

**SIMULACIÓN DE INUNDACIONES A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL
Y DE TOPOBATIMETRÍA EN UN SECTOR DEL RÍO CAUCA
MUNICIPIO DE POPAYÁN**



**DIEGO FERNANDO JUNIOR LOSADA ÁNGEL
JHONNATTAN ANTONIO MAMIÁN JIMÉNEZ**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
POPAYÁN, CAUCA
Febrero, 2018**

**SIMULACIÓN DE INUNDACIONES A PARTIR DE CARTOGRAFÍA DIGITAL
Y DE TOPOBATIMETRÍA EN UN SECTOR DEL RÍO CAUCA
MUNICIPIO DE POPAYÁN**



**DIEGO FERNANDO JUNIOR LOSADA ÁNGEL
JHONNATTAN ANTONIO MAMIÁN JIMÉNEZ**

**Informe final del trabajo de grado, modalidad investigación
Requisito parcial para optar al título de Ingenieros Ambientales**

**Directora
Ing. M. Sc. María Elvira Guevara A.**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Civil
Programa Ingeniería Ambiental
Popayán, Cauca
Febrero, 2018**

NOTA DE ACEPTACIÓN

La tesis de pregrado titulada “Simulación de inundaciones a partir de cartografía digital y de topobatimetría en un sector del río Cauca Municipio de Popayán”, presentada por Diego Fernando Junior Losada Ángel y Jhonnattan Antonio Mamián Jiménez, 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, febrero 27 de 2018

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a nuestros padres por su apoyo constante e incondicional. A nuestros hermanos y familias por el afecto y ánimo brindado en el transcurso de nuestra carrera. A nuestros compañeros y profesores por sus consejos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad del Cauca, a la Facultad de Ingeniería Civil y al programa de Ingeniería Ambiental del cual hacemos parte, gracias por habernos acogido durante este tiempo de estudio, también a los honorables docentes por brindarnos sus experiencias y conocimientos a nuestra formación académica, profesional y personal.

A nuestra directora de investigación, la Ingeniera María Elvira Guevara Álvarez, gratitud total por su apoyo constante e incondicional ante las eventualidades presentadas, por la exactitud y claridad con la cual logró despejar los interrogantes de nuestra investigación, también por compartir su experiencia en pro de mejorar diferentes aspectos en nuestras vidas.

A los Ingenieros Camilo Rojas y Erika Sons por brindarnos su apoyo e iniciativa en pro de llevar a cabo este proyecto.

A la Ingeniera Lady Susana Montenegro Arboleda por sus consejos y explicaciones puntuales.

Al Magíster Edwin Rengifo Canizales por su apoyo en el área de la estadística de los resultados obtenidos en nuestro trabajo.

A nuestros jurados, los Ingenieros Hernán Nope Rodríguez y Hugo Jair Orozco Dueñas, por sus observaciones y comentarios.

A cada uno de nuestros familiares y amigos, quienes nos apoyaron incondicionalmente.

A nuestros compañeros de carrera y estudio por sus consejos y recorrido académico.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1 OBJETIVOS	13
1.1 OBJETIVO GENERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
3 ANTECEDENTES	15
4 JUSTIFICACIÓN	17
5 HIPÓTESIS	18
6 MARCO TEÓRICO	19
6.1 INUNDACIONES	19
6.2 TOPOBATIMETRÍA	19
6.3 CARTOGRAFÍA DIGITAL	19
6.4 MODELACIÓN	20
6.5 SIMULACIÓN	20
6.6 AYUDAS COMPUTACIONALES	20
6.7 CAUDAL FORMADOR	21
6.8 BORDES DEL CAUCE PRINCIPAL	21
6.9 CONDICIONES DE CONTORNO EN HEC-RAS	21
6.10 DIQUES	22
6.11 MARCO REFERENCIAL	22
7 METODOLOGÍA	25
7.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	26
7.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	26
7.3 PRE-PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL EN ArcGIS Y HEC- GeoRAS	26
7.4 PROCESAMIENTO - SIMULACIÓN HIDRÁULICA HEC-RAS	27
7.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO SPSS	27
7.6 POST-PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS	27
7.7 COMPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS	28
7.8 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL	28
8 APLICACIÓN	29
8.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	29
8.2 INFORMACIÓN BÁSICA DE LA ZONA DE ESTUDIO	30
8.2.1 Información cartográfica digital	30
8.2.2 Información topobatimétrica	31
8.2.3 Información hidrológica	31
8.3 PRE-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	32
8.3.1 Preparación de la información topobatimétrica	32
8.3.2 Preparación de la información cartográfica digital	32

8.3.3	Procesamiento de la información cartográfica digital en el HEC-GeoRAS	33
8.4	PROCESAMIENTO EN HEC-RAS PARA EL TRAMO DEL RÍO CAUCA	35
8.4.1	Fotos aéreas georreferenciadas	36
8.4.2	Modelos geométricos	36
8.4.3	Procesamiento de información hidráulica	39
8.5	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN EL TRAMO DEL RÍO CAUCA	40
8.5.1	Zonas inundables en el HEC-RAS	40
8.5.2	Resultados gráficos en 3D de la simulación hidráulica	41
8.5.3	Perfiles longitudinales	41
8.5.4	Secciones transversales	43
8.5.5	Parámetros hidráulicos generados.....	44
8.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	44
8.7	POST PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN HEC-GeoRAS ...	51
9	COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON ESTUDIOS ANTERIORES	55
9.1	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LOS CAUCES EJIDO, MOLINO Y CAUCA.....	55
9.2	COMPARACIÓN DE RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LOS CAUCES EJIDO, MOLINO Y CAUCA.....	57
9.3	COMPARACIÓN DE LAS MANCHAS DE INUNDACIÓN GENERADAS EN LOS CAUCES EJIDO, MOLINO Y CAUCA	61
9.4	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL RÍO CAUCA CON LOS OBTENIDOS POR UN ESTUDIO DE FINDETER	65
10	LIMITACIONES DEL ESTUDIO	67
11	OBSERVACIONES	69
12	CONCLUSIONES	71
13	RECOMENDACIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	75

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Número de inundaciones por subcuenca.....	16
Figura 2 Metodología para el proyecto de investigación	25
Figura 3 Localización general de la zona de estudio en el río Cauca	29
Figura 4 Localización tramo de estudio en el río Cauca.....	30
Figura 5 Información cartográfica digital del municipio de Popayán.	32
Figura 6 Recorte y clip de zona de interés en el río Cauca	33
Figura 7 TIN de la zona de estudio.	33
Figura 8 Delineación del cauce principal.....	34
Figura 9 Trazado de las líneas del flujo (Flowpaths).....	34
Figura 10 Stream centerline, flowpaths y secciones transversales para un tramo.....	35
Figura 11 Almacenamiento de datos para exportación	35
Figura 12 Modelo geométrico topobatimétrico río Cauca.....	36
Figura 13 Modelo geométrico cartográfico digital río Cauca	36
Figura 14 Sección transversal con bordes y sin bordes del cauce.....	37
Figura 15 Coincidencia de los Banks con los bordes del río	37
Figura 16 Observaciones en campo para escoger el coeficiente de rugosidad de Manning apropiado.....	38
Figura 17 Sección transversal y vista en planta sin diques (levees)	38
Figura 18 Sección transversal y vista en planta con diques (levees).....	39
Figura 19 Manchas de inundación, modelo topobatimétrico	40
Figura 20 Manchas de inundación, modelo cartográfico digital.....	41
Figura 21 Esquema del flujo en 3D para cuatro caudales diferentes, sector puente del ferrocarril	41
Figura 22 Perfil longitudinal para el modelo topobatimétrico. So=0.01043877	42
Figura 23 Perfil longitudinal para el modelo cartográfico digital. So=0.01016472.....	42
Figura 24 Comparación secciones a 50 m aguas arriba puente del Ferrocarril.....	43
Figura 25 Comparación secciones aguas arriba puente Tomas Castrillón ...	43
Figura 26 Comparación secciones aguas arriba unión río Molino - río Cauca.....	43
Figura 27 Parámetros hidráulicos	44
Figura 28 Diagrama de cajas y distribución normal para la profundidad máxima. Tr=30 años	47
Figura 29 Diagrama de cajas y distribución normal para la velocidad. Tr=30 años.....	48
Figura 30 Diagrama de cajas y distribución normal para el ancho de inundación Tr=30 años.....	49
Figura 31 Diagrama de cajas y distribución normal para el número de	

Froude Tr=30 años.....	50
Figura 32 Manchas de inundación del río Cauca, modelo cartográfico digital.....	51
Figura 33 Manchas de inundación del río Cauca, modelo topobatimétrico	52
Figura 34 Manchas de inundación, modelo cartográfico digital.....	53
Figura 35 Manchas de inundación, modelo topobatimétrico	53
Figura 36 TIN original suministrado por la Alcaldía para un sector del río Cauca.....	54
Figura 37 TIN mejorado para un sector del río Cauca	54
Figura 38 Mancha de inundación río Ejido Tr=30años	62
Figura 39 Manchas de inundación río Molino Tr=30 años	63
Figura 40 Manchas de inundación río Cauca Tr=30 años.....	64
Figura 41 Inundación generada en estudio Universidad del Cauca, Q=400.9 m ³ /s	65
Figura 42 Inundación generada por estudio FINDETER, Q=306.5 m ³ /s	66
Figura 43 Error en la generación del TIN del modelo cartográfico digital.....	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Mosaico de fotos para el río Cauca.....	31
Tabla 2 Caudales máximos adoptados para el río Cauca.....	31
Tabla 3 Coeficiente de Manning para el cauce.	38
Tabla 4 Condiciones de frontera, modelo cartográfico digital.....	39
Tabla 5 Condiciones de frontera, modelo topobatimétrico	40
Tabla 6 Resumen resultados estadísticos río Cauca.	45
Tabla 7 Comparación cualitativa de la mediana de los parámetros hidráulicos.....	46
Tabla 8 Perfiles de los ríos Ejido, Molino, Cauca	55
Tabla 9 Sección trasversal de los ríos Ejido, Molino, Cauca.....	56
Tabla 10 Comparación de variables para los ríos Ejido, Molino y Cauca.....	57
Tabla 11 Comparación cualitativa de los ríos Ejido, Molino y Cauca	58
Tabla 12 Comparación desviación estándar variables para los ríos Ejido, Molino, Cauca	59
Tabla 13 Comparación porcentual para los ríos Ejido, Molino y Cauca	60

ANEXOS EN FORMATO DIGITAL

Anexo A: Carta aprobación municipio de Popayán

Anexo B: Marco referencial

Anexo C: Pre-procesamiento Hec-GeoRAS

Anexo D: Resultados manchas de inundación HEC-RAS

Anexo E: Gráficos en 3D de la simulación hidráulica

Anexo F: Parámetros hidráulicos

Anexo G: Resultados análisis estadísticos

Anexo H: Mapas de las zonas de inundación

Anexo I: Procedimiento general para realizar simulación de inundaciones

Anexo J: Videos tutoriales procesamiento información cartográfica digital y topobatimétrica

INTRODUCCIÓN

La tierra está conformada aproximadamente en un 70% por agua, siendo éste el recurso más importante para la vida. Colombia es uno de los países con mayor riqueza hídrica en el mundo, contando con más de 1000 ríos permanentes que propician y favorecen el desarrollo de actividades económicas, sociales, culturales y ambientales de la población, razón por la cual, muchos asentamientos ocupan espacios próximos a las riberas y por tanto, quedan expuestos a amenazas naturales como las inundaciones, que traen como consecuencias pérdidas económicas, ambientales, sociales y humanas (Rodríguez, 2012).

Las amenazas que se pueden presentar en las áreas cercanas a las riberas de un río incluyen inundaciones, erosión y contaminación del agua, entre otras causas. En particular, las inundaciones se presentan por fenómenos naturales y antrópicos, como cuando ocurren lluvias intensas y la falla estructural de diques, muros y represas, ocasionando el desborde de los cauces naturales. Por otro lado, la deforestación causada por el incremento en la actividad agrícola ha provocado degradación de los suelos en las partes altas, lo cual durante períodos de lluvia conlleva al arrastre de sedimentos de suelos y al aumento del volumen en los cuerpos de agua.

Colombia ha estado expuesta históricamente a problemas de inundaciones como los ocurridos en la parte baja de los ríos Cauca, Magdalena y San Jorge. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2017), generó un reporte de las zonas más vulnerables por inundaciones, donde el 28% del territorio presenta exposición alta, siendo Antioquia, Bolívar, Boyacá, Caldas, Cauca, Cundinamarca, Nariño, Norte de Santander, Risaralda, Santander y Tolima, los departamentos con mayor probabilidad a inundaciones súbitas, (EFE, 2017). Particularmente, el Municipio de Popayán tiene un fuerte régimen de lluvias, que históricamente ha producido inundaciones en las áreas rurales y urbanas, como ocurrió en 1827 y en 1995 en el río Cauca, y en 1928, 1938, 1986, 1996, 2004, 2011 y 2013 en el río Molino. Por esta razón, es muy importante abordar el tema de las inundaciones, hecho que se puede conocer, estudiar, analizar y comparar por metodologías de simulación basadas en sistemas de información geográfica, que facilitan analizar gran cantidad de información y ayudan en la toma acciones preventivas y correctivas.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Comparar zonas de inundación de tipo hidrológico en un sector de la cuenca alta del río Cauca, generadas a partir de cartografía digital y de topobatimetría medida en campo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Procesar información cartográfica digital con el apoyo de sistemas de información geográfica.
- Realizar la simulación hidráulica con flujo permanente en un sector de la cuenca alta del río Cauca a partir de dos modelos geométricos diferentes: cartografía digital y topobatimetría tomada en campo.
- Analizar los resultados de parámetros hidráulicos como velocidades, número de Froude, alturas y anchos de inundación obtenidos de la simulación hidráulica.
- Dar recomendaciones sobre la metodología a seguir para realizar simulaciones hidráulicas con ayudas computacionales.
- Dar recomendaciones sobre la factibilidad de uso de la cartografía digital y la influencia de las intervenciones antrópicas sobre los resultados hidráulicos.
- Comparar los resultados obtenidos en la presente investigación con los obtenidos en las precedentes realizadas para el río Molino y el sistema Ejido.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una modelación hidráulica, ya sea física o matemática, permite recrear condiciones reales sobre las cuales se desea conocer su comportamiento y realizar su respectivo análisis, para lo que es menester contar con datos que permitan caracterizar la morfología del río, establecer condiciones de creciente e identificar los diferentes elementos naturales o artificiales que afectan el cauce, y poder construir diferentes escenarios de amenaza por simulaciones. Esto implica en primer lugar, contar con información geométrica veras del cauce del río en planta, perfil longitudinal y secciones transversales y, en segundo lugar, tener información de tipo hidráulico que incluya caudales y condiciones de frontera. La primera se puede obtener a partir de cartografías digitales o a partir de topobatimetría tomada en campo. Por otra parte, es difícil predecir los caudales que se presentarán en el tiempo, de ahí la importancia de contar con mediciones de campo que permitan hacer calibración o usar herramientas computacionales que permitan generar diferentes escenarios.

Obtener la información topobatimétrica directamente medida en campo, demanda tiempo y dinero, además de resultar riesgosa por las características del terreno, niveles y velocidades del flujo y situación social, por lo que se podría omitir, si se dispone de información digital de alta calidad, caso en el cual, la modelación hidráulica generaría datos relativamente confiables y aplicables en la toma de decisiones en gestión territorial, planteamiento de soluciones y actuaciones de manera proactiva frente a fenómenos como las inundaciones.

Por las razones anteriormente mencionadas, se pretende investigar sobre la modelación hidráulica de inundaciones a partir de dos modelos geométricos diferentes: uno generado usando topobatimetría y otro usando cartografía digital, aprovechando una parte de la información generada dentro del Convenio Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca (2015), suministrada y aprobada para su uso en proyectos investigativos mediante oficio proporcionado por el Jefe de la Oficina Asesora de Planeación Municipal, Dr. Francisco León Zúñiga Bolívar, del 14 de marzo de 2016.

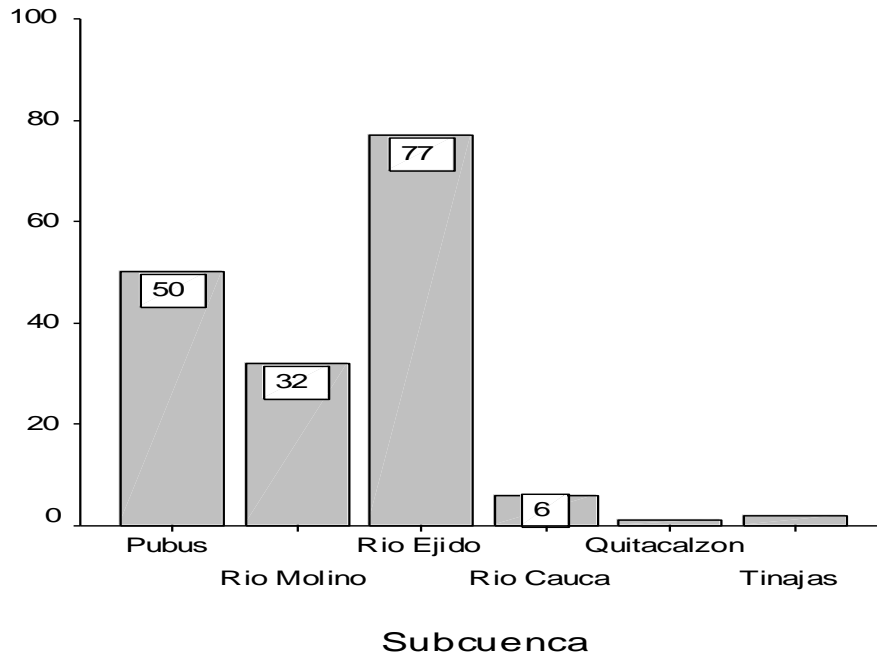
3 ANTECEDENTES

Colombia históricamente ha sido afectado por distintos tipos de amenazas, siendo las inundaciones una de las causas más importantes de desastres naturales, lo que ha hecho que la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, haya apoyado la realización de trabajos de grado en esta temática, habiéndose hecho ya algunos estudios de investigación en simulación para los cauces de los ríos Molino y Ejido, que recorren parte de la zona urbana del Municipio de Popayán. Esto ha motivado, a seguir con esta línea de trabajo aprovechando la información disponible y la experiencia ganada hasta la fecha.

Debido a lo anterior, en este trabajo de grado, se busca hacer un acercamiento a la amenaza por inundaciones de origen hidrológico en un sector de la parte alta del río Cauca. Específicamente, este río ha presentado pocas crecientes hasta la fecha, “tal como se observa en el registro estadístico obtenido a partir de los archivos del Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Popayán –CBVP-, Índices del Cabildo de Popayán y periódico El Liberal. Dicho informe estadístico reporta solamente 6 eventos ocurridos en 1624, 1675, 1730, 1736, 1827 y 1995” (Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca, 2015). Los eventos de los años 1624, 1675, 1730, 1736 son mencionados en los Índices del Cabildo y se debieron a crecientes que destruían algún puente bajo y de construcción precaria. Por otra parte, en el año 1827 se registra una gran creciente del río Cauca, inducida por un sismo y una erupción del volcán Puracé. Además, en los relatos de las erupciones del volcán Puracé de 1869 hechos por Roberto Blanke White, de 1899 y de 1949, se hace referencia a la formación de flujos de lodo sobre cauce del río Cauca (Espinosa, 2001).

En la siguiente figura se ilustran diferentes datos de crecientes en el municipio de Popayán, y cómo los registros del río Cauca no son tan frecuentes en comparación con otros ríos del municipio como los ríos Molino y Ejido.

Figura 1 Número de inundaciones por subcuenca.



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

A pesar de que las inundaciones no han sido tan frecuentes en el río Cauca, en la actualidad su desbordamiento podría afectar las urbanizaciones como: “Las Tres Margaritas, La Playa, Vega de Prieto, el área recreacional de Comfacauca, de igual forma tener impacto en la zona de Torremolinos y otros sectores que, aunque se encuentran a una cota significativa por encima de los cauces actuales, presentan susceptibilidad a estos fenómenos, ya que se asientan sobre antiguas terrazas de acumulación de los ríos” (CLOPAD, 2003).

4 JUSTIFICACIÓN

El avance en las ciencias y la tecnología ha contribuido a mejorar las herramientas computacionales y afectado de manera positiva la investigación, razón por la cual se hace menos laborioso resolver cálculos complejos que acarrear gran número de datos. Particularmente, el comportamiento de los cauces y demás elementos que conforman el ambiente ribereño, puede ser estudiado por medio de herramientas para modelación hidráulica cuando se pretende llevar a cabo proyectos como: acueductos, drenajes, centrales hidroeléctricas, control de inundaciones, zonas de recreación, control ambiental, distritos de riego, entre otros de aprovechamiento hídrico, sobre los cuales se necesita tomar decisiones precisas con el fin de minimizar el riesgo por la operación de un proyecto.

Los trabajos de grado realizados en la Universidad del Cauca para simulación de inundaciones en el sistema del río Ejido-La Paila-Tejares y del río Molino, conforman una base para este estudio, pero por las condiciones de esos cauces, muy pequeños y además estar muy afectados por intervenciones antrópicas, hace que los resultados obtenidos hasta la fecha, indican que no se tiene una adecuada caracterización geométrica que permita hacer una buena simulación. Es por esto que se ha pensado hacer un trabajo similar para el río Cauca, justificado por las siguientes razones:

- a) El trabajo es de tipo multi e interdisciplinario pues estarían involucradas áreas como la topografía, los sistemas de información geográfica y la hidráulica.
- b) El conocimiento y uso de herramientas computacionales facilita la toma de decisiones ante futuras situaciones adversas que se puedan presentar.
- c) El río Cauca es un cauce de mayor tamaño que los estudiados hasta la fecha, lo que permitiría una mejor caracterización del cauce tanto a partir de la topobatimetría como de la cartografía digital.
- d) El río Cauca tiene menos intervenciones antrópicas lo que permitiría una mejor simulación al no estar afectada por muros, rellenos, box culverts y puentes que contraen notoriamente el flujo.
- e) Esta investigación permitiría corroborar o mejorar los resultados obtenidos en los anteriores estudios realizados en la Facultad de Ingeniería Civil.
- f) Se tendrían resultados para cauces con diferentes características lo que permitiría evaluar las condiciones para las cuales sería factible el uso de cartografía digital.
- g) Esta investigación permitiría dar recomendaciones metodológicas sobre la factibilidad de usar o no cartografía digital frente a topobatimetría, pues ya se tendría información para cauces de distintas características.
- h) El resultado final, llevaría a mejorar el conocimiento de nuestros cauces y de las metodologías para su simulación hidráulica.

5 HIPÓTESIS

Se asume que la cartografía digital existente para el Departamento del Cauca no es muy precisa para cauces pequeños y los análisis muestran grandes zonas de inundación al compararla con los resultados obtenidos a partir de un modelo geométrico generado por topobatimetría; por otro lado, se considera que el grado de intervención antrópica y la morfología de un cauce influye mucho sobre los resultados que se obtienen a partir de los dos modelos geométricos antes mencionados. Por lo tanto, se espera que en el caso del río Cauca, al ser una corriente mayor y menos intervenida, se obtengan resultados más razonables con relación a los obtenidos por el sistema Ejido, Paila, Tejares y el río Molino.

