

# **El modelo IBER como herramienta en el análisis de casos de riesgo por inundación**

Sandra Marcela Orduz Berdugo

Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Hidroambiental

Universidad Santo Tomás de Tunja

## **Nota del Autor**

Este trabajo cuenta con la revisión y VoBO del PhD Carlos Caro, perteneciente de la facultad de Ingeniería Civil de Universidad Santo Tomás de Tunja.

Cualquier mensaje u observación con respecto a este informe debe ser enviado a la facultad de Ingeniería Civil de Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia o al correo [posgradosing@ustatunja.edu.co](mailto:posgradosing@ustatunja.edu.co)

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	5
2.	MARCO CONCEPTUAL.....	6
2.1.	MODELIZACION HIDRODINAMICA.....	6
2.2.	LA HIDRODINÁMICA EN INUNDACIONES.....	6
2.3.	MODELO HIDRODINÁMICO BIDIMENSIONAL IBER.....	7
2.3.1.	Módulo de Hidrodinámica.....	8
2.3.2.	Módulo de Turbulencia.....	8
2.3.3.	Modulo Transporte de sedimentos.....	8
2.3.4.	Módulo de calidad del agua.....	8
2.3.5.	Módulo de procesos hidrológicos.....	9
2.3.6.	Módulo Hábitat.....	9
2.4.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS MODELO IBER.....	9
2.4.1.	Modelo de Terreno.....	9
2.4.2.	Condiciones de contorno y coeficiente de rugosidad.....	10
2.4.3.	Incorporación de estructuras.....	10
2.4.4.	Presentación de resultados.....	10
3.	ANÁLISIS DE CASOS DE ESTUDIO: USO DEL MODELO IBER EN ESTUDIOS DE INUNDABILIDAD.....	12
3.1.	CASO ESTUDIO 1. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL TRAMO MEDIO DEL RÍO CTALAMOCHITA, PROVINCIA DE CÓRDOBA.....	12
3.1.1.	Resumen.....	12
3.1.2.	Características de la zona de estudio.....	12
3.1.3.	Metodología.....	14
3.1.4.	Resultados y discusión.....	14
3.2.	CASO ESTUDIO 2. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LA DETERMINACIÓN DE ALERTAS TEMPRANAS POR INUNDACIÓN EN LA ECO REGIÓN DE LA MOJANA - NECHÍ, ANTIOQUIA.....	17
3.2.1.	Resumen.....	17
3.2.2.	Zona de estudio.....	17
3.2.3.	Metodología.....	18
3.2.4.	Resultados y discusión.....	19
3.2.5.	Conclusiones del estudio.....	22

3.3.	CASO ESTUDIO 3. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES POR MÁXIMAS AVENIDAS DEL RIO QUÍNUAS EN EL CENTRO POBLADO LA QUISPA .....	23
3.3.1.	Resumen .....	23
3.3.2.	Zona de estudio.....	23
3.3.3.	Metodología.....	24
3.3.4.	Resultados y discusión .....	24
4.	CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN .....	28
5.	BIBLIOGRAFIA.....	29

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Interacción de módulos en modelo IBER.....	7
Figura 2. Visualización en el módulo de pos- proceso del mapa de máximos de velocidades del agua.....	11
Figura 3. Ubicación Geográfica del río Tercero.....	13
Figura 4. Imagen satelital del área de estudio correspondiente al río Tercero en su paso por la ciudad de Bell Ville.....	13
Figura 5. Modelo Digital del Terreno para representar la batimetría del río Tercero en su paso por la ciudad de Bell Ville.....	14
Figura 6. Resultados de calado de agua en la sección del dique Bell Ville obtenidos en campo y en los modelos numéricos unidimensional HECRAS y bidimensional IBER. ....	15
Figura 7. Esquema de áreas coloreadas de la velocidad media en el plano en el río Ctlamochita en su paso por la ciudad de Bell Ville. Izquierda Superior: Q = 196 m <sup>3</sup> /seg, Derecha Superior: Q = 225 m <sup>3</sup> /seg, Izquierda Inferior: Q = 254 m <sup>3</sup> /seg y Derecha Inferior: Q = 233 m <sup>3</sup> /seg. ....	16
Figura 8. Esquema de áreas coloreadas de la altura de agua en el río Ctlamochita en su paso por la ciudad de Bell Ville. Q = 249 m <sup>3</sup> /seg modelo Iber.....	16
Figura 9. Localización geográfica municipio de Nechi .....	17
Figura 10. Delimitación área de estudio para la modelación hidrodinámica .....	18
Figura 11 Generación de escenarios.....	20
Figura 12. Resultados calado escenario 1. (PR: 15 años).....	20
Figura 13. Resultados calado escenario 2. (PR: 100 años).....	21
Figura 14. Resultados calado escenario 3. (PR: 500 años).....	21
Figura 15. Resultados velocidad tres escenarios .....	22
Figura 16 Análisis de amenaza por inundación.....	22
Figura 17. Imagen satelital área de estudio. Adaptado Google Earth .....	23
Figura 18. Calado en la zona de Estudio- TR=15 años. ....	25
Figura 19. Calado en la zona de Estudio- TR=25 años. ....	25
Figura 20. Calado en la zona de Estudio- TR=40 años.....	25
Figura 21. Velocidad en la zona de Estudio- TR=15 años.....	26
Figura 22. Velocidad en la zona de Estudio- TR=25 años.....	26
Figura 23. Velocidad en la zona de Estudio- TR=25 años.....	27

