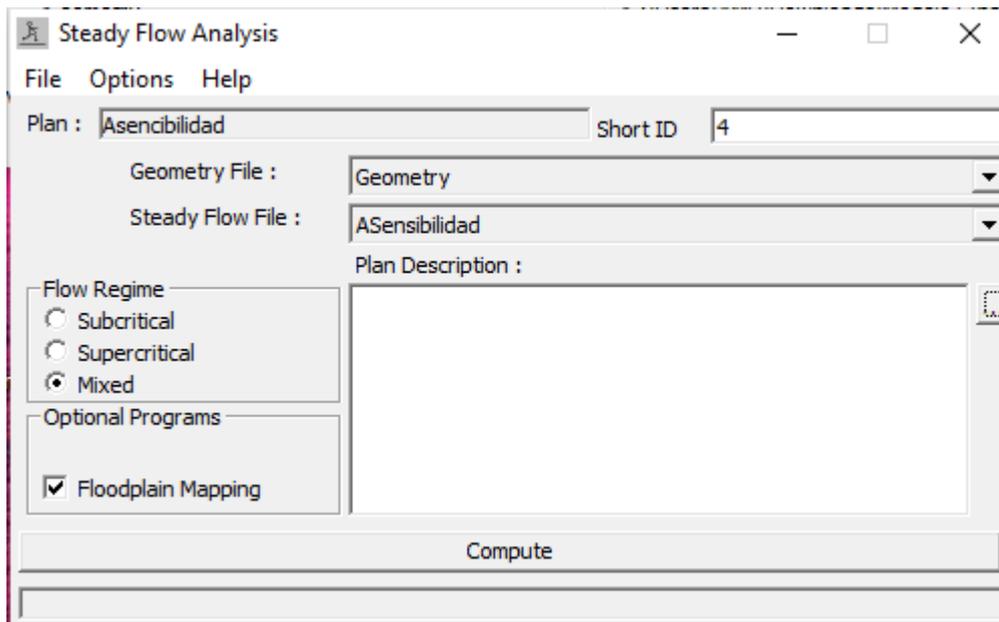
Se presenta un ejemplo de inundación en una vista tridimensional de las secciones transversales; el evento de inundación corresponde a la inundación del periodo de retorno de 43 años en 1D.

Anexo 7. Resumen extendido del proceso de calibración del modelo.

Datos del Software (Coeficiente de Manning : 0,07)							
Prueba # 1 (Pendiente 1%)							
Lugar	Velocidad (m/sg)	Altura lámina de agua (m)	Área de Flujo (m2)	Error de Velocidad	Error Altura	Error del Área de Flujo	Error del modelo
Aguas Arriba (Cota 11569)	0,11	0,14	0,16	8,3%	22,2%	3,6%	11,3%
	0,11	0,15	0,19	15,4%	25,0%	1,1%	
Aguas Abajo (Cota 789)	0,23	0,45	1,11	9,5%	8,2%	9,0%	
	0,23	0,48	1,24	9,5%	12,7%	10,8%	
Prueba # 2 (Pendiente 0,55%)							
Lugar	Velocidad (m/sg)	Altura lámina de agua (m)	Área de Flujo (m2)	Error de Velocidad	Error Altura	Error del Área de Flujo	Error del modelo
Aguas Arriba (Cota 11569)	0,12	0,14	0,16	0,0%	22,2%	3,6%	9,8%
	0,12	0,15	0,19	7,7%	25,0%	1,1%	
Aguas Abajo (Cota 789)	0,22	0,46	1,15	4,8%	6,1%	5,7%	
	0,24	0,47	1,22	14,3%	14,5%	12,2%	
Prueba # 3 (Pendiente 0,21%)							
Lugar	Velocidad (m/sg)	Altura lámina de agua (m)	Área de Flujo (m2)	Error de Velocidad	Error Altura	Error del Área de Flujo	Error del modelo
Aguas Arriba (Cota 11569)	0,12	0,15	0,17	0,0%	16,7%	2,4%	10,9%
	0,12	0,16	0,2	7,7%	20,0%	6,4%	
Aguas Abajo (Cota 789)	0,23	0,45	1,11	9,5%	8,2%	9,0%	
	0,25	0,46	1,17	19,0%	16,4%	15,8%	
Datos del Software (Coeficiente de Manning: 0,075)							
Prueba # 4 (Pendiente 1%)							
Lugar	Velocidad (m/sg)	Altura lámina de agua (m)	Área de Flujo (m2)	Error de Velocidad	Error Altura	Error del Área de Flujo	Error del modelo
Aguas Arriba (Cota 11569)	0,12	0,15	0,17	0,0%	16,7%	2,4%	9,4%
	0,12	0,16	0,2	7,7%	20,0%	6,4%	
Aguas Abajo (Cota 789)	0,23	0,45	1,11	9,5%	8,2%	9,0%	
	0,23	0,48	1,24	9,5%	12,7%	10,8%	
Prueba # 5 (Pendiente 0,55%)							
Lugar	Velocidad (m/sg)	Altura lámina de agua (m)	Área de Flujo (m2)	Error de Velocidad	Error Altura	Error del Área de Flujo	Error del modelo
Aguas Arriba (Cota 11569)	0,12	0,15	0,17	0,0%	16,7%	2,4%	9,2%
	0,12	0,16	0,2	7,7%	20,0%	6,4%	
Aguas Abajo (Cota 789)	0,22	0,46	1,15	4,8%	6,1%	5,7%	
	0,24	0,47	1,22	14,3%	14,5%	12,2%	
Prueba # 6 (Pendiente 0,21%)							
Lugar	Velocidad (m/sg)	Altura lámina de agua (m)	Área de Flujo (m2)	Error de Velocidad	Error Altura	Error del Área de Flujo	Error del modelo
Aguas Arriba (Cota 11569)	0,13	0,14	0,16	8,3%	22,2%	3,6%	8,8%
	0,13	0,15	0,19	0,0%	25,0%	1,1%	
Aguas Abajo (Cota 789)	0,22	0,46	1,16	4,8%	6,1%	4,9%	
	0,23	0,49	1,27	9,5%	10,9%	8,6%	

