

**SIMULACIÓN DE INUNDACIONES A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL
Y DE TOPOBATIMETRÍA EN UN SECTOR DEL RÍO EJIDO**



**JUAN CAMILO ROJAS LUCERO
ERIKA STEFANIA SONS HERNÁNDEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN, CAUCA
2017**

**SIMULACIÓN DE INUNDACIONES A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL
Y DE TOPOBATIMETRÍA EN UN SECTOR DEL RÍO EJIDO**



**JUAN CAMILO ROJAS LUCERO
ERIKA STEFANIA SONS HERNÁNDEZ**

**Trabajo de grado modalidad investigación como requisito parcial para
optar al título de Ingenieros Ambientales**

Directora

Ing. MSc. María Elvira Guevara A.

Asesor externo

Ing. Ambiental Fabián Andrés Calvache Hoyos

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN, CAUCA
2017**

NOTA DE ACEPTACIÓN

La tesis de pregrado titulada “Simulación de Inundaciones a partir de Cartografía Digital y de Topobatimetría en un Sector del río Ejido”, presentada por Juan Camilo Rojas Lucero y Erika Stefania Sons Hernández, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Ingenieros Ambientales.

Ing. MSc. María Elvira Guevara A.
Directora del trabajo de investigación

Hugo Yair Orozco Dueñas
Jurado

Hernán Nope Rodríguez
Jurado

Popayán, Mayo 12 de 2017

A mis padres Luis Armando Rojas, Carmen Elena Lucero y a mi hermana Valentina Rojas Lucero, por su inalcanzable perseverancia y apoyo incondicional en mi formación humana y profesional.

A mis padres Ismael Sons, Rubiela Hernández y a mi hermana Sharly Lorena Sons por la formación personal mediante valores, carácter y constancia para trabajar por mis metas.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Cauca, especialmente a la Facultad de Ingeniería Civil y a cada uno de sus honorables docentes, por su contribución en nuestra formación académica y personal.

A nuestra directora, la Ingeniera María Elvira Guevara Álvarez, por depositar su confianza en nosotros, estimular el aprendizaje y en especial por brindarnos su disponibilidad y paciencia, de igual manera por todo lo aprendido junto a ella, porque sin su ayuda realizar ésta investigación no hubiese sido posible.

Al Ingeniero Fabián Andrés Calvache Hoyos, por compartir con nosotros su tiempo y conocimiento, siendo nuestra guía durante el desarrollo del trabajo de investigación.

Al Magíster Edwin Rengifo Canizales por el apoyo brindado en el tratamiento estadístico de los resultados obtenidos en el trabajo.

A nuestros amigos más cercanos, por sus consejos y años de trabajo y amistad.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
2. ANTECEDENTES	14
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
4. JUSTIFICACIÓN	16
5. HIPÓTESIS	17
6. OBJETIVOS	18
6.1. OBJETIVO GENERAL	18
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
7. METODOLOGÍA	19
7.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	19
7.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	20
7.3. PRE-PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL Y TOPOBATIMÉTRICA	20
7.4. SIMULACIÓN HIDRÁULICA	20
7.5. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO	21
7.6. POST-PROCESAMIENTO DE RESULTADOS CON EL PROGRAMA HEC-GeoRAS	21
7.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS	21
7.8. ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	22
8. MARCO TEÓRICO	23
8.1. INUNDACIONES	23
8.2. TOPOBATIMETRÍA	23
8.3. CARTOGRAFÍA DIGITAL	23
8.4. MODELACIÓN HIDRÁULICA	24
8.5. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA –SIG-	24
8.6. ArcGIS	25
8.7. HEC-GeoRAS	25
8.8. HEC-RAS	25
8.9. ESTRUCTURA HIDRÁULICA	26
8.10. CONDICIONES DE CONTORNO EN HEC-RAS	27
9. MARCO REFERENCIAL	28
9.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA ENTRE HEC-RAS Y CCHE-2D, RÍO SUAREZ- BOYACÁ	28

9.2.	MODELACIÓN HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA PARA DETERMINAR LA VULNERABILIDAD A INUNDACIONES EN UN TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LOS POBLADOS GUAPILES Y LA RITA- RÍO GUÁPILES	28
9.3.	SIMULACIÓN DE INUNDACIONES A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL Y DE TOPOBATIMETRÍA- RÍO MOLINO	29
9.4.	ESTUDIO PRELIMINAR DE RIESGOS ASOCIADOS A FENÓMENOS DE INUNDACIÓN LENTA Y SÚBITA EN LA ZONA URBANA Y RURAL DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN	29
9.5.	MODELIZACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA INUNDACIÓN DE UN RÍO POLACO EN LOS CÁRPATOS: COMPARACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL TRAMO CANALIZADO Y SIN INTERVENCIÓN	29
9.6.	APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA EL MODELAMIENTO DE ZONAS CON RIESGO DE INUNDACIÓN- RÍO LURÍN, PERÚ	30
9.7.	ESTUDIO HIDRÁULICO PARA DETERMINAR ZONAS INUNDABLES Y ANÁLISIS DE SOLUCIONES DE PROTECCIÓN EN EL MUNICIPIO DE BALMASEDA, PAÍS VASCO	30
9.8.	USO DE SIG EN LA DETERMINACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIÓN EN EL MUNICIPIO DE CHÍA	30
10.	CASO EN ESTUDIO	32
10.1.	LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	32
10.2.	INFORMACIÓN BÁSICA	33
10.2.1.	Información cartográfica digital	33
10.2.2.	Información topobatimétrica	33
10.3.	PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN	33
10.3.1.	Preparación de la información topobatimétrica	33
10.3.2.	Preparación de la información cartográfica digital	33
10.4.	PRE-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION CARTOGRÁFICA DIGITAL EN EL HEC-GeoRAS	34
10.5.	PROCESAMIENTO EN HEC-RAS	39
10.6.	PROCESAMIENTO EN HEC-RAS PARA LOS TRAMOS EJIDO 1, EJIDO 2 Y LA PAILA	40
10.6.1.	Datos geométricos	40
10.6.2.	Datos hidráulicos	43
10.7.	PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE TEJARES - EJIDO 3	44
10.7.1.	Preparación de la información topobatimétrica	44
10.7.2.	Preparación de la información cartográfica digital	44

10.8. PROCESAMIENTO EN HEC-RAS PARA EL TRAMO TEJARES – EJIDO3	45
10.8.1. Datos geométricos	45
10.8.2. Datos hidráulicos	46
11. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA EJIDO	48
11.1. RESULTADOS HIDRÁULICOS PARA EL TRAMO EJIDO 1	52
11.1.1. Perfiles longitudinales	53
11.1.2. Secciones transversales	54
11.2. RESULTADOS HIDRÁULICOS PARA EL TRAMO EJIDO 2	55
11.2.1. Perfiles longitudinales	55
11.2.2. Secciones transversales	56
11.3. RESULTADOS HIDRÁULICOS PARA EL TRAMO LA PAILA	57
11.3.1. Perfiles longitudinales	57
11.3.2. Secciones transversales	58
11.4. RESULTADOS HIDRÁULICOS PARA EL TRAMO TEJARES - EJIDO 3	59
11.4.1. Perfiles longitudinales	59
11.4.2. Secciones transversales	60
12. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	61
13. POST-PROCESAMIENTO	66
14. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE INUNDACIONES A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL	69
15. LIMITACIONES DEL ESTUDIO	72
16. RECOMENDACIONES	73
17. CONCLUSIONES	74

ANEXOS EN FORMATO DIGITAL

ANEXO A. Ampliación de conceptos del marco teórico y marco referencial.

ANEXO B. Archivos SIG, cartografía digital y topobatimetría (Convenio 20131800008927)

ANEXO C. Archivos HEC-RAS.

ANEXO D. Resultados de la simulación hidráulica con HEC-RAS, tratamiento estadístico con SPSS.

ANEXO E. Mapas de zonas de inundación.

ANEXO F. Informe final del trabajo de investigación, gráficos y carta de aprobación de la Alcaldía de Popayán.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 7.1 Metodología	19
Figura 8.1. Sección transversal con efecto del dique	27
Figura 10.1. Localización del sistema en estudio.....	32
Figura 10.2. Localización del sistema Ejido en el municipio de Popayán	32
Figura 10.3. Barra de herramientas del HEC-GeoRAS	34
Figura 10.4. Información cartográfica digital del municipio de Popayán	34
Figura 10.5. Recorte de la zona de estudio y creación del TIN en ArcGIS.....	35
Figura 10.6. Comando para identificar un cauce	35
Figura 10.7. Identificación del cauce	36
Figura 10.8. Comando para identificar los Flow Path	36
Figura 10.9. Identificación de la llanura de inundación	36
Figura 10.10. Resultados de la topología de los flowpath para un tramo	37
Figura 10.11. Definición del cauce principal, llanuras de inundación y secciones transversales de un tramo de la zona de estudio.....	37
Figura 10.12. Asignación de atributos a los elementos creados	38
Figura 10.13. Asignación de atributos de las secciones transversales	38
Figura 10.14. Preparación para la exportación	38
Figura 10.15. Exportación de geometría al HEC-RAS.....	39
Figura 10.16. Modelo geométrico topobatimétrico de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila	40
Figura 10.17. Modelo geométrico cartográfico digital de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila	41
Figura 10.18. Cauce Ejido 1, Barrio Avelino Ull	42
Figura 10.19. Cauce Ejido 2, Barrio Los Sauces	42
Figura 10.20. Modelo geométrico topobatimétrico y cartográfico digital de Tejares – Ejido 3	45
Figura 10.21. Cauce quebrada Tejares	46
Figura 10.22. Cauce Ejido 3. Descarga del box culvert	46
Figura 11.1. Modelo geométrico topobatimétrico de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila	48
Figura 11.2. Modelo geométrico cartográfico digital de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila	49
Figura 11.3. Esquema en 3D del modelo topobatimétrico de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila	50
Figura 11.4. Esquema en 3D del modelo cartográfico digital de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila	50
Figura 11.5. Modelo geométrico Tejares - Ejido 3	51
Figura 11.6. Esquema en 3D del modelo topobatimétrico de Tejares – Ejido 3	51
Figura 11.7. Esquema en 3D del modelo cartográfico digital de Tejares- Ejido 3.....	52
Figura 11.8. Perfil longitudinal del modelo topobatimétrico para el tramo Ejido 1, pendiente media del cauce: 0.01181	53

Figura 11.9. Perfil longitudinal del modelo cartográfico digital para el tramo Ejido 1, pendiente media del cauce: 0.01075	53
Figura 11.10. Perfil longitudinal del modelo topobatimétrico para el tramo Ejido 2, pendiente media del cauce: 0.00979	55
Figura 11.11. Perfil longitudinal del modelo cartográfico digital para el tramo Ejido 2, pendiente media del cauce: 0.00792	55
Figura 11.12. Perfil longitudinal del modelo topobatimétrico para el tramo La Paila, pendiente media del cauce: 0.02029	57
Figura 11.13. Perfil longitudinal del modelo cartográfico digital para el tramo La Paila, pendiente media del cauce: 0.02146	57
Figura 11.14. Perfil longitudinal del modelo cartográfico digital para el tramo Tejares – Ejido 3, con pendiente media del cauce: 0.0051	59
Figura 11.15. Perfil longitudinal del modelo topobatimétrico para el tramo Tejares – Ejido 3, con pendiente media del cauce: 0.0050	59
Figura 12.1. Diagrama de cajas para las velocidades con un caudal con tiempo de retorno 30 años	63
Figura 12.2 Diagrama de cajas para las profundidades de agua con un caudal de tiempo de retorno 30 años	64
Figura 12.3 Diagrama de cajas para el ancho de inundación con un caudal de tiempo de retorno 30 años	65
Figura 13.1. Superposición del ancho de inundación de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila	66
Figura 13.2. Superposición del ancho de inundación de Tejares, tiempo de retorno: 30 años	67
Figura 13.3. Superposición del ancho de inundación para un tramo del río Molino, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{s}$	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Mosaico de fotos para el sistema Ejido.....	39
Tabla 2. Valores típicos de los coeficientes de contracción y expansión en flujo subcrítico	42
Tabla 3. Coeficientes de rugosidad de Manning determinados	42
Tabla 4. Caudales para los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila	43
Tabla 5. Condición de frontera para el modelo cartográfico digital	43
Tabla 6. Condición de frontera para el modelo topobatimétrico	44
Tabla 7. Coeficientes de rugosidad de Manning determinados	46
Tabla 8. Caudales para Tejares y Ejido 3	47
Tabla 9. Condición de frontera para el modelo cartográfico digital	47
Tabla 10. Condición de frontera para el modelo topobatimétrico.....	47
Tabla 11. Comparación de secciones transversales del tramo Ejido 1.....	54
Tabla 12. Comparación de secciones transversales del tramo Ejido 2.....	56
Tabla 13. Comparación de secciones transversales del tramo La Paila	58
Tabla 14. Comparación de secciones transversales del tramo Tejares - Ejido 3.....	60
Tabla 15. Resumen cuantitativo de los resultados hidráulicos del sistema Ejido.....	61
Tabla 16. Comparación cualitativa de parámetros hidráulicos para el sistema Ejido	62
Tabla 17. Resumen cuantitativo de los parámetros hidráulicos del río Molino	62
Tabla 18. Comparación cualitativa de los resultados hidráulicos del río Molino	63

INTRODUCCIÓN

La dinámica de los ecosistemas y los organismos que la integran, requieren del recurso hídrico como elemento imprescindible para su funcionamiento; dicho recurso es básico para el desarrollo de las actividades económicas, sociales, culturales y ambientales de la población, la cual se abastece de una red hídrica que varía según el territorio. En particular, la ubicación geográfica de Colombia ofrece condiciones climatológicas, orográficas e hidrológicas favorables con amplia disponibilidad del recurso. No obstante, la comunidad es susceptible ante los efectos que generan eventuales sequías e inundaciones, lo que puede producir pérdidas económicas por la afectación de zonas residenciales, infraestructura, actividades comerciales y como efecto más grave, pérdida de vidas humanas.

Las inundaciones históricamente se constituyen en una amenaza, tanto para la zona urbana como la rural y crean escenarios de riesgo, provocando desbordamientos del cauce de un río, especialmente cuando se presentan precipitaciones de cierta duración e intensidad, problema que se agrava en algunas ocasiones por la intervención del ser humano que causa deforestación, construcción de viviendas en zonas próximas al río y puentes con poca capacidad hidráulica, deficiente mantenimiento de los cauces, entre otros.

De acuerdo con lo anterior, las inundaciones a lo largo de la historia han perturbado la vida de las comunidades y un ejemplo de ello se vivió cuando el país tuvo que lidiar con la ola invernal ocurrida en los años 2010 y 2011, durante los cuales el fenómeno de la Niña impactó fuertemente en las precipitaciones, temperaturas y caudales de los ríos (CEPAL, 2012). Por otra parte, ante imprevistos de este tipo, el gobierno mediante la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres pretende cambiar el enfoque de prevención y atención de emergencias por la Gestión del Riesgo de Desastres, apoyándose en lo que establece la Ley 1523 de 2012. (Congreso de la República , 2012)

En particular, el Municipio de Popayán tiene como principales fuentes hídricas los ríos Blanco, Ejido, Molino, Las Piedras, Cauca, Negro, Pisojé, Clarete, Saté y Hondo (Alcaldía de Popayán , 2013); ver mapa en anexo F, sin embargo, los registros indican que especialmente los ríos Molino y Ejido han causado inundaciones de gran magnitud en la zona urbana de este municipio, por lo que resulta interesante estudiar, analizar y aportar al avance en el conocimiento de las inundaciones asociadas a estos ríos que cruzan Popayán, a través de la simulación del comportamiento hidráulico de los cauces usando herramientas computacionales que puedan apoyar la toma de decisiones sobre acciones correctivas y preventivas.

2. ANTECEDENTES

El Municipio de Popayán cuenta con afluentes hídricos que atraviesan la zona urbana, ocasionando eventualmente inundaciones causantes de detrimento en la calidad de vida de la población; en particular, el río Ejido y sus afluentes Tejares y Sauces, han congregado asentamientos vinculados con el proceso de crecimiento de la ciudad y se han convertido en elementos que estructuran una transformación del suelo rural a urbano. (Corporación Autónoma Regional del Cauca, 2006)

Solo como ejemplo, para los años 1981, 1984, 1993 y 1999, se encuentran registros de los desbordamientos del río Ejido en barrios como El Lago, Los Andes, Avelino Ull, María de Occidente, Siolé, Las Ferias, Poblado Alto y Los Sauces, generando riesgo para viviendas en zonas de conflicto por uso del suelo, desestabilización de la vía por socavamiento del cauce del río, desestabilización del suelo, entre otros. (Corporación Autónoma Regional del Cauca, 2006). Ver anexo F.

Por otro lado, la Universidad del Cauca adelantó para el Municipio de Popayán el Convenio 20131800008927 ALCALDÍA-UNICAUCA que se finalizó en el 2015, cuyo objeto fue realizar el estudio preliminar de riesgos (afectación y daños) asociados a fenómenos de inundación lenta y súbita (avenida torrencial) en la zona urbana y rural del Municipio de Popayán. Este estudio contempló la determinación de amenazas por inundaciones incluyendo entre otros métodos, la simulación hidráulica a partir de topobatimetría tomada en campo, la evaluación heurística y el análisis geomorfológico. Partiendo de la información generada durante este convenio, se desarrolló un trabajo de grado titulado "Simulación de Inundaciones a partir de Cartografía Digital y de Topobatimetría" cuya aplicación se hizo para un tramo del río Molino, (Calvache, F. y Pérez, D., 2016) Aprovechando esta información, se plantea el presente trabajo de investigación para confrontar resultados, haciendo una aplicación para un sector del sistema Ejido. Ver anexo F

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La simulación hidráulica de las inundaciones implica que se cuente con información que permita caracterizar la morfología del río, conocer el posible comportamiento para distintas condiciones de creciente e identificar los diferentes elementos naturales o artificiales vinculados con un cauce. Para hacer la simulación en una dimensión, se requiere contar con información geométrica consistente en el cauce del río en planta, perfil longitudinal, secciones transversales e información hidráulica incluyendo básicamente caudales y condiciones de frontera.

La información geométrica se puede obtener a partir de topobatimetría tomada en campo o de cartografía digital. Es de resaltar que la recopilación de datos en campo implica mayor riesgo y costos, siendo éste último un factor limitante para su aplicación, dicha información, también se puede obtener a partir de imágenes digitales de buena calidad, lo cual resulta ventajoso en comparación con la topobatimetría. Por otra parte, también es difícil predecir los caudales que se presentarán en el tiempo, de ahí la importancia de construir diferentes escenarios de amenaza.

Por lo tanto, se quiere explorar la simulación de las inundaciones a partir de cartografía digital y su posibilidad de uso para la toma de medidas de gestión territorial, planteamiento de soluciones y actuaciones de manera proactiva frente a fenómenos de inundación.

4. JUSTIFICACIÓN

La realización de este trabajo de investigación se justifica desde varios puntos de vista:

- a) Analizar los resultados de la simulación hidráulica a través de parámetros como anchos de inundación, profundidades y velocidades de agua, realizada para un tramo de un cauce ramificado y los obtenidos en una investigación previa en un tramo de cauce único. (Calvache, F. y Pérez, D., 2016).
- b) Explorar herramientas computacionales para la simulación hidráulica fluvial, ya que se requiere realizar cálculos extensos, complejos y repetitivos con una gran cantidad de datos que se procesarían de forma más sencilla con apoyos computacionales.
- c) Ampliar el conocimiento en cuanto a los recursos naturales del Departamento del Cauca que permita la toma de decisiones, puesto que la modelación hidráulica facilita el manejo de muchos elementos relacionados con proyectos de acueductos, drenajes, centrales hidroeléctricas, control de inundaciones, control ambiental, distritos de riego, riesgos y en general, con el aprovechamiento del recurso hídrico que es esencial para el desarrollo de la región y del país.
- d) Avanzar en el conocimiento de la forma en que se pueden caracterizar los sistemas hidráulicos que involucran aspectos como geografía, topografía, hidrología, suelos, coberturas vegetales, afectaciones antrópicas, entre otros, a partir de imágenes satelitales, debido a que la recopilación de la información en campo es muy costosa, pudiéndose minimizar tiempo y costos, si se comprueba mediante esta investigación, la posibilidad de usar cartografía digital.
- e) Apoyar a la línea de investigación en Hidráulica Fluvial del Departamento de Hidráulica de la Universidad del Cauca y específicamente al área de Modelación Hidrológica e Hidráulica, sirviendo de esta manera como base para futuros trabajos de investigación y/o aplicación.
- f) Avanzar en el conocimiento del riesgo de acuerdo a la relevancia que le otorga la ley 1523 de 2012, "por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres", ya que el trabajo de investigación se convierte en una herramienta útil para la formulación, ejecución y evaluación de políticas y estrategias para la reducción del riesgo, conforme a lo establecido en el artículo 1 (Congreso de la República, 2012)

5. HIPÓTESIS

Se asume que las zonas de inundación son mayores cuando se usa cartografía digital para realizar la simulación de inundaciones; por ello, se busca comparar los resultados con relación a los obtenidos a partir de topobatimetría y determinar semejanzas o diferencias en cuanto a parámetros hidráulicos como profundidad, ancho de la superficie libre del agua y velocidades de flujo.

6. OBJETIVOS

6.1. OBJETIVO GENERAL

Comparar zonas de inundación generadas a partir de la simulación realizada con cartografía digital y topobatimetría medida en campo en un sistema fluvial ramificado.