6 MARCO TEÓRICO

6.1 INUNDACIONES

Una inundación es un evento en el que el agua ocupa lugares donde usualmente no está y se produce por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales (IDEAM, 2017). Estas pueden ser clasificadas según la duración como: súbitas o torrenciales, lentas o de tipo aluvial y por encharcamiento (Secretaría Distrital de Ambiente, 2007); también, se pueden clasificar por el mecanismo de generación que involucran, como: fluviales, pluviales, costeras y por falla de estructuras (Aragón, 2014).

Otro tipo de inundaciones es conocido como avenida torrencial que se presenta comúnmente en ríos cuyas cuencas presentan fuertes vertientes en combinación con fenómenos hidrometeorológicos intensos, cuando en un evento de lluvias se superan valores de precipitación pico en pocas horas. Esto genera la saturación de los materiales de las laderas facilitando el desprendimiento del suelo, produciéndose de esta manera numerosos desgarres superficiales y deslizamientos, cuyo material cae al cauce y es transportado inmediatamente aguas abajo o queda inicialmente represado y luego, una vez que se rompe el represamiento, es transportado violentamente de forma repentina (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).

6.2 TOPOBATIMETRÍA

Se conoce como topobatimetría a la representación gráfica de la superficie de la tierra, con sus formas y detalles tanto naturales como artificiales, unida a la batimetría, que se logra mediante un levantamiento alti-planimétrico del fondo de corrientes y cuerpos de agua (Marbello, 2005). La topobatimetría también es conocida como hidrotopografía (topografía = terreno e hidrotimetría) que se define como la relación entre la hidráulica, que estudia el agua y su comportamiento y la topografía del cauce, lo cual permite evaluar de forma adecuada el mayor peligro que existe en los movimientos de agua, (Montenegro, 2011).

6.3 CARTOGRAFÍA DIGITAL

Es la creación y análisis de mapas a través del uso de las herramientas computacionales. Como tal, la cartografía digital utiliza los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que codifican y gestionan variables y datos geoespaciales mediante diferentes recursos como bases de datos, aplicaciones estadísticas y programas de diseño asistido por ordenador.

El propósito de crear un mapa es proporcionar una imagen significativa de la realidad. Un mapa digital, por lo tanto, puede ser una guía particularmente útil en la orientación de terreno, así como en el almacenamiento de otros datos a través de múltiples facetas complementarias (Bernal, 2013).

6.4 MODELACIÓN

La modelación es el proceso para representar o plasmar un sistema real que ayuda a entender cómo funciona, aumentar su comprensión o hacer predicciones. El modelo se debe calibrar para que represente lo mejor posible la realidad (Pérez G. , 1996).

6.5 SIMULACIÓN

La simulación es la técnica numérica para conducir experimentos que comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas, lógicas y computacionales, las cuales son necesarias para tratar de describir el comportamiento, evolución y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través del tiempo (UTADEO, 2017). Por lo tanto, la simulación ofrece algunas bases predictoras, pero no implica la calibración de los resultados como si lo exige la modelación.

6.6 AYUDAS COMPUTACIONALES

Las ayudas computacionales son sistemas que usan equipos informáticos, con el fin de reemplazar una función permitiendo la realización de una actividad. Algunas herramientas usadas en esta investigación como ayudas computacionales son el *HEC-RAS* y el *HEC-GeoRAS* como herramienta de ArcGIS.

El *HEC-RAS (Hydrological Engineering Center – River Analysis System)* es un programa de uso libre para la modelización hidráulica uni y bidimensional, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos (*USACE*), que permite simular flujos en cauces naturales o canales artificiales para determinar parámetros hidráulicos, por lo que entre sus objetivos están realizar estudios de inundabilidad.

El *HEC-GeoRAS (Hydrological Engineering Center - Geospatial River Analysis System)* es una extensión de uso libre para ArcGIS desarrollada conjuntamente por el *Hydrologic Engineering Center del United Army Corps of Engineering* y el *Environmental System Research Institute (ESRI)*. Se compone de una serie de procedimientos, herramientas y utilidades diseñadas para procesar datos georreferenciados que permite realizar la preparación de los datos geométricos para importarlos en *HEC-RAS*.

ArcGIS es un sistema de información geográfica (SIG) integrado que permite organizar, analizar, administrar, compartir y distribuir información geográfica fundamentalmente mediante mapas. (ESRI, 2011). (Versión prueba-6608228741).

Para hacer el análisis estadístico de las variables hidráulicas se usa el programa SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences, Prueba libre-Código IBMid 3030089*), el que es un sistema amplio y flexible capaz de trabajar con datos procedentes de distintos formatos, generando, desde sencillos gráficos de distribuciones y estadísticos descriptivos, hasta análisis estadísticos complejos que permiten descubrir relaciones de dependencia e interdependencia, establecer clasificaciones de sujetos y variables, predecir comportamientos, etc. Su aplicación fundamental está orientada al análisis multivariable de datos experimentales. (Universidad Autónoma de Madrid, 2010).

6.7 CAUDAL FORMADOR

El caudal formador fija la geometría de la sección transversal y es el caudal máximo anual medio que justo llena el canal con un período de retorno entre 1 y 2 años con un valor promedio de 1.4 años para la zona andina caucana, siendo fundamental a la hora de hacer estimaciones hidráulicas, al definir las características morfológicas del cauce como barreras, meandros y curvas. (Arbelaez, Guevara, González, & Gallardo, 2004) Gumbel sugiere que el caudal formador es el correspondiente a un período de retorno de 2.33 años considerando que éste es la media de la distribución de valores extremos Tipo I (Chow, Maidment, & Mays, 1998).

6.8 BORDES DEL CAUCE PRINCIPAL

Son los bordes del río (*banks*) que delimitan el cauce principal frente a las llanuras de inundación. Algunos de los criterios para fijar los bordes del cauce principal son: cambio de pendiente, cambio de cobertura, ancho del cauce principal y raíces expuestas en las laderas.

6.9 CONDICIONES DE CONTORNO EN HEC-RAS

Las condiciones de contorno o de frontera son aquellas que definen el comportamiento de un modelo en sus límites; la modelación en régimen permanente, permite usar cuatro distintas condiciones:

- a) Nivel de agua conocida: se escoge solo si tiene algún dato del nivel de agua asociado a un caudal.

- b) Profundidad crítica: se define cuando en la sección existe un elemento de control de la lámina de agua tal como vertederos, puentes, estructuras aforadoras, cambios de pendiente, que controlan la profundidad crítica. El programa calcula la profundidad crítica para la sección y la utiliza como condición de contorno (Oliveras, 2013).
- c) Curva de calibración del cauce: se usa cuando se posee una curva que relaciona el caudal con el nivel del agua. (Oliveras, 2013).
- d) La profundidad normal: “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” (Rojas & Sons, 2017).
- e) Las condiciones de frontera deben fijarse, aguas abajo si el flujo es subcrítico, aguas arriba si es supercrítico o tanto aguas arriba como aguas abajo en casos de flujo mixto.

6.10 DIQUES

Un dique (*levee*) es colocado en las orillas del cauce para confinar el flujo y evitar su desborde hacia las planicies de inundación. También se colocan en los puntos más altos de una sección transversal donde se considere que el flujo no rebasa ese límite, evitando que queden inundadas zonas dentro de la sección transversal que no resultan lógicas.

6.11 MARCO REFERENCIAL

A continuación, se presentan como ejemplos, algunos resúmenes de estudios que se encontraron luego de realizar una búsqueda bibliográfica tanto en formato digital como análogo, sobre trabajos enfocados al análisis de simulación de inundaciones a partir de herramientas computacionales como el HEC-RAS y el HEC-GeoRAS. Por limitaciones en la extensión de este texto, el resumen de otros trabajos relacionados, se encuentra en el anexo B.

I. Simulación de inundaciones a partir de cartografía digital y de topobatimetría en un sector del río Ejido

En esta investigación se realizó un análisis de dos modelos geométricos, cartografía digital y topobatimetría, comparando los resultados de la simulación de inundaciones, haciendo uso de herramientas computacionales como HEC-RAS, ArcGis y HEC-GeoRAS (Rojas & Sons, 2017).

II. Simulación de inundaciones a partir de cartografía digital y de topobatimetría del río Molino

La investigación se desarrolló en un tramo del río Molino en el municipio de Popayán, Cauca, en el que se realizó una comparación de la modelación hidráulica a partir de los modelos geométricos: cartografía digital y topobatimetría, en el cual se hizo uso de las herramientas computacionales HEC-RAS, ArcGis y HEC-GeoRAS (Calvache & Pérez, 2016).

III. Uso de Sistemas de Información Geográfica en la determinación de amenazas por inundación en el municipio de Chía

En esta investigación se evaluaron las zonas propensas a ser afectadas por inundaciones teniendo en cuenta un SIG (QSIG), donde se recolectaron mapas topográficos, hidrológicos, entre otros del municipio de Chía, para representar datos que pudieran influenciar sobre el fenómeno de inundaciones, los cuales se transformaron para formar un mapa que identificara las zonas con amenaza de inundación (Avendaño & Cadena, 2011).

IV. Implementación del HEC-GeoRAS en la modelación hidráulica para control de inundaciones de los ríos Cañar y Bulubulu en Ecuador

Su objetivo es estudiar el comportamiento del flujo en los ríos de la costa ecuatoriana vinculados al Proyecto Bulubulu-Cañar, con la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) y su interacción con el modelo HEC-RAS; en general, es la incorporación del módulo Geo al HEC-RAS para uso de información geo-referenciada a partir de la cartografía existente de la zona e interacción de todo el software, para obtener mapas de inundación y zonificación de riesgo (Encalada & Jara, 2010).

V. Modelación hidráulica de un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS

El estudio realizado en el río Magdalena en proximidades al Canal del Dique, tiene como objetivo reportar resultados de un ejercicio para establecer la eficacia del modelo unidimensional HEC-RAS en la simulación del comportamiento hidráulico de un cauce que presenta bifurcaciones y derivaciones de gran caudal. Con base en mediciones de campo (aforos y barimetrías) y registros hidrométricos de caudal y nivel en dos estaciones (Calamar en el río Magdalena e INCORA K7 en el Canal del Dique), se realizó la calibración del modelo, se desarrolló un proceso de validación simulando un hidrograma de entrada, y comparando los resultados con el hidrograma de caudal registrado en la estación INCORA K7, situada

aproximadamente a 7 kilómetros de la embocadura del Canal del Dique. Los resultados obtenidos evidencian la efectividad del modelo y su alta capacidad predictiva para tales condiciones. (Santo, Cubillos, & Vargas, 2008).

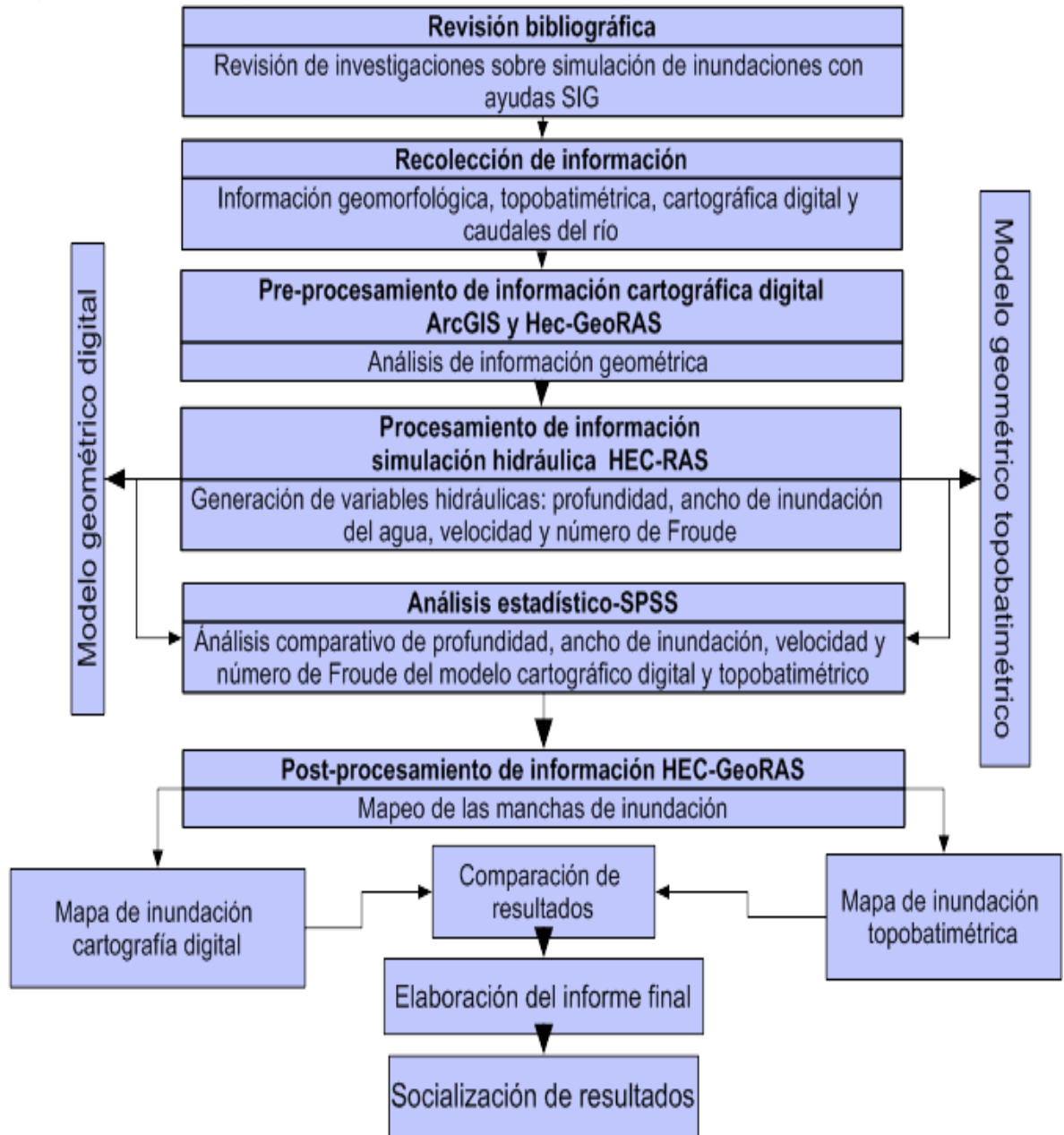
VI. Estudio hidráulico para la determinación de zonas inundables y protección en el municipio de Balmaseda, Vizcaya, país Vasco

El objeto del estudio es 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. Mediante la aplicación de técnicas LIDAR, se obtuvo un Modelo Digital del Terreno con tamaño de malla de 1 m y precisión en Z de 15 cm y con cotas optométricas. Asimismo, confeccionó el denominado Modelo Digital de Estudios Hidráulicos (MDEH), que incluye además del terreno la definición de edificios y estribos de estructuras. (Pérez N. , 2015).

7 METODOLOGÍA

El trabajo de investigación consiste en la simulación de inundaciones en un tramo del río Cauca, Municipio de Popayán; para lograr los objetivos propuestos, se seguirá la metodología que se ilustra en el siguiente diagrama de flujo y se explica más adelante.

Figura 2 Metodología para el proyecto de investigación



Fuente: Propia

7.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Es necesario, recolectar, leer y analizar estudios e investigaciones realizadas sobre temas relacionados con la investigación en diferentes fuentes de información, incluyendo instituciones públicas y privadas e internet.

La búsqueda de información se centró, por un lado, en el estado del arte sobre la simulación de inundaciones a partir de modelos topobatimétricos y cartográficas digitales teniendo como referencia los dos ya realizados en la Universidad del Cauca y adicionalmente, trabajos e investigaciones desarrollados en diversos lugares con el fin de conocer el avance de este tema. Por otro lado, un aspecto importante es estudiar la información conceptual sobre el manejo de las herramientas computacionales utilizadas como ArcGIS, HEC-GeoRAS, HEC-RAS y SPSS, cada uno de ellos, necesario e importante para las distintas fases de este trabajo.

7.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

El "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, es la principal fuente de información básica para llevar a cabo la investigación de la zona del río Cauca. El municipio de Popayán, mediante oficio 2016113009127-2 del 8 de marzo de 2016, autorizó el uso de la información cartografía digital, la topobatimetría, caudales para distintos tiempos de retorno, mapa predial y ortofotos para el desarrollo de la investigación. Anexo digital A. Además, se contó con los resultados de trabajos de grado similares realizados en la Universidad del Cauca y se completó la información con recorridos de campo.

7.3 PRE-PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL EN ArcGIS Y HEC-GeoRAS

El pre-proceso de la información cartográfica digital se lleva a cabo de la siguiente manera:

- En primer lugar, se contó con la ayuda de la herramienta HEC-GeoRAS del programa ArcGIS (Versión prueba-6608228741), para el análisis de la información cartográfica digital, a partir de la cual se generó un MDT (Modelo Digital de Terreno) en formato vectorial *TIN (Triangules Irregular Network)*, que permite el delineamiento del cauce principal, tramos del sistema y secciones transversales de la zona de interés.

- Seguidamente, la información es exportada desde el HEC-GeoRAS al HEC-RAS, en su versión libre.

Esta etapa se realiza solo con la información cartográfica digital, pues el Municipio de Popayán ya cuenta con el modelo topobatimétrico exportado al HEC-RAS y que fue suministrado para esta investigación.

7.4 PROCESAMIENTO - SIMULACIÓN HIDRÁULICA HEC-RAS

La información geométrica exportada al programa HEC-RAS, se debe corregir y ajustar en cuanto al recorrido del cauce en planta, secciones transversales, distancias entre secciones transversales, bordes del cauce principal, coeficientes de rugosidad de Manning por las laderas izquierda y derecha y coeficientes de pérdidas por expansión y contracción. También se debe analizar la necesidad de agregar estructuras como diques, para poder tener un mejor procesamiento de los resultados. En esta etapa también se establecen las condiciones de frontera para el cálculo de la simulación y el tipo de flujo que representa mejor el cauce. Esta actividad se debe realizar tanto para el modelo geométrico generado a partir de cartografía digital como el que se tiene disponible a partir de topobatimetría.

La simulación hidráulica realizada en esta parte permite obtener la altura del agua, velocidades del flujo, ancho de inundación entre otras, para cada una de las secciones transversales a diferentes caudales en los dos modelos geométricos.

7.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO SPSS

Una vez generada la simulación en el HEC-RAS para cada uno de los caudales asociados a períodos de retorno, se procede a tabular la información obtenida teniendo en cuenta los parámetros de estudio: ancho de inundación, profundidad máxima del río, velocidad del flujo y número de Froude. Estos datos son comparados y tratados por el programa SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*, versión de *prueba - Código IBMid 3030089*), permitiendo un análisis individual de los parámetros y comparación entre los mismos, tanto para el modelo cartográfico digital como el topobatimétrico.

7.6 POST-PROCESAMIENTO DE LOS RESULTADOS

Culminada la modelación hidráulica en el HEC-RAS se exportan los resultados obtenidos de la inundación al ArcGIS (Versión prueba-6608228741) para ser procesados mediante la herramienta HEC-GeoRAS en la que se generan los mapas de inundación asociadas a tiempos de retorno de 1.5, 10, 30 y 100 años

para los modelos geométricos tanto cartográfico como topobatimétrico. Se puede observar las manchas de inundación expuestas sobre las ortofotos permitiendo ver las zonas afectadas por la inundación.

7.7 COMPARACIÓN Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Luego de realizar el análisis estadístico de los parámetros hidráulicos evaluados, se comparan las ventajas y desventajas del uso de los modelos cartográfico y topobatimétrico, considerando no solo los resultados obtenidos en esta investigación para el río Cauca, si no también, los obtenidos por los estudios “Simulación de Inundaciones a partir de Cartografía Digital y de Topobatimetría” (Calvache & Pérez, 2016) y “Simulación de inundaciones a partir de cartografía digital y de topobatimetría en un sector del Río Ejido” (Rojas & Sons, 2017).

7.8 ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

El informe final incluye un resumen de los procedimientos llevados a cabo, resultados obtenidos por la simulación, un análisis de los parámetros evaluados como también de los mapas generados a partir de la simulación hidráulica de ambos modelos. En anexos se incluyen tablas y resultados detallados.

8 APLICACIÓN

El área de estudio del río Cauca atraviesa la zona urbana de Popayán a lo largo de casi 10 km de urbe, constituida por depósitos fluviales y depósitos de flujos de escombros de diferente origen y humedales, siendo también un tramo dentro de la ciudad que cuenta con pocas intervenciones antrópicas. (Alcaldía de Popayán, 2002).

En este trayecto el proceso fluvial fundamental es la agradación, así que el río Cauca transita sobre depósitos fluviales y depósitos de flujos de escombros de diferente origen, acumulados a lo largo de su curso.

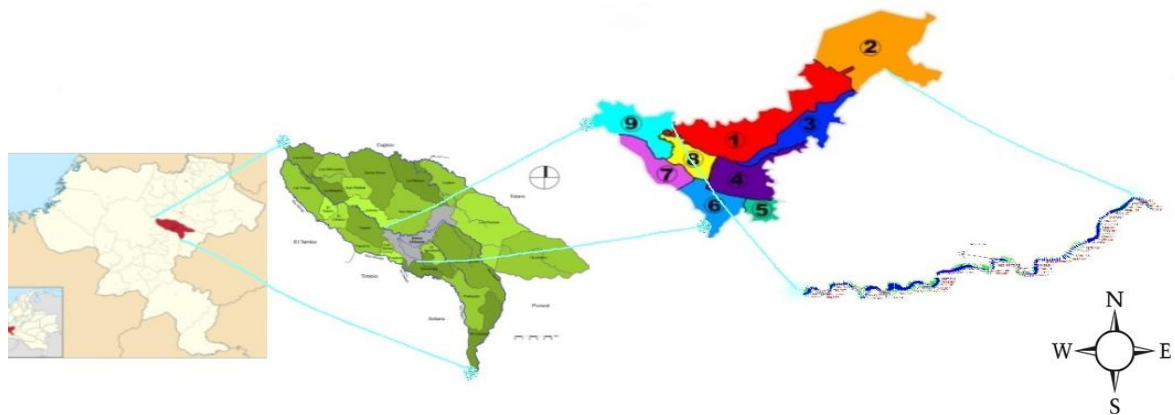
Para la realización del trabajo de investigación se aprovechó la información brindada por parte del convenio 20131800008927 entre la Universidad del Cauca y la Alcaldía Municipal de Popayán, finalizado en 2015 y autorizada para su uso mediante oficio 2016113009127-2 del 8 de marzo de 2016.

8.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El río Cauca nace en el departamento del Cauca, al sur de la Laguna del Buey y al sureste de la población de Paletará en el municipio caucano de Puracé (Quizlet, 2017) y desemboca en el río Magdalena en el departamento de Bolívar. (Alcaldía de Popayán, 2017).

El área de estudio se encuentra al sur occidente de Colombia, en centro del departamento del Cauca y del municipio de Popayán, Figura 3.

Figura 3 Localización general de la zona de estudio en el río Cauca



Fuente: modificado (Institución Educativa, Alejandro Humbolt, 2012) & (Rojas A. , 2009).

El tramo de estudio es de aproximadamente 9 Km y está comprendido entre el puente viejo del ferrocarril con coordenadas planas (Magna Colombia Oeste) E=1056595, N=765611, hasta aguas arriba de su unión con el río Molino en las coordenadas planas E=1050406, N=763666. Inicialmente, el tramo del río entra con dirección sur-este a nor-oeste, y debido a la falla geológica de Popayán en la coordenada aproximada E=1056269, N=765834, cambia su rumbo y sigue su recorrido con dirección promedia nor-este a sur-este, punto final de estudio. En la Figura 4, se puede detallar el tramo de estudio del río Cauca dentro de la zona urbana del municipio de Popayán.