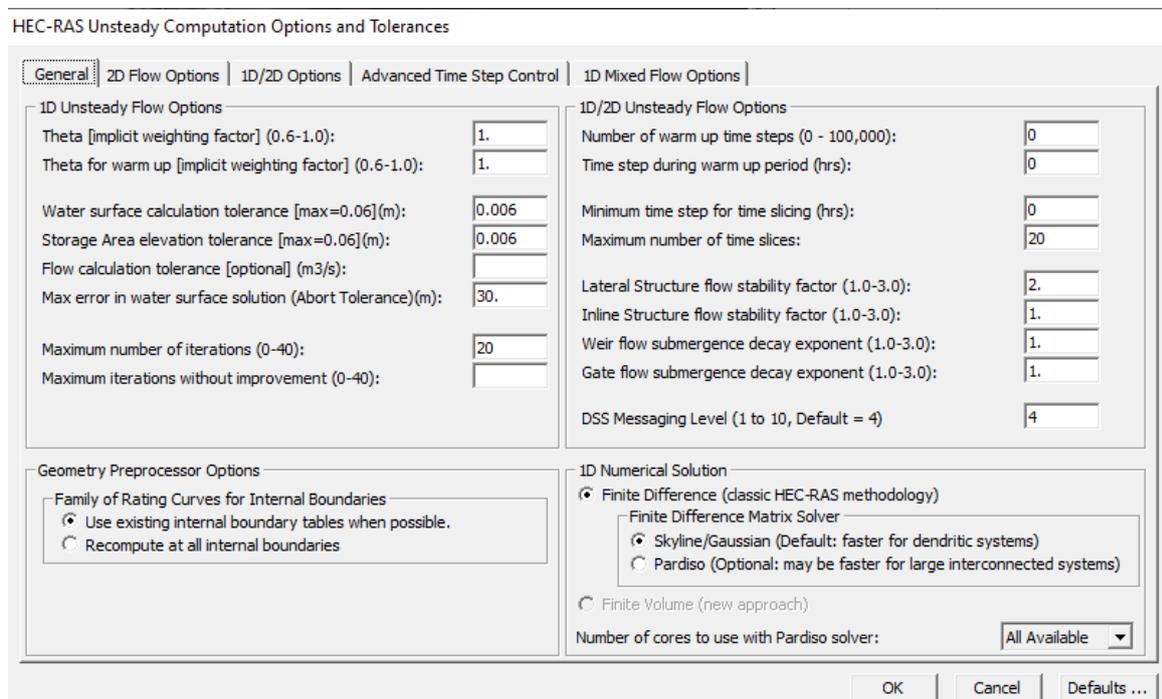
En el proceso de calibración se realizaron 6 pruebas variando los valores de rugosidad y pendiente con el objeto de identificar cual prueba se aproximaba más a las condiciones observadas en campo. Los resultados obtenidos fueron contrastados con los datos tomados en campo y se calculó un porcentaje de error.