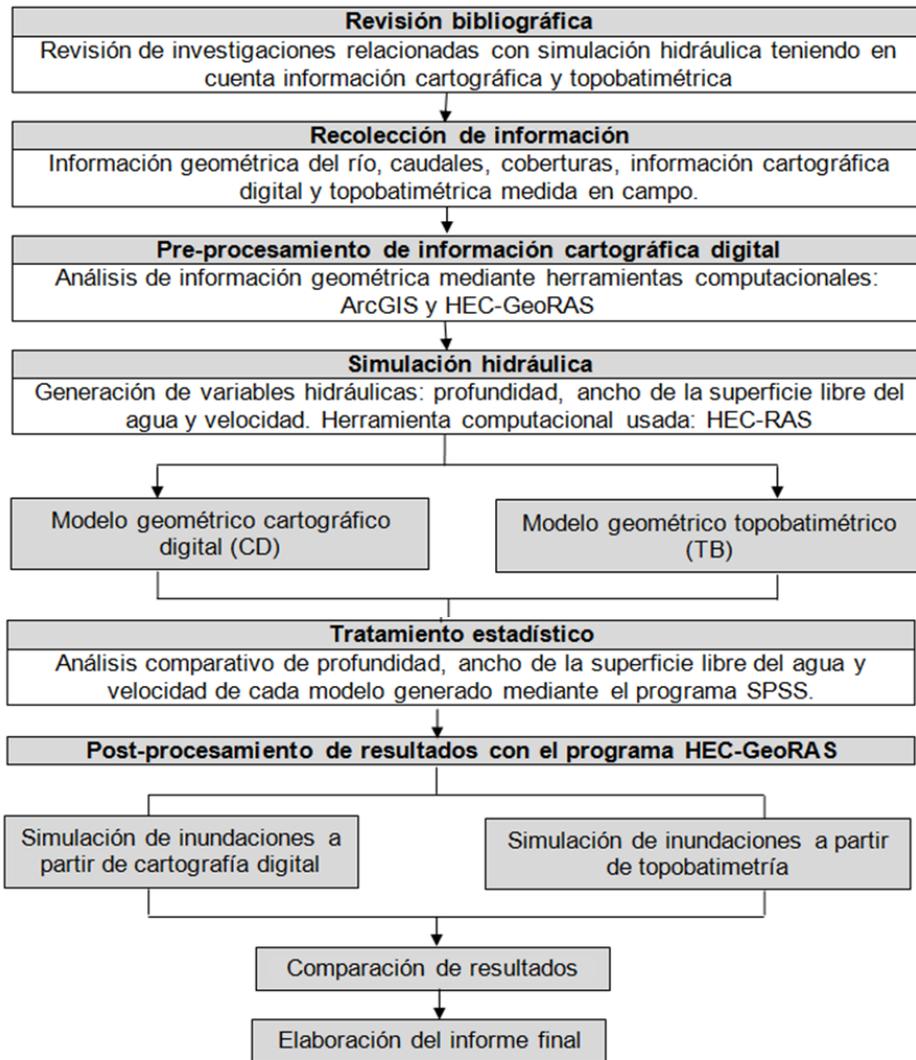
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Procesar información cartográfica y topobatimétrica con el apoyo de sistemas de información geográfica.
- b) Realizar la simulación hidráulica de zonas de inundación y generar parámetros hidráulicos para el sistema del río Ejido, a partir de herramientas computacionales.
- c) Comparar y analizar resultados de la simulación hidráulica realizada en un cauce ramificado, con los obtenidos en un cauce único según trabajo de investigación ya concluido. (Calvache, F. y Pérez,D., 2016).

7. METODOLOGÍA

Las etapas por desarrollar en el trabajo se ilustran en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 7.1 Metodología



Fuente: Autores

7.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este trabajo de investigación consiste en la simulación de inundaciones en un sector del río Ejido, el cual conforma un sistema ramificado al que le llegan las quebradas Tejares y Saucos, por lo que es importante revisar cuidadosamente la investigación realizada en la Universidad del Cauca relacionada con la simulación hidráulica teniendo en cuenta la información cartográfica y topobatimétrica para el cauce del río Molino. (Calvache, F. y Pérez, D., 2016)

Respecto a la información teórica o conceptual, se realizó una búsqueda bibliográfica para conocer el estado del arte de la simulación de inundaciones a partir de modelos topobatimétricos y cartográficos digitales, lo cual permite comprobar el desarrollo de investigaciones en dicho tema en estudio realizados en Colombia y otras partes del mundo.

De igual manera, se revisó información conceptual del manejo de las herramientas a utilizar como el ArcGIS, el HEC-GeoRAS, el HEC-RAS y el SPSS, dado que es necesario seguir los pasos adecuados para el procesamiento de la información cartográfica digital y topobatimétrica.

7.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para desarrollar el trabajo de investigación se empleó la información cartográfica digital disponible para la zona urbana, consistente en curvas de nivel del terreno detalladas cada dos metros obtenidas a partir del proceso de restitución realizado por el IGAC para el municipio de Popayán, la información topobatimétrica recolectada en campo, los caudales del sistema Ejido, el mapa predial y las fotografías aéreas del municipio de Popayán; dicha información se obtuvo del "Estudio de Riesgos Preliminar (afectación y daños) asociados a Fenómenos de Inundación Lenta y Súbita (avenida torrencial) en la Zona Urbana y Rural del Municipio de Popayán" - Convenio 20131800008927 ALCALDÍA-UNICAUCA, finalizado en el 2015. El uso de esta información fue aprobado mediante carta del Jefe de la Oficina Asesora de Planeación Municipal, Doctor Francisco León Zuñiga Bolivar con fecha 14 de marzo de 2016 y se incluye en el Anexo F.

7.3. PRE-PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL Y TOPOBATIMÉTRICA

La herramienta HEC-GeoRAS facilita el pre-procesamiento de la información cartográfica digital, la cual permite el delineamiento de los tramos del sistema Ejido, las laderas izquierda y derecha del cauce principal y el trazado de las secciones transversales, para posteriormente exportarla al software HEC-RAS que permite realizar el procesamiento de los datos geométricos e hidráulicos.

Tanto el software HEC-RAS como su herramienta HEC-GeoRAS fueron desarrollados por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos –USACE- y por lo tanto de uso libre.

7.4. SIMULACIÓN HIDRÁULICA

Los modelos geométricos topobatimétricos y cartográficos se exportaron desde el HEC-GeoRAS al HEC-RAS, en donde se ajustó el alineamiento del cauce principal en planta, el número de secciones transversales, los bordes del cauce principal, los coeficientes de rugosidad de Manning para la ladera izquierda,

derecha y del cauce principal y los coeficientes de pérdidas por expansión y contracción.

La simulación hidráulica realizada a partir del HEC-RAS permitió calcular la elevación de la superficie del agua en las secciones transversales de cada tramo estudiado para los diferentes caudales con distintos tiempos de retorno. Para lo anterior, fue necesario establecer las condiciones de frontera que permiten el cálculo inicial de la simulación para obtener posteriormente valores de los niveles de agua y las velocidades de flujo, entre otras variables. El estudio no contempló la calibración de resultados hidráulicos pues se busca comparar los resultados obtenidos a partir de información topobatimétrica con la información cartográfica digital.

7.5. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO

Los resultados obtenidos a partir de la simulación hidráulica en el HEC-RAS se procesaron con el software estadístico SPSS (Statistical Package for the Social Sciences), el cual permitió realizar un análisis comparativo de variables como profundidad, ancho de la superficie libre del agua y velocidad de cada modelo generado; de igual forma, se muestran indicadores estadísticos que evidencian las discrepancias encontradas en los diferentes parámetros que se obtuvieron dentro de la simulación numérica.

7.6. POST-PROCESAMIENTO DE RESULTADOS CON EL PROGRAMA HEC-GeoRAS

Los resultados de parámetros como anchos de inundación generados en la simulación hidráulica de los modelos topobatimétrico y cartográfico digital realizada por el HEC-RAS, se exportan al ArcGIS 10.1 (versión libre, con códigos de suscripción número 9710888924 y 6979789849) y fueron procesados a través del HEC-GeoRAS, generando mapas de inundación para los diferentes de caudales asociados a los tiempos de retorno establecidos. La visualización de los mapas permite el análisis para la determinación de posibles escenarios o efectos que perturbarían a la población colindante al río Ejido.

7.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis estadístico se realiza sobre algunos parámetros hidráulicos como la velocidad, profundidad y ancho de la superficie del agua, para evidenciar las discrepancias, ventajas y desventajas de los modelos cartográficos y topobatimétricos.

7.8. ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

En el informe se incluyen los diferentes procedimientos llevados a cabo, los resultados obtenidos, el análisis de los parámetros hidráulicos y los mapas de inundaciones generados a partir de las simulaciones hidráulicas de los modelos cartográficos y topobatimétricos.

8. MARCO TEÓRICO

El conjunto de definiciones y conceptos relevantes requeridos para el desarrollo del trabajo de investigación se resumen a continuación:

8.1. INUNDACIONES

Las inundaciones consisten en el desbordamiento del agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua, de acuerdo con la segunda edición del Glosario Internacional de Hidrología (UNESCO, 1974); a su vez, las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. (IDEAM, 2014)

Las inundaciones según su duración pueden ser lentas y súbitas. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-, las inundaciones lentas se producen cuando hay lluvias persistentes dentro de la cuenca generando un aumento paulatino del caudal de los ríos hasta el desbordamiento en zonas planas aledañas al cauce principal y valles aluviales extensos, reportan afectaciones de grandes extensiones, el tiempo de afectación puede llegar a ser del orden de meses, los incrementos de nivel diario son de apenas del orden de centímetros y ocasionan pocas pérdidas de vidas humanas, mientras que las crecientes súbitas son originadas por fuertes precipitaciones en las partes altas de las cuencas por lo que las crecientes suelen ser repentinas y de corta duración, los incrementos de nivel son del orden de metros en pocas horas, y el tiempo de permanencia de estas inundaciones en las zonas afectadas son igualmente de horas o pocos días, sin embargo cuando se presentan, cobran el mayor número de vidas humanas. (IDEAM, 2014)

La clasificación de inundaciones de acuerdo con la duración y al mecanismo de generación se presenta en el anexo A.

8.2. TOPOBATIMETRÍA

La topobatimetría es la caracterización del terreno y del cauce. Si un cuerpo de agua tiene profundidades que sobrepasen por ejemplo 1 m y velocidades de 1 m/s, se realiza batimetría con instrumentación geofísica como ecosondas; pero si un cuerpo de agua tiene profundidades menores, se puede realizar una topografía convencional y también batimetría por vadeo con apoyo de teodolito, nivel de precisión, estación total, etc. (puertosfesaragon, 2017).

8.3. CARTOGRAFÍA DIGITAL

La cartografía digital utiliza sistemas de información geográfica, que cumplen con la función de modelar de forma perceptible el territorio y su información geográfica, con el objetivo de analizar y gestionar variables y datos

geoespaciales mediante diferentes recursos como bases de datos, aplicaciones estadísticas, programas de diseño asistido por ordenador, de cartografía automatizada y de teledetección. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi , 2017)

8.4. MODELACIÓN HIDRÁULICA

Un modelo es una representación del medio utilizado para simular las condiciones ambientales y su respuesta ante estímulos o impactos determinados. Una vez que el modelo ha sido seleccionado o construido pueden ser evaluados los efectos de la acción propuesta y sus alternativas; estos pueden ser físicos y matemáticos, los físicos se utilizan cuando las situaciones son demasiado complejas para ser analizadas matemáticamente, sin embargo, su costo suele ser alto; por ello, actualmente se emplean más los modelos matemáticos apoyados en ayudas computacionales.

Por otro lado, dependiendo de las características físicas del medio por simular, los modelos matemáticos pueden ser uni, bi o tridimensionales. Los modelos unidimensionales representan los flujos de agua de los ríos teniendo en cuenta el sentido del escurrimiento de los mismos; los modelos bidimensionales se aplican en ríos de gran ancho que presentan por ejemplo, variación en la concentración de los contaminantes en sus riberas, por lo que se requiere usar un sistema cartesiano de coordenadas que corresponde al sentido del flujo y a la dimensión lateral del río; los modelos tridimensionales requieren mayor información para procesamiento computacional y su aplicación es, por ejemplo, en estudios de aguas subterráneas y sistemas complejos de aguas superficiales como costas y lagos. Las herramientas computacionales existentes son un recurso de fácil utilización y accesibilidad que proporcionan buenos resultados en el análisis de problemas complejos cuando el modelo es apropiado en el área de la modelación del comportamiento hidráulico y morfológico de cauces fluviales. (Castillo, J. y Espinoza, C., 2005)

8.5. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA –SIG-

Según el Banco de la República (2015), los SIG son un complejo sistema de almacenamiento y procesamiento de datos, que tiene como fin la producción de información espacial útil en diferentes campos del conocimiento. Un SIG puede servir para la elaboración de mapas, modelos espaciales y datos estandarizados que facilitan el procesamiento de la información. La información espacial se almacena en diferentes software que procesan los datos espaciales georeferenciados a manera de puntos, redes, líneas, polígonos y áreas a las cuales se les otorgan atributos que pueden ser almacenados y procesados por el programa elegido. Los datos espaciales que son introducidos a un SIG pueden ser presentados como capas en un mapa o modelo espacial; de igual forma, estos datos también se pueden usar para crear imágenes en tres dimensiones que representen el relieve de los ríos, vías, calles, etc. de un espacio determinado.

En Colombia se han implementado algunos programas de SIG como QGIS en el manejo de recursos naturales y en los procesos de Ordenamiento Territorial de algunos municipios. (Subgerencia Cultural del Banco de la República, 2015).

8.6. ArcGIS

Según el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales, ArcGIS es un sistema de información geográfica (SIG) integrado que permite organizar, analizar, administrar, compartir y distribuir información geográfica fundamentalmente mediante mapas; se considera como una plataforma para el uso de información geográfica a nivel mundial, ya que el sistema está disponible a través de navegadores web, dispositivos móviles como smartphones y equipos de escritorio. De ésta manera el conocimiento geográfico está al servicio de la educación, la ciencia, las empresas y el gobierno. Consta de tres componentes claves que forman parte del sistema y estos son: el software ArcGIS Desktop que corresponde a un conjunto integrado de aplicaciones SIG avanzadas, el ArcSDE™ Gateway que consiste en una interfaz para manejar las geodatabases en un sistema de administración de bases de datos (DBMS) y el software ArcIMS que es un SIG basado en internet que permite distribuir datos y servicios. (ESRI, 2011). Se empleó ArcGIS 10.1 en su versión libre, con códigos de suscripción número 9710888924 y 6979789849.

8.7. HEC-GeoRAS

El HEC-GeoRAS desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos (USACE), es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para el procesamiento de datos geospaciales en ArcGIS mediante una interfaz gráfica. El programa es de libre acceso y permite la preparación de los datos geométricos para su importación y exportación al y desde el HEC-RAS. Para crear el archivo de importación, se debe contar con un modelo digital del terreno del sistema fluvial en el formato ArcInfo TIN.

Posteriormente, se crea una serie de líneas permitiendo el desarrollo de los datos geométricos para HEC-RAS. Por otro lado, los datos del perfil de la superficie del agua y datos de velocidad exportados a partir de simulaciones podrán ser tratados por HEC-GeoRAS para analizar el mapa de inundación, los cálculos de daños por inundaciones, restauración de los ecosistemas, y la respuesta de alerta de inundaciones y la preparación. (US Army Corps of Engineers, 2010)

8.8. HEC-RAS

El HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) es un software de libre acceso para realizar simulaciones hidráulicas en una y dos dimensiones y cauces con pendientes bajas (también pendientes altas con su

debida corrección). Fue desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros Militares de los Estados Unidos.

El HEC-RAS contiene componentes para análisis de ríos y canales tales como: cálculos del perfil de la superficie del agua en flujo permanente, simulación de flujo inestable en una y dos dimensiones, cálculos de transporte de sedimentos y análisis de la calidad del agua. Dichos componentes se relacionan en el anexo A.

Un elemento clave es que los cuatro componentes utilizan una representación de datos geométricos comunes y rutinas de cálculo geométrico e hidráulicas comunes. Además de estos componentes de análisis, el sistema contiene varias características de diseño hidráulico que se pueden invocar una vez que los perfiles de la superficie de agua básicos se calculan. (US Army Corps of Engineers, 2010)

En particular, en éste estudio se construyeron escenarios de inundaciones asociados a dos modelos geométricos con varios caudales, que requirieron de los siguientes datos:

- **Datos geométricos**

- ✓ Esquema en planta del cauce con sus conectividades, secciones transversales y distancias entre ellas, siguiendo el thalweg o la zona más profunda y las laderas izquierda y derecha.
- ✓ Bordes del cauce principal por los lados izquierdo y derecho.
- ✓ Coeficientes de rugosidad de Manning.
- ✓ Coeficientes de pérdidas de energía.

- **Datos hidráulicos**

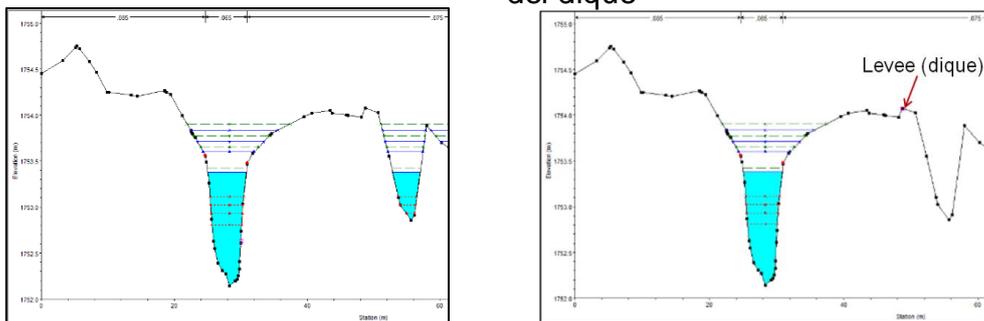
Los datos básicos para realizar el análisis en flujo permanente son: tipo de flujo que incluyen subcrítico, mixto o supercrítico; condiciones de frontera que pueden ser superficie del agua conocida, profundidad normal, profundidad crítica y curva de calibración.

8.9. ESTRUCTURA HIDRÁULICA

Un levee corresponde a un dique asignado manualmente en el HEC-RAS y es empleado para restringir o contener el flujo en las secciones transversales de modo que el HEC-RAS no asuma que el agua pueda ir a cualquier parte dentro de la sección transversal (CivilGEO Engineering Software, 2017); sin embargo, si la avenida del cauce rebasa el dique el flujo a través de la llanura se produce como si no existiera dicha protección (Pérez O., 2015). En las siguientes figuras se evidencia la funcionalidad de los diques dentro de la simulación hidráulica en el HEC-RAS. En la figura 8.1 a) se observa una lámina de agua en una zona cuando no se ha superado el nivel topográfico, mientras que en la figura 8.1 b) se observa como el dique contiene el flujo.

Figura 8.1. Sección transversal con efecto del dique

a) Sección transversal sin dique b) Sección transversal con efecto del dique



Fuente: Autores

8.10. CONDICIONES DE CONTORNO EN HEC-RAS

La condición de contorno define el nivel del agua a partir de los extremos del río, que es necesaria para que el programa pueda comenzar a realizar los cálculos. El HEC-RAS da cuatro opciones para condición de contorno:

Superficie del agua conocida: Esta opción se aplica a los casos en que se conoce el nivel de agua para un caudal dado.

Profundidad crítica: Con esta opción, el programa calcula la profundidad crítica para la sección y la utiliza como condición de contorno. Esta opción se aplica a los casos en que hay una estructura de control tal como vertedero o compuerta que controla e impone la profundidad crítica.

Curva de calibración: En esta opción el nivel del agua se interpola a partir de la curva de gastos dada. Por lo general, este caso se aplica para la estación limnigráfica, donde los niveles de agua y las descargas se miden constantemente.

La profundidad normal: En esta opción, el programa requiere como dato, la pendiente de energía para calcular la profundidad normal con la ecuación de Manning. De no contarse con esta información, se puede usar la pendiente de la solera del cauce o la pendiente de la superficie del agua en la zona próxima a los extremos del tramo en estudio.

La condición de frontera se ubica dependiendo del tipo de flujo: para el flujo subcrítico se localiza aguas abajo del cauce, para el flujo supercrítico se localiza aguas arriba y para el flujo mixto se ubican en los dos extremos. Sin embargo, estos son sólo aproximaciones que incorporan un error a las condiciones de frontera tanto aguas arriba como aguas abajo; por lo tanto, se sugiere aumentar las secciones transversales y la longitud del tramo a estudiar para que estos errores no afecten la zona de interés. (Science engineering and Sustainability, 2014). Respecto a lo anterior, para los modelos geométricos se crearon secciones transversales suficientes para mitigar el error.

9. MARCO REFERENCIAL

Se presentan a continuación algunos estudios encontrados en bibliografía especializada relacionados con los temas de la investigación.

9.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA ENTRE HEC-RAS Y CCHE-2D, RÍO SUAREZ- BOYACÁ

En esta investigación se realizó el análisis comparativo entre los modelos numéricos HEC-RAS y CCHE-2D mediante la modelación hidráulica, aplicada al tramo de estudio comprendido entre las abscisas K23+241 y K26+597 localizadas en el municipio de Saboyá del departamento de Boyacá, con una longitud de desarrollo en promedio de 3.36 km. Se identificaron las principales características de cada uno de los modelos en términos de los datos de entrada, los archivos de lectura, el desarrollo de las simulaciones, el método de cálculo que llevan a cabo, los resultados que arrojan y la sensibilidad de cada modelo. Mientras el modelo HEC-RAS es un software que tiene gran interacción con otros programas, facilita la interpretación y presentación de los resultados obtenidos y su interfaz gráfica es bastante amigable con el usuario, el modelo CCHE2D es un programa más complejo, que requiere de información de alta precisión en geometrías irregulares para representar las particularidades de un cauce. Ambos modelos HEC-RAS y CCHE2D, se encuentran en capacidad de permitir la visualización tanto gráfica como tabular, de los resultados del análisis de un gran número de variables y su variación en el tiempo, en cuanto al área de la zona inundable y la altura de la lámina de agua calculada por el modelo HEC-RAS para el análisis hidráulico fueron mayores que las del modelo CCHE2D en todas las secciones transversales a lo largo del tramo de estudio. (Giraldo, E., 2015)

9.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA E HIDROLÓGICA PARA DETERMINAR LA VULNERABILIDAD A INUNDACIONES EN UN TRAMO COMPRENDIDO ENTRE LOS POBLADOS GUAPILES Y LA RITA- RÍO GUÁPILES

En este trabajo se tuvo en cuenta la transformación del uso del suelo que ha sufrido la cuenca del río Guápiles debido a la expansión del foco urbano hacia la periferia y en la cual se realizó la modelación hidráulica e hidrológica con el objeto de determinar la vulnerabilidad de inundación de los terrenos de acuerdo a su ubicación con el cauce del río Guápiles. Mediante la simulación hidrológica se obtuvieron los caudales para diferentes periodos de retorno y por medio de la simulación hidráulica se determinaron los tramos y velocidades de inundación donde el río se desborda hacia las planicies. Las simulaciones realizadas se basaron en dos escenarios, uno actual y uno proyectado; para el modelo simulado con condiciones de cobertura y uso del suelo actual, la cuenca presentó bajo riesgo a inundaciones para eventos de precipitación cuya probabilidad sea inferior a 50 años de periodo de retorno y para la simulación

proyectada se plantea la implementación de un plan para mejorar el ordenamiento urbano considerando los cambios que dichos escenarios puedan ocasionar en el ciclo hidrológico. (Grainger, H., 2006)

9.3. SIMULACIÓN DE INUNDACIONES A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL Y DE TOPOBATIMETRÍA- RÍO MOLINO

En este trabajo de investigación se usaron herramientas computacionales como HEC-RAS, ArcGIS y HEC-GeoRAS para generar los mapas de inundaciones de un tramo de 7.1 km del río Molino que atraviesa la zona urbana del municipio de Popayán del departamento del Cauca, en el cual se realizó una comparación entre los resultados de las simulaciones de inundaciones a partir de dos modelos geométricos generados a partir de cartografía digital y de topobatimetría levantada en campo. Los resultados obtenidos revelan que el ancho del cauce principal en el modelo cartográfico digital se muestra mayor al del modelo topobatimétrico, lo que indica resultados más conservadores y por lo tanto, del lado de la seguridad, si se trata de definir la extensión de las inundaciones. (Calvache, F. y Pérez,D., 2016)

9.4. ESTUDIO PRELIMINAR DE RIESGOS ASOCIADOS A FENÓMENOS DE INUNDACIÓN LENTA Y SÚBITA EN LA ZONA URBANA Y RURAL DEL MUNICIPIO DE POPAYÁN

El estudio contempló entre otros aspectos, la definición de las zonas de amenaza por inundación en la parte urbana y rural del municipio de Popayán, usando criterios heurísticos, geomorfológicos y simulación hidráulica para generar el mapa preliminar de inundaciones para los ríos como Cauca, Molino, Ejido, Palacé, Rio Hondo, entre otros. Los caudales con los que se modelaron los tramos se calcularon a partir de métodos indirectos, dado a que no se contó con estaciones limnigráficas, dicho trabajo se apoyó en herramientas computacionales como ArcGIS con su herramienta HEC-GeoRAS y HEC RAS para la modelación hidráulica de los tramos. (Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca, 2015)

9.5. MODELIZACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA INUNDACIÓN DE UN RÍO POLACO EN LOS CÁRPATOS: COMPARACIÓN DE LAS CONDICIONES DEL TRAMO CANALIZADO Y SIN INTERVENCIÓN

Este estudio se realizó en río Biala, en la región de Cárpatos en Polonia, el cual fue intervenido fuertemente por la canalización en el siglo XX. No sólo eran estos impactos perjudiciales para el estado ecológico del río, sino que también modifican negativamente a las condiciones de contener las inundaciones y el paso de la onda de avenida torrencial. La morfología de las secciones transversales, junto con datos de pendiente del canal y la rugosidad de las secciones transversales se utilizaron como datos de entrada al modelo

hidráulico realizado con el software unidimensional HEC-RAS. El modelado de las condiciones de inundación indicó que los tramos canalizados y no canalizados del río Biala muestran un bajo potencial de la retención de agua en zonas inundables. (Checa, W. et al., 2015)

9.6. APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA EL MODELAMIENTO DE ZONAS CON RIESGO DE INUNDACIÓN- RÍO LURÍN, PERÚ

El presente estudio consiste en la aplicación de un SIG como herramienta de análisis hidráulico y modelamiento espacial para evaluar el impacto de posibles inundaciones en un sector de la cuenca baja del río Lurín. Para ello se integró el software de análisis hidráulico HEC-RAS con software SIG ArcView generando como resultado un mapa de inundación, para un perfil de flujo de 50 y 100 años de período de retorno, donde se puede cuantificar y visualizar la magnitud de la inundación. Los resultados permitieron cuantificar y visualizar el área inundada para el mapa de suelo. (Cardenas, M. y Aldo, P., s.f.)