## 1. INTRODUCCIÓN

Para atender a los riesgos asociados a los procesos de inundación principalmente en zonas urbanas y asentamientos poblacionales, se ha hecho necesario el uso de herramientas computacionales que permitan predecir o anticipar estos fenómenos a través del análisis y consolidación de información topográfica, hidrológica, hidráulica e incluso de calidad, para generar escenarios con condiciones diferentes y que permitan la toma de decisiones de ingeniería basados en información técnica y sustentada.

Basado en lo anterior, se han desarrollado diferentes herramientas de modelización numérica del flujo del agua, que permitan el mejor ajuste entre las condiciones reales y las simuladas. Una de estas herramientas es el modelo Iber que se basa en el desarrollo de las ecuaciones St. Venant mediante el método de volúmenes finitos para representar los fenómenos hidrodinámicos que ocurren en las fuentes hídricas.

El modelo Iber, permite estudiar fenómenos cada vez más complejos ya que en la observación de la naturaleza se encuentran gran cantidad situaciones donde el flujo es bidimensional —lo que indica, que predominan las dimensiones horizontales sobre la vertical—, lo que lleva a este modelo a desarrollar esquemas bidimensionales.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, el objetivo del presente informe de investigación es presentar las características y bondades de la modelación hidrodinámica, específicamente desarrollada con el modelo bidimensional Iber, y evaluar su aplicación en tres casos de estudios reales, desarrollados en zonas geográficas diferentes, pero con un fin común, que es identificar las zonas potencialmente inundables y que puedan representar riesgo en zonas pobladas cercanas a los cauces estudiados.

## **2. MARCO CONCEPTUAL**

### **2.1. MODELIZACION HIDRODINAMICA**

Debido a que los diferentes fenómenos hidráulicos que ocurren en los cuerpos de agua son complejos, ha sido un reto resolverlos con métodos matemáticos exactos. Lo anterior, ha hecho necesario buscar mediante métodos experimentales y sustentados numéricamente, técnicas que permitan analizar y determinar las principales variables que caracterizan el flujo en cuerpos hídricos. (Santiago Ochoa, 2016)

Por lo anterior, una de las técnicas desarrolladas es la modelación hidrodinámica, que consiste básicamente en determinar los valores de las variables más importantes que permiten representar el comportamiento del flujo del agua en cauces, a partir de la resolución por métodos numéricos de ecuaciones que describen el comportamiento del mismo.

Las variables relevantes y de interés en el estudio del flujo en cauces y sus zonas de inundación son: el calado (la lámina de agua), los cambios del caudal, la elevación de la cota, la presión o la concentración de contaminantes, para flujos tanto en estado estacionarios como no estacionarios (J. Murillo, 2008).

El estudio de la hidrodinámica de un cuerpo hídrico proporciona la ventaja de valorar las causas y efectos positivos o negativos que se podrían ocasionar, ya sea por fenómenos naturales (ej. avenidas torrenciales, cambio climático, etc.) o la interacción directa del hombre con el recurso (ej. instalación obra e infraestructura). Es por esto, que hoy por hoy es posible conocer los impactos antes, durante y después de un evento que requiera ser estudiado. Con los resultados que se obtienen de las simulaciones se puede entender, predecir y controlar los procesos físicos y químicos que suceden en el cuerpo de agua y permite tomar decisiones acertadas en términos de ingeniería técnica, así como, de inversión.