Figura 4 Localización tramo de estudio en el río Cauca



Fuente: Modificado de (GoogleEarth, 2017)

8.2 INFORMACIÓN BÁSICA DE LA ZONA DE ESTUDIO

A continuación, se resume la información usada para el estudio.

8.2.1 Información cartográfica digital

Se contó con información cartográfica digital de la zona urbana del municipio de Popayán, consistente en curvas de nivel del terreno detalladas cada 2 metros y escala 1:2000, según se observa en los datos suministrados para este estudio, obtenidas a partir del proceso de restitución realizado por el IGAC para el municipio de Popayán; también, se cuenta con el mapa predial que permite tener detalles del recorrido del río en la zona urbana y con fotografías áreas georreferenciadas con resolución de pixel de 0.3 m, que fueron suministradas por la Alcaldía del Municipio de Popayán mediante oficio 2016113009127-2 del 8 de marzo de 2016.

A continuación, se presenta la lista de fotos georreferenciadas útiles para la zona de estudio, las cuales tienen fechas del 7 de junio de 2007.

Tabla 1 Mosaico de fotos para el río Cauca

N	Fotografía satelital	N	Fotografía satelital
1	342ivd1y.sid	13	342ivd3n.sid
2	342ivd2p.sid	14	342ivd3o.sid
3	342ivd2q.sid	15	342ivd3i.sid
4	342ivd2r.sid	16	342ivd4a.sid
5	342ivd2s.sid	17	342ivd4b.sid
6	342ivd2u.sid	18	342ivd4c.sid
7	342ivd2v.sid	19	342ivd4d.sid
8	342ivd2w.sid	20	342ivd4f.sid
9	342ivd2x.sid	21	342ivd4g.sid
10	342ivd3d.sid	22	342ivd4h.sid
11	342ivd3e.sid	23	342ivd4k.sid
12	342ivd3j.sid	24	342ivd4l.sid

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

8.2.2 Información topobatimétrica

Se dispone de la información topobatimétrica del río Cauca ya procesada y exportada al HEC-RAS para un tramo aproximado de 9,135 kilómetros, 403 secciones transversales y cuatro puentes, generadas dentro del estudio realizado por la Universidad del Cauca y la Alcaldía Municipal de Popayán, 2015. - Convenio 20131800008927, (Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca, 2015).

8.2.3 Información hidrológica

Se cuenta con los caudales máximos, que se calcularon con base en los datos de la estación limnigráfica administrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), identificada con el No 2601720 localizada en Julumito a una elevación de 1626 m.s.n.m., Latitud: 5.9524675° N y Longitud: 76.6443° W e instalada en abril de 1964 con datos hasta el 2006, (Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca, 2015). En la tabla 2 se observan los caudales adoptados para diferentes tiempos de retorno.

Tabla 2 Caudales máximos adoptados para el río Cauca

Período de retorno T_r (años)	Q (m³/s)
1.5	134.6
10	238.2
30	308.0
100	400.9

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

8.3 PRE-PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

A continuación, se presenta el resumen de los diferentes pasos seguidos para crear el modelo geométrico del río Cauca en la zona de estudio. El procedimiento se puede consultar en los Anexo C e I, y los detalles se ilustran mediante un video que se encuentra en el anexo J.

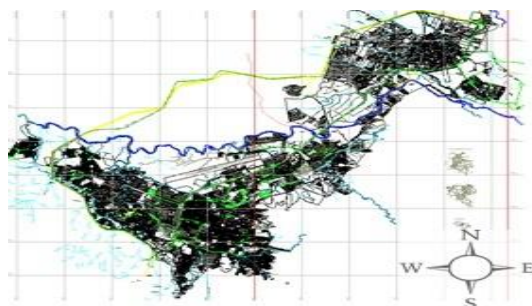
8.3.1 Preparación de la información topobatimétrica

La preparación de la información topobatimétrica se realizó en el HEC-RAS, en donde se siguieron todos los protocolos para el uso del programa, trabajando con 399 secciones transversales en 9.1 kilómetros a lo largo del río.

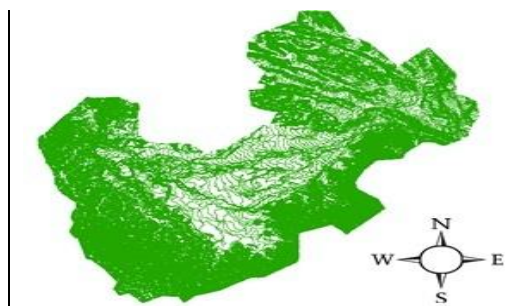
8.3.2 Preparación de la información cartográfica digital

Se usó el programa ArcGIS 10.3 (Versión prueba-6608228741). No se utilizó una versión más reciente debido a que el HEC-GeoRAS disponible hasta la fecha de inicio de este trabajo, solo permite trabajar con esta versión. Se tomó como base la información topobatimétrica buscando que en el trabajo con la cartografía digital, coincidieran de la mejor forma posible los dos modelos geométricos en cuanto a longitud, localización y número de secciones transversales. Se usa el sistema de coordenadas "MAGNA_Colombia_Oeste". La siguiente figura 5 ilustra el mapa predial, el modelo digital del terreno y el cauce del río Cauca superpuesto a las fotos aéreas en la zona de estudio.

Figura 5 Información cartográfica digital del municipio de Popayán.



5.a Predial ciudad de Popayán



5.b Modelo digital del terreno (MDT)

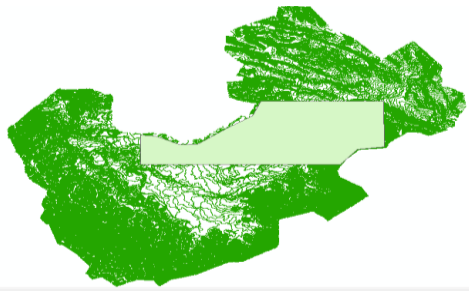


5.c Fotos aéreas de la zona interés y cauce del río Cauca

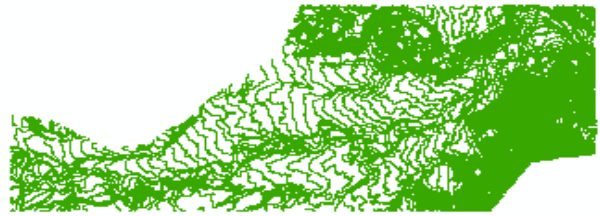
Fuente: Modificado (Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca, 2015).

Se debe realizar un recorte para lo que se crea un *Shapefile* (archivo de forma) de tipo polígono, el cual utiliza el mismo sistema de coordenadas de la cartografía digital; este polígono se debe encontrar dentro de los límites de la información cartográfica digital como se muestra en la figura 6a; también, se crea un recorte para obtener las curvas de nivel, como se muestra en la figura 6.b.

Figura 6 Recorte y clip de zona de interés en el río Cauca



6.a Polígono de la zona de interés

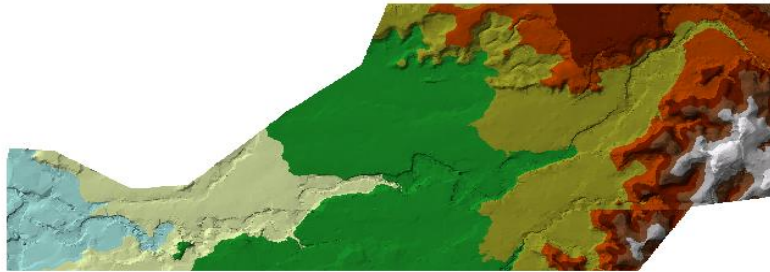


6.b Polígono recortado

Fuente: Propia

Posteriormente, se requiere generar un TIN (*Triangulated Irregular Network*), el cual se crea a partir del polígono y sus curvas de nivel utilizando la herramienta *TIN Data Management* del *Arctoolbox* en ArcGIS.

Figura 7 TIN de la zona de estudio.



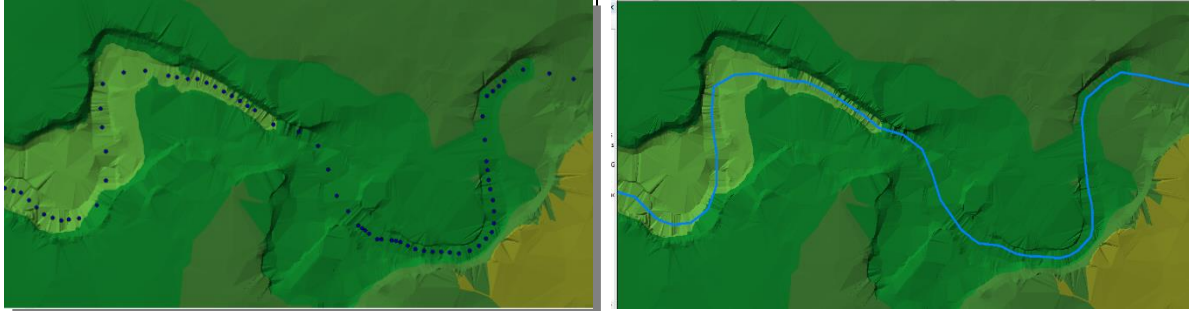
Fuente: Propia

8.3.3 Procesamiento de la información cartográfica digital en el HEC-GeoRAS

Posteriormente, se utiliza la herramienta HEC-GeoRAS para definir el cauce principal con la opción *stream centerline*, de forma que coincida con los puntos más bajos del río o *thalweg*, que en este caso tuvo buena concordancia con el eje mostrado en el mapa predial y en las fotos aéreas suministradas por el municipio de Popayán. En la figura 8 se pueden observar los puntos del cauce principal que

se tomaron de las coordenadas del cauce del modelo topobatimétrico para tener la mayor similitud entre los dos modelos geométricos.

Figura 8 Delineación del cauce principal

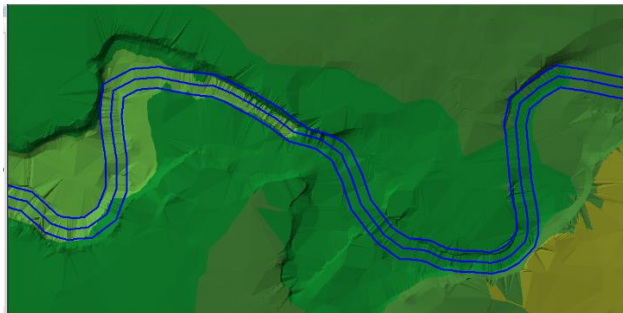


8.a Ubicación de puntos del cauce
Fuente: Propia

8.b Delimitación línea principal del río

Posteriormente, se trazan las rutas del agua (*Flowpaths*), que definen el centro de masas de las llanuras de inundación, es decir el eje por donde se asume circula el agua; además, deben de ser continuas a lo largo del río y no se deben interceptar entre ellas. El eje principal corresponde al *Channel*, el *Flowpath* del lado izquierdo (*left*) y el *Flowpath* del lado derecho (*right*);

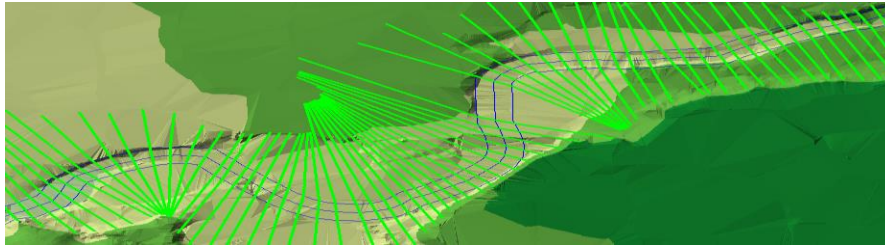
Figura 9 Trazado de las líneas del flujo (*Flowpaths*)



Fuente: Propia

Por último, se trazan las secciones transversales, las cuales son líneas perpendiculares a la línea principal del cauce; para el trazo de estas secciones se tomaron las coordenadas de modelo topobatimétrico para así mejorar la comparación con el modelo geométrico digital que se genera. Las secciones transversales están separadas una distancia en promedio de 25 a 30 metros a lo largo del cauce del río Cauca, siguiendo el *thalweg* y las laderas derechas e izquierda. En la figura 10 se observa un ejemplo del procedimiento realizado.

Figura 10 *Stream centerline, flowpaths* y secciones transversales para un tramo

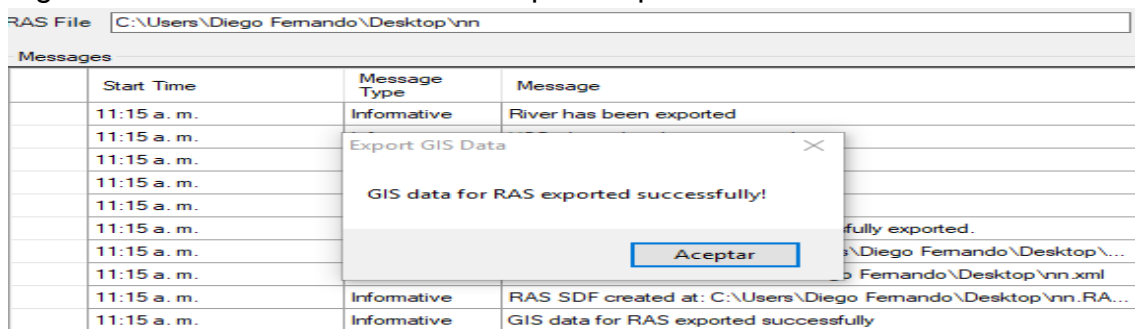


Fuente: Propia

Una vez terminado el trabajo de líneas del cauce y secciones transversales, se les brindan atributos, lo que permite generar la capa con topología y las distancias entre secciones y elevaciones.

Cuando ya se tienen los atributos y elementos de la geometría del modelo, se procede a la exportación de la geometría al HEC-RAS, tal como se ilustra a continuación.

Figura 11 Almacenamiento de datos para exportación



Fuente: Propia

8.4 PROCESAMIENTO EN HEC-RAS PARA EL TRAMO DEL RÍO CAUCA

Una vez exportada la información geométrica del modelo cartográfico digital al HEC-RAS, se procede a realizar los ajustes necesarios como: adición de fotos, bordes del cauce principal *Banks*, coeficientes de rugosidad de Manning, coeficientes de contracción y expansión y adición de diques que confinen el flujo en donde resulte apropiado, tal como se explica a continuación. Los pasos a seguir se presentan en el anexo I y se ilustran mediante un video que se encuentra en anexo J.

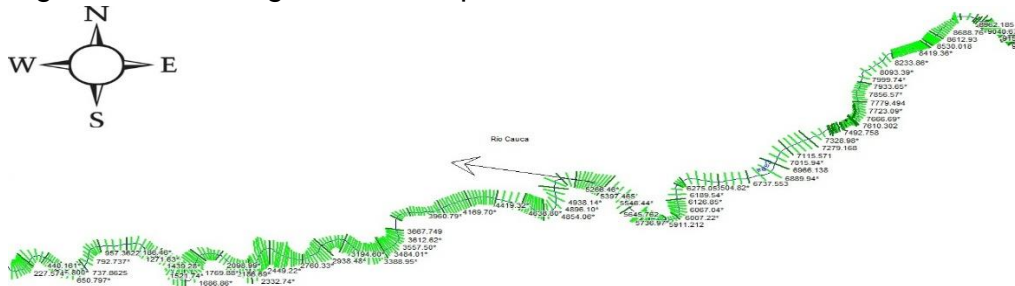
8.4.1 Fotos aéreas georreferenciadas

Se usaron las fotos con resolución de 0.3 m por pixel, para obtener una mejor ubicación de las manchas de inundación e identificar de forma detallada las zonas susceptibles a este fenómeno.

8.4.2 Modelos geométricos

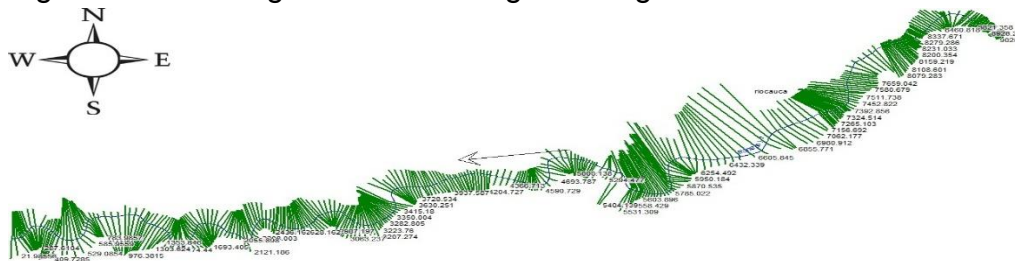
El HEC-RAS requiere de datos geométricos correspondientes a los esquemas mostrados en las figuras 12 y 13 con sus respectivas confluencias, secciones transversales, distancias entre secciones transversales, bordes de cauce principal, coeficientes de rugosidad de Manning y de pérdidas de energía.

Figura 12 Modelo geométrico topobatimétrico río Cauca



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

Figura 13 Modelo geométrico cartográfico digital río Cauca



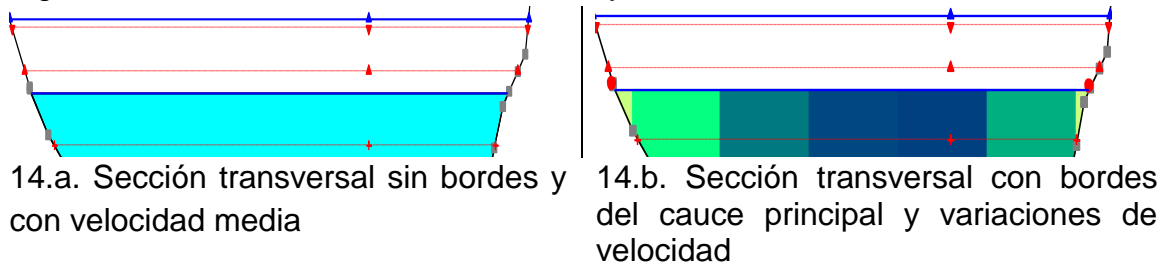
Fuente: Propia

- **Bordes del cauce principal:** Debido a que en el pre-procesamiento de la información no se marcaron los bordes del cauce para el modelo cartográfico digital, en el procesamiento con el HEC-RAS, se completa la información geométrica para las laderas izquierda y derecha del cauce principal, para lo que se tuvieron en cuenta criterios como: una profundidad aproximada del agua entre 1 y 2 metros y un ancho promedio entre 20 y 40 metros, dependiendo de la zona del río; el cambio de pendiente en las secciones; el caudal formador con período de retorno de 1.5 años y la ayuda de las fotos aéreas. Estos mismos criterios se usaron para definir los bordes del cauce en el modelo topobatimétrico. Siempre es difícil y hasta cierto punto subjetivo, fijar los bordes del cauce principal, por lo que en

hidráulica fluvial no se puede hablar de verdades absolutas; igual ocurre para otros parámetros como los coeficientes de rugosidad.

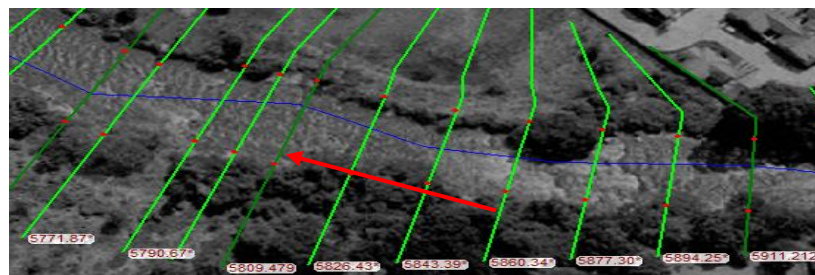
En la figura 14.a se observa una sección con lámina de agua en la que no se presentan los bordes del cauce, y en la figura 14.b los bordes del cauce marcados por un punto rojo por cada ladera, coincidiendo con el caudal formador; de igual manera, en la figura 15 se muestra cómo coinciden los bordes del cauce con las delimitaciones de las fotos aéreas. Para esto, debió realizarse una corrida hidráulica de prueba para el caudal con período de retorno de 1.5 años, que se tomó para calibración.

Figura 14 Sección transversal con bordes y sin bordes del cauce



Fuente: Propia

Figura 15 Coincidencia de los *Banks* con los bordes del río



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

- **Coefficientes de pérdidas de energía:** Las pérdidas de energía en el río se presentan por contracción y expansión, lo que produce un cambio de velocidad en el flujo del agua; el programa HEC-RAS trabaja por defecto, con transición gradual que tiene como coeficientes de contracción 0.1 y de expansión 0.3, las cuales no se modificaron para la investigación.
- **Coefficientes de rugosidad de Manning:** determinan las resistencias al flujo y sirven para calcular las pérdidas por fricción; en la figura 16a y 16b se muestran algunas de las observaciones en campo para definir este coeficiente,

usándose los mismos valores para ambos modelos. La tabla 3 presenta los coeficientes para el cauce principal y las laderas, asignados a partir de las ayudas del HEC-RAS, dado que el programa trabaja con la ecuación de Manning.

Figura 16 Observaciones en campo para escoger el coeficiente de rugosidad de Manning apropiado.



16.a Sector puente viejo-Lacteos
Fuente: Propia



16.b Sector la Cabaña

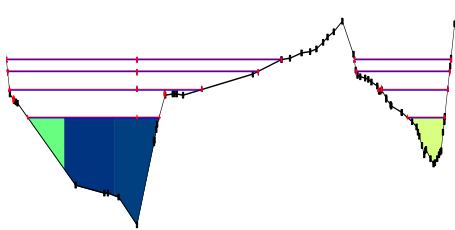
Tabla 3 Coeficiente de Manning para el cauce.

Zona del Cauce	Valor	Descripción
Canal principal	0.045	Meandros con algunas piedras
Ladera izquierda	0.070	Arbustos medianos a densos
Ladera derecha	0.070	

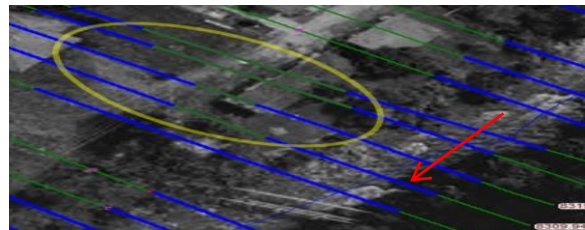
Fuente: (US Army Corp of Engineers, 2017)

- **Diques (Levees):** Una sección transversal está mal definida cuando se encuentran zonas de inundación por fuera del canal principal y que no son razonables; para observar este efecto se realizó una corrida hidráulica para caudales de creciente. Para eliminar este error se marca un punto *-levee-* en la parte más alta entre el canal principal y la zona de error. En las figuras 17.a y 17.b se observa el perfil y la vista en planta con láminas de agua en zonas distintas del cauce principal cuando no se ha superado el límite; en la figura 18.b se observa cómo el dique elimina las zonas donde se encontraban las láminas de agua no razonables.