9.7. ESTUDIO HIDRÁULICO PARA DETERMINAR ZONAS INUNDABLES Y ANÁLISIS DE SOLUCIONES DE PROTECCIÓN EN EL MUNICIPIO DE BALMASEDA, PAÍS VASCO

Este artículo se centra en la determinación de las zonas inundables que provoca el río Cadagua a su paso por el municipio de Balmaseda, en la provincia de Vizcaya, y el análisis de medidas estructurales de protección que disminuyan la inundabilidad y el daño causado por ésta. En general, la hipótesis de flujo unidimensional y estacionario es adecuada para definir su comportamiento hidráulico. Entre los distintos modelos matemáticos aplicables, se utilizó la versión 4.1 del software HEC-RAS, la cual requiere datos de entrada indispensable como lo es la geometría del cauce y caudal; se recurrió al empleo del ábaco vigente en el Plan Hidrológico Norte III, aprobado por la Confederación Hidrográfica del Norte para el cálculo de caudales en las cuencas de su competencia. Con carácter general, se le atribuye buena estimación para cuencas de superficie menor a 10 km². (Pérez O., 2015).

9.8. USO DE SIG EN LA DETERMINACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIÓN EN EL MUNICIPIO DE CHÍA

El trabajo de investigación se realizó en el municipio de Chía, Cundinamarca, identificándose las zonas propensas a sufrir una inundación; en el cual se usó un SIG (QSIG), donde se recolectaron mapas topográficos, hidrológicos, entre otros, del municipio de Chía, los cuales se transformaron para formar un mapa que identificara las zonas con amenaza de Inundación. Las zonas identificadas son propensas a inundarse ya que de acuerdo a los datos reunidos, el terreno tiene poca pendiente y al presentarse un evento extremo de corta duración, la

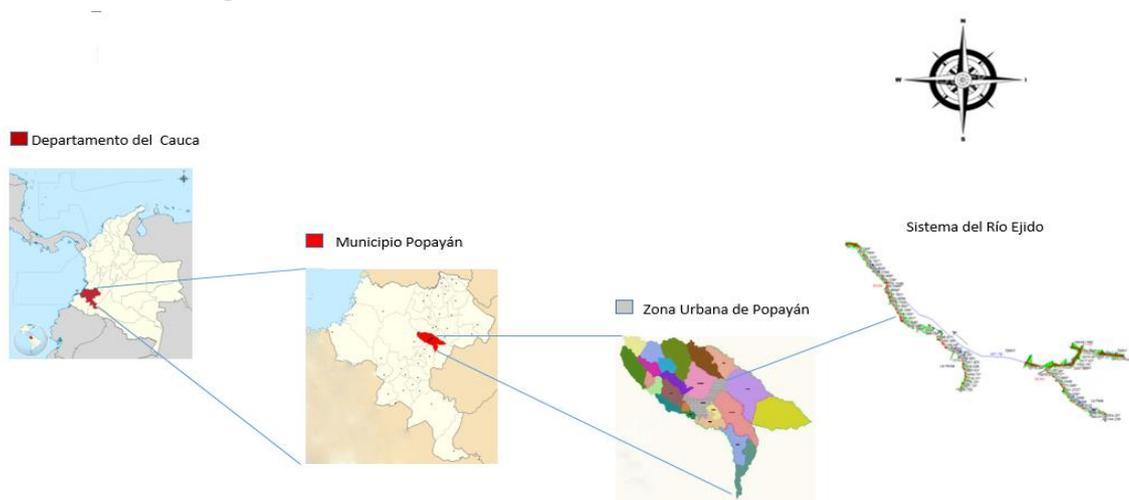
capacidad de escorrentía de los canales colapsaría lo que impediría el adecuado drenaje de las aguas; de igual manera, el mapa generó las áreas aferentes a los ríos Bogotá, Frío y Teusacá en el municipio de Chía, presentando entre 70 % y el 90 % de probabilidad de inundarse en épocas invernales debido al desbordamiento de los afluentes. (Avendaño, L. y Cadena, M., S.f.)

10. CASO EN ESTUDIO

10.1. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

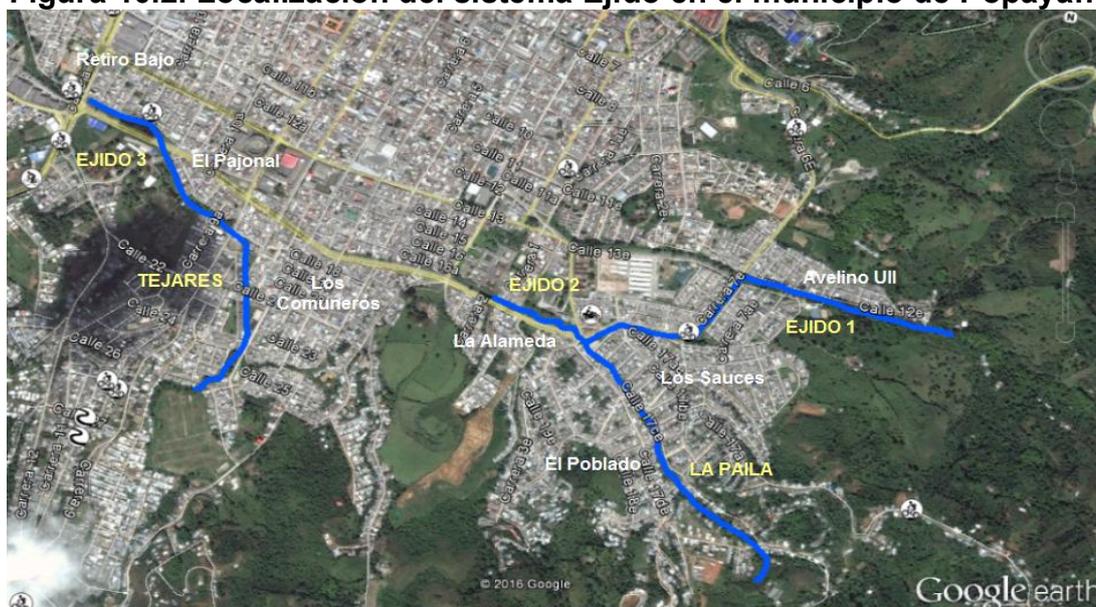
El río Ejido y sus afluentes Sauces-La Paila y Tejares-La Monja, conforman el sistema que se observa en la figura 10.1 y con un contexto en la figura 10.2, el cual atraviesa el sur oriente de la zona urbana del Municipio de Popayán, llevando sus aguas al río Molino y éste posteriormente al río Cauca. Para mayor detalle dirigirse al Anexo F.

Figura 10.1. Localización del sistema en estudio



Fuente: Modificado de (Shadowxfox , 2012)

Figura 10.2. Localización del sistema Ejido en el municipio de Popayán



Fuente: Modificado de (Google earth, 2016)

El sistema en estudio (figura 10.2) nace de la unión de las quebradas Tinajas y Molanga en el barrio Avelino Ull y recorre la comuna 5 en sentido oriente-occidente; de igual forma, el afluente Tejares nace en el barrio Nuevo Japón, recorriendo la comuna 6. En la Plaza de Ferias presenta una bifurcación donde un tramo toma la dirección oriente-occidente continuando su curso natural y el otro la dirección sur hacia donde fue desviado en el año 1984, para luego llegar a un box-culvert de aproximadamente 2.0 km de longitud, que inicia frente al barrio Santa Mónica y termina en el barrio Retiro Bajo. (Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca, 2015)

10.2. INFORMACIÓN BÁSICA

10.2.1. Información cartográfica digital

Se cuenta con cartografía digital de la zona urbana del municipio de Popayán, con curvas de nivel cada 2 metros, obtenidas a partir del proceso de restitución realizado por el IGAC para el municipio. De igual forma se tienen el mapa predial y fotografías aéreas con resolución de pixel de 0.3 m propiamente georeferenciadas en la zona de estudio, que fueron suministradas por la Alcaldía del Municipio de Popayán.

10.2.2. Información topobatimétrica

Se cuenta con información topobatimétrica del sistema del río Ejido en una distancia de aproximadamente 5.0 kilómetros y 567 secciones transversales, generadas dentro del estudio realizado por la Universidad del Cauca y la Alcaldía Municipal de Popayán - Convenio 20131800008927. Ver anexo F.

10.3. PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN

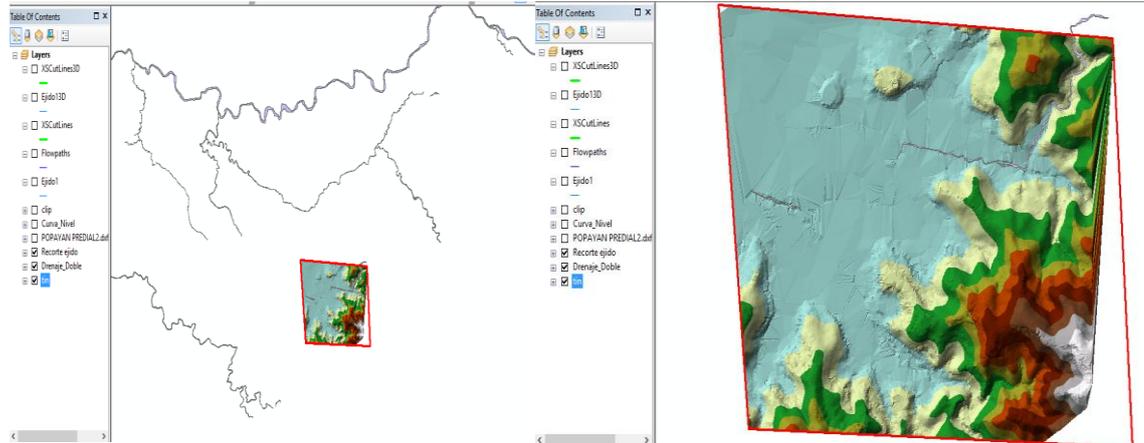
10.3.1. Preparación de la información topobatimétrica

La información topobatimétrica suministrada cuenta con datos de aproximadamente 5.0 kilómetros de longitud, los cuales fueron divididos entre Tejares y el sistema Ejido – La Paila". Los cauces en estudio presentan 27 estructuras entre puentes y presas, 587 secciones transversales. La preparación de la información se llevó a cabo en el HEC-RAS omitiendo las estructuras presentes dada la complejidad que representan para la modelación por ejemplo, existe un box culvert de casi 2 km de longitud al cual le llegan múltiples descargas de agua, tanto lícitas como ilícitas y sobre las cuales no existe información; por otra parte, se modificaron los bordes del cauce principal y el número de secciones transversales con el objetivo de facilitar la comparación entre los modelos geométricos.

10.3.2. Preparación de la información cartográfica digital

Para procesar la información cartográfica digital de la zona que abarca el municipio de Popayán, se usó el programa ArcGIS 10.1 en su versión libre, con códigos de suscripción número 9710888924 y 6979789849.

Figura 10.5. Recorte de la zona de estudio y creación del TIN en ArcGIS



Fuente: Autores

Una vez creado el TIN, se traza la línea central del flujo seleccionando *RAS Geometry | Create RAS Layer | Stream Centerline* y automáticamente el programa genera una capa a la cual se le asigna nombre y se edita haciendo *click* derecho sobre ésta y seleccionando *Edit features | Start Editing* para empezar a definir los ejes de los tramos del cauce (Ejido 1, Ejido 2, La Paila y Tejares) siempre desde aguas arriba hacia aguas abajo con base en el predial y los puntos de mayor profundidad según el TIN. En el caso de la unión que corresponde al primer tramo del río Ejido 1 con el aporte de la quebrada La Paila se procuró que el vértice entre ellos coincidiera. Seguidamente se asigna la identificación de los tramos dibujados indicando el nombre del cauce y el tramo, usando el comando que se muestra en la figura 10.6:

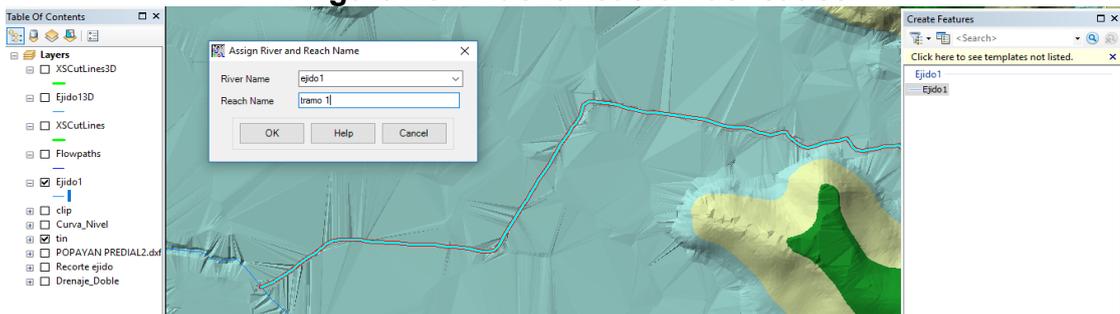
Figura 10.6. Comando para identificar un cauce



Fuente: Autores

Seguidamente, haciendo uso de dicho comando y seleccionando el cauce por identificar, se asigna un nombre para éste, tal como se observa en la figura 10.7.

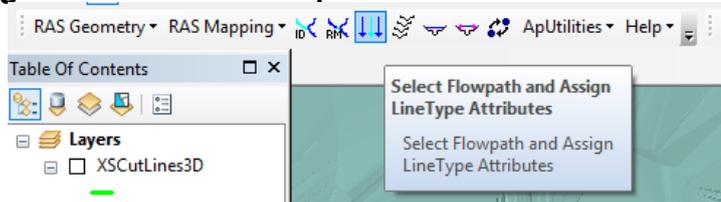
Figura 10.7. Identificación del cauce



Fuente: Autores

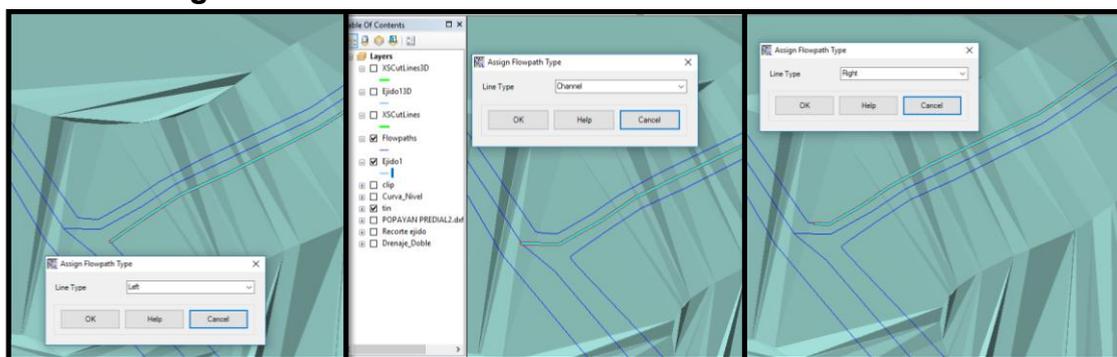
Posteriormente, se trazan las rutas del flujo seleccionando *RAS Geometry | Create RAS Layer | Flow Path Centerlines* y de igual forma, como en el paso anterior, el programa genera una capa que se edita para trazar de forma continua de izquierda a derecha el eje que representa la dirección en la que circula el agua en las llanuras de inundación desde aguas arriba hacia aguas abajo para cada tramo del río. Seguidamente se usa el comando que se muestra en la figura 10.8 para identificar los Flow Path trazados, mediante la selección de las tres líneas para cada tramo (figura 10.9), donde el eje principal corresponde al Channel, el Flow Path del lado izquierdo (left) y el Flow Path del lado derecho (right). Para mayor detalle dirigirse al Anexo F.

Figura 10.8. Comando para identificar los Flow Path



Fuente: Autores

Figura 10.9. Identificación de la llanura de inundación



Fuente: Autores

En la figura 10.10 se presentan los resultados de los atributos obtenidos en la topología.

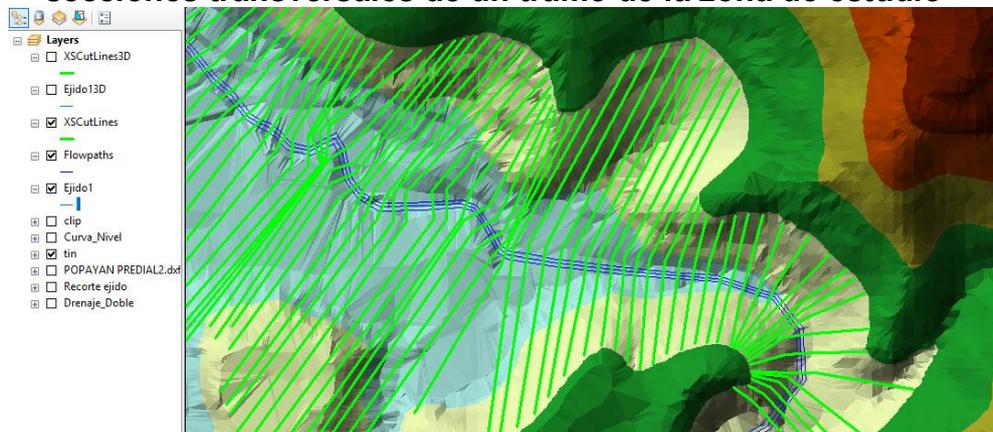
Figura 10.10. Resultados de la topología de los flowpath para un tramo

Table				
Flowpaths				
	Shape *	OID *	Shape_Length	LineType
▶	Polyline	3	2651.49624	Channel
	Polyline	4	2637.523171	Left
	Polyline	5	2657.140674	Right

Fuente: Autores

Seguidamente, se definen las secciones transversales al flujo seleccionando *RAS Geometry | Create RAS Layer | XS Cut Lines* y se edita la capa generada trazando manualmente de izquierda a derecha, líneas normales a la dirección del flujo, es decir, al cauce principal, cuya ubicación y cantidad se precisa con las mismas coordenadas de las secciones transversales del modelo geométrico topobatemétrico. En éste proceso se tiene en cuenta que las secciones crucen sólo una vez el cauce y los flow paths, que éstas no se intercepten entre sí y que la longitud de cada sección varía de acuerdo a la forma del terreno, pero no deben sobrepasar los límites del TIN. En la figura 10.11 se muestra la definición del cauce principal, las llanuras de inundación y las secciones transversales en uno de los tramos de la zona de estudio.

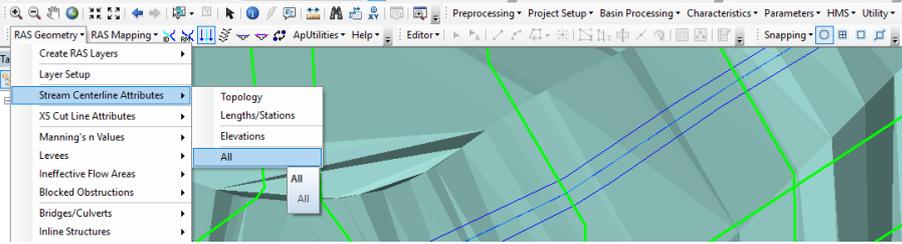
Figura 10.11. Definición del cauce principal, llanuras de inundación y secciones transversales de un tramo de la zona de estudio



Fuente: Autores

Para que la geometría del modelo cartográfico digital esté correctamente definida, es imprescindible asignar atributos a cada elemento de la capa, seleccionando *RAS Geometry | Stream Centerlines Attributes | Topology | Lengths | Elevations*, como se observa en la figura 10.12 y con ello se genera una nueva capa con topología, distancias entre secciones y elevaciones.