### **2.2. LA HIDRODINÁMICA EN INUNDACIONES**

Las inundaciones son los desastres naturales que tienen más repercusiones socioeconómicas a escala mundial, estas, son fenómenos hidrológicos recurrentes, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente hídrica. Se producen por lluvias persistentes que generan un aumento paulatino del nivel del agua de un cauce, superando la altura de las orillas naturales o artificiales y ocasionando un desbordamiento de las aguas sobre las zonas aledañas a los cursos de agua. (IDEAM, 2021)

Para estudiar los impactos de las lluvias torrenciales que a su vez puedan generar de inundaciones en las áreas aledañas a los cauces, se utilizan modelos unidimensionales o bidimensionales. Un modelo unidimensional considera el cauce como una línea con secciones transversales donde su geometría representa los puntos de cálculo en el modelo.

Por otra parte, los bidimensionales discretizan el sistema completo como una malla formada por celdas poligonales que representa el cauce y las llanuras inundables. (Santiago Ochoa, 2016)

Los modelos evaluados en una sola dimensión brindan resultados acertados en las variables que representan el flujo en el cauce principal de una corriente, no obstante, quedan limitados para mostrar resultados de las variables en las áreas de inundación. Respecto a los modelos bidimensionales, permiten representar con mayor exactitud los parámetros tanto del cauce como de las áreas inundables, sin embargo, su requerimiento computacional es alto, lo que ha limitado su aplicación masiva.

De acuerdo a esto último, los modelos bidimensionales son una herramienta clave para prever los riesgos y anticipar la instalación de las medidas de prevención, ya sean estructurales o no estructurales, así como adoptar las mejores y más acertadas estrategias desde el punto de vista económica, social y ambiental.

Uno de los puntos clave de los modelos bidimensionales, es que permiten el acoplamiento del sistema hidráulico con sistemas de información geográfica, a través de los modelos digitales de elevación (MDE), lo que ha permitido representar con mayor exactitud la topografía terrestre y determinar la extensión y niveles de agua en las zonas subyacentes al cauce.

Si hablamos en términos de prevención, preparación y protección ante posibles inundaciones, los modelos bidimensionales permiten elaborar mapas de peligrosidad y son capaces de determinar el riesgo de inundación por diferentes eventos de lluvias.

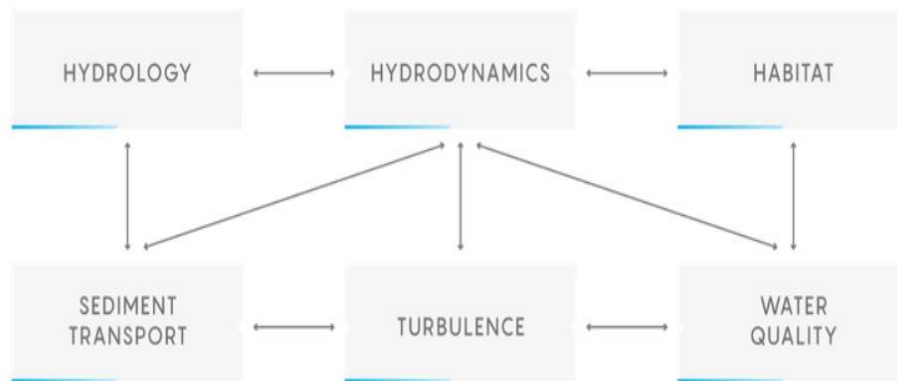
En la actualidad existen diversos programas bidimensionales comerciales con código abierto y gratuitos que posibilitan este tipo de estudios y son capaces de modelizar flujos de ríos en los que se tienen en cuenta las variaciones en las dos dimensiones. Uno de los modelos que acopla dentro de su estructura, las características antes mencionadas, y que está siendo ampliamente usado en el área de la ingeniería por ser de uso libre es el modelo IBER.

### **2.3. MODELO HIDRODINÁMICO BIDIMENSIONAL IBER**

IBER es un modelo matemático bidimensional para la simulación del flujo en ríos y estuarios desarrollado por la colaboración de diferentes centros de investigación, y promovido por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. (E. Bladé, 2014).

El modelo Iber cuenta con una serie de módulos que interactúan entre sí, actualmente, a la fecha de redacción del presente informe, el modelo cuenta con cinco módulos para su operación. Los módulos y su interacción se presentan en la Figura 1. Las características generales de cada uno se describen a continuación:

Figura 1. Interacción de módulos en modelo IBER



Fuente: (Iberaula, 2021) Recuperado: <https://www.iberaula.es>

### 2.3.1. Módulo de Hidrodinámica

El módulo hidrodinámico en Iber, resuelve las ecuaciones de conservación de la masa y las ecuaciones de momento en las dos direcciones horizontales.