Figura 17 Sección transversal y vista en planta sin diques (*levees*)

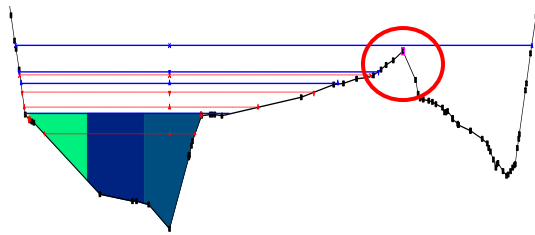


17.a Sección transversal sin *levee*
Fuente: Propia

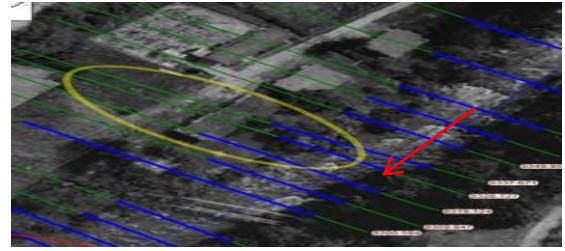


17.b Vista en planta de secciones sin *levee*

Figura 18 Sección transversal y vista en planta con diques (*levees*)



18.a Sección transversal con *levee*
Fuente: Propia



18.b Vista en planta de secciones con *levee*

8.4.3 Procesamiento de información hidráulica

Los datos hidráulicos que se requieren para el desarrollo de la simulación de inundaciones son: caudales de inundación, condiciones de frontera y tipo de flujo; estos datos son utilizados tanto en el modelo topobatimétrico como en la cartográfica digital.

Las condiciones de frontera establecen el comportamiento aguas arriba y aguas abajo del tramo y permiten definir los perfiles en la sección de trabajo. 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 ubica tanto aguas arriba como aguas abajo del tramo en estudio. De acuerdo con los datos disponibles, se escoge como condición de frontera la profundidad normal del flujo que requiere introducir el gradiente hidráulico o en su defecto la pendiente del fondo del cauce. En las tablas 4 y 5 se presentan los datos de las pendientes aguas arriba y aguas abajo, correspondiente a los modelos cartográfico digital y topobatimétrico, respectivamente. La pendiente del fondo (S_0) es calculada por la relación entre diferencias de elevación y longitud entre los dos puntos.

Tabla 4 Condiciones de frontera, modelo cartográfico digital

Abscisa	Distancia horizontal (m)	Ubicación	Elevación del fondo	Diferencia de elevación (m)	Longitud (m)	S_0 (m/m)
9020.397	9018.45	Aguas arriba	1775.03	3.91	355.49	0.0109989
8664.907	8662.96	Aguas abajo	1771.12			
214.401	212.50	Aguas arriba	1685.30	1.94	212.50	0.0091294
1.897	0.00	Aguas abajo	1683.36			

Fuente: Propia

Tabla 5 Condiciones de frontera, modelo topobatimétrico

Abscisa	Distancia horizontal (m)	Ubicación	Elevación del fondo	Diferencia de elevación (m)	Longitud (m)	S ₀ (m/m)
9249.200	9116.02	Aguas arriba	1804.39	0.32	47.11	0.0067926
9202.095	9068.91	Aguas abajo	1804.07			
284.299	151.27	Aguas arriba	1710.78	1.55	151.27	0.0102465
133.031	0.00	Aguas abajo	1709.23			

Fuente: Propia

Como se puede observar en las tablas anteriores, las pendientes para el tramo aguas arriba de los modelos (0.0109989 para el cartográfico y 0.0067926 para el topobatimétrico) son un poco distintas en comparación con el tramo aguas abajo, que no tienen mucha diferencia (0.0091294 para el cartográfico y 0.0102465 para el topobatimétrico). Sin embargo, la diferencia no es muy apreciable y no afectaría en nada los resultados si el flujo resulta subcrítico, puesto que la condición de frontera solo se requiere aguas abajo del tramo.

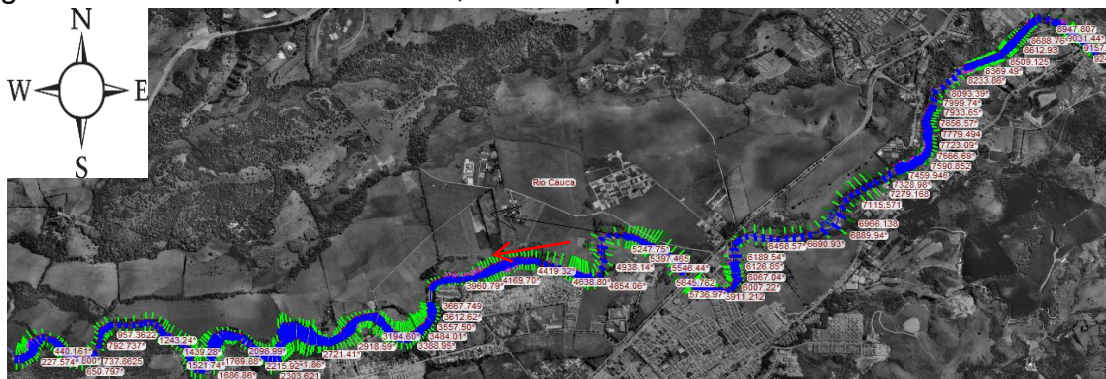
La simulación se realizó usando los tres tipos de flujo para los modelos geométricos; analizando los resultados, se eligió aquel que presentara menores observaciones y advertencias, por lo cual se seleccionó el flujo subcrítico.

8.5 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN HIDRÁULICA EN EL TRAMO DEL RÍO CAUCA

8.5.1 Zonas inundables en el HEC-RAS

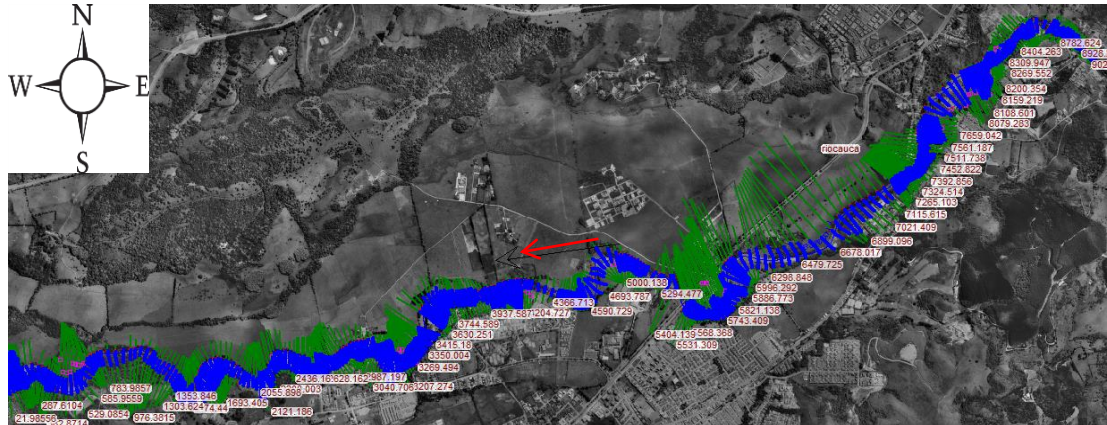
En las siguientes figuras se muestran las manchas de inundación resultantes en el HEC-RAS para los modelos topobatimétrico y cartográfica digital considerando como ejemplo un período de retorno de 30 años, superpuestos sobre ortofotos del área del estudio. Los demás resultados se pueden consultar en el Anexo D.

Figura 19 Manchas de inundación, modelo topobatimétrico



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

Figura 20 Manchas de inundación, modelo cartográfico digital

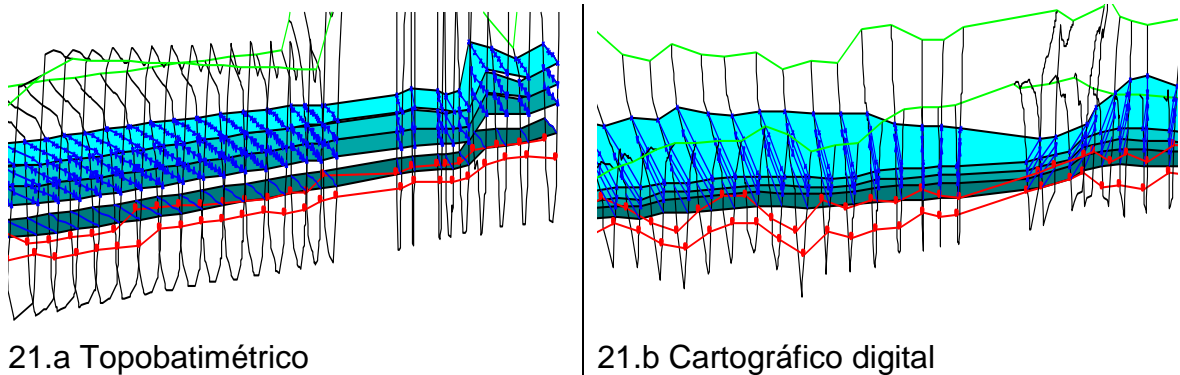


Fuente: Propia

8.5.2 Resultados gráficos en 3D de la simulación hidráulica

En los resultados de la simulación hidráulica en tres dimensiones, se pueden apreciar las secciones transversales y láminas de agua para diferentes períodos de retorno; en la figura 21 se aprecia la comparación de un tramo del río en el sector aguas arriba y aguas abajo del puente del ferrocarril, en donde puede observarse cómo el *thalweg* de los dos modelos es más irregular para el modelo cartográfico digital, apreciándose muchos altibajos.

Figura 21 Esquema del flujo en 3D para cuatro caudales diferentes, sector puente del ferrocarril



21.a Topobatemétrico

21.b Cartográfico digital

Fuente: Propia

Debido a la longitud estudiada del río Cauca, es recomendable observarlo por tramos, los cuales se incluyen en el anexo E.

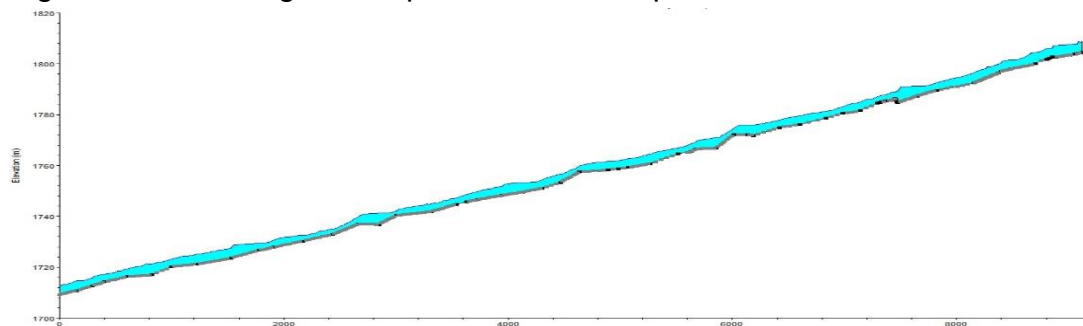
8.5.3 Perfiles longitudinales

En las siguientes figuras se hace una comparación de los perfiles longitudinales para los modelos de simulación topobatemétrico y cartográfica digital con un

tiempo de retorno de 30 años. Es de aclarar que existe una diferencia de elevaciones entre el modelo cartográfico digital de aproximadamente 30 m por encima de las cotas del topobatómétrico, lo puede ser 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. (Rojas & Sons, 2017). No se contempló la transformación de un sistema de referencia a otro porque se buscó recrear las mismas condiciones de trabajos anteriores, y consistencia para la comparación de los resultados que es uno de los objetivos de la investigación al usar la información.

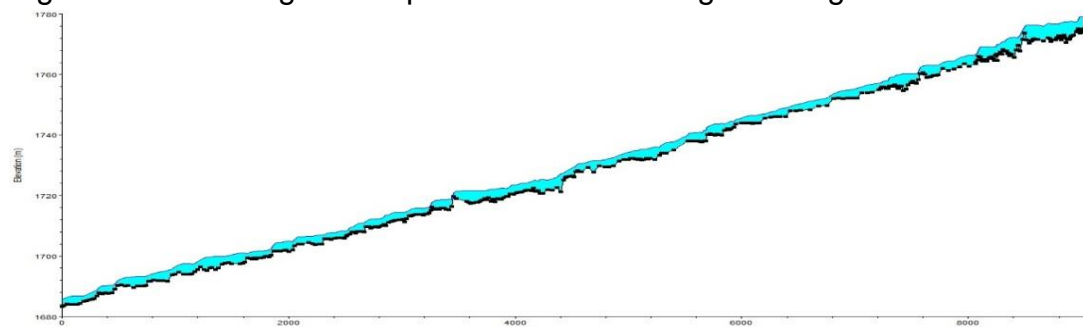
A pesar de la diferencia de alturas, los resultados hidráulicos son comparables puesto que la diferencia de elevaciones y longitudes son consistentes a lo largo de todos los tramos, lo que permite comparar los parámetros hidráulicos, que son calculados directamente desde el fondo de la sección transversal para cada modelo. 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.

Figura 22 Perfil longitudinal para el modelo topobatómétrico. $S_o=0.01043877$



Fuente: Propia

Figura 23 Perfil longitudinal para el modelo cartográfico digital. $S_o=0.01016472$



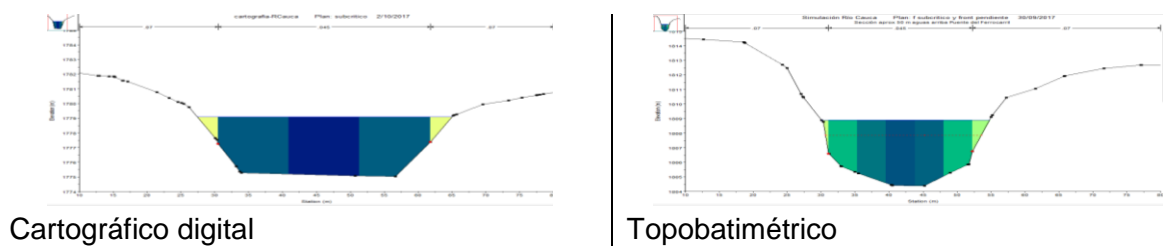
Fuente: Propia

Las pendientes medias del tramo fueron 0.01043877 para el topobatimétrico y 0.01016472 para la cartográfica digital, evidenciando una similitud en su valor, pero al detallar los dos perfiles se muestra un mayor ruido o distorsión del fondo en el modelo cartográfico digital; ello se debe a la dificultad que se tiene para identificar con exactitud el fondo del río, trabajando con un TIN creado a partir de una cartografía con curvas de nivel espaciadas 2.0 m.

8.5.4 Secciones transversales

A continuación, se presenta la comparación entre modelo topobatimétrico y cartográfica digital de secciones transversales en tres puntos diferentes del tramo del río Cauca para un período de retorno de 30 años.

Figura 24 Comparación secciones a 50 m aguas arriba puente del Ferrocarril



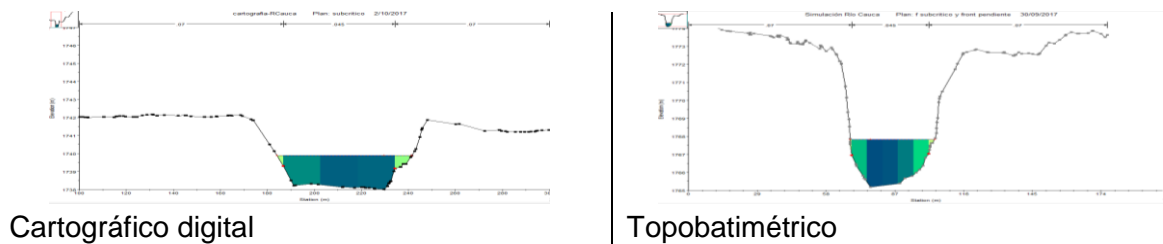
Cartográfico digital

Topobatimétrico

Coordenadas planas: E=1056596.32; N=765611.55

Fuente: Propia

Figura 25 Comparación secciones aguas arriba puente Tomas Castrillón



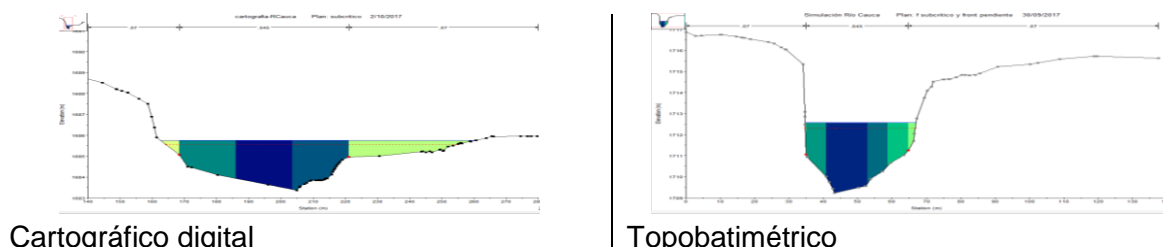
Cartográfico digital

Topobatimétrico

Coordenadas planas: E=1054273.30; N=764147.40

Fuente Propia

Figura 26 Comparación secciones aguas arriba unión río Molino - río Cauca



Cartográfico digital

Topobatimétrico

Coordenadas planas: E=1050408.75; N=763665.50

Fuente Propia

8.5.5 Parámetros hidráulicos generados

Los resultados de los parámetros hidráulicos se generaron para cada una de las 399 secciones transversales; a continuación, se observan los parámetros hidráulicos para una sección transversal. En la figura 27 se muestran como ejemplo, los parámetros hidráulicos para una sección aguas arriba del puente Tomas Castrillón para un tiempo de retorno de 30 años, incluyendo laderas derecha e izquierda y el cauce principal.

Figura 27 Parámetros hidráulicos

Plan: f subcritico Cauca Río Cauca RS: 5745.47* Profile: QTr = 30					
E.G. Elev (m)	1769.13	Element	Left OB	Channel	Right OB
Q Total (m3/s)	308.00	Flow (m3/s)	0.11	306.85	1.04
Top Width (m)	34.60	Top Width (m)	0.50	31.73	2.36
Vel Total (m/s)	4.07	Avg/Vel. (m/s)	0.52	4.13	0.90
Max Chl Dpth (m)	2.97	Hydr. Depth (m)	0.43	2.34	0.49

Fuente: Propia

En el anexo F se muestran los principales parámetros hidráulicos en tablas para todas las secciones transversales, para los dos modelos.

8.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

A partir de la simulación con el HEC-RAS del modelo topobatimétrico y cartográfica digital del tramo del río Cauca, se generaron las variables hidráulicas, de las cuales se tomaron: profundidad máxima, velocidad, ancho de inundación y número de Froude, para los cuatro tiempos de retorno de 1.5, 10, 30 y 100 años con un total de 399 datos. Estos datos fueron exportados a tablas de Excel para ser organizados y posteriormente al programa SPSS (*Versión prueba-Código IBMid 3030089*) para realizar el análisis estadístico y comparación numérica de las variables; los resultados obtenidos se pueden ver tanto en tabla como en gráficos y a continuación se presenta un resumen de los resultados. Los resultados y datos en su totalidad se pueden encontrar en el anexo G.

La tabla 6 presenta la comparación de las variables hidráulicas para los modelos generados a partir de cartografía digital y topobatimetría para los caudales asociados a diferentes tiempos de retorno.

Tabla 6 Resumen resultados estadísticos río Cauca.

VARIABLES		Tiempo retorno 1.5 años		Tiempo retorno 10 años		Tiempo retorno 30 años		Tiempo retorno 100 años	
		CD	TB	CD	TB	CD	TB	CD	TB
Profundidad máxima del agua (m)	Media	2.25	2.24	2.76	2.94	3.04	3.35	3.36	3.86
	Desviación	0.88	0.48	0.97	0.61	1.02	0.69	1.09	0.78
	Mínimo	0.88	1.12	1.15	1.55	1.30	1.79	1.45	2.09
	Máximo	5.53	3.87	6.42	4.98	6.92	5.77	7.49	6.67
	Cuartil 1	1.64	1.90	2.11	2.49	2.32	2.83	2.62	3.28
	Mediana	2.01	2.24	2.52	2.95	2.77	3.35	3.08	3.83
	Cuartil 3	2.73	2.59	3.25	3.38	3.54	3.80	3.90	4.37
	CV	38.9%	21.6%	35.2%	20.8%	33.6%	20.6%	32.3%	20.3%
Velocidad (m/s)	Media	1.83	2.77	2.14	3.33	2.28	3.58	2.42	3.84
	Desviación	0.72	0.57	0.76	0.68	0.76	0.75	0.78	0.82
	Mínimo	0.45	1.25	0.63	1.55	0.73	1.70	0.84	1.82
	Máximo	3.85	4.04	4.59	4.70	4.94	5.30	5.31	5.70
	Cuartil 1	1.26	2.40	1.59	2.89	1.73	3.09	1.85	3.28
	Mediana	1.70	2.80	2.03	3.37	2.17	3.70	2.31	3.99
	Cuartil 3	2.28	3.14	2.63	3.84	2.78	4.16	2.93	4.49
	CV	39.3%	20.4%	35.4%	20.5%	33.3%	20.9%	32.3%	21.4%
Ancho de inundación (m)	Media	72.47	34.13	92.06	37.06	100.79	38.97	111.01	41.84
	Desviación	32.86	10.10	40.55	10.78	42.63	11.47	45.22	12.84
	Mínimo	23.37	19.10	24.85	19.47	25.70	19.71	26.75	20.13
	Máximo	209.57	87.86	246.89	92.68	256.85	95.56	269.25	99.23
	Cuartil 1	48.84	27.02	65.82	29.23	74.06	30.39	80.22	32.34
	Mediana	67.16	31.68	83.59	34.11	91.42	35.60	99.55	37.75
	Cuartil 3	87.11	39.44	110.57	42.70	121.20	44.94	130.48	49.39
	CV	45.3%	29.6%	44.1%	29.1%	42.3%	29.4%	40.7%	30.7%
Froude	Media	0.53	0.72	0.56	0.73	0.58	0.73	0.59	0.74
	Desviación	0.27	0.17	0.24	0.18	0.22	0.18	0.22	0.18
	Mínimo	0.11	0.27	0.16	0.28	0.18	0.29	0.20	0.31
	Máximo	1.02	1.01	1.18	1.00	1.01	1.00	1.06	1.00
	Cuartil 1	0.33	0.60	0.38	0.61	0.40	0.61	0.43	0.61
	Mediana	0.45	0.72	0.50	0.73	0.53	0.73	0.55	0.75
	Cuartil 3	0.75	0.84	0.74	0.87	0.75	0.88	0.76	0.89
	CV	50.4%	24.0%	42.7%	24.1%	38.8%	24.4%	36.3%	24.6%

CD: Cartografía digital, TB: Topobatimétrico, CV: coeficiente de variación

Fuente: Propia

Analizando la media para cada una de las variables, se observa mayor consistencia para la profundidad máxima del agua y número de Froude en los dos modelos; por otra parte, la velocidad presenta valores más diferenciados, en tanto que el de mayor divergencia entre sus datos es el ancho de inundación, siendo los valores de la cartográfica digital superiores a los del topobatimétrico.

Al analizar la media y la mediana, se observa también que los datos topobatimétricos tienen un comportamiento normal, a diferencia de la cartográfica digital; esto también se evidencia con los resultados de la desviación estándar, que dada la dispersión de los datos con respecto a la media, es mayor para la cartográfica digital y menor en la topobatimétrica.

Por otra parte, analizando los coeficientes de variación, se tiene que el número de Froude-cartográfico digital y tiempo de retorno de 1.5 años, se encuentra en el 50%; el resto de los resultados se encuentra por debajo de este porcentaje, lo que representa que los valores no están muy dispersos con respecto a la media.

En general, los coeficientes de variación son más altos para los resultados del modelo cartográfico digital en comparación con el topobatimétrico, que a su vez son más consistentes y están próximos al 20%, lo que significa que tienen mejor representatividad y permiten observar mejor las diferencias. Dado al coeficiente de variación del modelo cartográfico digital se trabaja con la mediana y no con la media.

Análogo a los datos cuantitativos se presenta en la tabla 7 una comparación cualitativa entre los resultados entre modelos cartográfico digital y topobatimétrico.