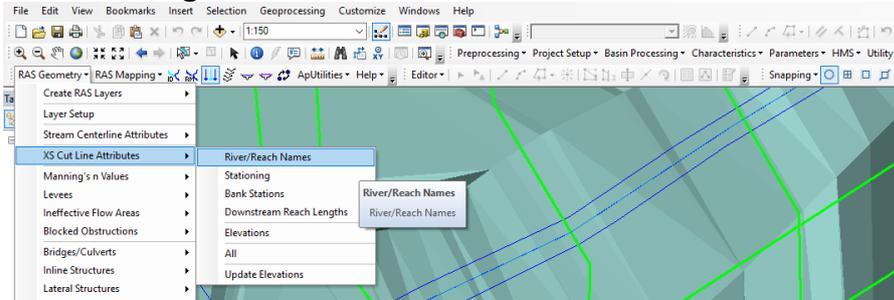
Figura 10.12. Asignación de atributos a los elementos creados



Fuente: Autores

De igual forma, a las secciones transversales al flujo se les asignan atributos de manera individual como se observa en la figura 10.13 y para ello se selecciona *RAS Geometry | XS Cut Lines Attributes | River/ Reach Names | Stationing | Downstream Reach lengths | Elevations* y se genera una nueva capa con los atributos de cada elemento.

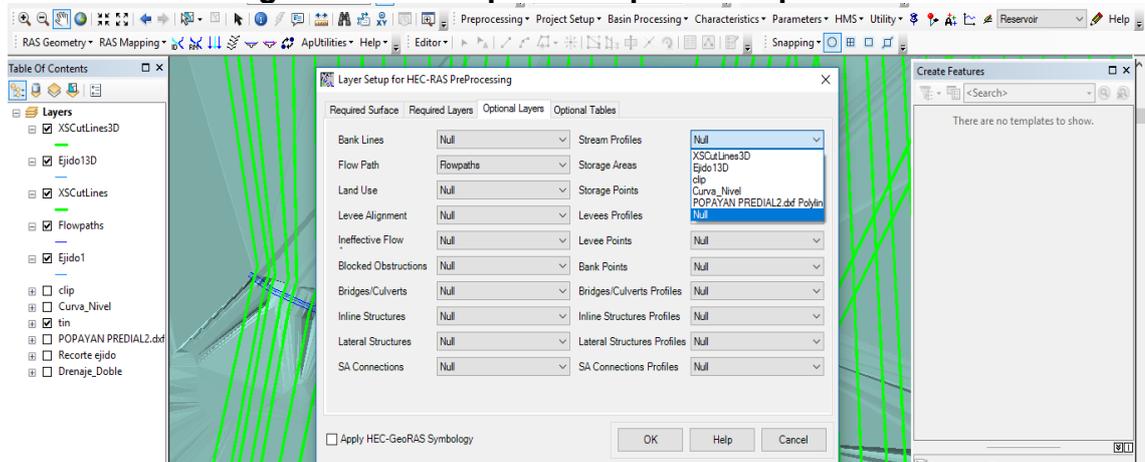
Figura 10.13. Asignación de atributos de las secciones transversales



Fuente: Autores

Es preciso preparar el archivo que contiene los tramos Ejido 1, Ejido 2, La Paila y Tejares para la exportación; sin embargo, en el caso de la confluencia de cauces, se requiere configurar el archivo para que el HEC-RAS reconozca dicha unión y para ello desde *RAS Geometry | Layer Setup* se selecciona la opción *Null* en *Stream Profiles* en la pestaña *Optional Layers*, tal como se observa en la figura 10.14.

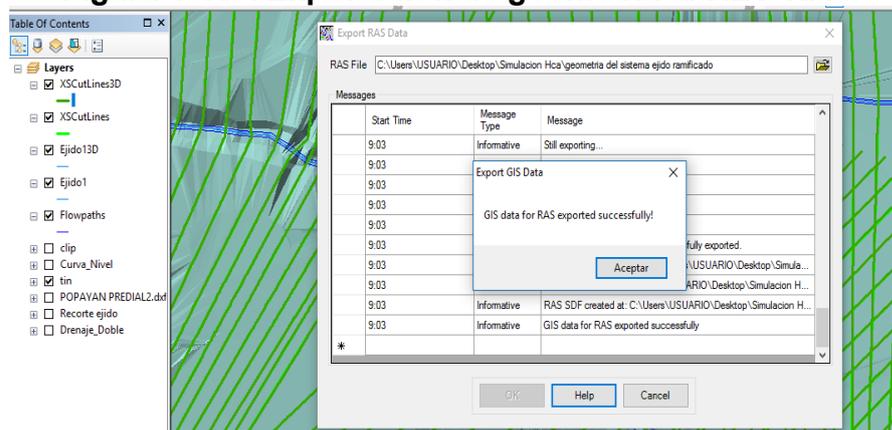
Figura 10.14. Preparación para la exportación



Fuente: Autores

El fin del proceso en el HEC-GeoRAS consiste en la exportación de la geometría al HEC-RAS, seleccionando *RAS Geometry | Export RAS Data* y se especifica la ruta para almacenar los datos de la geometría; seguidamente aparece la ventana que se observa en la figura 10.15 indicando que el proceso se completó correctamente.

Figura 10.15. Exportación de geometría al HEC-RAS



Fuente: Autores

10.5. PROCESAMIENTO EN HEC-RAS

Para la modelación hidráulica se trabajó con el mosaico de ortofotos con resolución de 0.3 m por píxel, del 7 de junio de 2007 que se listan en la tabla 1 y cuyo uso fue aprobado por el Municipio de Popayán mediante oficio, ver en el anexo F.

Tabla 1. Mosaico de fotos para el sistema Ejido

N	Fotografía satelital
1	342ivd3s.sid
2	342ivd4u.sid
3	342ivd4p.sid
4	342ivd4k.sid
5	342ivd3y.sid
6	342ivd3x.sid
7	342ivd3t.sid
8	342ivd3o.sid
9	342ivd3n.sid
10	364iib2a.sid
11	364iib1e.sid

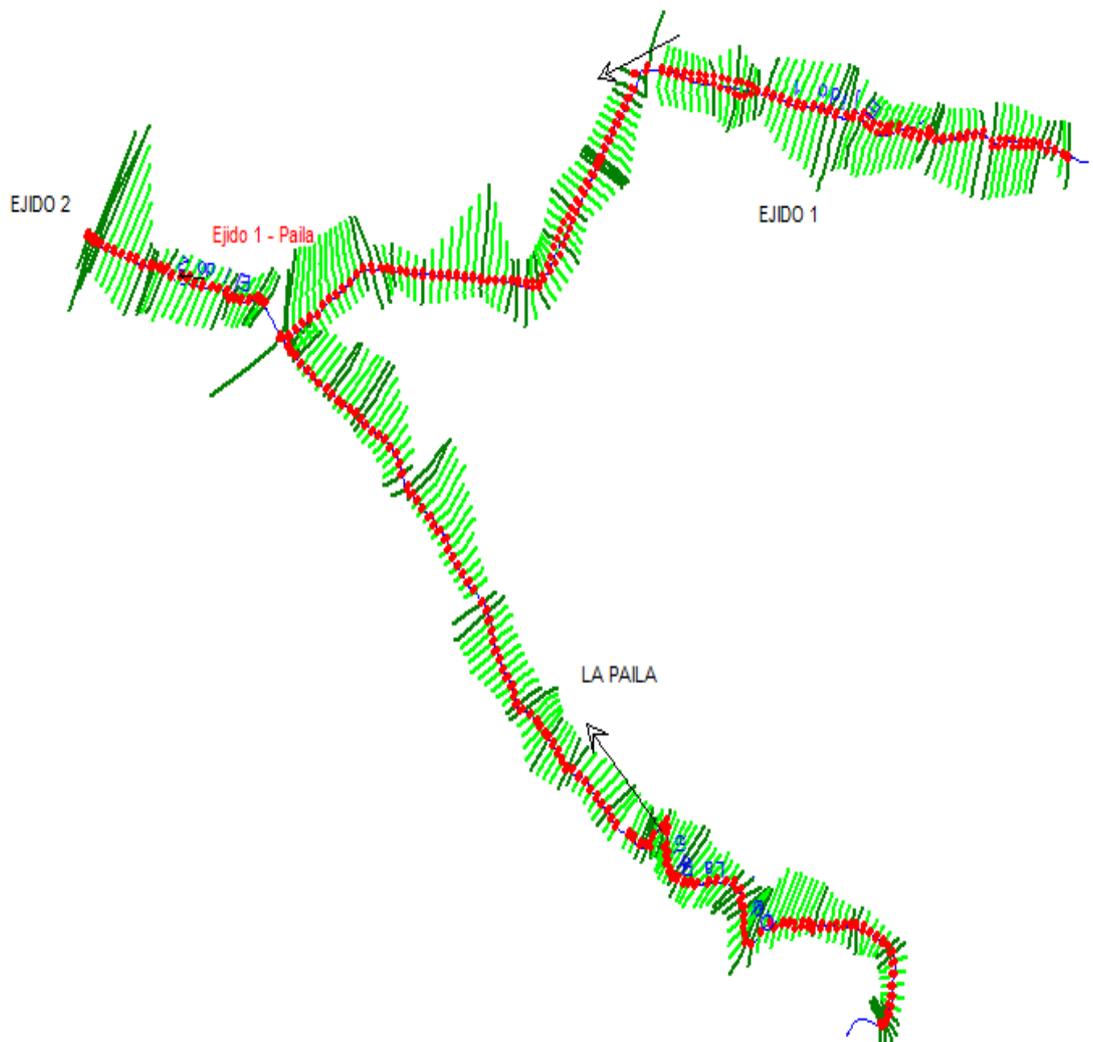
Fuente: Convenio 20131800008927 Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca

10.6. PROCESAMIENTO EN HEC-RAS PARA LOS TRAMOS EJIDO 1, EJIDO 2 Y LA PAILA

10.6.1. Datos geométricos

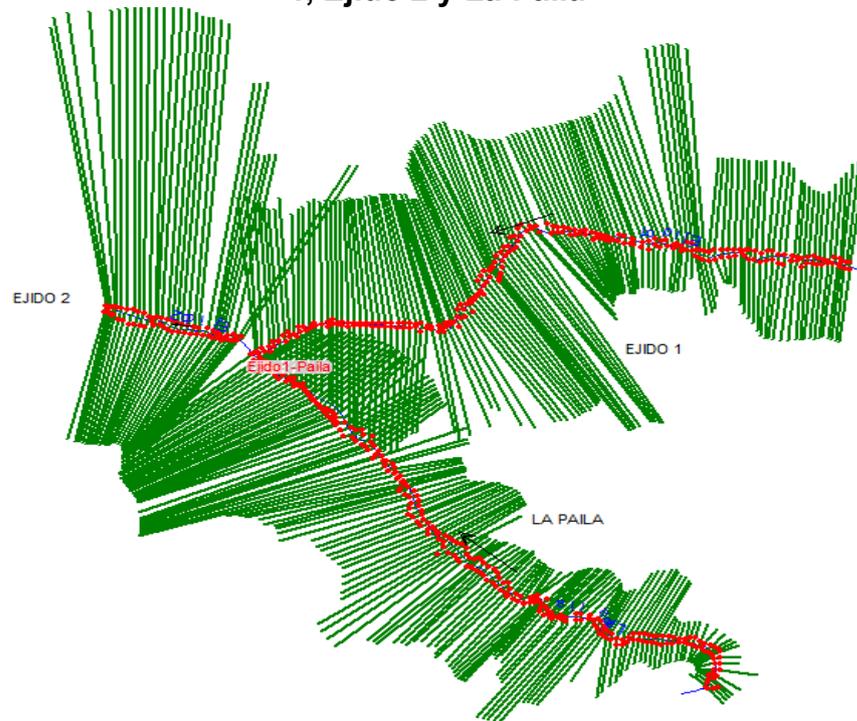
Los datos geométricos de un modelo requeridos por el HEC-RAS corresponden al esquema en planta del cauce con sus respectivas confluencias, secciones transversales, bordes del cauce principal, los coeficientes de rugosidad de Manning y de pérdidas de energía. En las figuras 10.16 y 10.17 se evidencian los modelos geométricos que representan la información topobatimétrica y cartográfica digital para los tramos de estudio.

Figura 10.16. Modelo geométrico topobatimétrico de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila



Fuente: Modificado de Convenio 20131800008927 Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca

Figura 10.17. Modelo geométrico cartográfico digital de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila



Fuente: Autores

Los anteriores modelos geométricos incluyen las distancias y elevaciones del cauce principal y las laderas de inundación entre secciones transversales; por otra parte, cabe mencionar que las distancias entre secciones generalmente son parecidas, pero pueden variar cuando el cauce es sinuoso. Además, se observa una variación en la longitud de las secciones transversales del modelo cartográfico digital frente al topobatimétrico y esto es debido a la limitación que genera la intervención antrópica para realizar una plena caracterización de los tramos estudiados, mientras que en el modelo cartográfico digital se puede considerar una longitud de acuerdo a las zonas propensas a ser inundadas, sin tener en cuenta la presencia de viviendas y demás elementos.

Ciertamente, se hizo necesario definir los bordes del cauce principal en cada modelo teniendo en cuenta dos criterios: el cambio brusco de pendiente y un ancho del cauce representativo de la realidad; sin embargo, ésta fase fue compleja en uno de los modelos, dado que la cartografía digital no precisa bien el cauce, encontrándose varias posibilidades de ejes para el cauce principal, para lo cual se utilizaron las ortofotos con resolución de 0.30 m por pixel, lo cual indica un buen nivel de detalle para establecer los bordes del cauce. En general, la profundidad del río es aproximadamente de 1 m y se obtiene un ancho del cauce principal entre 2 m y 5 m para el modelo topobatimétrico y entre 2 m y 15 m para el modelo cartográfico digital.

Por otro lado, en los ríos se presentan pérdidas de energía por la contracción y expansión del flujo a lo largo de los tramos, dichas pérdidas se introducen en el software como coeficientes contracción entre 0.1 y 0.6 y de expansión entre 0.0

y 0.8 tal como se establece en la tabla 2. No obstante, es indispensable aclarar que en el estudio no se consideraron obstrucciones como puentes y box culvert, dado que se desconocía información para algunas estructuras, por lo cual se adoptaron los valores para transiciones graduales en todos los cauces estudiados.

Tabla 2. Valores típicos de los coeficientes de contracción y expansión en flujo subcrítico

Tipo de transición	Coeficiente	
	Contracción	Expansión
Sin pérdida por transición	0.0	0.0
Transición gradual	0.1	0.3
Secciones típicas de puentes	0.3	0.5
Transiciones abruptas	0.6	0.8

Fuente: US Army Corps of Engineers, 2010

Para los modelos geométricos se definieron tres valores de coeficientes de rugosidad de Manning que corresponden a las zonas de ladera izquierda y derecha y del cauce principal del río, ya que estos son necesarios para realizar la modelación en el software HEC-RAS. Se asignaron los coeficientes de rugosidad, tanto para el modelo topobatimétrico como para el cartográfico digital, que se muestran en la tabla 3, teniendo en cuenta las observaciones de las salidas de campo, (Figuras 10.18 y 10.19).

Tabla 3. Coeficientes de rugosidad de Manning determinados

Zonas del cauce	Ejido 1, Ejido 2 y La Paila	Descripción
Ladera Izquierda	0.07	Tramos sucios, con pastos y pozos profundos.
Ladera Derecha	0.07	
Cauce principal	0.06	Cauces pequeños con arbustos y árboles.

Fuente: U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, 2010

Figura 10.18. Cauce Ejido 1, Barrio Avelino UII



Fuente: Autores

Figura 10.19. Cauce Ejido 2, Barrio Los Sauces



Fuente: Autores

10.6.2. Datos hidráulicos

Para la modelación hidráulica de los modelos geométricos tanto cartográfico digital como topobatimétrico, es necesario fijar los siguientes parámetros: caudal de inundación, condiciones de frontera y tipo de flujo. En el estudio realizado por la Alcaldía Municipal y la Universidad del Cauca en el 2015, el análisis de caudales máximos para el sistema Ejido se desarrolló con base en métodos de hidrogramas unitarios, dado que no se cuenta con estaciones para medición de caudales. En la tabla 4 se presentan los valores adoptados.

Tabla 4. Caudales para los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila

Tiempo de retorno (años)	Caudales (m ³ / s)		
	Ejido 1	La Paila	Ejido 2
1.5	11.6	8.8	20.4
10	16.3	12.4	28.7
30	19.9	15.1	35
100	24.7	18.7	43.4

Fuente: Modificado de Convenio 20131800008927 Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca

Para la modelación hidráulica se escogió como condición de frontera la profundidad normal del flujo, para lo que se usó la pendiente del fondo (So) del cauce al no contar con información sobre el gradiente hidráulico; por lo anterior, en las tablas 5 y 6, se muestran los valores de la pendiente del terreno (So) aguas arriba y aguas abajo de cada tramo, ya que el programa la utiliza para calcular la profundidad normal con la ecuación de Manning. La pendiente del fondo (So) se calculó mediante la relación entre la diferencia de elevaciones y la longitud entre estos dos puntos.

Tabla 5. Condición de frontera para el modelo cartográfico digital

Modelo Cartográfico Digital	Tramo	Abscisa sección transversal	Ubicación	Elevación del fondo (m)	Δ Elevación (m)	Longitud (m)	So		
	Ejido 1	1085.956	Aguas arriba	1737.83	0.09	6.71	0.01341		
		1071.30		1737.74					
		17.56681	Aguas abajo	Unión tramo Ejido 1 - La Paila					
		27.3904							
	Ejido 2	257.5198	Aguas arriba	Unión tramo Ejido 1 - La Paila					
		223.7735							
		15.72296	Aguas abajo	1723.85	0.25	13.10	0.01908		
		2.58821		1723.60					
La Paila	1053.087	Aguas arriba	1748.27	0.16				7.45	0.02148
	1045.583		1748.11						
	14.83422	Aguas abajo	Unión tramo Ejido 1 - La Paila						
	8.045007								

Fuente: Autores

No obstante, cabe mencionar que las uniones se consideran condiciones de frontera internas y el HEC-RAS las genera automáticamente según las confluencias o conexiones entre cauces definidas en el sistema geométrico modelado.

Tabla 6. Condición de frontera para el modelo topobatimétrico

Modelo Topobatimétrico	Tramo	Abscisa sección transversal	Ubicación	Elevación del fondo (m)	Δ Elevación (m)	Longitud (m)	So
	Ejido 1		4075.818	Aguas arriba	1766.69	0.34	6.59
4068.76			1766.35				
		3005.88	Aguas abajo	Unión tramo Ejido 1 - La Paila			
		2996.365					
Ejido 2		2979.88	Aguas arriba	Unión tramo Ejido 1 - La Paila			
		2947.347					
		2727.98	Aguas abajo	1751.93	0.14	5.31	0.02637
		2722.708		1751.79			
La Paila		1144.336	Aguas arriba	1777.35	0.17	3.60	0.04722
		1140.364		1777.18			
		1425.53	Aguas abajo	Unión tramo Ejido 1 - La Paila			
		6.906075					

Fuente: Autores

Posteriormente, se realizó la simulación hidráulica para flujo supercrítico, subcrítico y mixto; analizando los resultados, se seleccionó el tipo de flujo que arrojó menos observaciones y notas de advertencia en la simulación, lo cual permitió establecer que los tramos Ejido 1, La Paila y Ejido 2 presentan flujo mixto.

10.7. PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE TEJARES - EJIDO 3

Cabe aclarar, que al no considerarse para la modelación hidráulica el box culvert que conecta a Ejido 2 con Tejares, es indispensable realizar un cambio de caudal, lo cual lleva a conformar el tramo Ejido 3 en el modelo hidráulico.

10.7.1. Preparación de la información topobatimétrica

La preparación de información topobatimétrica se desarrolló de igual manera que para los tramos de Ejido 1, Ejido 2 y La Paila, tal como se describió en los numerales correspondientes.

10.7.2. Preparación de la información cartográfica digital

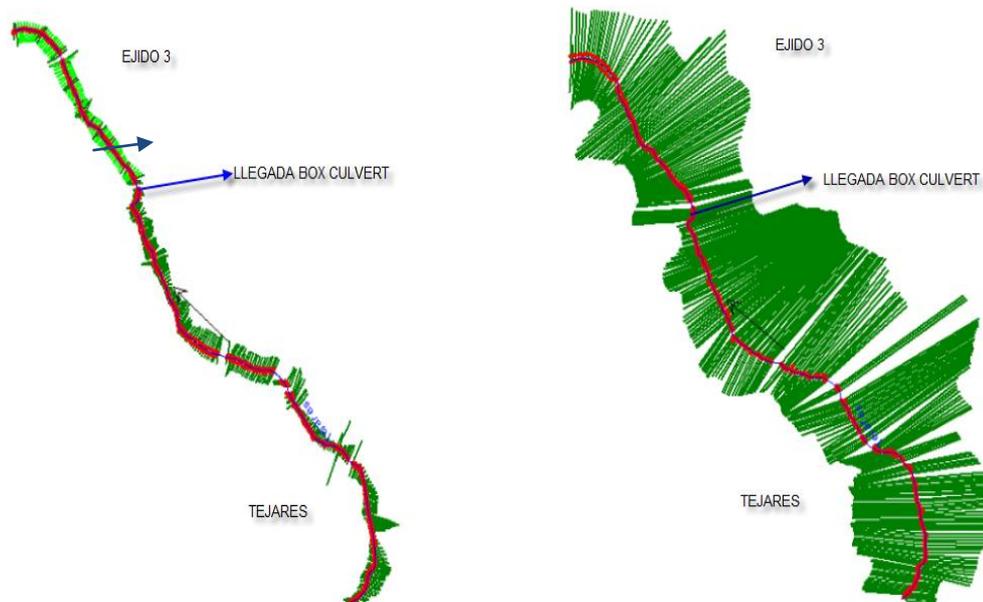
La preparación de información digital se desarrolló de igual manera que para los tramos de Ejido 1, Ejido 2 y La Paila, tal como se describió en los numerales correspondientes.

10.8. PROCESAMIENTO EN HEC-RAS PARA EL TRAMO TEJARES – EJIDO 3

10.8.1. Datos geométricos

El modelo geométrico de Tejares – Ejido 3, al igual que los anteriores, contiene datos de las diferentes secciones transversales, las elevaciones que constituyen el cauce principal y las laderas de inundación; de igual forma, se cuenta con las distancias entre cada sección transversal teniendo en cuenta el thalweg del cauce principal y las laderas izquierdas y derechas, considerando la distancia del centro de masa del flujo a cada lado. Las distancias mencionadas anteriormente pueden variar en función de la sinuosidad del cauce. En la figura 10.20 se evidencian los modelos geométricos que representan la información topobatimétrica y cartográfica digital para los tramos de estudio.

Figura 10.20. Modelo geométrico topobatimétrico y cartográfico digital de Tejares – Ejido 3



a) Modelo topobatimétrico

Fuente: Modificado de Convenio
20131800008927 Alcaldía de
Popayán y Universidad del Cauca

b) Modelo cartográfico digital

Fuente: Autores

Para el modelo geométrico de Tejares, se establecieron los bordes del cauce principal en la ladera izquierda y derecha, para lo que se consideraron los criterios de cambio brusco de pendiente en las secciones transversales y un ancho de superficie libre representativo de la realidad, con lo cual se obtiene un ancho de cauce aproximadamente entre 3 m y 15 m para el modelo cartográfico digital. En contraste con el topobatimétrico, se definió el ancho del cauce aproximadamente de 2 m y 9 m.