Estas ecuaciones asumen las hipótesis de distribución de presión hidrostática y velocidad uniforme sobre la profundidad del agua. El supuesto de presión hidrostática se satisface tanto en los ríos como en las corrientes de estuarios no estratificados. La hipótesis de distribución uniforme de velocidades se cumple generalmente en ríos y estuarios, siempre y cuando no existan procesos de estratificación importantes por diferencias de salinidad, temperatura o viento. ( Iberaula, 2021)

### 2.3.2. Módulo de Turbulencia

Iber incorpora para el desarrollo hidrodinámico varios modelos de turbulencia que se basan en la hipótesis de Boussinesq. Dentro del modulo se encuentran modelos turbulentos como el de viscosidad turbulenta constante, modelo K de rodi y rastogi, modelo de longitud mixta y modelo parabólico.

### 2.3.3. Modulo Transporte de sedimentos

El módulo de transporte de sedimentos del modelo Iber resuelve las ecuaciones de transporte de sólidos en ríos por dos modos de transporte, los de carga de fondo y los de carga en suspensión. Teniendo en cuenta las dos formas de transporte, se calcula la evolución de la cota del fondo a partir de los procesos de sedimentación y fenómenos de erosión mediante la ecuación de Exner en dos dimensiones. En la versión actual del modelo únicamente se pueden considerar granulometrías uniformes. (WSP, 2021)

### 2.3.4. Módulo de calidad del agua

El módulo de Calidad del Agua (IberWQ) calcula las transformaciones físicas y químicas en las dimensiones de tiempo y de espacio, así como la interacción entre sí, de varias determinantes de importancia ambiental, como los son:

- Oxígeno disuelto
- Demanda de oxígeno bioquímico carbonoso
- Nitrógeno orgánico
- Nitrógeno amoniacal
- Nitritos / Nitratos Nitrógeno
- Temperatura
- Escherichia coli
- Salinidad

### **2.3.5. Módulo de procesos hidrológicos**

Iber permite presentar resultados como modelo hidrológico distribuido, desarrollando las ecuaciones en dos dimensiones de aguas someras y partir del cálculo de la transformación de la escorrentía superficial.

Es importante resaltar que, la versión más reciente de Iber no incluye en su dominio un módulo de flujo de aguas subterráneas y, por lo tanto, el componente de flujo base no se considera en el modelo. Esto limita su aplicabilidad como modelo hidrológico en eventos de lluvia cortos e intensos en los que la contribución del flujo base a la descarga total es menos relevante que la contribución del flujo superficial (Iberaula, 2021)

### **2.3.6. Módulo Hábitat**

Iber se ha potenciado como modelo de hábitat mediante la incorporación de herramientas específicas en el pre y pos proceso, convirtiéndose en un software adecuado para la eco hidráulica. Esta nueva herramienta puede ser útil para promover estrategias de conservación ambiental en los ríos y potenciar todos los aspectos ecológicos y biológicos existentes en los ecosistemas acuáticos, (Iberaula, 2021)

## **2.4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS MODELO IBER**

### **2.4.1. Modelo de Terreno**

Al considerarse la modelización en dos dimensiones, el modelo Iber requiere la incorporación de un modelo digital de terreno mediante una malla tridimensional de terreno como dato importante en la partida del estudio.

La versión más reciente de Iber permite la importación de un gran número de formatos de geometrías y mallas en tres dimensiones, por ejemplo: recibe archivos con extensiones (IGES, STEP, DXF, Parasolid, ACIS, VDA, SHAPEFILE, PUNTOS XYZ, KML, MALLA 3D STUDIO, RASTER GDAL, etc.). No obstante, para la modelación de cauces reales, se recomienda el uso de archivos MDT (modelo digital de terreno). Si es necesario

un nivel de detalle importante, el modelo permite generar directamente una malla formada por cuadrados mediante la opción importación de archivos Raster GDAL, o una malla formada por triángulos empleando la herramienta de importación RTIN (WSP, 2021)

Una opción importante en el modelo, y que vale la pena resaltar es la de incorporar orto fotos georreferenciadas al modelo, esta opción permite que se mejore la introducción de información de entrada y la posterior interpretación de resultados en proyectos.

#### **2.4.2. Condiciones de contorno y coeficiente de rugosidad**

Las condiciones de contorno y las condiciones iniciales de sistema en el modelo Iber, se aplican directamente a los elementos de la malla. El modelo permite ingresar curvas de caudal o niveles de agua en el tiempo como condición de contorno. Respecto a las condiciones de contorno a la salida, el modelo permite elegir una condición de flujo tipo subcrítico o de tipo supercrítico.