Tabla 7 Comparación cualitativa de la mediana de los parámetros hidráulicos

VARIABLES	Período retorno 1.5 años		Período retorno 10 años		Período retorno 30 años		Período retorno 100 años	
	CD	TB	CD	TB	CD	TB	CD	TB
Profundidad	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
Velocidad	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor
Ancho Inundación	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor
Froude	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor	Menor	Mayor

CD: Cartografía digital, TB: Topobatimétrico

Fuente: Propia

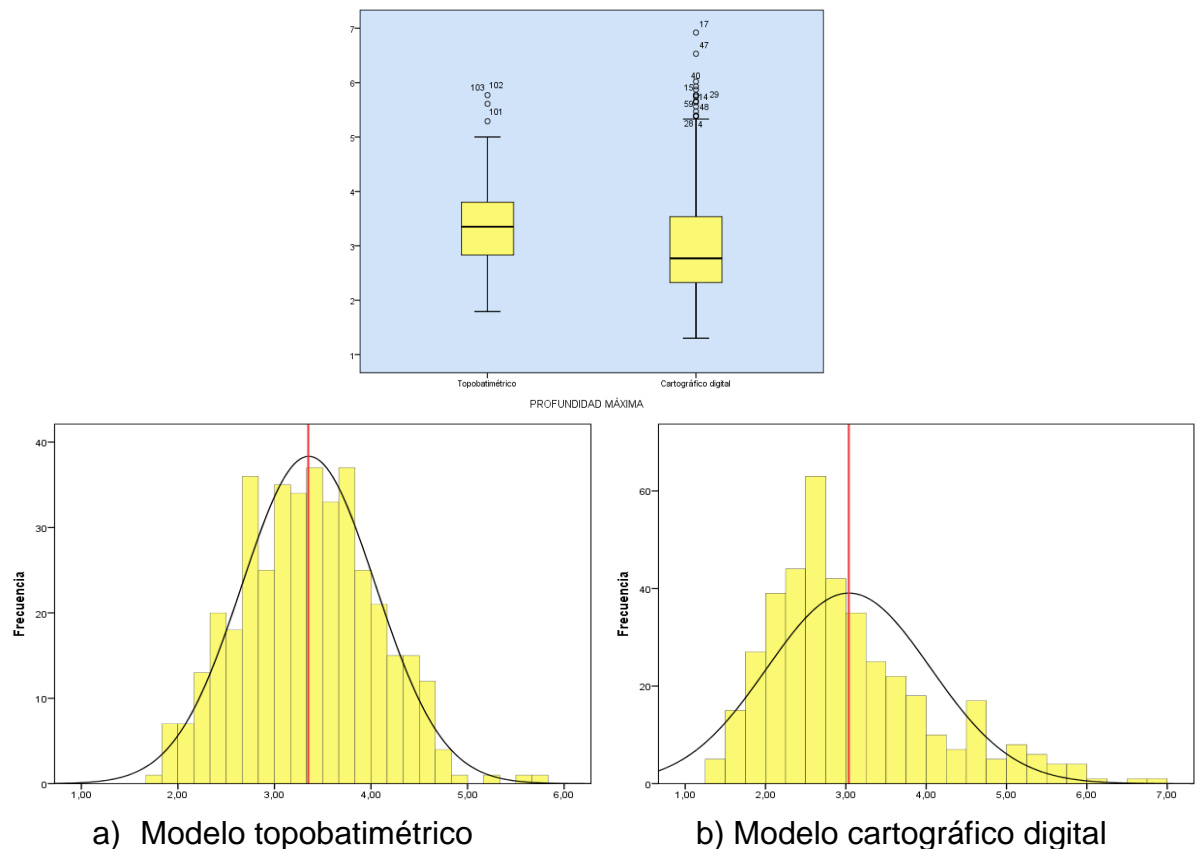
En la tabla 7 se trabaja con la mediana ya que es menos sensible a la oscilación de los valores. En cuanto a la comparación cualitativa de los resultados, se tiene la misma tendencia para cada período de retorno, donde la profundidad, velocidad y número de Froude es menor en el cartográfico digital que en el topobatimétrico, en tanto que el ancho de inundación por el contrario es el único valor que es mayor en la cartográfica digital.

En este trabajo se pretende ver diferencias en los resultados entre un modelo y otro, sin descartar valores atípicos, lo que llevaría a tener resultados

aparentemente más consistentes. Además, un río es muy variable a lo largo de su recorrido y es prácticamente imposible y no resultaría representativo, descartar valores de parámetros hidráulicos. Lo único cierto es la verificación en campo, válida para las condiciones del momento, puesto que el río es dinámico en tiempo y en espacio.

En las siguientes figuras se muestra como ejemplo, la comparación de los diagramas de cajas de los modelos topobamétrico y cartográfica digital para las cuatro variables y período de retorno de 30 años.

Figura 28 Diagrama de cajas y distribución normal para la profundidad máxima. $T_r=30$ años

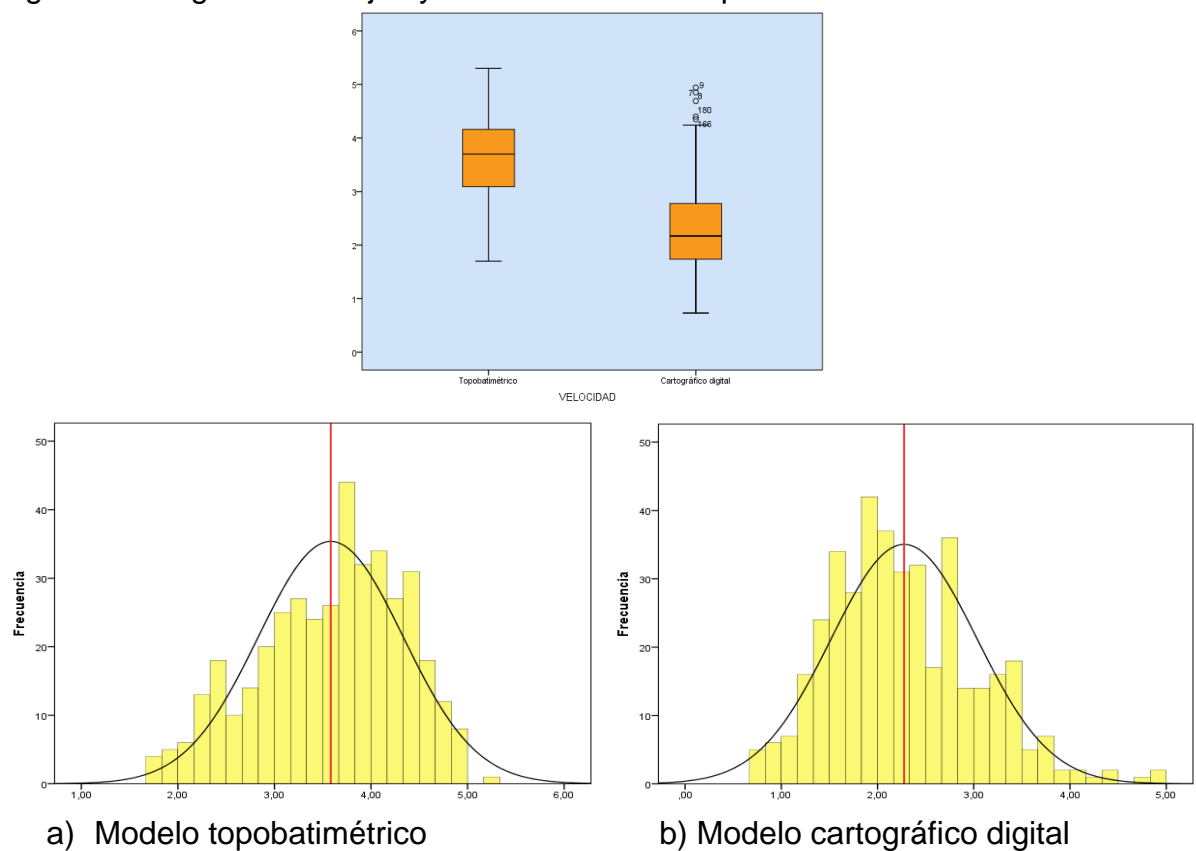


Fuente: Propia

Realizando un análisis de la figura 28, profundidad máxima, se puede identificar que no hay paridad en los resultados en cuanto a la mediana de los dos modelos, ya que para la topobatimétrica es de 3.35 m y en la cartográfica digital es de 2.77 m, obteniendo un 21% de diferencia entre los dos resultados. En cuanto a la dispersión de los datos se tiene menor dispersión de los valores en el modelo

topobatimétrico, ya que la diferencia entre el primer y tercer cuartil es más cercana que los cuartiles del modelo cartográfico digital. Para los dos casos se muestran valores atípicos o extremos, siendo mayor en el modelo cartográfico digital, donde se aprecia una nube de puntos por fuera del límite superior. En cuanto a la asimetría, el modelo topobatimétrico presenta una mejor distribución simétrica, lo que se puede observar porque la figura está más equilibrada y también porque los valores de la media y la mediana son cercanos; por otra parte, el modelo cartográfico digital presenta una distribución asimétrica positiva, ya que la mediana se encuentra alejada del límite superior.

Figura 29 Diagrama de cajas y distribución normal para la velocidad. Tr=30 años

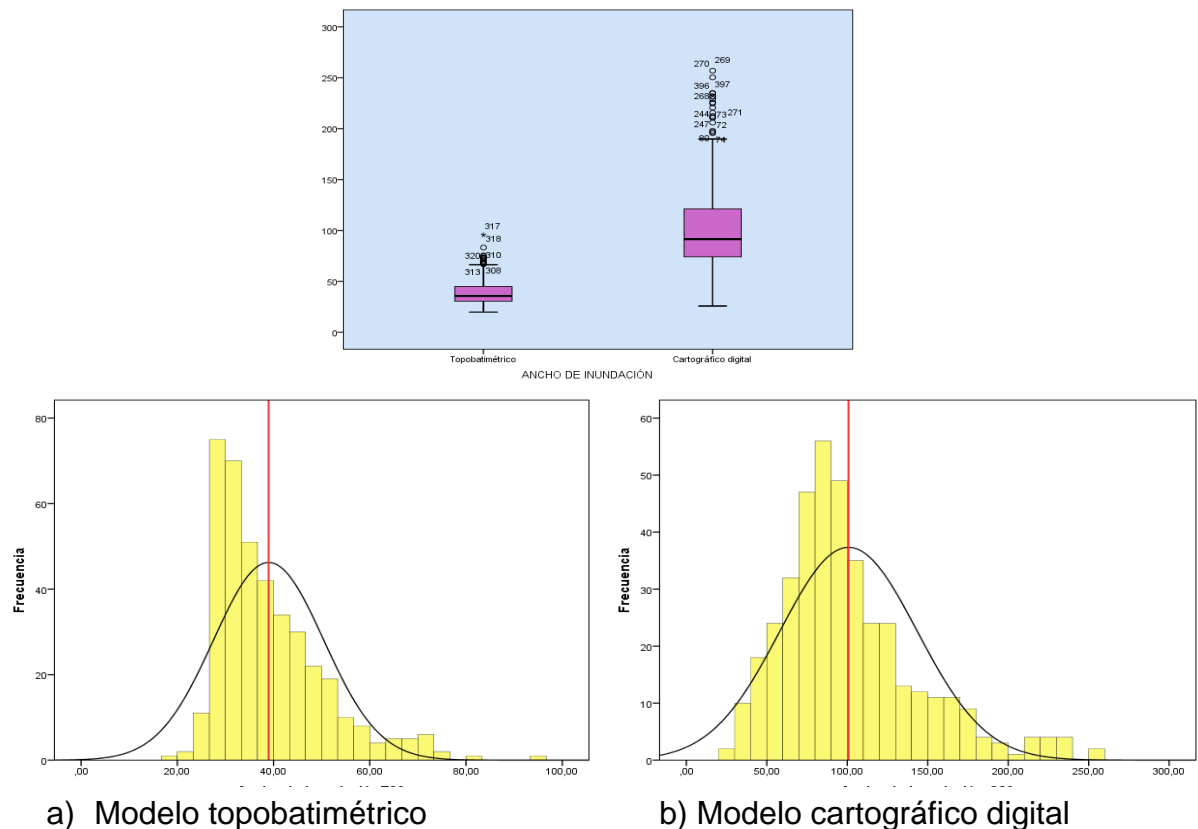


Fuente: Propia

En la representación del diagrama para la velocidad (Figura 29), se observa una diferencia marcada sobre la mediana de los dos modelos, en la cual hay una diferencia del 71% entre los valores, siendo la del topobatimétrico mayor con valor de 3.7 m/s sobre la cartográfica digital que tiene un valor de 2.17m/s. Las distribuciones de los valores para ambos modelos son similares si se tiene en cuenta el tamaño del rectángulo y su distancia con los extremos o límites inferior y

superior. Los valores atípicos se presentan en el modelo cartográfico digital por encima del límite superior pero no en el topobatimétrico. El modelo topobatimétrico presenta una distribución negativa ya que la concentración del 50% de los datos es más estrecha entre la mediana y el límite superior; caso contrario es para el modelo cartográfico digital en donde un 50% de los datos que se encuentran entre la mediana y el límite superior es más amplia, presentando una distribución positiva.

Figura 30 Diagrama de cajas y distribución normal para el ancho de inundación Tr=30 años

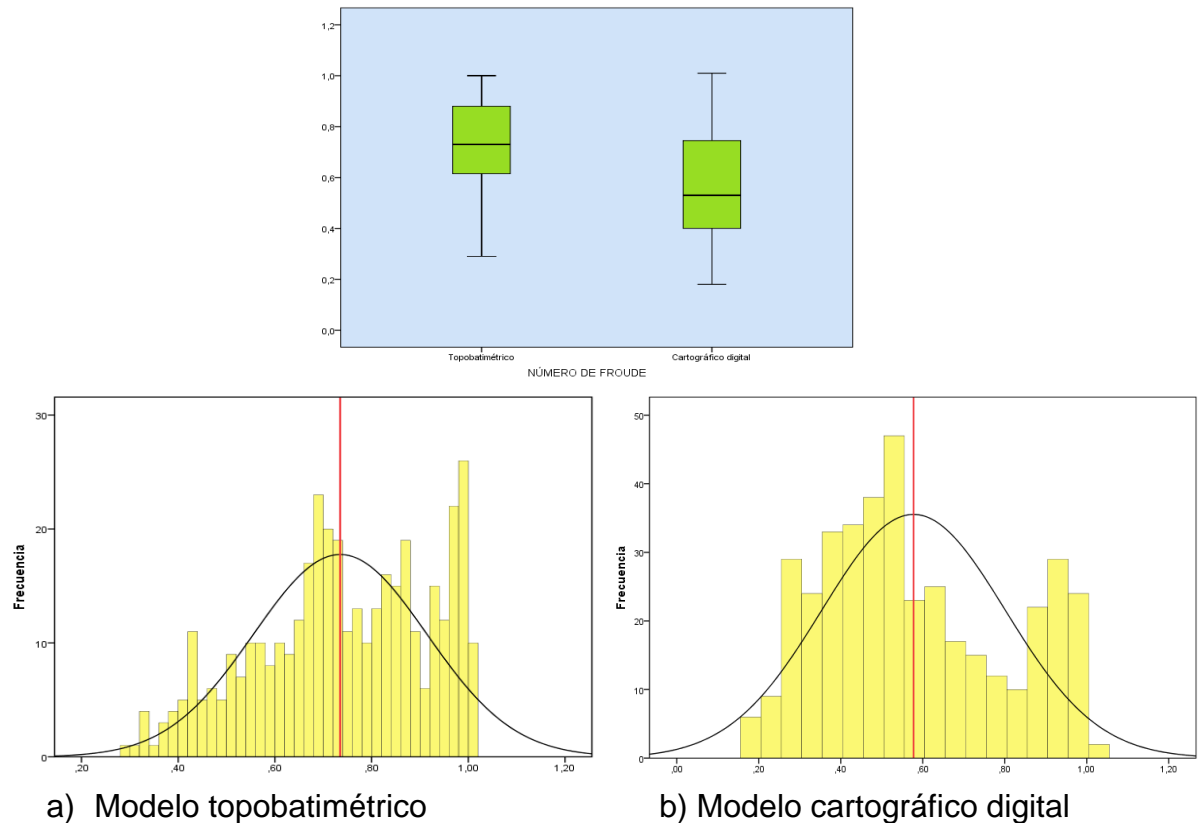


Fuente: Propia

En la figura 30 del diagrama de cajas para el ancho de inundación, se identifica una diferencia amplia en la distribución, en donde la mediana de la cartográfica digital es mayor a la del topobatimétrico, con valores de 91.4m y 35.6m, respectivamente. Identificando el tamaño de las cajas de ambos modelos, la distribución de los valores es más amplia en el modelo cartográfico digital que en el topobatimétrico. Los dos modelos en este caso tienen valores atípicos por fuera del límite superior, pero siendo más densos en el topobatimétrico. Los dos

modelos presentan una distribución asimétrica positiva, dado que el valor de la mediana se encuentra más cercano al límite inferior y separado del extremo o límite superior.

Figura 31 Diagrama de cajas y distribución normal para el número de Froude Tr=30 años



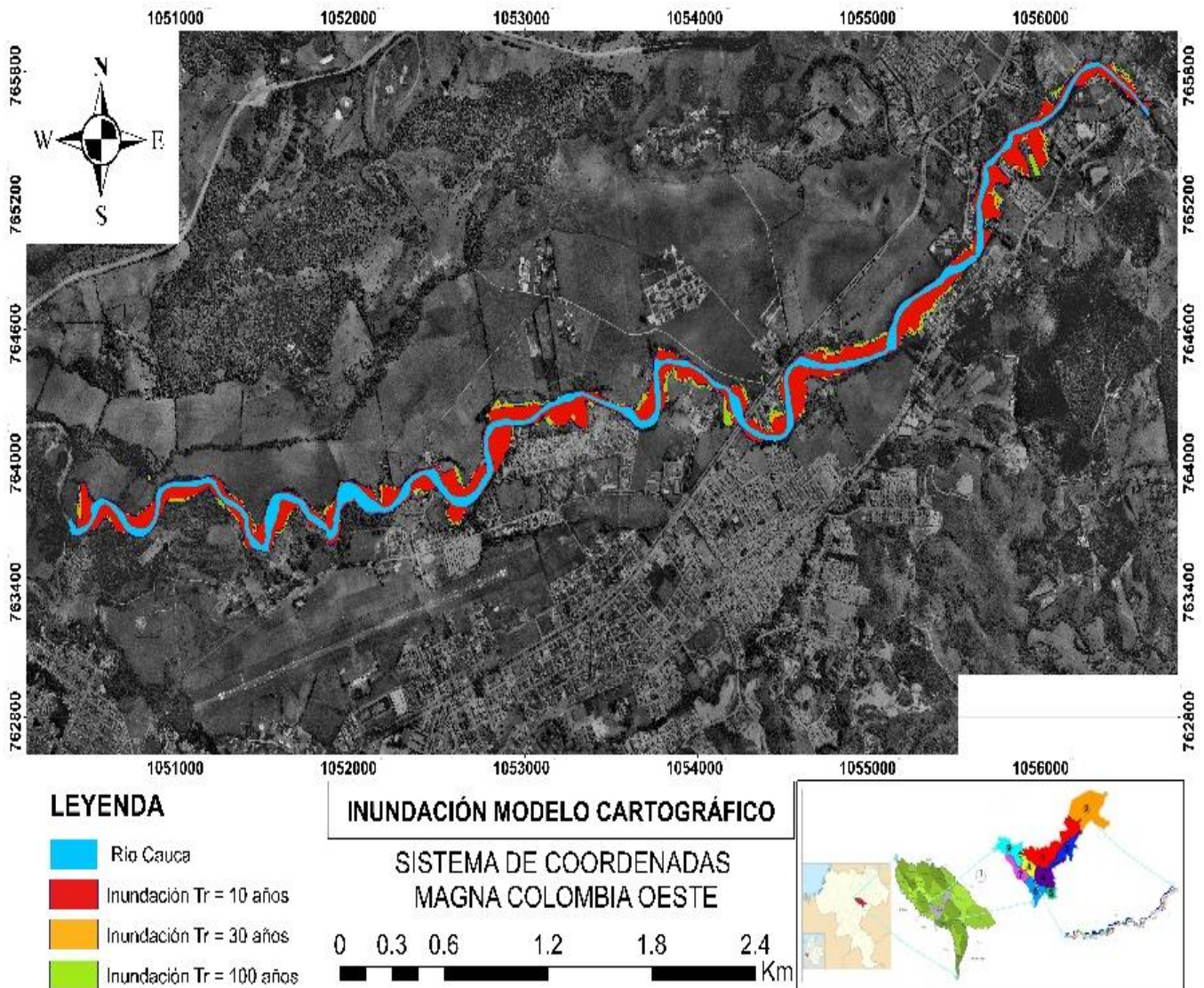
Fuente Propia

La figura 31 muestra el diagrama de cajas para el número de Froude. Comparando las medianas de los modelos se encuentran una diferencia marcada, siendo mayor para el modelo topobatemétrico. La distribución en el modelo cartográfico digital es amplia si se observa que la caja que representa el 50% de los datos es más grande que la del modelo topobatemétrico. La distribución de los datos en el modelo cartográfico digital presenta una asimetría positiva, mientras que el modelo topobatemétrico presenta asimetría negativa. También los datos están más densos en el topobatemétrico, ya que la diferencia entre los extremos es menor; en esta variable no se presentaron datos atípicos en los dos modelos para el número de Froude.