Para los modelos geométricos tanto topobatimétrico como cartográfico digital, se definieron tres valores de coeficientes de rugosidad de Manning que corresponden a la zonas de ladera izquierda y derecha y al cauce principal de Tejares teniendo en cuenta las observaciones en campo. La tabla 7 ilustra los coeficientes adoptados para ambos modelos.

Tabla 7. Coeficientes de rugosidad de Manning determinados

Descripción del coeficiente de rugosidad de Manning				
Zonas del cauce	Tejares	Descripción	Ejido 3	Descripción
Ladera izquierda	0.085	Presencia de malezas densas y matorrales sin cortar, tan altas como la profundidad del flujo.	0.06	Arbustos dispersos con presencia de densa malezas.
Ladera derecha	0.075	Con presencia de troncos de árboles y presentan maleza.	0.05	Presencia de maleza de altura considerable.
Cauce principal	0.065	Flujo lento, con presencia de maleza, cauce profundo.	0.06	Algunos pozos profundos, bajíos con malezas y piedras.

Fuente: US Army Corps of Engineers, 2010

En las figuras 10.21 y 10.22 se evidencia la cobertura vegetal de las laderas izquierda y derecha para el tramo Tejares – Ejido 3.

Figura 10.21. Cauce quebrada Tejares



Fuente: Autores

Figura 10.22. Cauce Ejido 3. Descarga del box culvert



Fuente: Autores

10.8.2. Datos hidráulicos

Para poder desarrollar la modelación hidráulica del modelo geométrico, cartográfico digital y topobatimétrico, es necesario contar con datos de caudal de inundación, especificar el tipo de flujo y las condiciones de frontera.

En la tabla 8, se presentan los valores de caudales que se adoptaron del estudio realizado por la Universidad del Cauca y la Alcaldía Municipal de Popayán - Convenio 20131800008927 (2015).

Tabla 8. Caudales para Tejares y Ejido 3

Tiempo de retorno (años)	Caudales para Tejares (m ³ /s)	Caudales para Ejido 3 (m ³ /s)
1.5	4.5	24.9
10	6.4	35.1
30	7.8	42.8
100	9.6	53.0

Fuente: Modificado de (Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca, 2015)

Como eje fundamental de la modelación hidráulica se establecen las condiciones de frontera que son indispensables para el cálculo de los niveles de partida aguas arriba y aguas abajo. Para la modelación hidráulica de Tejares y Ejido 3, se determinó como condición de frontera la profundidad normal, la cual define los niveles de agua iniciales dependiendo del tipo de flujo. En las tablas 9 y 10, se muestran las diferentes condiciones de frontera para los tramos en estudio para los modelos cartográfico digital y topobatimétrico.

Tabla 9. Condición de frontera para el modelo cartográfico digital

Tramo	Abscisa sección transversal	Ubicación	Elevación del fondo (m)	Δ Elevación (m)	Longitud (m)	So
Tejares - Ejido 3	2639.288	Aguas arriba	1724.04	0.12	76.64	0.00157
	2562.725		1723.92			
	4.45	Aguas abajo	1710.54	0.18	30.99	0.00581
	34.8		1710.36			

Fuente: Autores

Tabla 10. Condición de frontera para el modelo topobatimétrico

Tramo	Abscisa Sección transversal	Ubicación	Elevación de fondo (m)	Δ Elevación (m)	Longitud (m)	So
Tejares - Ejido 3	2659.78	Aguas arriba	1752.84	0.44	19.3	0.023
	2640.4		1752.4			
	0	Aguas abajo	1739.64	0.03	10.3	0.003
	10.09		1739.61			

Fuente: Autores

Para la selección del tipo de flujo se realizó la simulación hidráulica considerando flujo supercrítico, subcrítico y mixto. Analizando los resultados, se seleccionó el que menos arrojara notas o mensajes de advertencia en su simulación, lo que permitió establecer que Tejares - Ejido 3 presenta flujo subcrítico.

11. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA EJIDO

Las figuras 11.1 y 11.2 ilustran los modelos topobatimétrico y cartográfico digital superpuestos con las ortofotos en el HEC-RAS, a partir de los cuales se realizó la simulación hidráulica.

Figura 11.1. Modelo geométrico topobatimétrico de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila



Fuente: Modificado de Convenio 20131800008927 Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca

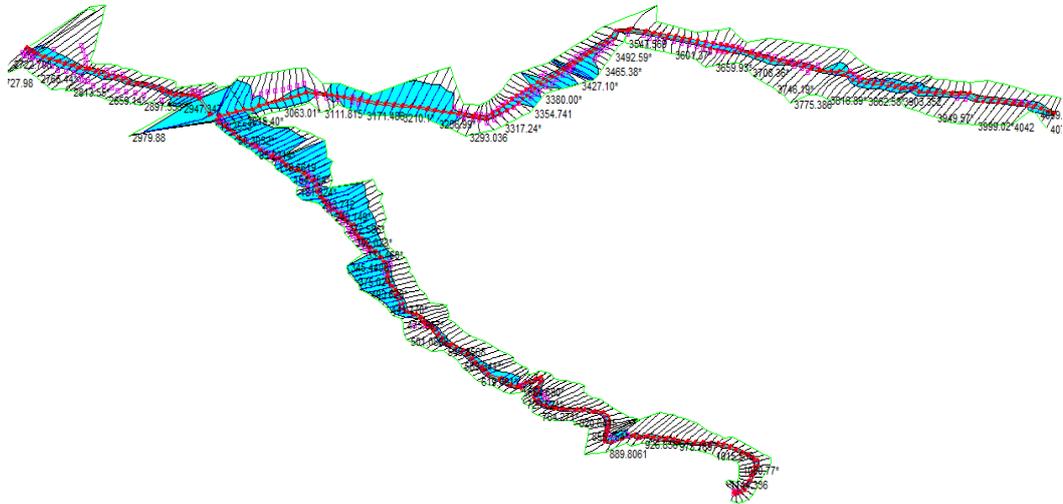
Figura 11.2. Modelo geométrico cartográfico digital de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila



Fuente: Autores

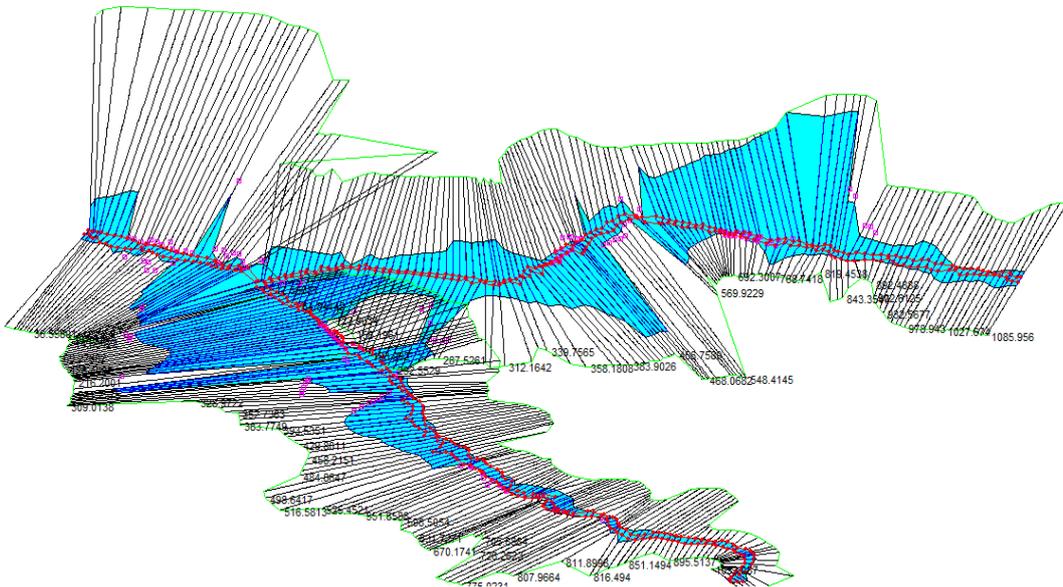
La simulación hidráulica arroja resultados gráficos y numéricos; las figuras 11.3 y 11.4, ilustran las zonas de inundación generadas para un caudal con tiempo de retorno de 30 años usando el HEC-RAS. Concretamente, se aprecia que las extensiones de inundación son mayores en la simulación a partir de cartografía digital en comparación con la topobatimetría. Los resultados gráficos generados para los demás caudales correspondientes a otros tiempos de retorno se muestran en el anexo D.

Figura 11.3. Esquema en 3D del modelo topobatimétrico de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila



Fuente: Modificado de Convenio 20131800008927 Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca

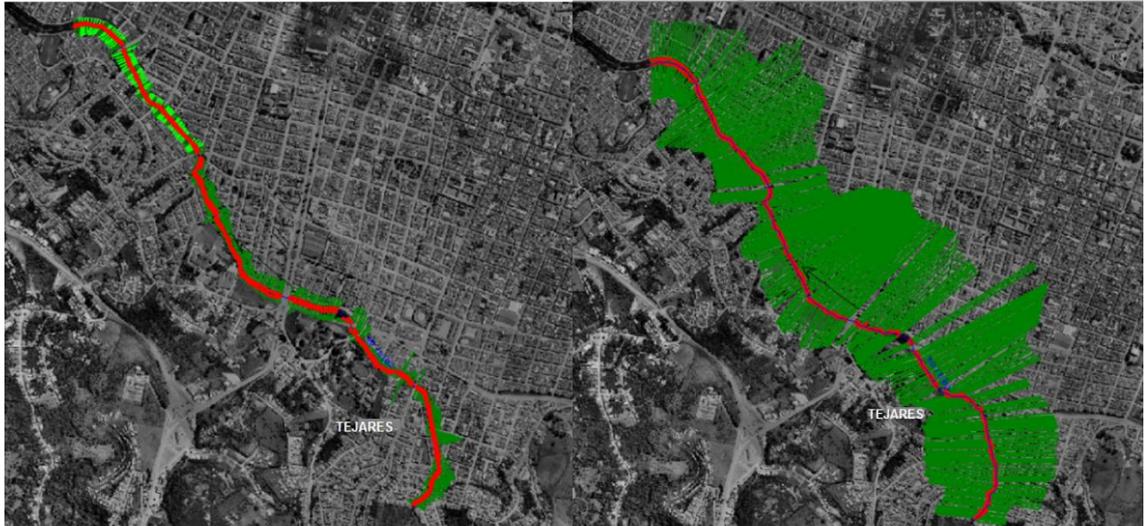
Figura 11.4. Esquema en 3D del modelo cartográfico digital de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila



Fuente: Autores

En la figura 11.5, se observan los modelos superpuestos en las fotografías aéreas para el tramo Tejares – Ejido 3.

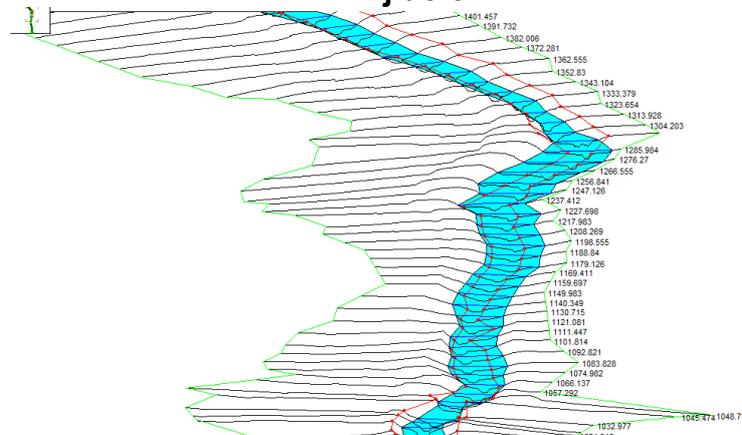
Figura 11.5. Modelo geométrico Tejares - Ejido 3
a) Topobatimétrico b) Cartográfico digital



Fuente: Autores

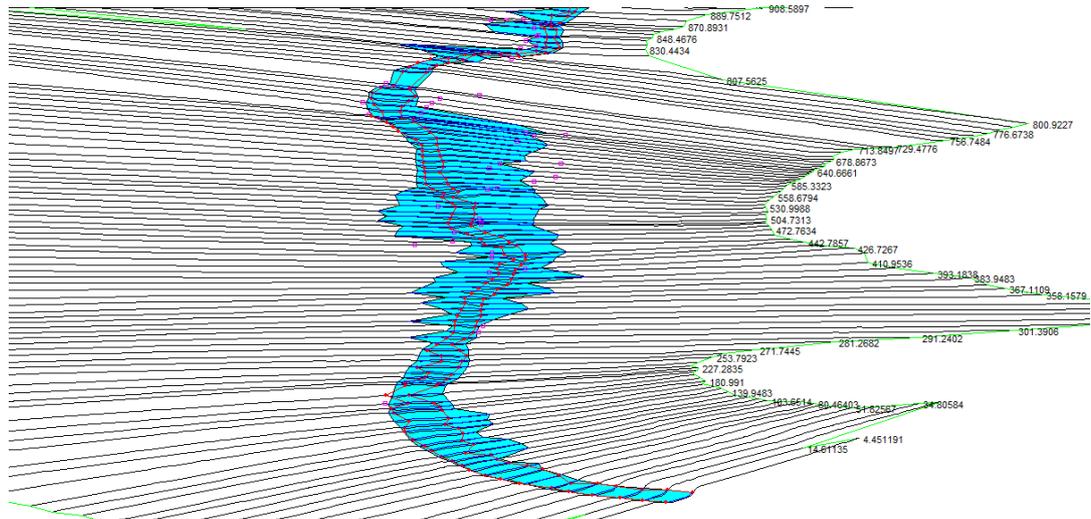
Los modelos geométricos presentados manifiestan una diferencia considerable en la extensión de las secciones transversales; en el caso del topobatimétrico, la longitud de las secciones se vio limitada dado que el sistema Ejido, formado por Ejido 1, Ejido 2, La Paila, Tejares y Ejido 3, presenta alta intervención antrópica, lo cual dificulta una buena caracterización del terreno. En contraste, en el cartográfico digital las secciones transversales son más extensas debido a que se consideró toda la zona propensa a ser inundada sin restricciones de tipo antrópico. En las figuras 11.6 y 11.7 se presentan las zonas de inundación generadas para un caudal con tiempo de retorno de 30 años. Evidentemente se aprecia que las extensiones de inundación son mayores en la simulación a partir de cartografía digital en comparación con la topobatimétrica. Los resultados obtenidos para los demás caudales correspondientes a otros tiempos de retorno se muestran en el anexo D.

Figura 11.6. Esquema en 3D del modelo topobatimétrico de Tejares – Ejido 3



Fuente: Modificado de Convenio 20131800008927 Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca

Figura 11.7. Esquema en 3D del modelo cartográfico digital de Tejares-Ejido 3



Fuente: Autores

11.1. RESULTADOS HIDRÁULICOS PARA EL TRAMO EJIDO 1

Las figuras 11.8 y 11.9, muestran los perfiles de flujo y la comparación de secciones transversales de cada modelo para el caudal con tiempo de retorno de 30 años en los tramos Ejido 1, Ejido 2, La Paila, Tejares – Ejido 3.

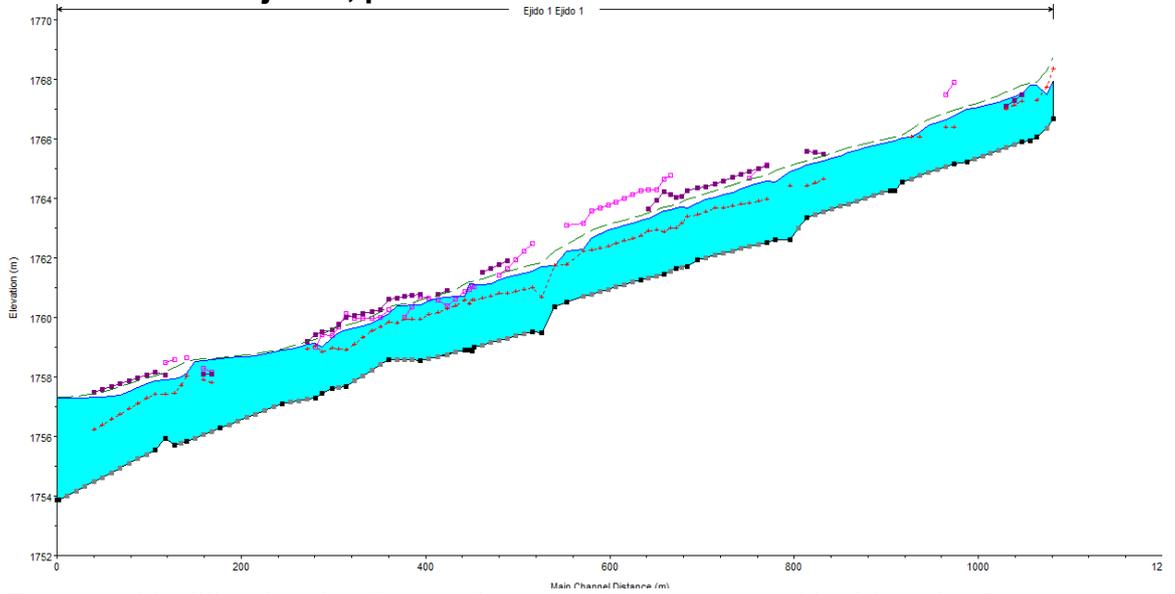
Es de aclarar que existe una diferencia de elevaciones entre el modelo cartográfico digital y el topobatemétrico, dado que las elevaciones del primero están aproximadamente 30 m por encima de las cotas del segundo lo que es debido a que los levantamientos topográficos convencionales se basan en un sistema de referencia vertical geoidal; en cambio los levantamientos satelitales GNSS, y de la misma manera los DEMs provenientes de tecnología satelital, se basan en un sistema elipsoidal.

A pesar de esto, los resultados hidráulicos son comparables puesto que la diferencia de elevaciones es consistente a lo largo de todos los tramos, lo que permite comparar las profundidades máximas dentro de las zonas de inundación, dado que se comparan las láminas de agua, que son calculadas directamente desde el fondo de la sección transversal y no con las cotas del nivel de agua. Cabe mencionar, que las zonas de inundación de ambos modelos, se contrastan dado que se generaron a partir del mismo sistema de coordenadas, Magna Colombia Oeste. Por otro lado, las depresiones que presenta el perfil longitudinal del modelo cartográfico digital son más pronunciadas en contraste con las del modelo topobatemétrico; sin embargo, cabe mencionar que los tramos presentan pendientes medias del cauce similares cuando se comparan entre sí para cada modelo.

Para comparar las secciones transversales se consideró como punto en común, la coordenada plana del eje donde está ubicada.

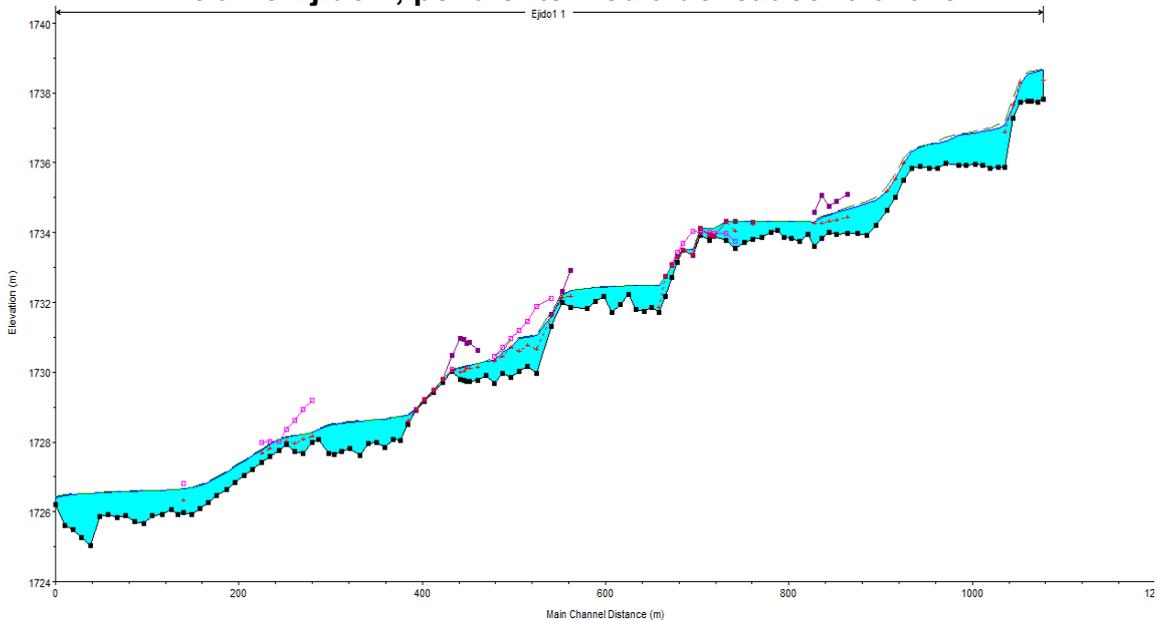
11.1.1. Perfiles longitudinales

Figura 11.8. Perfil longitudinal del modelo topobatemétrico para el tramo Ejido 1, pendiente media del cauce: 0.01181



Fuente: Modificado de Convenio 20131800008927 Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca

Figura 11.9. Perfil longitudinal del modelo cartográfico digital para el tramo Eje 1, pendiente media del cauce: 0.01075

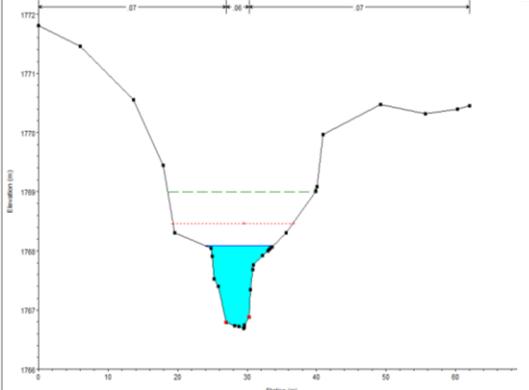
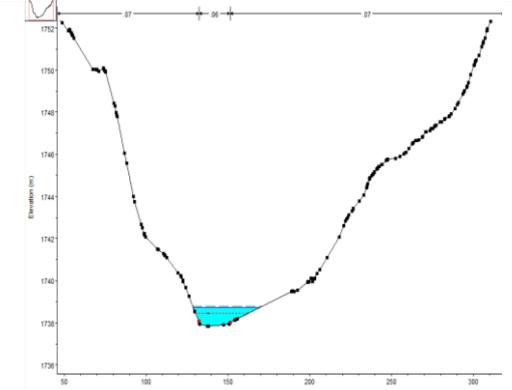
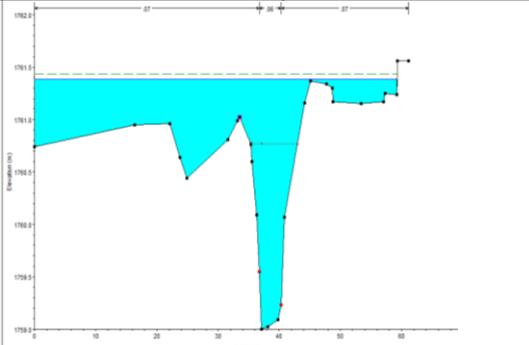
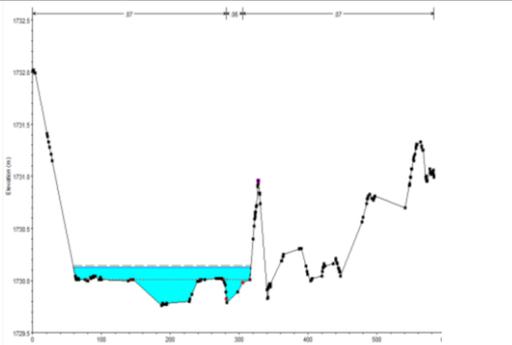
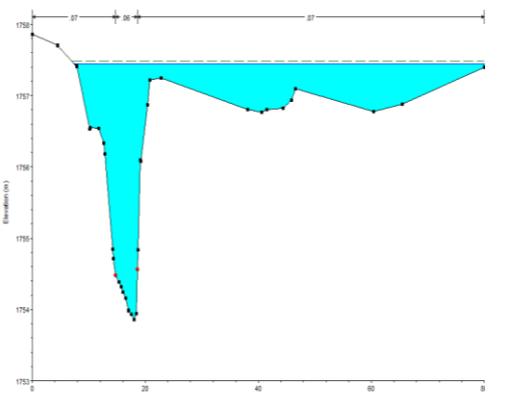
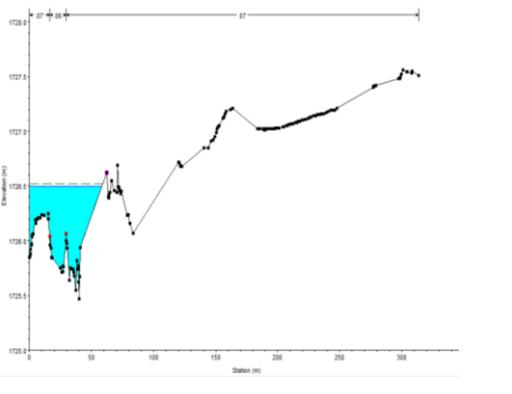


Fuente: Autores

11.1.2. Secciones transversales

La tabla 11, presenta la comparación de las secciones transversales ubicadas en el inicio, mitad y final del tramo Ejido 1, con el objetivo de evidenciar las discrepancias entre el modelo cartográfico digital y topobatimétrico.