Para la introducción de los coeficientes de rugosidad al sistema modelado, el modelo Iber cuenta con un sistema de asignación automática, así que, a partir de un archivo raster, es posible asociar un código diferente a cada elemento de la malla, de este modo se le puede aplicar un valor diferente de coeficiente de rugosidad a cada código. (WSP, 2021)

#### **2.4.3. Incorporación de estructuras**

El modelo IBER admite la incorporación de diversos tipos de estructuras hidráulicas que permitan predecir comportamientos de los cauces con la instalación de estas. Las estructuras que permite el modelo son: compuertas, vertederos, cubiertas, diques, puentes y alcantarillas.

#### **2.4.4. Presentación de resultados**

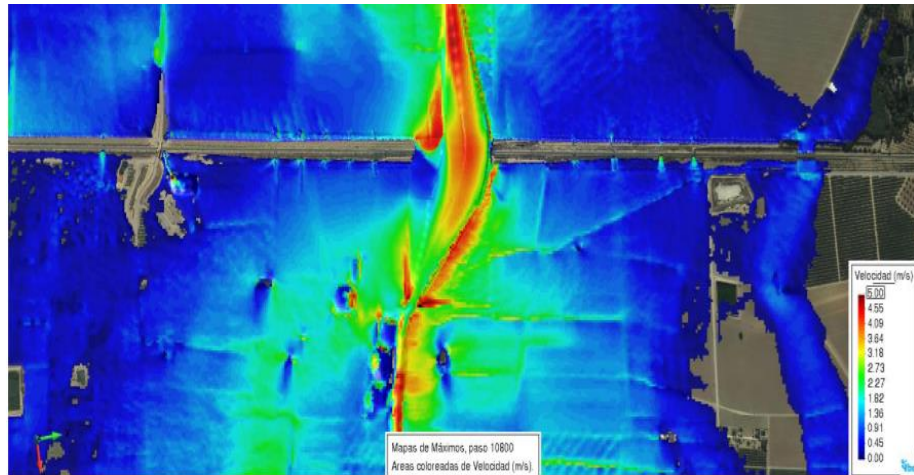
Referente a la presentación de los resultados, el modelo IBER permite presentar un gran número de resultados y variables importantes en el estudio de la hidrodinámica, dentro de las variables importantes de destacar se encuentran: calado (altura de la lámina de agua), velocidades, nivel de agua, número de Froude, máxima tensión de fondo, peligrosidad y energía.

Los resultados de IBER son generalmente de tipo raster, y están asociados a los fenómenos de ocurrencia en un instante determinado de tiempo, lo que permite analizar la evolución de las características del flujo del agua en el tiempo e interpretar de una mejor manera el sistema modelado. (WSP, 2021)

De igual manera, el modelo también permite generar los resultados mediante mapas de máximos, lo que garantiza que se puedan analizar los escenarios menos favorables para todo el sistema modelado. Los valores máximos presentados se encuentran principalmente en las variables de calado, velocidad y cota, que son los más utilizados

para la comprobación y el diseño de los elementos que se incluyen en el modelo, por lo que identificarlos de forma instantánea resulta de gran utilidad en el proceso. (Ver Figura 2)

**Figura 2. Visualización en el módulo de pos- proceso del mapa de máximos de velocidades del agua**



Fuente: (WSP, 2021)

Como se mencionó anteriormente, los resultados al ser de tipo raster pueden importarse desde el programa como imágenes, en archivos compatibles con plataformas SIG e incluso, permite generar animaciones de la evolución de las variables en el tiempo y representadas en distintos formatos de exportación (GIF, AVI, FLV o MPEG).

### **3. ANALISIS DE CASOS DE ESTUDIO: USO DEL MODELO IBER EN ESTUDIOS DE INUNDABILIDAD**

A continuación, se presenta un estudio de análisis de tres casos de estudio que desarrollan la modelación hidrodinámica mediante modelo bidimensional IBER, con el fin de simular las condiciones y comportamiento de cauces, así como, determinar posibles áreas de inundación. Los estudios de caso presentados son desarrollados en diferentes zonas, condiciones y características con el fin de determinar similitudes, diferencias y variables en común, a tener en cuenta en el desarrollo de estudios de inundabilidad.