8.7 POST PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN HEC-GeoRAS

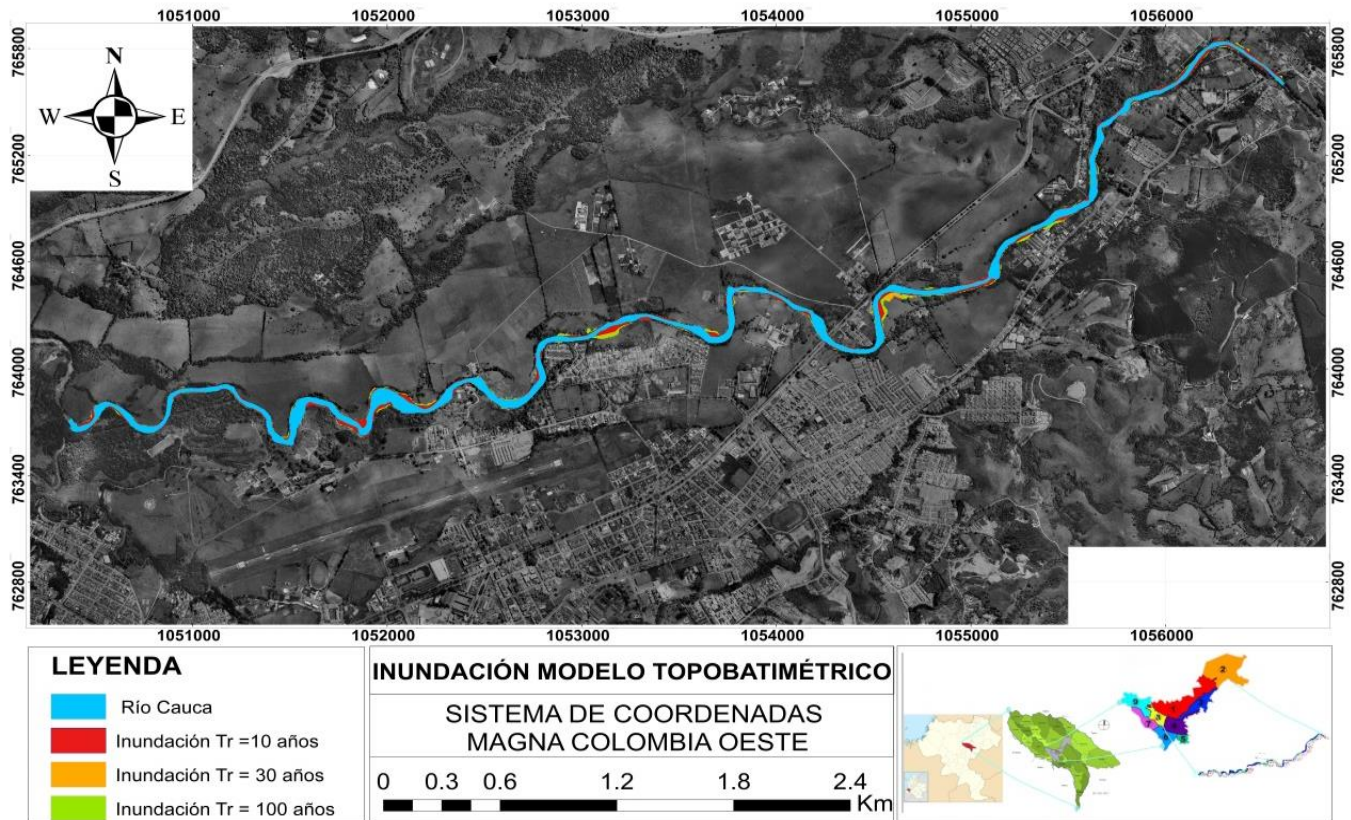
El post-procesamiento se realiza con la información generada en el HEC-RAS, la cual es exportada al HEC-GeoRAS, que permite visualizar espacialmente los resultados de las manchas o zonas de inundación para cada uno de los tiempos de retorno (10, 30 y 100 años), tal como se muestra en las siguientes figuras. La información en su totalidad se puede encontrar en el anexo H. Los pasos a seguir se encuentran en el anexo I, y se ilustran mediante un video en el anexo J.

Figura 32 Manchas de inundación del río Cauca, modelo cartográfico digital



Fuente: Propia

Figura 33 Manchas de inundación del río Cauca, modelo topobatimétrico

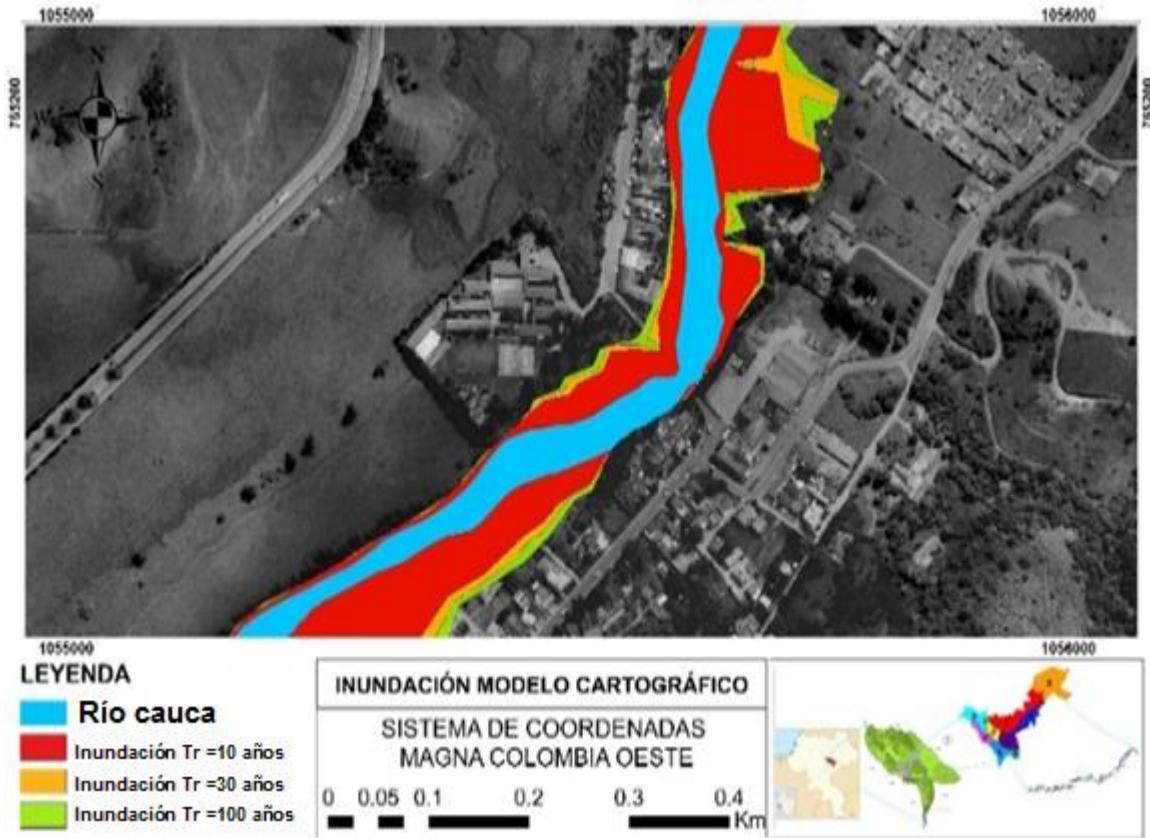


Fuente: Propia

Los mapas indican la susceptibilidad por inundación hidráulica a partir de los modelos cartográfico digital y topobatimétrico; la mancha roja indica alta susceptibilidad a las inundaciones con tiempo de retorno de 10 años, el naranja para media con tiempo de retorno de 30 años y el verde para baja con tiempo de retorno de 100 años. La superposición de las inundaciones generadas para el modelo cartográfico digital muestra una mayor zona de inundación con respecto al topobatimétrico, pero no muy grandes en comparación con los resultados de otros estudios que se mostrarán más adelante; por ser un cauce muy confinado las manchas de inundación para el modelo topobatimétrico son muy pequeñas llegando a no mostrarse en algunas partes de la zona de estudio. Los mapas de las figuras anteriores muestran claramente los resultados obtenidos en la estadística las cuales indicaban mayores zonas de inundación para el modelo cartográfico digital.

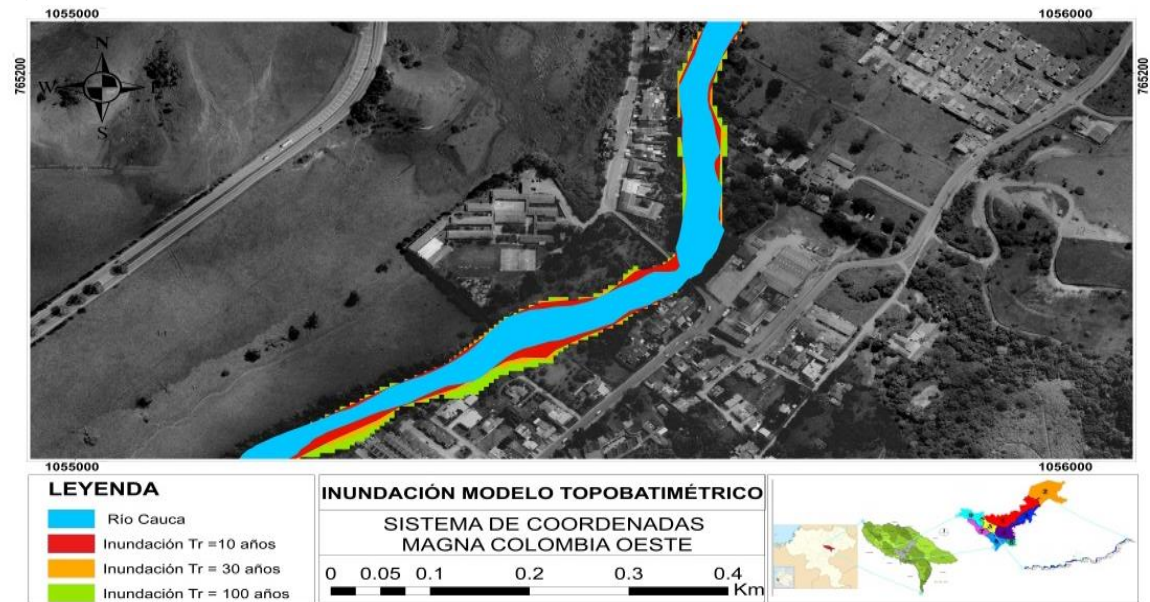
En las siguientes figuras se presenta un detalle de los mapas de inundación para sector puente Lácteos Puracé.

Figura 34 Manchas de inundación, modelo cartográfico digital



Fuente: Propia

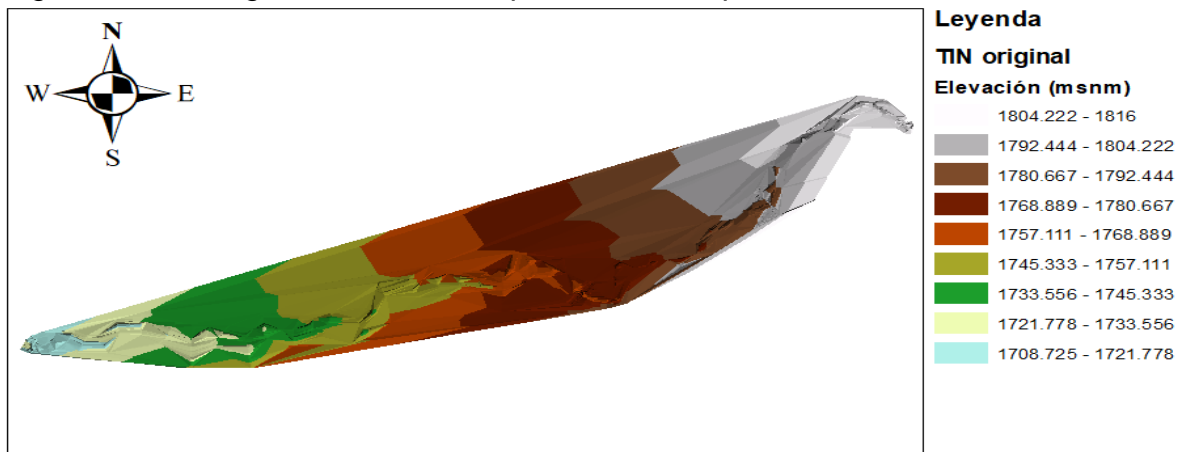
Figura 35 Manchas de inundación, modelo topobatimétrico



Fuente: Propia

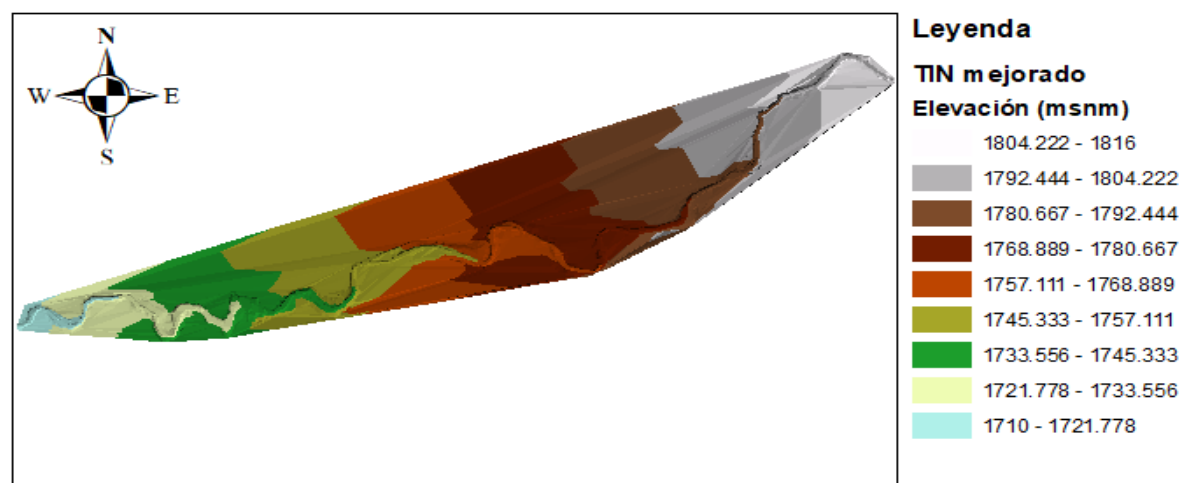
Vale la pena anotar, que el TIN original para el modelo topobatemétrico suministrado por la Alcaldía, fue generado a partir de secciones transversales tomadas en campo con gran separación, que en algunos casos llegaba a ser de más de 200 m en tramos homogéneos y, por tanto, dejaba muchos sectores sin información que dificultaban el mapeo de las zonas de inundación al no haber continuidad en ellas, (Figura 36). Por esta razón, se exploraron las posibilidades de la última versión 5.0.3 del HEC-RAS (2016), que permitió incluir secciones interpoladas y así poder generar un TIN de mejores características, que fue el que finalmente se usó para el mapeo de las zonas de inundación, que se mostraron anteriormente, (Figura 37).

Figura 36 TIN original suministrado por la Alcaldía para un sector del río Cauca



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

Figura 37 TIN mejorado para un sector del río Cauca



Fuente: propia

9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS CON ESTUDIOS ANTERIORES

A continuación, se comparan los resultados obtenidos en diferentes estudios realizados para los ríos Ejido (Rojas & Sons, 2017), Molino (Calvache & Pérez, 2016), FINDETER (FINDETER Y BID, 2017) y Cauca (2017).

9.1 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA LOS CAUCES EJIDO, MOLINO Y CAUCA

En la tabla siguiente se pueden observar comparativamente los perfiles longitudinales de los dos modelos geométricos, considerando caudales asociados a períodos de retorno de 30 años, pues es el que resulta común para los tres estudios. Para el río Ejido se muestra solo la zona de aguas arriba, dado que es un cauce ramificado y genera los perfiles para cada una de las divisiones de las que está conformado.

Tabla 8 Perfiles de los ríos Ejido, Molino, Cauca

RÍO		Modelo topobatemétrico	Modelo cartográfico digital
EJIDO	$S_0=1.181\%$		
		$S_0=1.075\%$	
MOLINO	$S_0=0.818\%$		
		$S_0=0.805\%$	
CAUCA	$S_0=1.044\%$		
		$S_0=1.016\%$	

Fuente: Propia, (Calvache & Pérez, 2016), (Rojas & Sons, 2017)

Es evidente que el perfil longitudinal conserva la misma pendiente media para los tres cauces, en tanto que las irregularidades del fondo del terreno disminuyen a medida que aumenta el tamaño del cauce.

En la tabla 9 se observa que para los cauces de los ríos Ejido y Molino, las secciones del modelo cartográfico digital y topobatimétrico difieren bastante entre sí, caso contrario de las secciones del río Cauca que tienen mayor similitud, lo cual se evidencia para todas las secciones transversales a lo largo de los cauces.

Tabla 9 Sección trasversal de los ríos Ejido, Molino, Cauca

RÍO	Modelo topobatimétrico	Modelo cartográfico digital
EJIDO		
	Barrio El Poblado; Coordenadas: E=1053479.06, N=759929.64	
MOLINO		
	Barrio el Triunfo; Coordenadas: E=1051291.92, N=762578.20	
CAUCA		
	Puente del Ferrocarril-Pisojé, coordenadas: E=1056596.32, N=765611.55	

Fuente: Propia, (Calvache & Pérez, 2016), (Rojas & Sons, 2017)

9.2 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LOS CAUCES EJIDO, MOLINO Y CAUCA

Los resultados hidráulicos obtenidos de estudios previos en los ríos Molino y Ejido, junto a los de la presente investigación en el río Cauca, se incluyen en las tablas 10, 11, 12 y 13 en las que se presentan el número de Froude, la máxima profundidad del agua, el ancho de superficie y la velocidad del flujo para un período de retorno de 30 años, para hacer una comparación cuantitativa y cualitativa de varios parámetros estadísticos.

Tabla 10 Comparación de variables para los ríos Ejido, Molino y Cauca.

Variable		RÍO EJIDO		RÍO MOLINO		RÍO CAUCA	
		TB	CD	TB	CD	TB	CD
Número de Froude	Media	0.44	0.34	0.55	0.45	0.73	0.58
	Desv. est	0.23	0.31	0.16	0.24	0.18	0.22
	Máximo	2.43	2.11	0.96	1.02	1.00	1.01
	Mínimo	0.09	0.01	0.25	0.08	0.29	0.18
	CV	52%	91%	29%	53%	24%	38%
Máxima profundidad del agua (m)	Media	2.03	1.13	2.54	2.03	3.35	3.04
	Desv. est	0.54	0.73	0.55	0.77	0.69	1.02
	Máxima	3.56	3.67	4.01	5.10	5.77	6.92
	Mínima	0.68	0.22	1.18	0.67	1.79	1.30
	CV	27%	65%	22%	38%	21%	34%
Ancho de la superficie del agua (m)	Media	17.79	112.54	14.86	44.72	38.97	100.79
	Desv. est	16.95	98.47	8.75	27.77	11.47	42.63
	Máximo	143.59	400.79	76.52	159.77	95.56	256.85
	Mínimo	3.31	7.19	6.49	12.51	19.71	25.70
	CV	95%	87%	59%	62%	29%	42%
Velocidad de flujo (m/s)	Promedio	1.73	0.90	2.44	1.48	3.58	2.28
	Desv. est	0.84	0.75	0.55	0.65	0.75	0.76
	Máxima	5.89	4.60	4.59	3.41	5.30	4.94
	Mínima	0.37	0.01	1.10	0.37	1.70	0.73
	CV	49%	83%	23%	44%	21%	33%

CD: Cartografía digital, TB: Topobatimétrico, CV: coeficiente de variación

Fuente: Propia, Modificado (Calvache & Pérez, 2016); (Rojas & Sons, 2017).

En la tabla anterior se observan los distintos resultados para cada uno de los ríos y dado que los valores difieren bastante, se calculó también el coeficiente de variación para observar el comportamiento general de los datos para un período

de retorno de 30 años. De acuerdo con este resultado, los modelos cartográficos digitales tienen un mayor valor frente a los resultados del topobatimétrico, excepto para el coeficiente de variación del ancho de la superficie del agua, en donde el topobatimétrico es superior; estos resultados muestran un mejor comportamiento para los modelos topobatimétricos.

Es evidente, que los coeficientes de variación tienden a mejorar su comportamiento cuando el cauce del río es más grande, tanto para el modelo topobatimétrico como para la cartográfica digital, siendo sus diferencias menores, como se observa para el río Cauca.

En la tabla 11 se presenta una comparación cualitativa de los resultados obtenidos, para apreciar el comportamiento en general de los resultados

Tabla 11 Comparación cualitativa de los ríos Ejido, Molino y Cauca

Variable		RÍO EJIDO		RÍO MOLINO		RÍO CAUCA	
		TB	CD	TB	CD	TB	CD
Número de Froude	Media	TB > CD		TB > CD		TB > CD	
	Desv. est	TB < CD		TB < CD		TB < CD	
	Máximo	TB > CD		TB < CD		TB < CD	
	Mínimo	TB < CD		TB > CD		TB > CD	
Máxima profundidad del agua (m)	Media	TB > CD		TB > CD		TB > CD	
	Desv. est	TB < CD		TB < CD		TB < CD	
	Máximo	TB < CD		TB < CD		TB < CD	
	Mínimo	TB > CD		TB > CD		TB > CD	
Ancho de la superficie del agua (m)	Media	TB < CD		TB < CD		TB < CD	
	Desv. est	TB < CD		TB < CD		TB < CD	
	Máximo	TB < CD		TB < CD		TB < CD	
	Mínimo	TB < CD		TB < CD		TB < CD	
Velocidad de flujo (m/s)	Media	TB > CD		TB > CD		TB > CD	
	Desv. est	TB > CD		TB < CD		TB < CD	
	Máximo	TB > CD		TB > CD		TB > CD	
	Mínimo	TB > CD		TB > CD		TB > CD	

CD: Cartografía digital, TB: Topobatimétrico

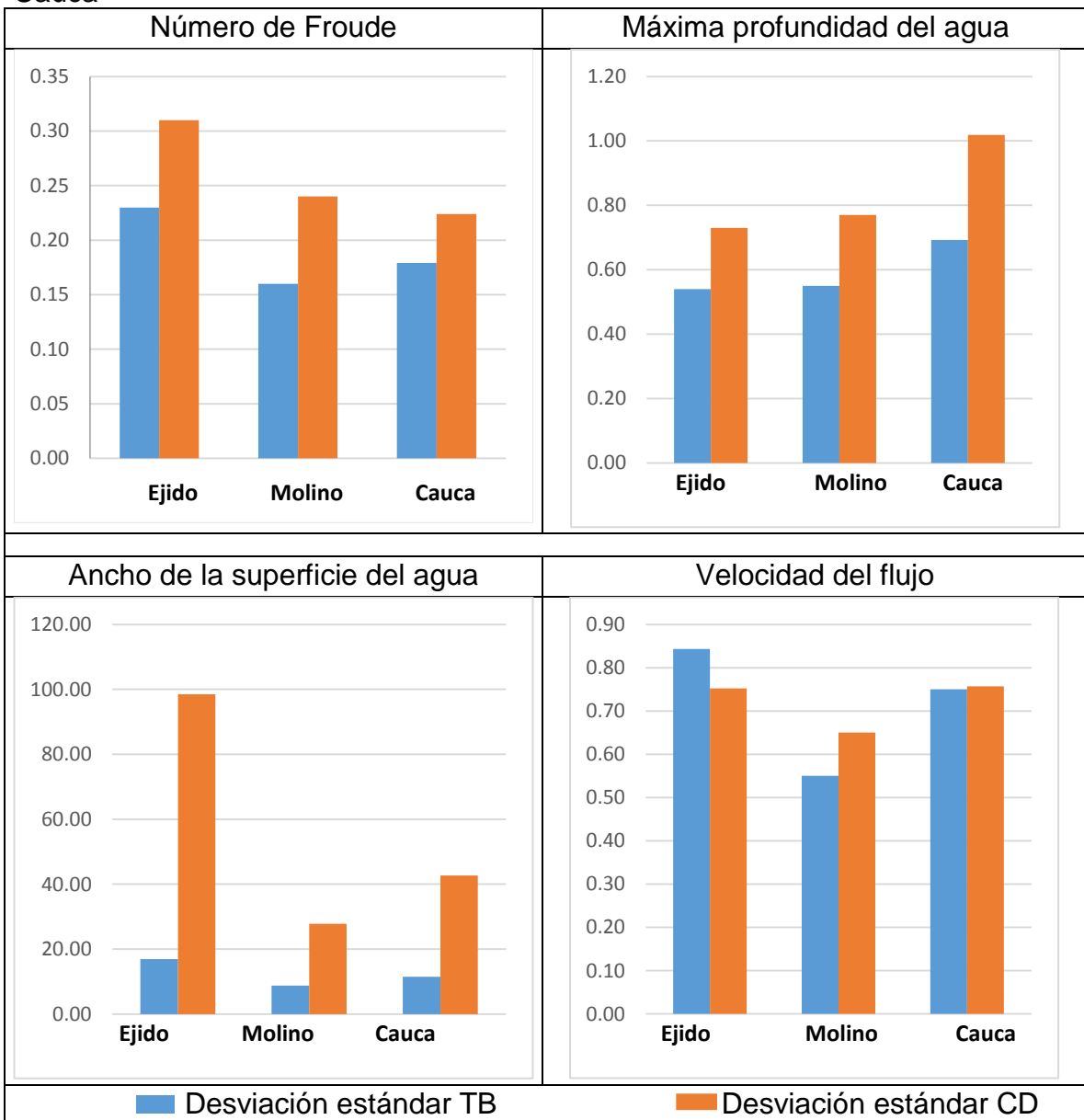
Fuente: Propia

La comparación cualitativa de la tabla anterior muestra los valores que son mayores y menores para cada resultado; teniendo la media como principal criterio de comparación, se observa un comportamiento igual para cada uno de los tres ríos, en los cuales las medias de los modelos topobatimétricos del número de Froude, máxima profundidad y velocidad de flujo son mayores a las del modelo

cartográfico digital, caso contrario del ancho de superficie del agua, en donde la media de la cartográfica digital es superior a la media del topobatimétrico.