Tabla 11. Comparación de secciones transversales del tramo Ejido 1

Topobatimétrico	Cartográfico Digital
Aguas abajo presa de concreto Barrio Avelino UII	
	
Coordenada X:105393.66 Coordenada Y: 760720.29	
Calle 15 A Barrio El Lago	
	
Coordenada X:1053144.24 Coordenada Y: 760712.46	
Puente Barrio los Sauces con Alameda	
	
Coordenada X: 1052783.03 Coordenada Y: 760553.69	

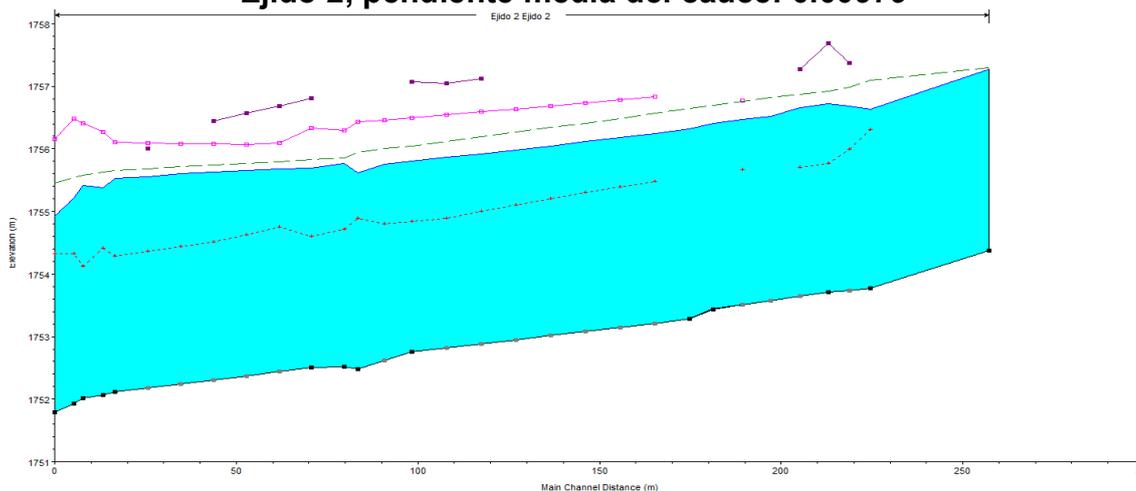
Fuente: Autores

11.2. RESULTADOS HIDRÁULICOS PARA EL TRAMO EJIDO 2

Las figuras 11.10 y 11.11, presentan los perfiles longitudinales del tramo Ejido 2, evidenciando los valores de las pendientes medias del cauce para los modelos cartográfico digital y topobatimétrico.

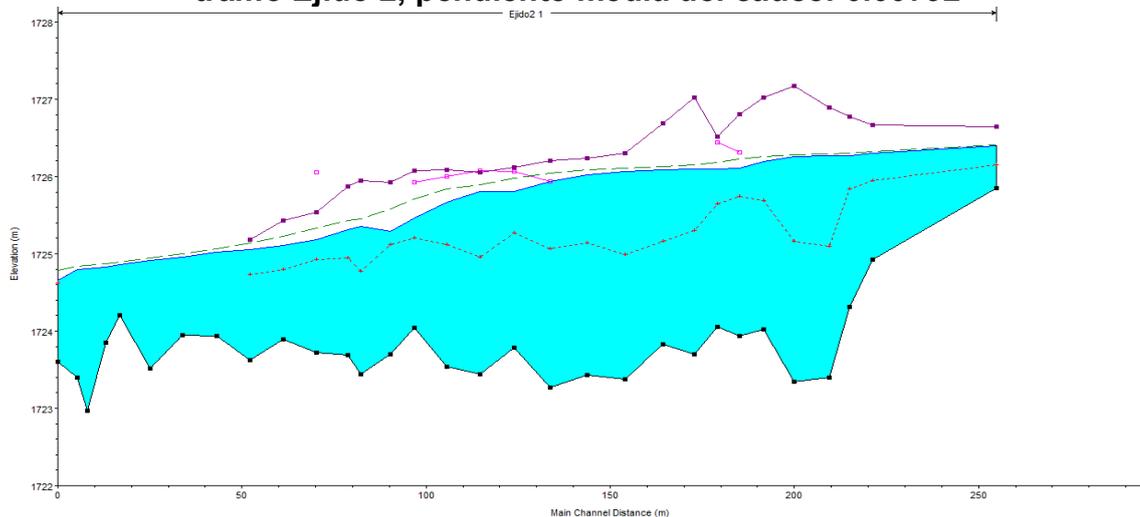
11.2.1. Perfiles longitudinales

Figura 11.10. Perfil longitudinal del modelo topobatimétrico para el tramo Ejido 2, pendiente media del cauce: 0.00979



Fuente: Modificado de Convenio 20131800008927 Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca

Figura 11.11. Perfil longitudinal del modelo cartográfico digital para el tramo Ejido 2, pendiente media del cauce: 0.00792



Fuente: Autores

Para comparar las secciones transversales se consideró como punto en común, la coordenada plana del eje donde está ubicada.

11.2.2. Secciones transversales

En la tabla 12 se presenta la comparación de las secciones transversales ubicadas en el inicio, mitad y final del tramo Ejido 2, con el objetivo de mostrar las diferencias entre cada modelo estudiado.

Tabla 12. Comparación de secciones transversales del tramo Ejido 2

Topobatómico	Cartográfico Digital
Puente Barrio los Sauces con Alameda	
Coordenada X:1052773.47 Coordenada Y: 760550.31	
Barrio La Alameda	
Coordenada X:1052709.50 Coordenada Y: 760591.26	
Barrio La Campiña del lado derecho, Santa Mónica del lado izquierdo	
Coordenada X:1052547.97 Coordenada Y: 760643.92	

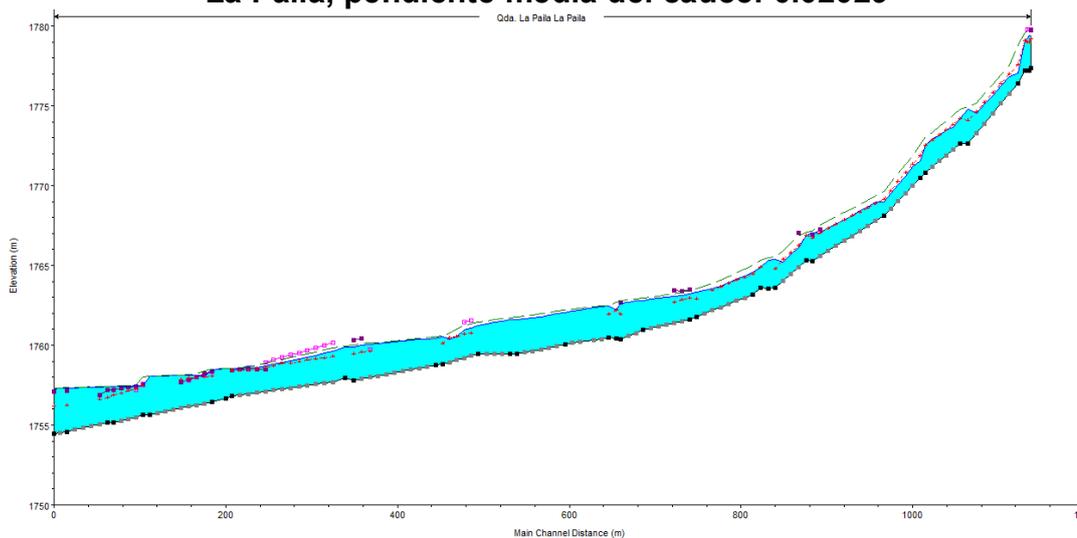
Fuente: Autores

11.3. RESULTADOS HIDRÁULICOS PARA EL TRAMO LA PAILA

Las figuras 11.12 y 11.13, presentan los perfiles longitudinales de la quebrada La Paila, evidenciando los valores de las pendientes medias del cauce para los modelos cartográfico digital y topobatimétrico.

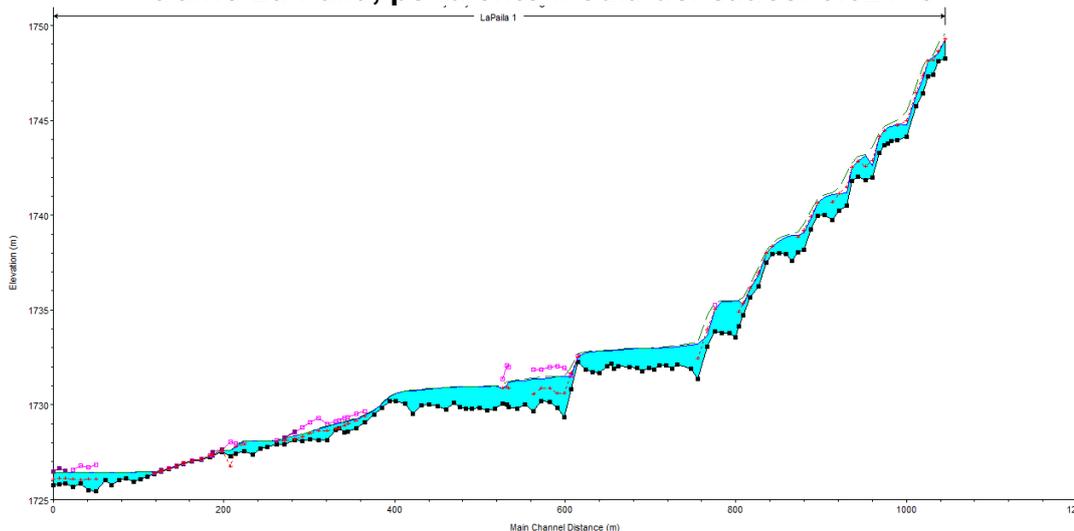
11.3.1. Perfiles longitudinales

Figura 11.12. Perfil longitudinal del modelo topobatimétrico para el tramo La Paila, pendiente media del cauce: 0.02029



Fuente: Modificado de Convenio 20131800008927 Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca

Figura 11.13. Perfil longitudinal del modelo cartográfico digital para el tramo La Paila, pendiente media del cauce: 0.02146



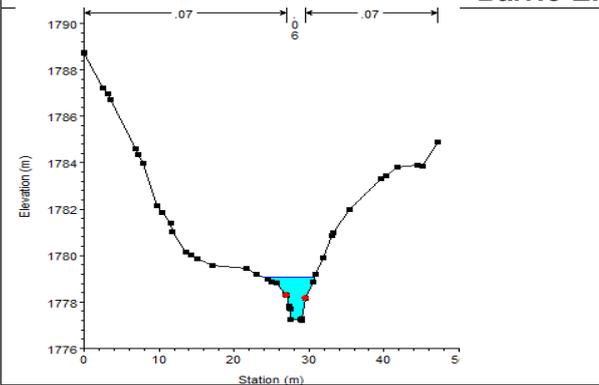
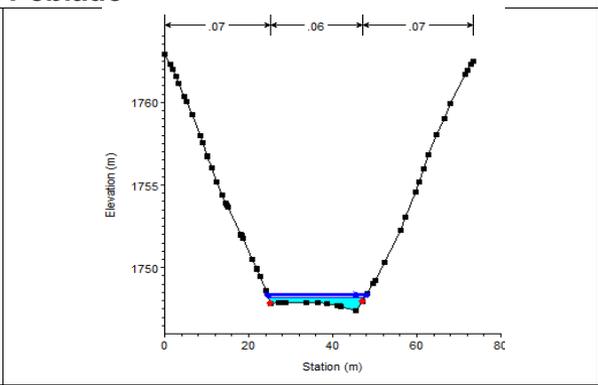
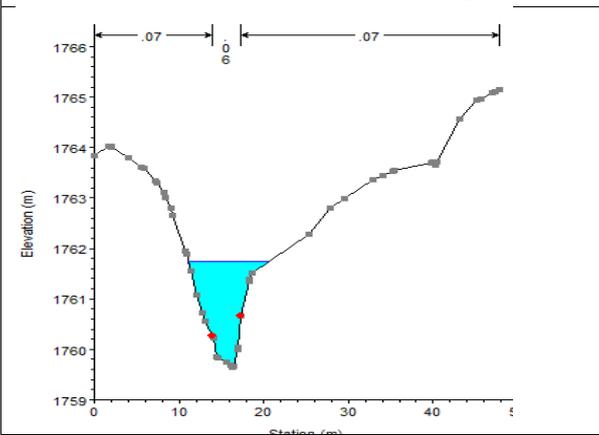
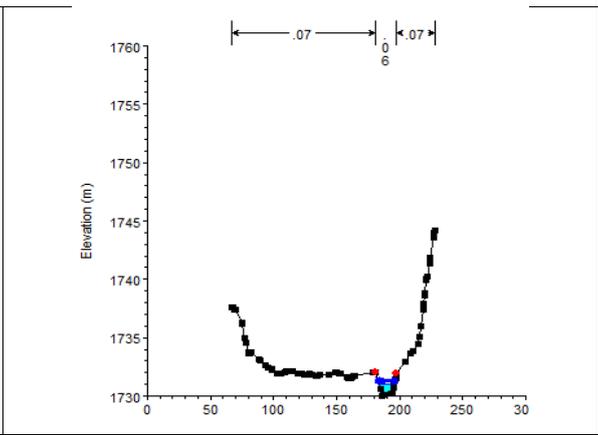
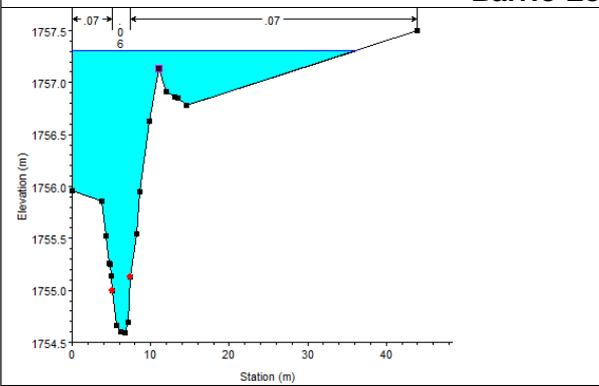
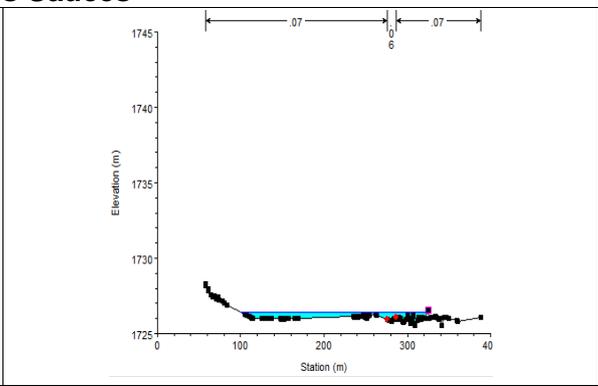
Fuente: Autores

Para comparar las secciones transversales se consideró como punto en común, la coordenada plana del eje donde está ubicada.

11.3.2. Secciones transversales

La tabla 13 presenta la comparación de las secciones transversales ubicadas en el inicio, mitad y final del tramo La Paila, con el objetivo de mostrar las diferencias entre cada modelo estudiado.

Tabla 13. Comparación de secciones transversales del tramo La Paila

Topobatemétrico	Cartográfico digital
Barrio El Poblado	
	
Coordenada X:1053479.06 Coordenada Y: 759929.64	
Barrio María Oriente	
	
Coordenada X:1053130.37 Coordenada Y: 760139.76	
Barrio Los Sauces	
	
Coordenada X:1052791.48 Coordenada Y: 760533.63	

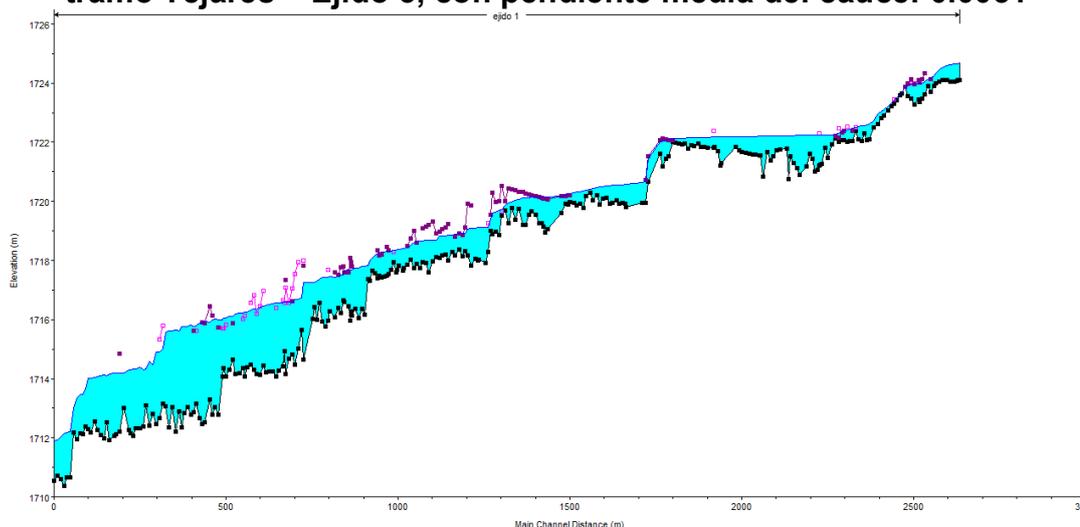
Fuente: Autores

11.4. RESULTADOS HIDRÁULICOS PARA EL TRAMO TEJARES - EJIDO 3

Las figuras 11.14 y 11.15, se presentan los perfiles longitudinales del tramo Tejares – Ejido 3, evidenciando los valores de las pendientes medias para los modelos cartográfico digital y topobatimétrico.