#### **3.1. CASO ESTUDIO 1. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL TRAMO MEDIO DEL RÍO CTALAMOCHITA, PROVINCIA DE CÓRDOBA.**

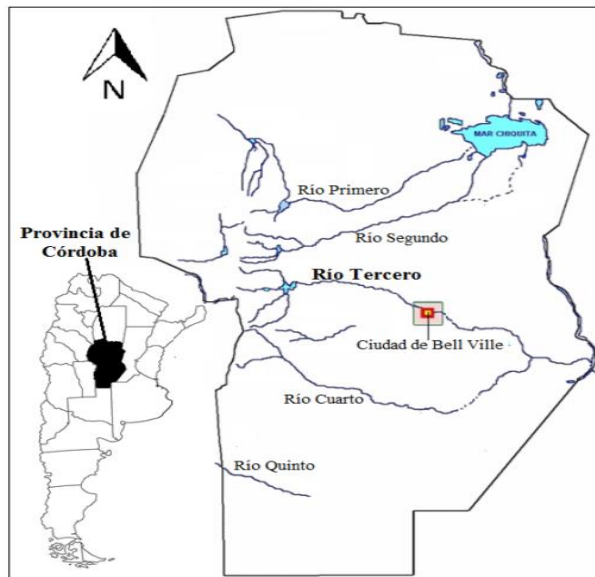
##### **3.1.1. Resumen**

El estudio desarrolla dos modelaciones, una con un modelo unidimensional como lo es HEC RAS y la otra bajo el dominio de un modelo bidimensional IBER, sobre un tramo del río Tercero (Ctalamochita) que atraviesa la ciudad de Bell Ville, con la finalidad de verificar cuál de los modelos representa con mayor asertividad la realidad de la zona de estudio y definir a partir de diferentes escenarios, las áreas de inundabilidad y que puedan representar riesgo para la ciudad.

##### **3.1.2. Características de la zona de estudio**

El estudio fue desarrollado sobre un cauce denominado río Tercero o Ctalamochita, cuyo nacimiento se ubica en un área conocida como sierras grandes, en una área montañosa de Cordoba, Argentina. El cauce del río Tercero (Ctalamochita) nace en el embalse de Piedras Moras y vierte sus aguas en el río Carcarañá. Recorre una longitud aproximada de 300 kilómetros. El cauce cuenta con un ancho promedio de 35 metros y en sus costados se ubican importantes centros poblados como Almafuerde, Río Tercero, Villa Ascasubi, Pampayasta, Villa María y Bell Ville. La ubicación geográfica se presenta en la Figura 3.

**Figura 3. Ubicación Geográfica del río Tercero**



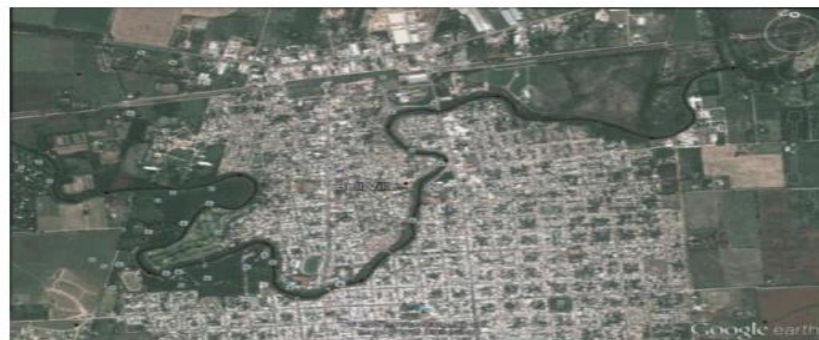
Fuente: (Santiago Ochoa, 2016)

El tramo seleccionado para la modelación hidrodinámica en el caso de estudio fue el paso del río por la ciudad de Bell Ville. El autor eligió este sistema para la modelación por la importancia y el marcado desarrollo poblacional en esta zona, el riesgo que implican las inundaciones, así mismo, tuvo en cuenta que la zona cuenta con datos de aforos y estudios previos, lo que permitió la calibración del modelo realizado.

Un punto que cobro mayor relevancia en la elección del tramo fueron las curvaturas pronunciadas propias de un río de llanura con trazado meandriforme (Santiago Ochoa, 2016). (Ver

Figura 4), esto permitió que se conociera el comportamiento de la hidrodinámica de flujo en el tramo de estudio y verificar con cual modelo se representaban mejor las variables del flujo, si con uno unidimensional o con uno bidimensional.

**Figura 4. Curvatura y localización de tramo de estudio**



Fuente: (Santiago Ochoa, 2016)

### 3.1.3. Metodología

Para la determinación de la batimetría del tramo de estudio, fue utilizada información secundaria de informes realizados previamente, la cual, fue contrastada con información obtenida en campo mediante una campaña topográfica realizada por el autor en el desarrollo del estudio. El contraste de esta información permitió mejorar la resolución de las secciones del cauce y generar un modelo digital de terreno para introducirlo en los dos modelos seleccionados. En la Figura 5 se presenta el modelo digital de terreno utilizado para esquematizar y generar la batimetría del río, en la misma figura se presenta el punto utilizado para tomar los datos de calibración denominado Puente Sturla.