Anexo 8. Configuración de la modelación para 1D



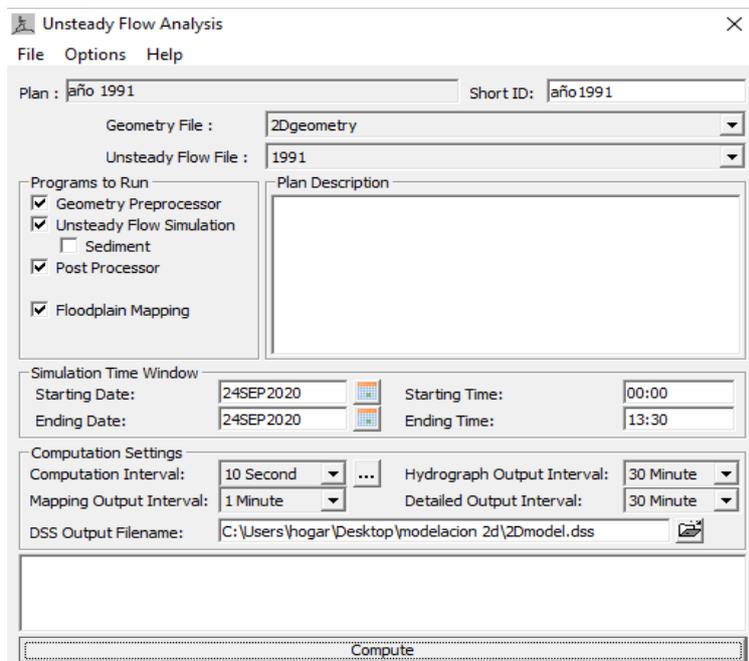
Para la modelación en 1D se tomó como consideración modelar en régimen mixto (subcrítico y súpercrítico), esto debido a que podría darse un cambio de régimen por efectos propios de la geometría del tramo.

Anexo 9. Configuración de la modelación 2D

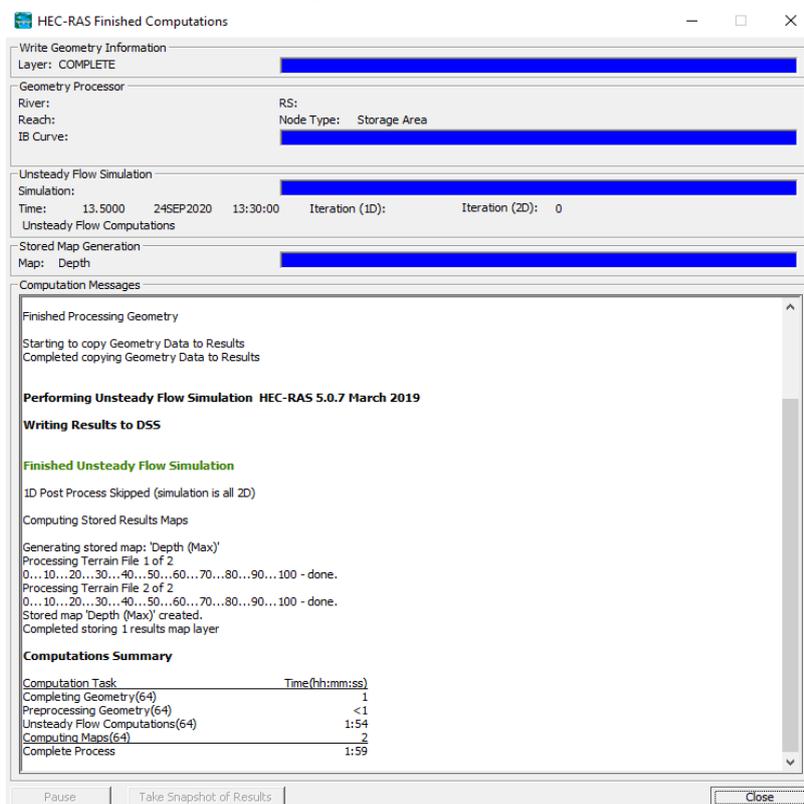


Se presenta la configuración general de la modelación en 2D, donde se dejó la configuración por defecto.

También se presenta la configuración específica para el evento de 1991, donde se puede observar el tiempo computacional elegido, así como el intervalo para la salida de los mapas. Adicionalmente se presentan los comentarios que arroja el modelo durante y al final de la computación del evento, de los cuales no arroja comentarios sobre inestabilidad del modelo, indicando una modelación correcta.



configuracion evento 1991



Comentarios de la computación del evento de 1991.