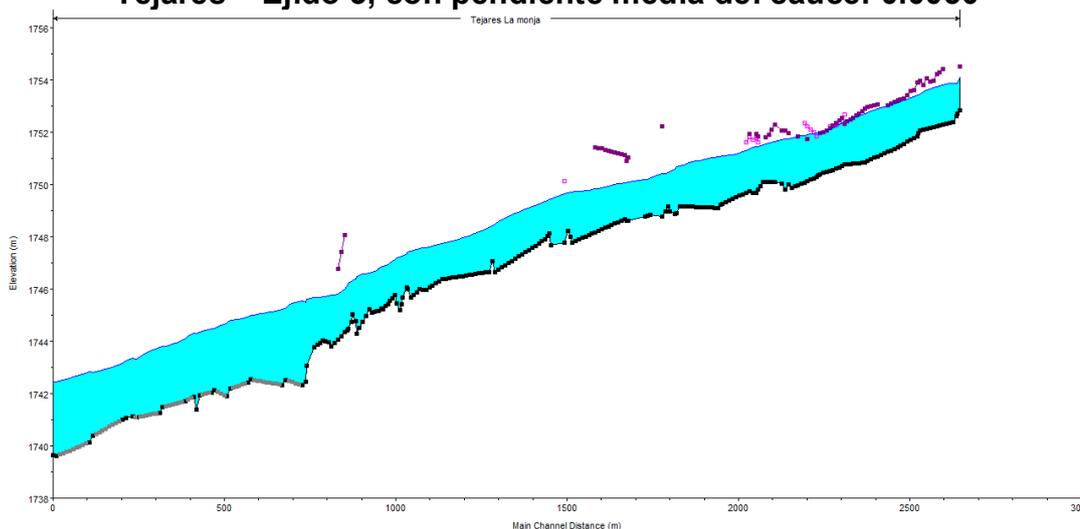
11.4.1. Perfiles longitudinales

Figura 11.14. Perfil longitudinal del modelo cartográfico digital para el tramo Tejares – Ejido 3, con pendiente media del cauce: 0.0051



Fuente: Autores

Figura 11.15. Perfil longitudinal del modelo topobatimétrico para el tramo Tejares – Ejido 3, con pendiente media del cauce: 0.0050



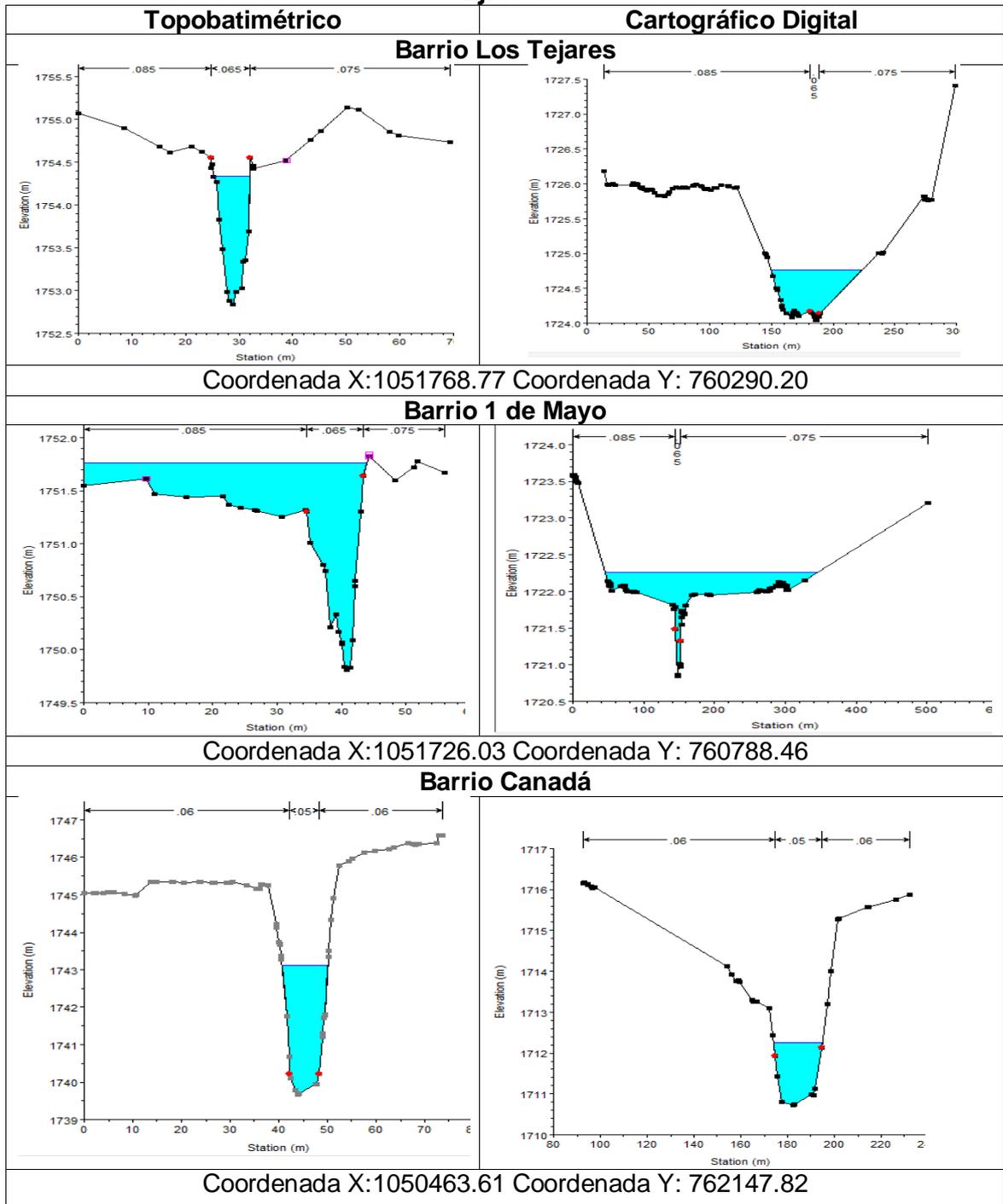
Fuente: Modificado de Convenio 20131800008927 Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca

Para comparar las secciones transversales se consideró como punto en común, la coordenada plana del eje donde está ubicada.

11.4.2. Secciones transversales

La tabla 14 presenta la comparación de las secciones transversales ubicadas en el inicio, mitad y final del tramo de la Quebrada Tejares, con el objetivo de mostrar las diferencias de cada modelo estudiado.

Tabla 14. Comparación de secciones transversales del tramo Tejares - Ejido 3



Fuente: Autores

12. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico de los resultados hidráulicos obtenidos a partir del HEC-RAS para los modelos topobatimétrico y cartográfico digital, es llevado a cabo con apoyo del software SPSS, que permite realizar un análisis estadístico exploratorio y comparativo de los parámetros hidráulicos como número de Froude, velocidad de flujo, ancho de inundación y profundidad del agua; los resultados del análisis se presentan en forma de gráficos y tablas, que se muestran a continuación de forma resumida para el sistema Ejido. La totalidad de los resultados se encuentra en el anexo D.

Tabla 15. Resumen cuantitativo de los resultados hidráulicos del sistema Ejido

Variable	Q (TR 1.5 AÑOS)		Q (TR 10 AÑOS)		Q (TR 30 AÑOS)		Q (TR 100 AÑOS)		
	CD	TB	CD	TB	CD	TB	CD	TB	
Froude	Promedio	0.33	0.43	0.34	0.44	0.34	0.44	0.35	0.44
	Des. Estándar	0.32	0.21	0.31	0.23	0.31	0.23	0.311	0.24
	Máximo	2.29	2.48	2.16	2.53	2.11	2.43	2.1	2.35
	Mínimo	0.01	0.13	0.01	0.11	0.01	0.09	0.01	0.11
	Mediana	0.25	0.4	0.27	0.4	0.28	0.41	0.28	0.4
	CV	96.97	48.84	91.18	52.27	91.18	52.27	88.86	54.55
	Cuartil 1	0.13	0.3	0.15	0.29	0.16	0.29	0.16	0.28
Cuartil 3	0.41	0.5	0.411	0.51	0.42	0.51	0.43	0.28	
Máxima Profundidad del agua (m)	Promedio	0.96	1.6	1.06	1.86	1.13	2.03	1.21	2.22
	Des. Estándar	0.64	0.39	0.69	0.48	0.73	0.54	0.78	0.62
	Máximo	3.09	2.88	3.44	3.24	3.67	3.56	3.95	3.95
	Mínimo	0.16	0.5	0.19	0.59	0.22	0.68	0.22	0.78
	Mediana	0.74	1.55	0.82	1.76	0.88	1.89	0.93	2.03
	CV	66.67	24.38	65.09	25.81	64.60	26.60	64.46	27.93
	Cuartil 1	0.5	1.33	0.56	1.55	0.6	1.68	0.64	1.81
Cuartil 3	1.25	1.78	1.37	2.08	1.46	2.25	1.56	2.49	
Ancho de la superficie (m)	Promedio	97.14	10.03	106.58	14.47	112.54	17.788	118.08	21.67
	Des. Estándar	95.85	7.98	97.16	13.99	98.468	16.953	98.41	19.92
	Máximo	365.94	66.05	397.14	121.18	400.79	143.59	397.99	160.99
	Mínimo	6.3	3.30	6.9	3.31	7.19	3.31	7.53	3.32
	Mediana	55.77	8.11	67.49	9.88	75.12	11.2	85.82	19.92
	CV	98.67	79.56	91.16	96.68	87.50	95.31	83.34	91.92
	Cuartil 1	24.89	6.52	31.79	7.89	34.04	8.86	39.49	9.85
Cuartil 3	127.4	10.22	142.95	13.29	151.11	18.08	164.2	26.04	
Velocidad de flujo(m/s)	Promedio	0.76	1.5	0.84	1.65	0.902	1.734	0.96	1.82
	Des. Estándar	0.66	0.67	0.71	0.77	0.752	0.843	0.79	0.911
	Máximo	4.15	4.99	4.38	5.67	4.6	5.89	4.89	6.17
	Mínimo	0.01	0.44	0.01	0.44	0.01	0.37	0.01	0.34
	Mediana	0.61	1.54	0.7	1.7	0.74	1.72	0.8	1.76
	CV	86.84	44.67	84.52	46.67	83.37	48.62	82.29	50.05
	Cuartil 1	0.27	0.88	0.33	0.95	0.35	0.99	0.38	1.04
Cuartil 3	1.07	1.91	1.2	2.12	1.27	2.29	1.35	2.41	

CD: cartografía digital TB: topobatimetría CV: coeficiente de variación

Fuente: Autores

Los parámetros hidráulicos anteriormente ilustrados, establecen una diferencia considerable entre el modelo cartográfico digital y topobatimétrico, para todos los tiempos de retornos estudiados. El coeficiente de variación calculado es superior al 20% y por ello se optó por comparar los resultados hidráulicos a partir de la mediana, dado que los valores promedios pierden representatividad. En la tabla 16, se muestra la comparación cualitativa de las tendencias de las

variables analizadas para los tramos Ejido 1, Ejido 2, La Paila y Tejares en los respectivos modelos geométricos.

Tabla 16. Comparación cualitativa de parámetros hidráulicos para el sistema Ejido

TRAMO	VARIABLES	Q (TR 1.5 AÑOS)		Q (TR 10 AÑOS)		Q (TR 30 AÑOS)		Q (TR 100 AÑOS)	
		TB	CD	TB	CD	TB	CD	TB	CD
Ejido 1	Número de Froude	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
	Profundidad máxima	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
	Ancho de inundación	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
	Velocidad de flujo	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
Ejido 2	Número de Froude	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
	Profundidad máxima	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
	Ancho de inundación	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
	Velocidad de flujo	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
La Paila	Número de Froude	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
	Profundidad máxima	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
	Ancho de inundación	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
	Velocidad de flujo	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
Tejares	Número de Froude	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
	Profundidad máxima	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
	Ancho de inundación	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
	Velocidad de flujo	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor

Fuente: Autores

De acuerdo con el análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados del sistema, se establece que el número de Froude, la velocidad y la profundidad de flujo son mayores para el modelo topobatimétrico, mientras que el ancho de inundación es mayor para el modelo cartográfico digital; dichas tendencias se mantienen en todos los tiempos de retorno estudiados. Se presenta una tabla resumen de los parámetros hidráulicos para el río Molino (tabla 17) obtenidos por Calvache y Pérez, 2016; cabe mencionar que en esta investigación también se omitieron estructuras tales como puentes, presas y diques.

Tabla 17. Resumen cuantitativo de los parámetros hidráulicos del río Molino

Variable		Q = 30 m ³ /s		Q = 50 m ³ /s		Q = 70 m ³ /s	
		TB	CD	TB	CD	TB	CD
Número de Froude	Promedio	0.54	0.43	0.55	0.45	0.56	0.46
	Desv. est	0.16	0.25	0.16	0.24	0.16	0.24
	Máximo	1.00	1.08	0.96	1.02	0.97	1.06
	Mínimo	0.22	0.06	0.25	0.08	0.23	0.09
Máxima profundidad del agua (m)	Promedio	1.99	1.68	2.54	2.03	2.99	2.30
	Desv. est	0.46	0.69	0.55	0.77	0.63	0.83
	Máximo	3.32	4.58	4.01	5.1	4.57	5.53
	Mínimo	0.75	0.51	1.18	0.67	1.48	0.81
Ancho de la superficie del agua (m)	Promedio	11.90	36.49	14.86	44.72	18.16	50.97
	Desv. est	3.71	23.06	8.75	27.77	14.90	29.80
	Máximo	32.25	149.49	76.52	159.77	117.83	168.62
	Mínimo	6.03	10.99	6.49	12.51	7.4	14.09
Velocidad de flujo (m/s)	Promedio	2.03	1.26	2.44	1.48	2.75	1.64
	Desv. est	0.46	0.59	0.55	0.65	0.61	0.69
	Máximo	3.72	3.00	4.59	3.41	5.00	3.70
	Mínimo	1.00	0.28	1.10	0.37	1.16	0.45

Fuente: Modificado de Calvache, F. y Pérez, D., 2016

Es importante mencionar que en el estudio de Calvache y Pérez, 2016, los parámetros hidráulicos como el número de Froude, la velocidad y la profundidad de flujo son más altas para el cauce de El Molino que para el sistema Ejido, dado que los caudales que transporta el primero son mayores en contraste con el sistema ramificado; a su vez, el ancho de la superficie libre del agua es mayor para el sistema ramificado ya que su topografía es más plana, en tanto que el cauce único presenta un mayor Factor de Incisión del cauce, en comparación con el sistema Ejido.

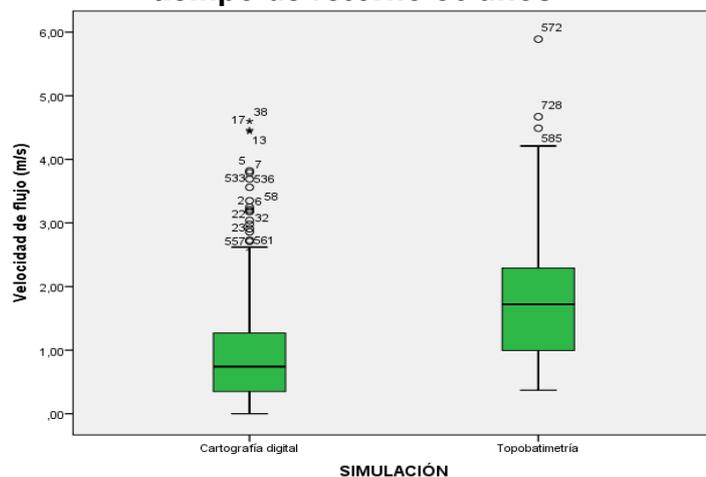
Tabla 18. Comparación cualitativa de los resultados hidráulicos del río Molino

Variable	Tipo de flujo	Q = 30 m ³ /s		Q = 50 m ³ /s		Q = 70 m ³ /s	
		TB	CD	TB	CD	TB	CD
Número de Froude	Subcrítico	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
Máxima profundidad del agua (m)	Subcrítico	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
Ancho de la superficie del agua (m)	Subcrítico	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
Velocidad del flujo (m/s)	Subcrítico	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor

Fuente: Modificado de Calvache, F. y Pérez, D., 2016

A partir de los análisis cualitativos del cauce único y ramificado, se estableció que el ancho de inundación tiende a ser mayor en la cartografía digital; en contraste, los parámetros como número de Froude, velocidad y profundidad de flujo, son menores en el modelo cartográfico digital en comparación con el modelo topobatimétrico. En las siguientes figuras se muestran los gráficos del tratamiento estadístico integral realizado para el sistema Ejido con el caudal respectivo para un tiempo de retorno de 30 años. El tratamiento estadístico para los demás caudales en cada tramo se incluye en el Anexo D.

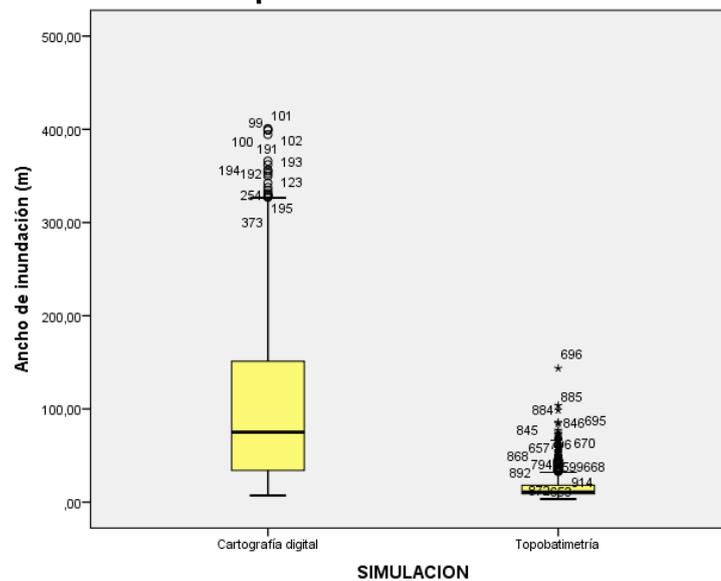
Figura 12.1. Diagrama de cajas para las velocidades con un caudal con tiempo de retorno 30 años



Fuente: Autores

Otro parámetro importante analizado es el ancho de la superficie libre del agua; para el modelo topobatimétrico se obtuvo una mediana de 11.2 m y para el cartográfico digital de 75.12 m; como refleja la siguiente figura, los valores de los anchos de inundación para el topobatimétrico se encuentran alrededor del valor de la media, siendo estos menores en comparación con el modelo cartográfico digital que cuenta con un ancho de inundación mayor y con una distribución asimétrica positiva.

Figura 12.3 Diagrama de cajas para el ancho de inundación con un caudal de tiempo de retorno 30 años



Fuente: Autores

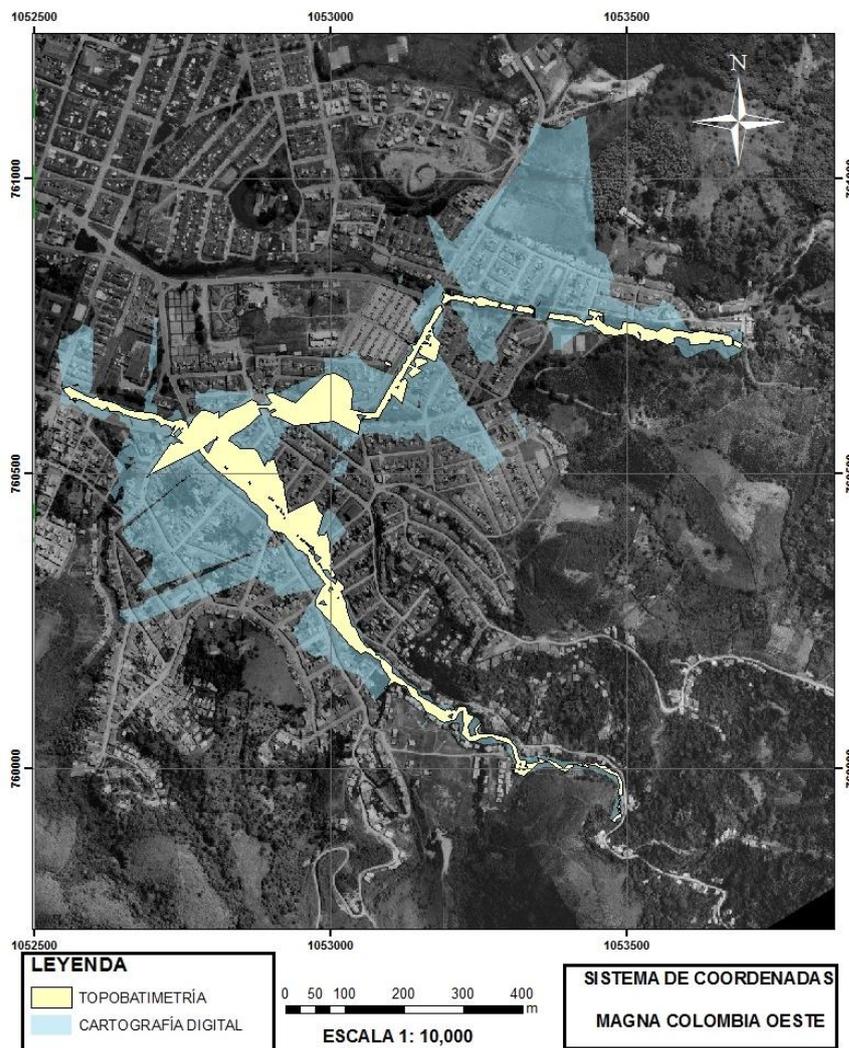
De igual forma, se cuenta con valores de anchos extremos, que permiten establecer una desviación estándar para la cartografía digital de 98.46 y para el modelo topobatimétrico de 16.953; el mayor grado de dispersión en la cartografía digital se debe a la falta de precisión en la delimitación de las secciones transversales para este modelo, al estar las curvas de nivel cada 2.0 m y no presentarse obstrucciones de tipo antrópico.

Finalmente, se realizaron pruebas no paramétricas para determinar la existencia de diferencia estadísticamente significativa en los resultados, de las cuales se encontró que no hay una distribución normal en los valores de todas las variables en cada modelo. Por otra parte, en general, no se cumple el supuesto de igualdad de varianzas de los valores de las variables en cada modelo, por tanto no se debe usar la conocida prueba de t-Student y se utilizó otra prueba de tipo no paramétrico, conocida como Mann-Whitney, la cual determina diferencia estadísticamente significativa en los resultados de la simulación.

13. POST-PROCESAMIENTO

El post-procesamiento se realiza con la herramienta HEC-GeoRAS para visualizar los resultados obtenidos en el HEC-RAS, mediante mapas de inundación para el tiempo de retorno considerado; a continuación se ilustra el mapa con la superposición de los modelos cartográfico digital y topobtimétrico para un tiempo de retorno de 30 años y en el anexo E se ilustran para los demás tiempos de retorno.

Figura 13.1. Superposición del ancho de inundación de los tramos Ejido 1, Ejido 2 y La Paila
SUPERPOSICIÓN DEL ANCHO DE INUNDACIÓN

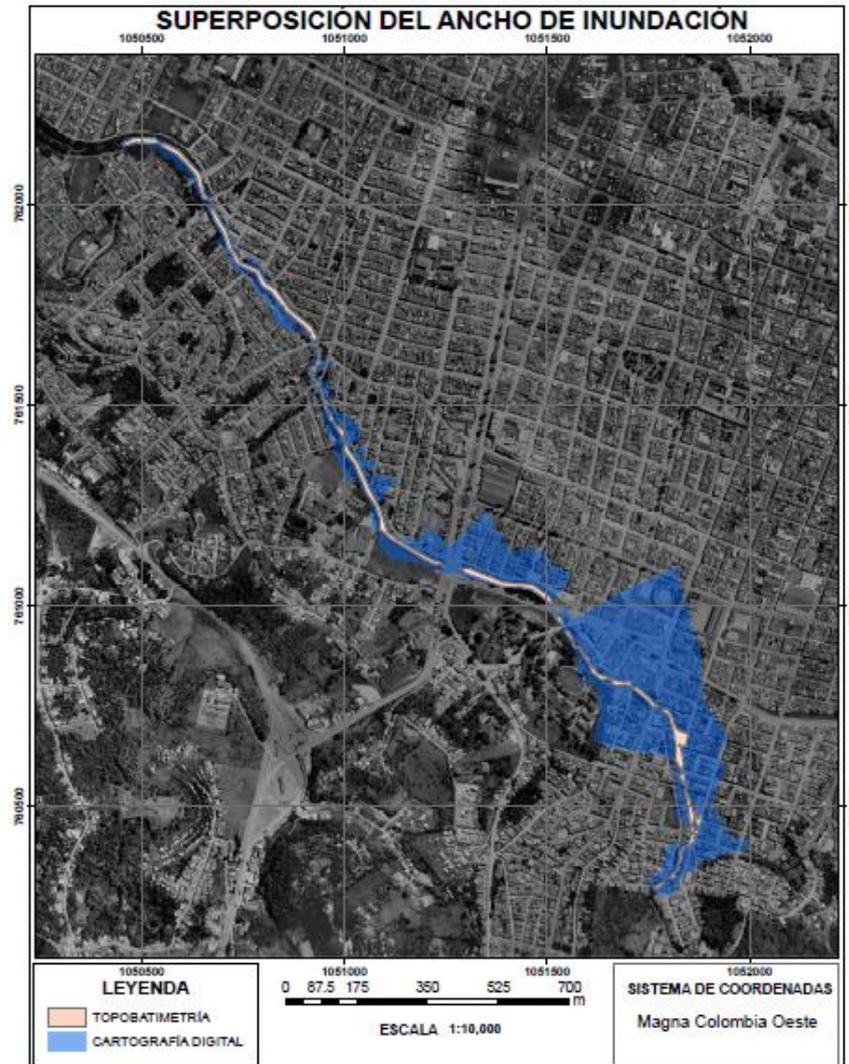


Fuente: Autores

La superposición de las simulaciones evidencia la discrepancia entre el ancho de inundación generado por cada modelo, los lugares críticos donde se generan zonas de inundación más amplias y otros, donde se presentan algunas coincidencias, lo que permite definir criterios y zonas donde se

justificaría la ejecución de estudios más detallados. Por ejemplo, el tramo inicial de la quebrada La Paila, en aproximadamente 500 m de longitud, presenta gran similitud entre ambos modelos.