**Figura 5. Modelo Digital del Terreno y ubicación del punto de calibración**



Fuente: (Santiago Ochoa, 2016)

Con los datos de batimetría y la determinación de los datos hidráulicos se procedió al montaje de los modelos, para el caso del modelo Iber, se generó una malla no estructurada de 166.148 elementos. Respecto al hidrograma de entrada, se generó a través de los datos obtenidos en los monitoreos y aforos realizados en el año 2014 y fue correlacionado con los datos medidos en el punto de calibración.

### 3.1.4. Resultados y discusión

#### 3.1.4.1. Calado (Altura lámina de agua)

En cuanto al calado o altura de la lámina de agua, los resultados se presentan en función del tiempo y en una sección transversal del río denominada dique de Bell Ville. Para este escenario, se evidenció que los resultados obtenidos mediante el modelo bidimensional

Iber presentan un mejor ajuste del sistema modelado que el modelo unidimensional Hec RasR, esto con respecto los datos utilizados para la calibración.

Lo anterior, se puede explicar por la forma del cauce en este tramo, que, como se observa en el tramo de estudio, cuenta con grandes curvas que posibilitan la generación de flujos y velocidades transversales que no pueden ser analizadas mediante esquemas numéricos hidrodinámicos unidimensionales, que para el estudio fueron modelados mediante el modelo HEC-RAS.

**Figura 6. Resultados de calado de agua en los dos modelos vs datos de monitoreo en la sección del dique Bell Ville**



Fuente: (Santiago Ochoa, 2016)

#### 3.1.4.2. Velocidad

En la Figura 7, se evidencian los resultados de velocidad en los 9 kilómetros del río analizado. Dentro del estudio se tuvieron en cuenta cuatro escenarios de caudal correspondientes a diferentes lluvias de exceso ocurridas en el año 2014. Los caudales de estos escenarios corresponden a 196 m<sup>3</sup>/s, 225 m<sup>3</sup>/s, 254 m<sup>3</sup>/s y 233 m<sup>3</sup>/s

En la misma figura (Figura 7) se puede evidenciar que la velocidad promedio del tramo analizado es inferior a 2 m/s, lo que generó cambios de régimen de subcrítico a supercrítico y generó también aceleraciones en el flujo en zonas donde se ubican estructuras y puentes.

**Figura 7. Velocidades en el tramo de estudio en diferentes escenarios**

**. Izquierda Superior:  $Q = 196 \text{ m}^3/\text{seg}$ , Derecha Superior:  $Q = 225 \text{ m}^3/\text{seg}$ , Izquierda Inferior:  $Q = 254 \text{ m}^3/\text{seg}$  y Derecha Inferior:  $Q = 233 \text{ m}^3/\text{seg}$ .**



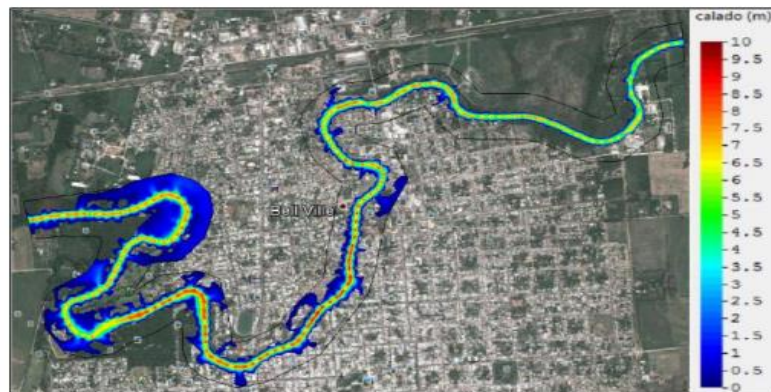
Fuente: (Santiago Ochoa, 2016)

#### 3.1.4.3. Inundabilidad

Referente a resultados de inundabilidad, en la Figura 8 se presenta el tiempo de mayor inundación analizada en el modelo Iber, la avenida torrencial que causo la inundación fue la ocurrida el día 10 de Marzo de 2014, con un caudal máximo de  $249 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Como se puede evidenciar, en la Figura 8, las zonas más afectadas por la inundacion se ubican en la primera tercera parte del río, justo en la zona de mayor curvatura, en este escenario, la altura de la lámina de agua en las zonas inundadas llego hasta alrededor de un 1 metro. Respecto a la zona del cauce, la altura de agua es de aproximadamente 6 metros y alcanza máximos de aproximadamente 10 metros de profundidad, en algunos tramos del río.