La comparación de la desviación estándar de los resultados muestra que para los tres cauces es mayor en la cartográfica digital, excepto en la velocidad de flujo del sistema Ejido, donde la desviación es menor; lo que permite inferir que hay datos alejados, en especial para el modelo cartográfico digital para los tres ríos.

Tabla 12 Comparación desviación estándar variables para los ríos Ejido, Molino, Cauca



Fuente: Propia

Para observar qué tanto se alejan los valores entre los dos modelos se optó por realizar una comparación porcentual, que se encuentra en la tabla 13.

Tabla 13 Comparación porcentual para los ríos Ejido, Molino y Cauca

Variable		RÍO EJIDO		RÍO MOLINO		RÍO CAUCA	
		TB	CD	TB	CD	TB	CD
Número de Froude	Media	-22.7%		-18.2%		-21.4%	
	Desv. est	34.8%		50.0%		25.0%	
	Máximo	-13.2%		6.3%		1.0%	
	Mínimo	-88.9%		-68.0%		-37.9%	
Máxima profundidad del agua (m)	Media	-44.3%		-20.1%		-9.5%	
	Desv. est	35.2%		40.0%		47.2%	
	Máximo	3.1%		27.2%		19.9%	
	Mínimo	-67.6%		-43.2%		-27.4%	
Ancho de la superficie del agua (m)	Media	532.7%		200.9%		158.6%	
	Desv. est	480.8%		217.4%		271.6%	
	Máximo	179.1%		108.8%		168.8%	
	Mínimo	117.2%		92.8%		30.4%	
Velocidad de flujo (m/s)	Media	-48.0%		-39.3%		-36.5%	
	Desv. est	-10.8%		18.2%		1.0%	
	Máximo	-21.9%		-25.7%		-6.8%	
	Mínimo	-97.3%		-66.4%		-57.1%	

CD: Cartografía digital, TB: Topobatimétrico

Fuente: Propia

Los valores que se presentan en la tabla 13, indican el porcentaje de diferencia entre los dos modelos, donde los porcentajes positivos representan que los valores del modelo cartográfico digital son superiores al modelo topobatimétrico y los porcentajes negativos representan que los resultados del modelo topobatimétrico son superiores al modelo cartográfico digital; de esta forma y observando los resultados de las variables, se tiene que para la media del número de Froude, el modelo topobatimétrico es superior al cartográfico digital, con un promedio del 21% para los tres ríos. La máxima profundidad presenta las mismas condiciones del número de Froude, para su media, pero la diferencia porcentual entre los dos modelos disminuye a medida que el cauce es mayor, es así como en el río Ejido se tiene 44.3%, en el río Molino 20.1% y para el río Cauca 9.5%.

Para los resultados de la media del ancho de superficie del agua, se tienen los mayores porcentajes de diferencia con valores de 532.7%, 200.9% y 158.6% para los ríos Ejido, Molino y Cauca respectivamente; similarmente a los resultados de

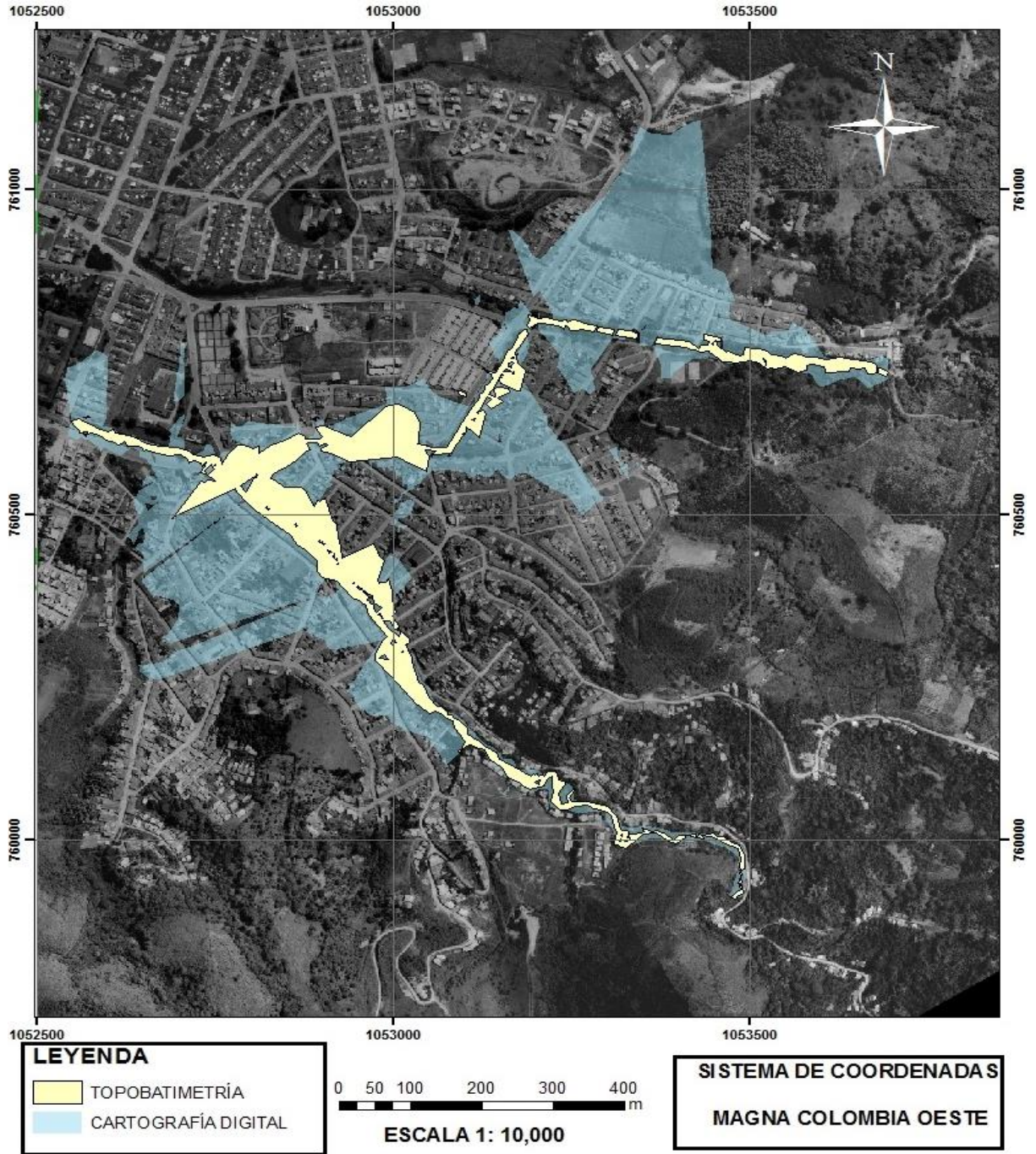
máxima profundidad del agua, en el que la diferencia entre los modelos disminuye, teniendo en cuenta que pasa de 532.7% en el río Ejido a 158.6% para el río Cauca. Continuando con la media de la velocidad de flujo se muestra que en el topobatimétrico los resultados son mayores a los que presenta la cartográfica digital con diferencias del 48%, 39.3% y 36.5% para los ríos Ejido, Molino y Cauca, respectivamente.

Es evidente un mejor comportamiento de los resultados cuando el estudio se hace en un cauce mayor, pues se minimiza el efecto de la separación entre curvas de nivel y entre secciones transversales.

9.3 COMPARACIÓN DE LAS MANCHAS DE INUNDACIÓN GENERADAS EN LOS CAUCES EJIDO, MOLINO Y CAUCA

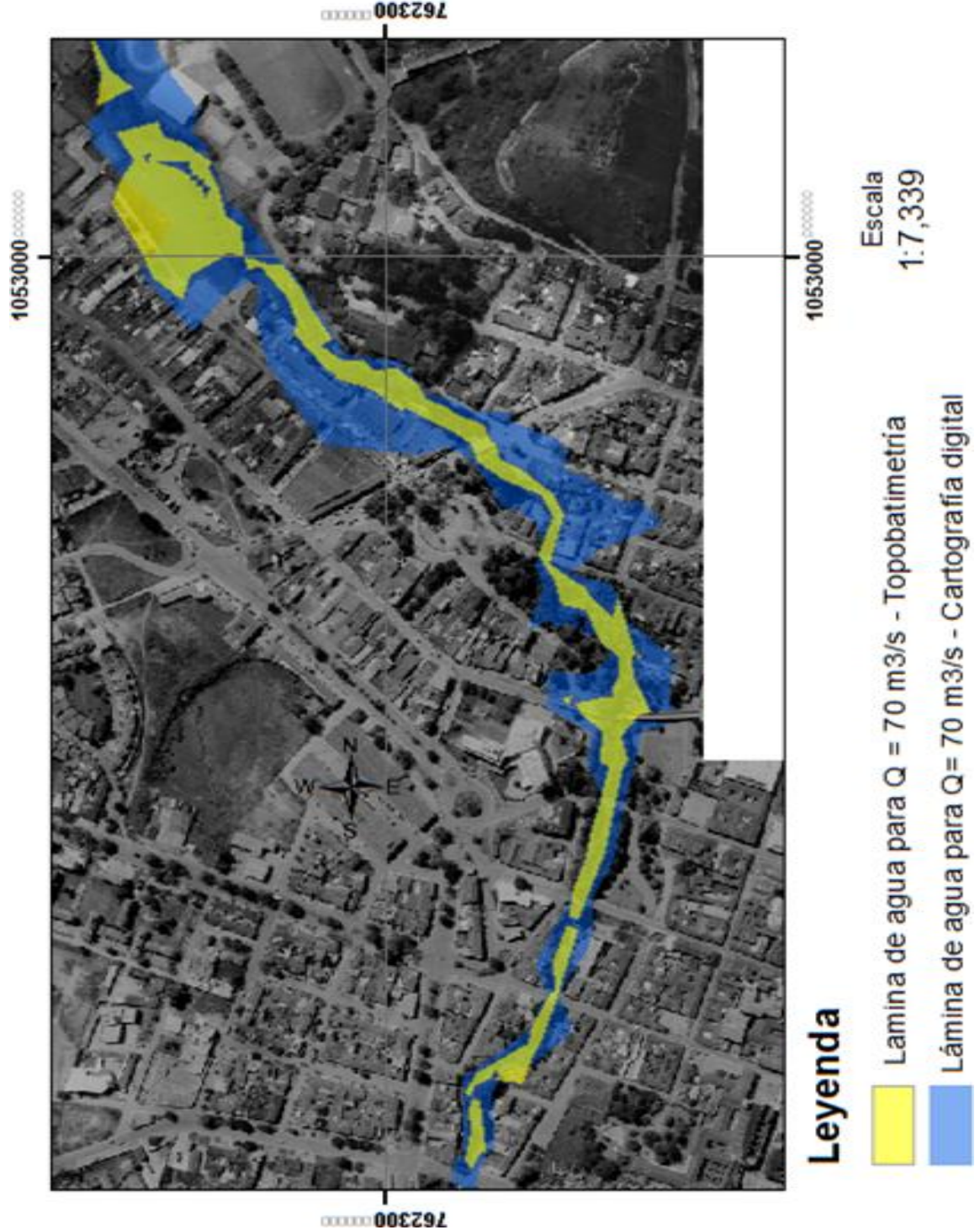
Tomando los resultados de estudios ya realizados en los ríos Ejido y Molino junto con el del río Cauca, se hace una comparación de las manchas de inundación tanto para el modelo cartográfico digital como para el topobatimétrico, considerando un período de retorno común de 30 años.

Figura 38 Mancha de inundación río Ejido Tr=30años



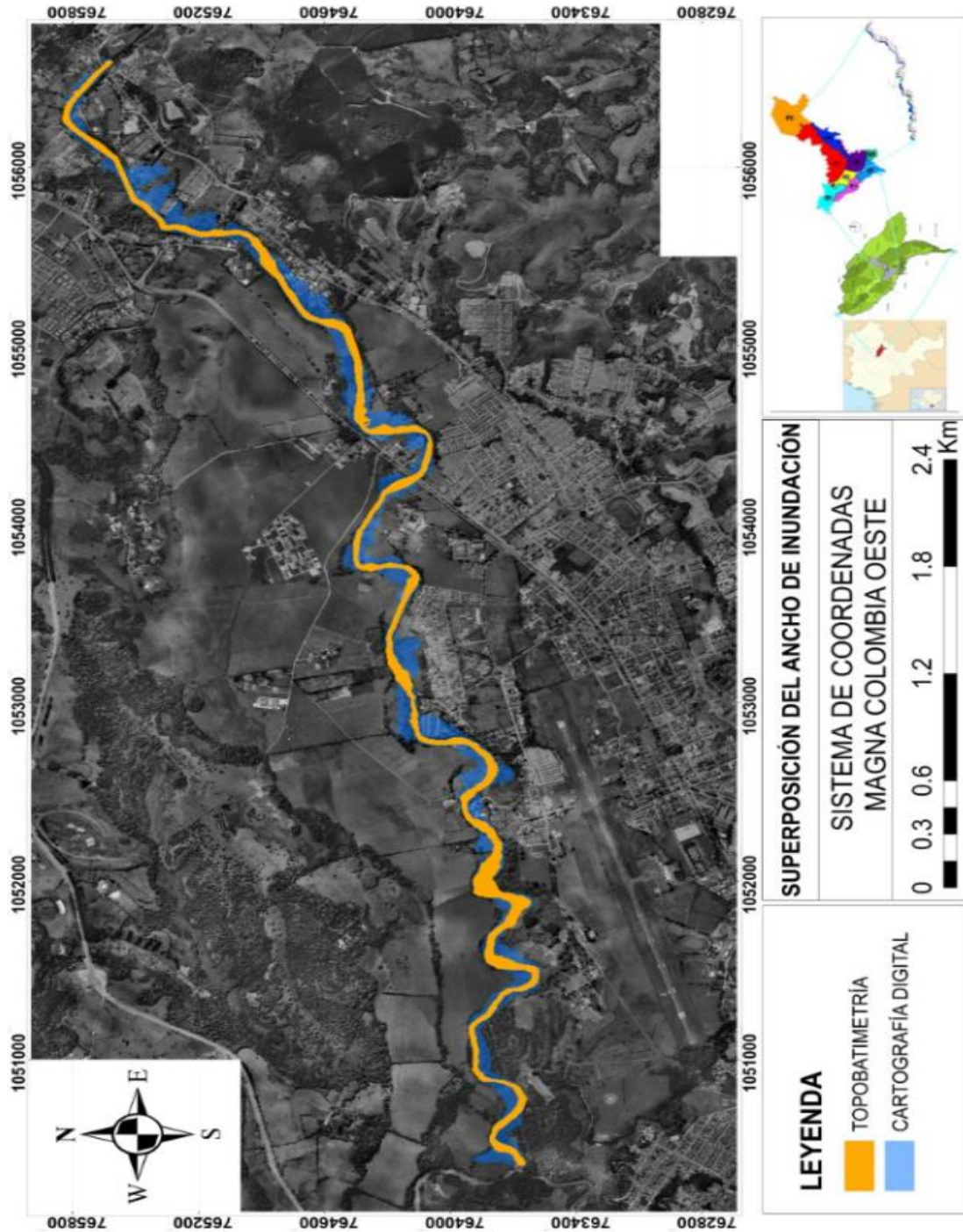
Fuente: (Rojas & Sons, 2017)

Figura 39 Manchas de inundación río Molino Tr=30 años



Fuente: (Calvache & Pérez, 2016)

Figura 40 Manchas de inundación río Cauca Tr=30 años

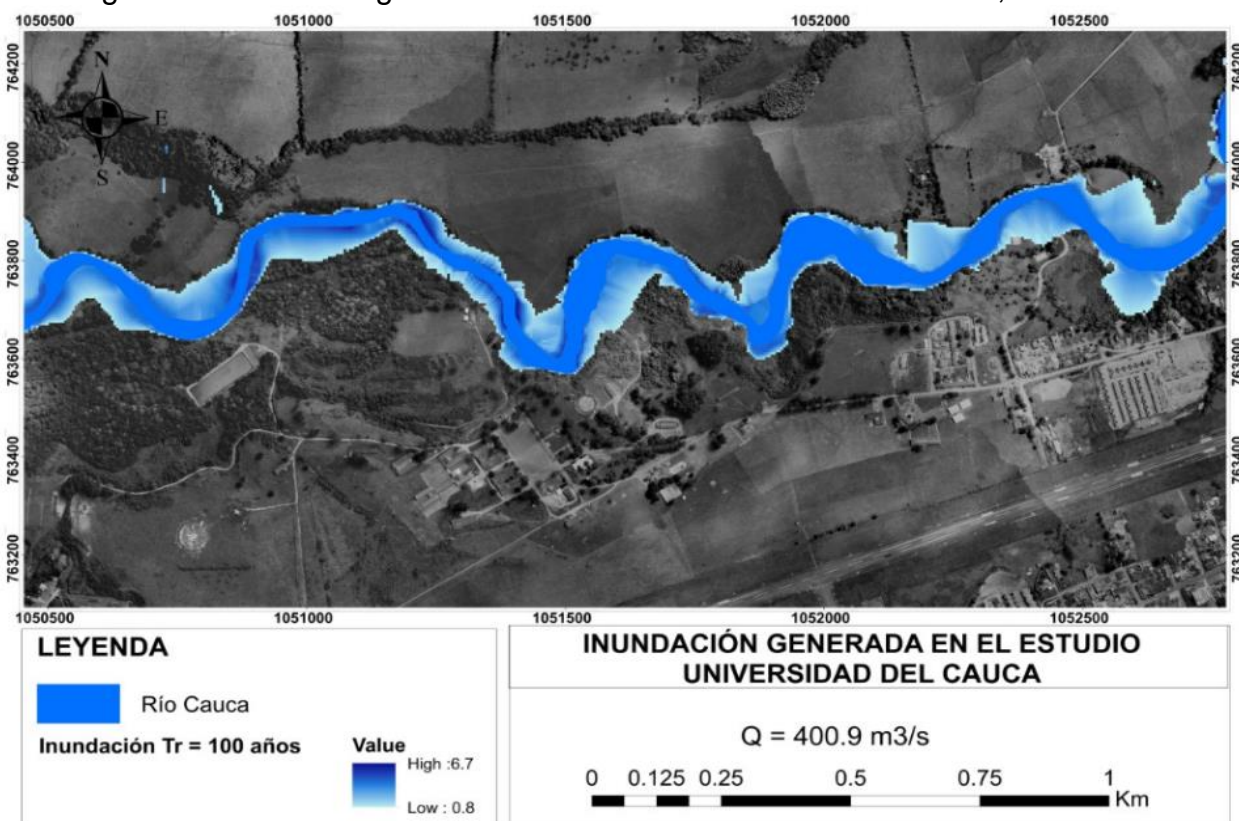


Fuente: Propia

9.4 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL RÍO CAUCA CON LOS OBTENIDOS POR UN ESTUDIO DE FINDETER

Aprovechando resultados obtenidos en un estudio sobre vulnerabilidad climática y riesgo de desastre usando cartografía digital, financiado por FINDETER y otras entidades para la ciudad de Popayán, se compara a continuación un tramo del río Cauca comprendido entre la urbanización La Cabaña y aguas arriba de la unión con el río Molino en un sector aledaño al batallón José Hilario López; estos puntos tienen coordenadas planas aproximadas del cauce principal: E=1052776.18, N=763900.72 y E=1050510.74, N=763737.87, respectivamente. Las manchas de inundación se generaron para un tiempo de retorno de 100 años al que corresponde un caudal de 306.50 m³/s para el estudio de FINDETER (FINDETER Y BID, 2017), y de 400.9 m³/s para un estudio realizado por la Universidad del Cauca (Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca, 2015). En las figuras 41 y 42 se presentan las zonas de inundación generadas por los dos estudios mencionados.

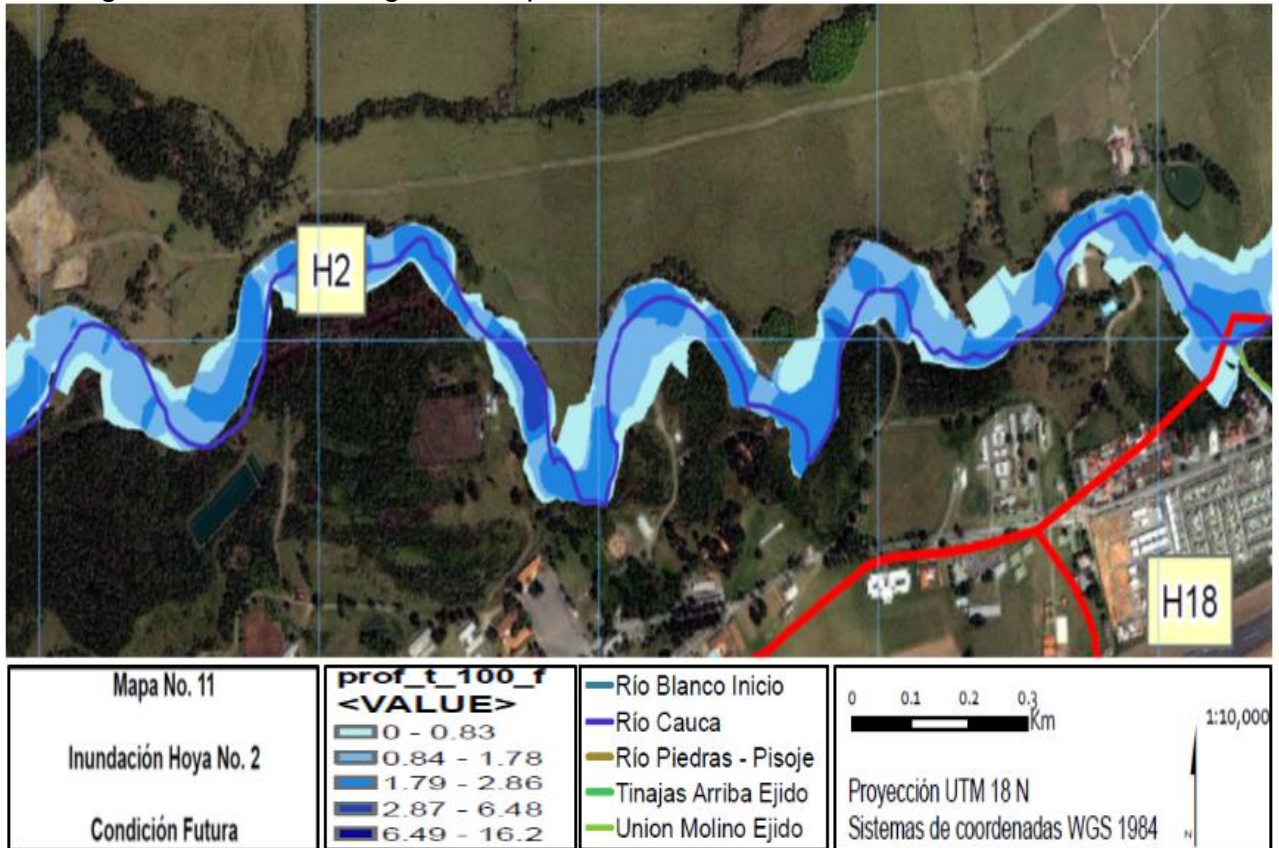
Figura 41 Inundación generada en estudio Universidad del Cauca, Q=400.9 m³/s



Nota: los valores indican profundidades del flujo

Fuente: Propia

Figura 42 Inundación generada por estudio FINDETER, $Q=306.5 \text{ m}^3/\text{s}$



Fuente: Modificado (FINDETER Y BID, 2017)

Se observa que las manchas de inundación tienen gran similitud en la mayor parte de los lugares, siendo algo mayores en la investigación llevada a cabo en la Universidad del Cauca puesto que el caudal con el que se trabaja es mayor.