Figura 13.2. Superposición del ancho de inundación de Tejares, tiempo de retorno: 30 años



Fuente: Autores

En particular, la superposición de las simulaciones realizadas para Tejares-Ejido 3, evidencia la existencia de dos sectores, uno aguas arriba con gran discrepancia en las zonas de inundación y otro aguas abajo con gran coincidencia debido a un mayor Factor de Incisión del cauce.

A partir de los mapas del sistema Ejido se consideran como lugares críticos los siguientes, ya que en estas zonas la simulación cartográfica generó anchos de inundación más amplios que en la simulación a partir de topobatimetría:

- La zona de desviación del río Ejido en el barrio Moscopán.
- El antiguo humedal del barrio El Lago.

- La confluencia de la quebrada La Paila con el Ejido en el barrio Los Sauces.
- Barrios Valparaíso, 1 de Mayo, Comuneros y San Rafael I Etapa.

Por lo anterior, se infiere a partir de las simulaciones realizadas con cartografía digital se puede ahorrar tiempo y dinero, ya que al contar con mapas como los anteriores, se puede decidir en qué zonas o sitios puntuales, se justificaría movilizar al personal encargado de realizar mediciones en campo para caracterizar un río.

Se presenta a continuación el resultado del mapeo de zonas de inundación obtenido por Calvache y Pérez, 2016 para el río Molino.

Figura 13.3. Superposición del ancho de inundación para un tramo del río Molino, $Q = 70 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fuente: Calvache, F. y Pérez, D., 2016

Al igual que para los tramos analizados del sistema Ejido, el río Molino presenta franjas de coincidencia y discrepancia. Es particularmente interesante ver que la zona de inundación del Barrio Bolívar es similar en el modelo cartográfico digital y en el topobatimétrico.

14. METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA SIMULACIÓN DE INUNDACIONES A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL

La identificación de zonas de inundación a nivel preliminar se puede realizar a partir de cartografía digital, que presente un buen nivel de detalle y resolución; para la simulación numérica se requiere información hidrológica e hidráulica que permita obtener niveles de agua para diferentes tiempos de retorno, a través de la aplicación de herramientas computacionales como ArcGIS, HEC-GeoRAS y HEC-RAS. Los requerimientos para obtener un mapa de amenaza por inundación, son los siguientes:

Información cartográfica digital:

- Modelo de elevación digital -DEM- con resolución de por lo menos 5 m por pixel para sistemas más grandes como el río Cauca. Es importante aclarar que para cauces de menor tamaño como el sistema Ejido, se requiere un modelo de elevación digital de mayor detalle que permita caracterizar el cauce, sin embargo, el costo de esta información cartográfica digital detallada es elevado, por ello se recomienda la realización de topobatemetría.
- Ortofotos e imágenes satelitales de la zona de interés, con alta resolución, aproximadamente 0.25 m.
- Mapa predial del municipio o zona a evaluar.

Nota: el tramo de estudio debe ser lo suficientemente largo, para minimizar errores por la incertidumbre en la fijación de las condiciones de frontera en el modelo hidráulico.

Información hidráulica:

- Caudales de inundación para diferentes tiempos de retorno.
- Condiciones de frontera aguas arriba y/o aguas abajo.
- Coeficientes de rugosidad de Manning para el cauce principal y las laderas izquierda y derecha.
- Bordes del cauce principal.
- Coeficientes de pérdidas de energía.

La simulación de inundaciones implica tres etapas: Pre-procesamiento, simulación hidráulica y post-procesamiento, tal como se describe a continuación:

PRE-PROCESAMIENTO EN EL HEC-GeoRAS

Se resumen a continuación los pasos para la creación del modelo geométrico, tal como se desarrollaron en el numeral 10.4.

1. Crear un archivo en la interfaz de ArcGIS en el sistema de coordenadas apropiado.
2. Cargar la información digital (Modelo digital de elevaciones en formato Tif o modelo digital del terreno en formatos como Shape).

3. Recortar la zona de estudio.
4. Generar el Modelo Digital del Terreno TIN (Triangulated Irregular Network).
5. Trazar el eje del cauce principal por la parte más profunda del río, desde aguas arriba hacia aguas abajo; en este paso es importante guiarse del TIN, las ortofotos de alta resolución o el mapa predial del municipio.
6. Trazar los flowpaths o rutas del flujo para cada tramo del río, de forma continua, de izquierda a derecha, por donde se prevee que circula el flujo en las llanuras de inundación, desde aguas arriba hacia aguas abajo.
7. Crear las secciones transversales de izquierda a derecha, perpendiculares al flujo, cruzando sólo una vez el cauce y los flowpaths; no deben interceptarse entre sí, ni sobrepasar los límites del TIN, para evitar errores en la simulación numérica. Para la separación entre secciones se sugiere ubicarlas como máximo, entre cinco y diez veces el ancho del cauce principal en tramos rectos y hasta uno y dos veces el ancho del cauce en tramos curvos; esto con el fin de disminuir errores e incertidumbre que incorporan los cálculos hidráulicos.
8. Generar los atributos de los elementos creados con HEC-GeoRAS.
9. Crear archivo para exportar al HEC-RAS.

SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN EL HEC-RAS

10. Importar la geometría desde el HEC-GeoRAS.
11. Definir los bordes del cauce principal, teniendo en cuenta criterios como el cambio brusco de pendiente, ancho y alto representativo de la realidad del cauce, para lo que resulta conveniente definirlos en campo con un GPS o apoyándose en ortofotos.
12. Definir los coeficientes de rugosidad de Manning con base en las observaciones de las salidas campo.
13. Definir los coeficientes de pérdidas de energía por contracción y expansión.
14. Ingresar los caudales para los tiempos de retorno definidos.
15. Establecer la condición de frontera aguas arriba y aguas abajo teniendo en cuenta la información disponible, para lo cual hay cuatro opciones: profundidad normal del flujo, flujo crítico, superficie de agua conocida y curva de calibración del cauce. Cabe mencionar que las uniones entre tramos se consideran condiciones de frontera internas y el HEC-RAS las genera automáticamente según las confluencias o conexiones entre cauces definidas en el sistema geométrico simulado.
16. Definir el tipo de flujo: Subcrítico, supercrítico o mixto.
17. Realizar simulación con HEC-RAS para generar los perfiles de flujo y los parámetros hidráulicos de interés como ancho, profundidad y velocidad del flujo, asociados a los caudales de estudio.
18. Exportar resultados de HEC-RAS a ArcGIS.

POST-PROCESAMIENTO EN EL HEC-GeoRAS

19. Importar resultados de la simulación hidráulica como ancho y velocidad del flujo, para los perfiles de flujo generados con HEC-RAS.

- 20.** Añadir las ortofotos debidamente georeferenciadas.
- 21.** Visualizar la superficie del agua para cada perfil de flujo; para ello activar la capa que corresponde al ancho de inundación (el nombre de la capa tiene asociada la letra b, que significa boundary para límites de inundación).
- 22.** Incluir datos como: título, leyenda, Norte, grilla, sistema de coordenadas, y escala para mayor interpretación del mapa.

15. LIMITACIONES DEL ESTUDIO

La intervención antrópica en el sistema Ejido comprende entre otros aspectos la desviación y canalización del río, la presencia de muros, viviendas y cercas, próximas al cauce; por tanto, la caracterización topobatimétrica y el respectivo modelo geométrico se ven limitados en algunas zonas; por el contrario, en el modelo cartográfico digital no influyen dichas restricciones.

La diferencia sistemática de 30 m en elevación y las notorias diferencias en los anchos del cauce principal entre el modelo cartográfico digital y el topobatimétrico, restringen la caracterización de estructuras como presas, puentes y el box-culvert de aproximadamente 2.0 km de longitud, presentes en el sistema Ejido.

La cartografía digital disponible para la investigación, cuenta con curvas de nivel cada 2.0 m, lo que permite generar el TIN; sin embargo, este no refleja claramente la definición del cauce principal en algunas zonas del sistema Ejido, particularmente en los tramos Ejido 1 y La Paila; por tanto, resultó dispendioso definir los bordes del cauce principal especialmente en el modelo cartográfico digital y en algunas zonas se optó por usar como guía, el mapa predial y las ortofotos del municipio dado que su buen nivel de resolución (0.30 m) permite identificarlos.

La ubicación y cantidad de secciones transversales en los modelos geométricos generados a partir de cartografía digital y topobatimetría coinciden; sin embargo, en el modelo cartográfico digital se disminuyó la longitud de algunas secciones próximas a la confluencia entre el tramo Ejido 1 y La Paila, para evitar intersecciones y errores en la simulación numérica.

La extensión de la superficie libre del agua se limitó mediante diques para evitar el desbordamiento en zonas que no deberían contener agua por crecientes del río; no obstante, esto debería hacerse para cada caudal considerado, lo que implica construir diferentes modelos geométricos; sin embargo, se optó por fijar los diques en las partes más altas considerando el caudal para período de retorno mayor a 30 años, teniendo en cuenta que es un caudal intermedio analizado y que presenta las mismas tendencias.

16. RECOMENDACIONES

Adelantar la simulación de inundaciones para cauces de mayor tamaño, como el río Cauca, para validar la metodología propuesta en ríos de otras características, considerando que se cuenta con la información para la zona urbana de Popayán.

En estudios de cauces de quebradas y/o ríos más detallados, se deben precisar los coeficientes de rugosidad de Manning, considerando las distintas coberturas como: pastos, pavimentos, construcciones, sobre las posibles zonas inundables o por donde atravesará el eje en estudio.

Las curvas de nivel con las que se elaboró el modelo cartográfico digital presentan curvas cada 2 m; sin embargo para sistemas fluviales como el Ejido, es necesario implementar curvas de nivel por ejemplo cada 50 cm, que permitan reflejar las particularidades de cauces tan pequeños, no obstante el costo de esta información cartográfica digital detallada es elevado, por ello se recomienda la realización de topobatimetría.

Los modelos de elevación digital (DEM) que se utilicen para generar modelos geométricos para cauces como los del sistema Ejido, deben tener al menos una resolución de 1 m por pixel para que exista mayor detalle, dado que son cauces pequeños con menos de 30 m de ancho y transportan caudales bajos.

En las secciones transversales en las cuales se dificulta establecer los bordes del cauce principal, se hace importante identificar los mismos mediante trabajo de campo utilizando para ello un GPS cartográfico, para mayor precisión.

Para estudios preliminares de simulación de inundaciones en cauces que presenten *Factor de Incisión* menores a 1.8, se obtendrán resultados aceptables empleando la misma cartografía digital, entendiéndose *Factor de Incisión* como la relación entre el ancho de la zona propensa a inundaciones y el ancho del cauce principal.

Es urgente emprender campañas de educación ciudadana con el fin mejorar la situación de los cauces, actualmente invadidos y contaminados, para mitigar el impacto de escenarios de inundación en dichas zonas.

Es necesario que las autoridades sean rigurosas con el cumplimiento del ordenamiento territorial para evitar invasiones al cauce que alteran su dinámica.

17. CONCLUSIONES

Los sistemas fluviales con gran intervención antrópica como el sistema Ejido, resultan de gran complejidad y dificultan la simulación hidráulica, tanto con cartografía digital como con topobatimetría, caso en el cual se hace más viable realizar un análisis heurístico de la zona en estudio.

El análisis estadístico determina una gran diferencia en los resultados entre ambos modelos para los tramos estudiados. El río Molino presenta las mismas tendencias de los parámetros hidráulicos que el sistema Ejido, teniendo en cuenta que las zonas de inundación para el río Ejido, son más amplias en comparación con el río Molino, dado que éste último presenta un mayor *Factor de Incisión* del flujo.

Las pendientes medias y las longitudes de los cauces que conforman el sistema Ejido son similares entre sí, para el modelo topobatimétrico y el cartográfico digital.

Los resultados de anchos de inundación tanto para el modelo cartográfico digital como el topobatimétrico presentan similitud, cuando el tramo es encajonado, como se refleja en la zona de Ejido 3 y aguas arriba de la quebrada La Paila.

El análisis estadístico establece tendencias similares para la quebrada Tejares, La Paila, Ejido 1 y Ejido 2, con relación a los parámetros hidráulicos como número de Froude, velocidad, ancho y profundidad.

Las zonas de inundación generadas para el sistema Ejido a partir de cartografía digital difieren en algunos tramos con respecto a las generadas con la topobatimetría, sin embargo, se plantea una metodología que permita obtener resultados aceptables a nivel preliminar en la simulación hidráulica a partir de cartografía digital.

La cartografía digital utilizada permite obtener resultados aceptables en zonas donde el cauce presenta un Factor de Incisión promedio de 1.8. Esto se evidenció en el tramo de Tejares - Ejido 3, donde las zonas de inundación generadas a partir de cartografía digital coincidieron con las zonas generadas a partir de la topobatimetría.

Se podría inferir que la cartografía digital se puede implementar en casos en que se requiera estudiar ríos de gran tamaño con cauces mayores de 30 m de ancho y en tramos largos, por ejemplo, mayores de tres kilómetros.

La metodología propuesta para la simulación de inundaciones a partir de cartografía digital se puede implementar en estudios preliminares para la toma de decisiones, minimizando costos y tiempo.

En estudios preliminares se puede usar cartografía digital para simular inundaciones y limitarse los estudios topobatimétricos a las zonas en donde es evidente que se desborda el agua. Esto lleva a minimizar los costos que incluye realizar levantamientos topográficos. Por ejemplo, según información obtenida de topógrafos, el ahorro en realizar 1 km de topobatimetría con secciones transversales cada 10 m, sería de aproximadamente \$5´000,000.

El trabajo de investigación aporta en el avance en que se pueden caracterizar los sistemas fluviales actualmente, a través del planteamiento de una metodología para la simulación de inundaciones a partir de cartografía digital, mediante la aplicación de herramientas computacionales que permiten ahorrar tiempo ante el rápido procesamiento de gran cantidad de datos; sin embargo, cabe aclarar que la investigación se realizó con fines académicos y que los resultados obtenidos no se pueden emplear para la toma de decisiones, ya que el modelo cartográfico digital construido en algunas zonas del sistema Ejido genera zonas de inundación que difieren rigurosamente de las del modelo topobatimétrico.

BIBLIOGRAFÍA

Alcaldía de Popayán. (2013). Nuestra Geografía, Popayán. Obtenido de <http://popayan.gov.co/ciudadanos/popayan/nuestra-geografia> Consulta: 10 de Noviembre de 2016

Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca. (2015). Convenio 20131800008927 Estudio preliminar de riesgos (afectación y daños) asociados a fenómenos de inundación lenta y súbita (avenida torrencial) en la zona urbana y rural del municipio de Popayán, Colombia.

Avendaño, L. y Cadena, M. (s.f.). Uso de sistemas de información geográfica en la determinación de amenazas por inundación en el municipio de Chía, Cundinamarca.

Calvache, F. y Pérez, D. (2016). Simulación de inundaciones a partir de Cartografía digital y de Topobatimetría. Universidad del Cauca. Informe final del trabajo de investigación para optar al título de ingenieros ambientales. Popayán, Colombia.

Cardenas, M. y Aldo, P. (s.f.). Aplicación de sistemas de información geográfica para el modelamiento de zonas en riesgo de inundación, caso estudio río Lurín.

Castillo, J. y Espinoza, C. (2005). Modelo de simulación para la calidad de agua.

Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED. (2010). Inundaciones, Conceptos básicos. [En línea] <http://cemexico.groups.et.byu.net/vocabulary/Inundacion1.pdf> Consulta: 17 de Enero de 2017

Comisión económica para América Latina y el Caribe y Banco Interamericano de desarrollo CEPAL. (2012). Valoración de daños y pérdidas. Bogotá, Colombia.

Checa W., et al. (2015). Modelación de capacidad de inundación de un río en los Cárpatos; comparación de las condiciones del tramo canalizados y sin intervención. Geomorfología, 272, 32-42.

CHOW, Ven Te. (1982). Hidráulica de los Canales Abiertos. México D.C.: Editorial Diana, 337 p.

CivilGEO Engineering Software. (2017). HEC-GeoRAS [En línea] <https://www.civilgeo.com/es/> Consulta: 13 de diciembre de 2016

Congreso de la República. (2012). Ley 1523 de 2012. Colombia.

Corporación Autónoma Regional del Cauca. (2006). CRC. Plan De Ordenación Y Manejo De La Subcuenca Río Molino - Quebrada Pubús. [En línea] <http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/POMCH/Rio%20Molino-Pubus/Plan%20de%20Ordenacion%20y%20Manejo.pdf> Consulta: 2 de Diciembre de 2016

Dirección General de Protección Civil. (2004). Riesgo de inundaciones. Dirección general de protección civil y emergencias, Madrid, España. [En línea] <http://www.proteccioncivil.es/riesgos/inundaciones> Consulta: 8 de Enero de 2017

ESRI. (2011). ArcGIS [En línea] <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n000000t000000.htm> Consulta: 14 de Enero de 2017

ESRI. (2011). ArcGIS [En línea] http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm#ESRI_SECTION2_5B2875D431C745BEAD55F25511EAF738 Consulta: 14 de Enero de 2017

García Lorenzo, R., y Conesa García, C. (2011). Estimación de caudales de avenidas y delimitación de áreas inundables mediante métodos hidrometeorológicos y técnicas SIG, estudio aplicado de la región de Murcia. Papeles de Geografía.

Giraldo, E. (2015). Análisis comparativo de la modelación hidráulica entre HEC-RAS y CCHE-2D, aplicado a un cauce aluvial. Caso estudio: río Suarez, Boyacá. Escuela de Ingeniería

Grainger, H. (2006). Modelación hidráulica e hidrológica para determinar la vulnerabilidad a inundaciones en un tramo comprendido entre los poblados Guápiles y la Rita. Editorial: Universidad de Costa Rica

Guevara Álvarez, M. (2015). Simulación hidráulica para el puente caballero sobre el río Molino en Pueblillo. Popayán.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM (2014). Amenazas de Inundación. [En línea] <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion> Consulta: 23 Enero 2017

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. IGAC (2017). Cartografía Digital. [En línea] http://geoservice.igac.gov.co/contenidos_telecentro/cartografia_basica/cursos/sem_1/un1/index.php?id=38 Consulta: 20 Enero de 2017

JARA, J. (2010). Implementación del Modelo Hidráulico HEC-GeoRAS en la Modelación Hidráulica del Sistema para el Control de Inundaciones de los ríos Cañar y Bulubulu. Cuenca. Editorial Universidad de la Cuenca 174 p

Molero, E. (2013). Manual Básico de HEC-GeoRAS 10. Granada.

Municipio de Popayán – Universidad del Cauca (1997). Estudio del Problema de Erosión en el Río Molino, Tramo entre Cras 9 y 11. Popayán.

Naranjo, E. T. (2010). Aplicación del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para el río Bogotá. Bogotá, Colombia. Editorial Universidad Libre

Orío Cucharero, M. (2011). Estudio hidrológico e hidráulico del barranco Torres a su paso bajo puente del tranvía Villajoyosa-Benidorm. Valencia. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.

Pérez, O. (2015). Estudio hidráulico para determinación de zonas inundables y análisis valorado de soluciones de protección en el municipio de Balmaseda, Vizcaya, Comunidad Autónoma del País Vasco. Alicante.

Perú Global Consulting S.A.C. (2016). Cartografía Digital. [En línea] <http://www.peruglobalconsulting.com/Cartografia-Digital11.php> Consulta: 25 de Enero 2017

puertosfesaragon. (2017). Topografía y batimetría. [En línea] <http://puertosfesaragon.blogspot.com.co/p/iii1-topografia-y-batimetria.html> Consulta: 3 de Febrero de 2017

Science engineering and Sustainability. (2014). Boundary conditions. Science engineering & Sustainability. [En línea] <https://sciengsustainability.blogspot.com.co/2014/02/boundary-conditions-in-hec-ras.html> Consulta: 1 de Febrero de 2017

Shadowxfox. (2012). Mapa de localización del departamento de Cauca. [En línea] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colombia_-_Cauca.svg?uselang=es Consulta: 24 de Noviembre de 2016

Subgerencia Cultural del Banco de la República. (2015). Sistema de información geográfica. [En línea] http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/ayudadetareas/geografia/sistema_de_informacion_geografica Consulta: de 20 de Enero de 2017

Timbe , L. y Timbe, E. (2012). Mapeo del peligro de inundación en ríos de montaña, caso de estudio del. MASKANA, 96.

UNESCO. (1974). Glosario Internacional de Hidrología. [En línea] <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002218/221862M.pdf> Consulta: 15 de Diciembre de 2017

Universidad Autónoma de Madrid. (2010). Introducción al SPSS, manejo y procesamiento básico de datos básicos en SPSS. Madrid, España.

US Army Corps of Engineers. (2010). River Analysis System. Davis CA.

U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (2010). River Analysis System, HEC-RAS. USER'S MANUAL. VERSIÓN 4.1 .Approved for public release - Distribution Unlimited.CPD-68. 790 pp.

U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (2010). River Analysis System, HEC-RAS. HYDRAULIC REFERENCE MANUAL. VERSIÓN 4.1. Approved for public release - Distribution Unlimited.CPD-69.419 pp.

U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (2010). River Analysis System, HEC-RAS. APPLICATIONS GUIDE. Version 4.1. Approved for public release - Distribution Unlimited.CPD-70. 351 pp.

U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (2010). River Analysis System, HEC-RAS. Release notes. Approved for public release - Distribution Unlimited. Version 4.1.21 pp.

U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (2011). HEC-GeoRAS. GIS Tools for Support of HEC-RAS using ArcGIS. USER'S MANUAL. Version 4.3.93. Approved for public release - Distribution Unlimited.CPD-83. 244 pp.

VILLOTA, E. C. (2011). Utilización de modelos matemáticos para la formulación de una propuesta de gestión ambiental en la zona Noroccidental. Pereira.