10 LIMITACIONES DEL ESTUDIO

La cartografía digital suministrada por la Alcaldía de Popayán para esta investigación cuenta con curvas de nivel cada 2.0 m, a partir de la cual se generó un TIN que permitió realizar una buena delimitación del cauce en planta para el río Cauca, excepto en algunos sectores en las partes planas, en las que se tuvo que recurrir a las fotos aéreas y al mapa predial para poder definirlo. Cauces como el del río Ejido, si resultaron más difíciles de caracterizar, (Rojas & Sons, 2017).

El modelo cartográfico digital que cuenta con curvas de nivel cada 2.0 m, aunque permite una buena caracterización de las secciones transversales para el caso del río Cauca, se hacen necesario generar curvas de nivel con menor separación para mejorar los resultados en la simulación cartográfica digital, especialmente para el caso de cauces más pequeños como el Ejido y el Molino, (Calvache & Pérez, 2016) y (Rojas & Sons, 2017), un modelo digital con más detalle.

Las secciones transversales del modelo topobatimétrico original proporcionadas por la Alcaldía de Popayán están muy espaciadas, las cuales fueron interpoladas en el HEC-RAS para mejorar los resultados de la simulación hidráulica. Sin embargo, es posible que estas secciones interpoladas no representen de manera precisa la realidad, especialmente en zonas de curvas del río. El criterio general usado es que en tramos rectos y homogéneos, las secciones transversales pueden ser más espaciadas, requiriéndose menos espaciamiento en tramos curvos, en los cuales se requieren como mínimo tres secciones transversales. Este criterio se cumplió para el río Cauca. Es de aclarar que el software de hidráulica HEC-RAS, requiere muchas secciones transversales dependiendo de las características del río, lo que haría inviable económicamente su uso por la cantidad de información topográfica. Por otra parte, se hicieron observaciones de campo para verificar el coeficiente de rugosidad de Manning, los bordes del cauce y las zonas obstruidas o no al flujo –leaves- en el tramo estudiado del río Cauca.

Las fotos aéreas usadas son anteriores a la cartografía digital disponible. Sin embargo, se nota que el cauce del río Cauca se ha mantenido estable a lo largo del tiempo.

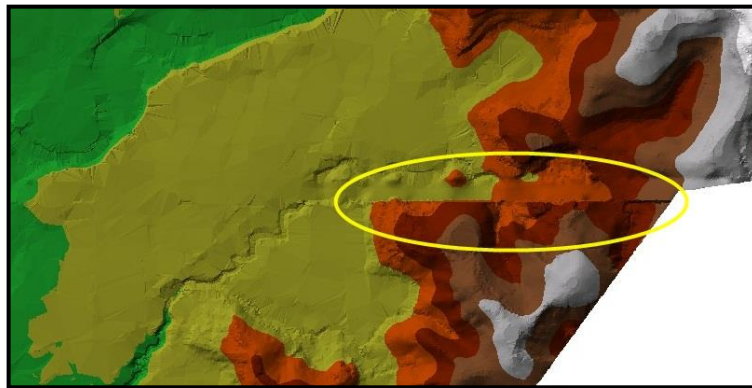
El TIN a partir de información topobatimétrica suministrado por el municipio de Popayán no es apto para el mapeo de las zonas de inundación y con el fin de corregir los problemas generados en anteriores trabajos, se optó por generar un nuevo TIN usando todas las secciones transversales incluyendo tanto las tomadas en campo como las interpoladas en el HEC-RAS.

Los resultados obtenidos en esta investigación no fueron calibrados para los caudales de creciente por falta de información de niveles de inundación realmente tomados en campo y, por lo tanto, no se recomienda su uso para efectos de toma de decisiones para zonificación de inundaciones o planes de ordenamiento territorial. Si se hizo una calibración previa a partir del caudal para un período de retorno de 1.5 años, cuyos niveles del agua coincidieron en gran medida con los bordes del cauce principal, como se esperaba.

11 OBSERVACIONES

En la generación del TIN para el tramo del río Cauca, se detectó una inconsistencia que se ilustra en la figura 43, pero que no afecta los resultados de este estudio pues está alejada del tramo en análisis. Sin embargo, se trató de encontrar explicaciones y soluciones al problema consultado a expertos quienes opinan que la barrera que se presenta puede deberse a errores de origen de los datos y/o a curvas de nivel muy próximas que lleven a errores en el proceso de triangulación. Se sale del alcance de este estudio entrar a revisar y corregir información de origen.

Figura 43 Error en la generación del TIN del modelo cartográfico digital



Fuente: Propia

Para el montaje de las manchas de inundación de cada uno de los modelos cartográfico digital y topobatimétrico, se debe usar el TIN correspondiente a cada modelo.

La interpolación entre secciones transversales se realiza de forma distinta en los programas ArcGIS y HEC-RAS, pudiéndose hacer en el primero si se cuenta con muy buena información; de lo contrario, es preferible interpolar las secciones transversales directamente en el HEC-RAS, siguiendo criterios y conocimientos de hidráulica.

Un parámetro importante en este tipo de estudios es definir la separación entre secciones transversales. Una práctica común es espaciarlas entre 5 y 10 veces el ancho del cauce en tramos rectos y entre 1 y 2 veces en tramos curvos. Si por ejemplo, se considera un ancho del río Cauca de 20 m en la zona de estudio, la separación óptima sería entre 100 y 200 m para tramos rectos y entre 20 y 40 m para tramos curvos. Por otro lado, la guía metodológica para el desarrollo del

sistema nacional de cartografía de zonas inundables de España, (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Y Marino, 2011), presenta las siguientes fórmulas para definir la distancia entre secciones transversales:

$$\Delta x < 20B \quad (1)$$

$$\Delta x < \frac{1}{2S_0} \quad (2)$$

$$\Delta x < 0.2 \frac{h}{S_0} \quad (3)$$

Donde:

Δx : distancia entre secciones

B : ancho de la sección

S_0 : pendiente del tramo

h : calado o profundidad del agua

Aplicando estas fórmulas para el río Cauca y usando valores medios, se tienen los siguientes resultados para la distancia entre secciones transversales:

$$B = 20 \text{ m}, S_0 = 0.01043877 \text{ m/m}, h = 2 \text{ m}$$

$$\Delta x < 20 * 20m = 400m \quad (1)$$

$$\Delta x < \frac{1}{2 \times 0,01043877} = 48m \quad (2)$$

$$\Delta x < 0.2 \frac{2}{0,01043877} = 38m \quad (3)$$

Se observa que la localización de las secciones transversales, debe ser inferior a los 400 m si se tiene en cuenta el ancho promedio del río; inferior a 48 m si se considera la pendiente y menores que 38 m teniendo en cuenta la profundidad y la pendiente.

De todas las posibilidades presentadas, resulta más recomendable usar la ecuación que involucra profundidad y pendiente. De acuerdo con los resultados obtenidos, la separación entre secciones transversales usada para el río Cauca es buena al estar cada 25 m en promedio.

12 CONCLUSIONES

El procesamiento de la información cartográfica digital brindada por la Alcaldía de Popayán logró procesarse mediante los programas de Sistemas de Información Geográfica: ArcGis y HEC-GeoRAS, siguiendo los protocolos requeridos, y haciéndose necesario el uso de fotos aéreas y el mapa predial para realizar ajustes en tramos donde la caracterización del río no era buena.

Se generaron parámetros hidráulicos como: velocidad del agua, número de Froude, alturas y anchos de inundación, haciendo la simulación hidráulica para flujo permanente con el HEC-RAS, lo que permitió hacer la comparación y análisis de los resultados obtenidos a partir de los modelos cartográfico digital y topobatimétrico.

La cartografía digital es factible de ser usada para simulación de manchas de inundación por la cobertura que puede brindar, pero el nivel de detalle que pueda brindar depende de su precisión y el tamaño del cauce. En el caso de la ciudad de Popayán, se evidenció mejor comportamiento para el río Cauca que para el río Molino y sistema Ejido; por otra parte, las intervenciones antrópicas como puentes, muros y box culverts, se dificulta introducirlas en el modelo digital, aumentando el nivel de error en cuanto a los resultados finales.

Se realizó el análisis estadístico comparativo de los parámetros hidráulicos para los ríos Ejido, Molino y Cauca obteniendo las mismas tendencias de los parámetros evaluados: número de Froude, ancho de inundación, profundidad máxima y velocidad del flujo para los diferentes períodos de retorno, observándose que los coeficientes de variación y porcentajes de diferencia entre el modelo topobatimétrico y cartográfica digital disminuyeron a medida que el cauce aumentaba de tamaño.

Las intervenciones antrópicas y el pequeño tamaño de los cauces influyeron mucho en los resultados para el río Ejido y Molino en donde las manchas generadas y los parámetros hidráulicos, presentan grandes diferencias para los dos modelos, pero disminuyen para el río Cauca.

Se presentó mayor consistencia en los parámetros hidráulicos del modelo topobatimétrico y cartográfica digital para el río Cauca que para los ríos Ejido y Molino, dado que el tamaño del cauce es mayor y el nivel de antropización bajo, por lo que se pudo realizar una mejor caracterización del cauce y obtener información geométrica más congruente.

El TIN generado por el grupo de estudio a partir de la información topobatimétrica del HEC-RAS 5.0.3 tiene una mejor definición en comparación con el brindado por la Alcaldía para el tramo del río Cauca, pues en este trabajo se usaron todas las secciones transversales incluyendo las interpoladas, lo que permitió mejorar la caracterización del río en planta y por lo tanto un mejor mapeo de las zonas de inundación.

La metodología para la simulación de inundaciones con la información cartográfica digital brindada por la Alcaldía de Popayán, puede ser implementada como estudio preliminar y no definitivo, ya que solo se cuenta con curvas de nivel cada 2 metros y de acuerdo con el Miniterio de Ambiente y Desarrollo Sostenible “se recomiendan curvas entre 0.15 y 0.50 m para estudios de amenaza por inundación” (Miniterio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013), información no disponible para nuestra región.

Es recomendable trabajar con información topobatimétrica cuando se requieren estudios de precisión para tramos cortos, menos de 2 km, limitando el uso del modelo digital del terreno cuando tenga muy buena calidad y se trate de tramos largos. Es claro que nada supera la precisión que representa la topobatimetría medida en campo, pero desafortunadamente, a veces se limita su uso debido a los costos y riesgos que acarrea.

Con el modelo digital del terreno brindado por la alcaldía de Popayán (curvas de nivel cada dos metros) se obtuvieron mejores resultados para el río Cauca, el cual tiene un ancho promedio entre 20 y 40 metros, caso contrario de cauces menores como los ríos Ejido y Molino, en los que se requiere un modelo digital con curvas del nivel de menor diferencia espacial (entre 0.15 y 0.5 m).

13 RECOMENDACIONES

El documento de Zonificación de Amenaza por Inundación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013) recomienda: “Se requiere información hidrológica e hidráulica que permita obtener los niveles esperados para distintos períodos de retorno con muy buena precisión y la topografía detallada de la zona de influencia de la inundación, ambos con resolución vertical mayor a 0.1 metros y una resolución horizontal acorde con el tamaño del cauce. La información con éstas características difícilmente se puede obtener para el Plan de Manejo y Ordenamiento de una Cuenca (POMCA). Cuando los insumos de información no tienen una calidad suficiente es inútil utilizar técnicas muy complejas y es irresponsable zonificar amenazas con ello”. (pág. 37). En la práctica se suele trabajar con cartografías con curvas de nivel en un rango entre 0.15 y 0.50 metros.

Se recomienda seguir la metodología planteada en el anexo I que incluye las instrucciones básicas que ilustran el procedimiento seguido en este trabajo; de igual manera, se incluyen en el anexo J videos de las etapas de: preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento de la información cartográfica digital y topobatimétrica con ayudas de sistemas de información geográfica y la realización de las simulaciones hidráulicas.

Para definir la separación óptima entre secciones transversales se sugiere tener varios criterios que incluyan objetivo del estudio, precisión requerida, características del cauce y aspectos económicos.

Además de la simulación hidráulica, se pueden realizar también estudios geomorfológicos a partir de interpretación de fotografías aéreas e imágenes de satélite, como alternativa cuando no se cuenta con recursos económicos suficientes para realizar los levantamientos topobatimétricos detallados. Estudios geomorfológicos que incluyan dataciones para definir machas de inundación, si podrían resultar tan costosos como la generación de los datos para las simulaciones hidráulicas.

Para poder trabajar conjuntamente con modelos digitales y topobatimétricos, es necesario que se tenga el máximo rigor en los amarres a las redes del Marco Geocéntrico Nacional de Referencia del Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Es importante aprovechar el conocimiento local y las herramientas computacionales desarrolladas e implementadas dentro de la Universidad del Cauca, así como las personas que se están capacitando en diferentes áreas académicas, evitando tener que recurrir a otras entidades fuera del territorio.

Realizar otros trabajos de grado sobre modelación de avenidas torrenciales incluyendo remoción en masa, para estudiar fenómenos como los últimos acontecimientos ocurridos en Mocoa (Putumayo) y Caldon (Cauca).

Usar otras herramientas computacionales más actualizadas y de versión libre como el HEC-RAS 5.0.3 y el QGIS, que son importantes en el desarrollo de aprendizaje para la modelación hidráulica e hidrológica, respectivamente.

Realizar calibración de cuencas con el fin de establecer parámetros hidrológicos propios para la región.

Realizar calibración de ríos con el fin de establecer con certeza las machas de inundación.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Popayán. (2002). POT Plan de ordenamiento territorial de Popayán: Acuerdos 06 y 07 de 2002. *Documentos Técnicos: Ambiental, Componente Urbano, Clasificación del Suelo, Espacio Público, Vivienda, Plan Vial y Social*. Popayán, Cauca, Colombia.
- Alcaldía de Popayán. (2017). *Alcaldía de Popayán*. Recuperado el 8 de septiembre de 2017, de <http://www.popayan.gov.co/ciudadanos/popayan/nuestra-ecologia>
- Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca. (2015). Convenio 20131800008927 ALCALDIA-UNICAUCA. *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*. Popayán, Colombia.
- Aragón, F. (2014). Inundaciones en zonas urbanas de cuencas en América Latina. *Soluciones Prácticas* (págs. 29-31). Lima: ZURICH.
- Arbelaez, A., Guevara, M., González, L., & Gallardo, C. (2004). Caudal formador en la Cuenca Cauca del Departamento del Cauca. Trabajo de investigación participante de la IV convocatoria de apoyo a proyectos de investigación y desarrollo tecnológico, Universidad del Cauca.
- Avendaño, A., & Cadena, Y. (2011). *Uso de Sistemas de información geográfica en la determinación de amenazas por inundación en el municipio de Chía*. Bogotá: Universidad católica de Colombia.
- Bernal, I. (2013). Implementación de una herramienta basada en un Sistema de Información Geográfica para el ordenamiento de la propiedad rural en México. México, D.F., México.
- Bladé, E., Sánchez, M., Sanchez, H., & Gómez, N. (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable una visión a partir del modelo HEC-RAS* (Primera ed.). Barcelona: Edicions UPC.
- Calvache, F., & Pérez, D. (2016). Simulación de Inundaciones a partir de Cartografía Digital y de Topobatimetría.
- Cardenas y Aldo. (s.f.). Aplicación de sistemas de información geográfica para el modelamiento de zonas en riesgo de inundación, caso estudio río Lurin.
- Checa W., et al. (2015). Modelación de capacidad de inundación de un río en Cárpatos polacos; comparación de las condiciones del tramo canalizados y sin intervención. *Geomorfología*, 272, 32-42.
- Chow, A., Maidment, R., & Mays, L. (1998). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- CLOPAD, C. I. (2003). *Plan para la atención de emergencias en el municipio de Popayán*. Popayán.
- EFE, E. P. (10 de Abril de 2017). Incrementarán las lluvias durante Semana Santa, dice Ideam. *El País*.
- Encalada, J., & Jara, R. (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: Universidad de Cuenca.
- Espinosa. (2001). Erupciones históricas de los volcanes colombianos (1500-1995). En Espinosa, *Erupciones históricas de los volcanes colombianos (1500-1995)*. Academia Colombiana de Ciencias Exactas y Naturales (págs. 83-132). Bogotá: Colección Jorge Álvarez Lleras. Edición cofinanciada por la Universidad del Quindío No.16.

- ESRI. (2011). *ArcGIS Resources*. Recuperado el 22 de abril de 2017, de <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n000000t000000.htm>
- FINDETER Y BID. (2017). *Estudios de base Popayán. Informe Inicial. Módulo 2. Estudio vulnerabilidad climática y Riesgo de desastre*. Popayán.
- García, R., & Conesa, C. (2011). Estimación de caudales de avenidas y delimitación de áreas inundables mediante métodos hidrometeorológicos e y técnicas s.i.g., estudio aplicado de la Región de Murcia. *Papeles de Geografía*, 123.
- Giraldo, E. Z. (2015). Análisis comparativo de la modelación hidráulica entre HEC-RAS y CCHE-2D, aplicado a un cauce aluvial. Caso estudio: río Suarez (Boyacá).
- Grainger, H. M. (2006). Modelación hidráulica e hidrológica para determinar la vulnerabilidad a inundaciones en un tramo comprendido entre los poblados Guápiles y la Rita.
- IDEAM, I. d. (2017). Mapas de amenaza por inundación. *Actividades del centro nacional de modelación*.
- Institución Educativa, Alejandro Humbolt. (2012). *Institución Educativa, Alejandro Humbolt, sede Pueblillo*. Recuperado el 16 de Junio de 2017, de (Imagen), Blog Institución Educativa, Alejandro Humbolt, sede Pueblillo: <http://docentespueblillo.blogspot.com.co/>
- Marbello, P. (5 de Junio de 2005). *Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado el 5 de Agosto de 2017, de Portal Web Repositorio institucional: <http://www.bdigital.unal.edu.co/12697/68/3353962.2005.Parte%2013.pdf>
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural Y Marino. (2011). Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables. Madrid, España: Secretaria general técnica. Recuperado el 5 de abril de 2017, de http://www.mapama.gob.es/es/agua/publicaciones/guia_snczi_baja_optimizada_tcm7-461442.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). Proyecto de Implementación de la guía para el acotamiento de rondas hídricas en tres corrientes priorizadas y proponer metodologías de amenaza, vulnerabilidad y riesgo en cuencas. Informe final: Metodología para la evaluación del riesgo en los POMCAS. *Universidad Nacional de Colombia*, 2-152.
- Montenegro, L. (2011). *Descripción física de los puertos*. Topografía y Batimetría.
- Muhammad, K., Faizan, A., Tariq, S., Mohammed, S., Khurram, S., & Anwaar, A. (2015). Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcGIS: A Case Study of Kabul River. *CrossMark*, 1376-1390.
- Oliveras, J. (25 de Marzo de 2013). *HidroJING*. Recuperado el 02 de Agosto de 2017, de HidroJING: <http://www.hidrojing.com/condiciones-de-contorno-en-hec-ras/>
- Orío, M. (2011). *Estudio hidrológico e hidráulico del Barranco Torres a su paso bajo puente del tranvía Villajoyosa-Benidorm*. Valencia. Valencia.
- Peréz Olaya, N. (2015). *Estudio hidráulico para la determinación de zonas inundables y análisis valorado de soluciones de protección en el municipio de Balmaseda, Vizcaya, comunidad autónoma del país Vasco*. Alicante. Alicante.
- Pérez, A., & Vanegas, L. (2016). *Estudio hidrológico e hidráulico en la zona baja de la cuenca del río Frío en el municipio de Chía*. Universidad Católica de Colombia, Bogotá. Recuperado el 2 de Octubre de 2017
- Pérez, G. (1996). *Enciclopedia colaborativa en la red cubana*. Recuperado el 10 de Junio de 2017, de ECuRed: https://www.ecured.cu/M%C3%A9todo_de_modelaci%C3%B3n
- Pérez, N. (2015). *Estudio hidráulico para la determinación de zonas inundables y análisis valorado de soluciones de protección en el Municipio de Balmaseda, Vizcaya, Comunidad autónoma del país Vasco*.

- Quiroga, V., Kure, S., Udo, K., & Mano, A. (2016). Aplicación de simulación numérica 2D para analizar la inundación de febrero febrerode 2014 en la Amazonia Boliviana: aplicación del nuevo HEC-RAS versión 5. *RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua*, 25-33.
- Quizlet. (2017). Recuperado el 12 de Junio de 2017, de <https://quizlet.com/191632801/los-rios-de-colombia-flash-cards/>
- Rodríguez, C. (28 de Noviembre de 2012). *bdigital Portal de Revistas UN*. Recuperado el 23 de Junio de 2017, de *bdigital Portal de Revistas UN*: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/36284/42930>
- Rojas, A. (29 de 05 de 2009). *Wikipedia commons*. Recuperado el 19 de Agosto de 2017, de Wikimedia commons: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Popayan-Mapa_Rural.svg
- Rojas, C., & Sons, E. (2017). Simulación de inundaciones a partir de cartografía digital y de topobatimetría en un sector del Río Ejido.
- Santo, A. C., Cubillos, C., & Vargas, A. (Mayo de 2008). Modelación hidráulica d un sector de río caudaloso con derivaciones empleando HEC-RAS. *Avances en Recursos Hidráulicos*(17), 43-54.
- Sarría, F. (4 de Febrero de 2018). *Universidad de Murcia*. Recuperado el 5 de Febrero de 2018, de Universidad de Murcia: <http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2007). Amenaza, vulnerabilidad, riesgo. *Aunar esfuerzos técnicos, humanos, administrativos y económicos para la formulación del plan de ordenación y manejo de la Cuenca del río Salitre en el perímetro urbanos del distrito capital*, (págs. 596-598). Bogotá.
- Timbe , L., & Timbe, E. C. (2012). Mapeo del peligro de inundación en ríos de montaña, caso de estudio del. *MASKANA, III*, 96.
- Torres, E., & González, E. (2010). *Aplicación del modelo de simulación hidráulica HEC-RAS para la cuenca media del río Bogotá*. Bogotá.
- Universidad Autónoma de Madrid. (2010). Introducción al SPSS, manejo y procesamiento básico de datos básicos en SPSS. Madrid, España.
- US Army Corp of Engineers. (2017). *Hydrologic Engineering Center*. Recuperado el 04 de Junio de 2017, de CEIWR-HEC Organizational Chart: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>
- UTADEO. (2017). *Universidad de Bogotá José Tadeo Lozano*. Recuperado el 5 de septiembre de 2017, de UTADEO: <http://www.utadeo.edu.co/es/link/maestria-en-modelado-y-simulacion-mms/26106/layout-1/que-es-modelado-y-simulacion-ms>