**Figura 8. Resultados de altura de la lámina de agua en el escenario máximo caudal de avenida torrencial 2015 =  $249 \text{ m}^3/\text{s}$**



Fuente: (Santiago Ochoa, 2016)

#### 3.1.4.4. Conclusiones del estudio

Una de las principales conclusiones del estudio, evidencia como el modelo bidimensional Iber permite una mejor representación de las variables de velocidad y calado (altura de la lámina de agua) en tramos con curvas pronunciadas o muy meandricas, respecto al ajuste y correlación con los datos de campo monitoreados.

Respecto al comportamiento hidráulico del cauce de estudio, evaluado mediante el modelo bidimensional Iber, se determinó que el cauce cuenta generalmente con flujo subcrítico, con un número de Froude en el rango de 0.1 a 0.4 para todo el sistema modelado.

El estudio permitió el cálculo de las áreas inundadas en el tiempo de máximo caudal. El área inundada correspondió a 43 hectáreas y alcanzó una altura promedio de 1 m. La velocidad promedio en el cauce fue de 1.26 m/s, con esta información el autor calculó el tiempo de tránsito correspondiente a 2 horas en todo el tramo.

### **3.2. CASO ESTUDIO 2. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LA DETERMINACIÓN DE ALERTAS TEMPRANAS POR INUNDACIÓN EN LA ECO REGIÓN DE LA MOJANA - NECHÍ, ANTIOQUIA**

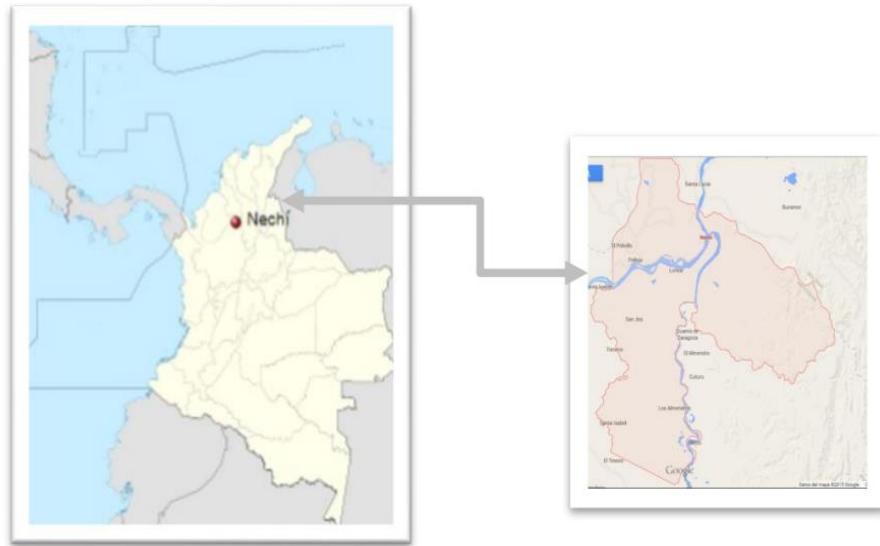
#### **3.2.1. Resumen**

El estudio realiza una identificación de las condiciones vulnerables respecto a la inundabilidad del municipio de Nechí (Antioquia-Colombia). Dentro del análisis realiza una modelación hidrodinámica con el modelo Iber que permite definir las velocidades del río en la zona de estudio y la altura de la lámina de agua en zonas contiguas al cauce que permita identificar potenciales zonas inundables en tres escenarios hidrológicos, generar análisis de amenaza por inundación y un sistema de alerta temprana.

#### **3.2.2. Zona de estudio**

El estudio fue realizado en el río Nechí afluente del río Cauca y que recorre los municipios de Nechí, el Bagre, Zaragoza y Caucasia. El tramo de estudio se evaluó en su paso por el municipio de Nechí en Antioquia. El municipio de Nechí se encuentra localizado en la región del bajo Cauca del Departamento de Antioquia (Colombia), y hace parte de los 11 Municipios de la región de la Mojana. La localización geográfica del municipio se presenta en la Figura 9 y la delimitación del área de estudio del proyecto se presenta en la Figura 10.

#### **Figura 9. Localización geográfica municipio de Nechi**



Fuente: (Caicedo, 2017)

**Figura 10. Delimitación área de estudio para la modelación hidrodinámica**



Fuente: (Caicedo, 2017)

### 3.2.3. Metodología

El modelo digital de terreno que se incorporó en el modelo Iber, fue desarrollado a partir de información topográfica del departamento de Antioquia desarrollada por el fondo de adaptación en el año 2013, posteriormente la información fue procesada en el programa ArcGis. Para el sistema se generó una malla irregular de triángulos con un número de 896176 elementos.

Para el desarrollo del estudio, el autor definió tres escenarios de modelación con periodos de retorno de 15, 100 y 500 años.

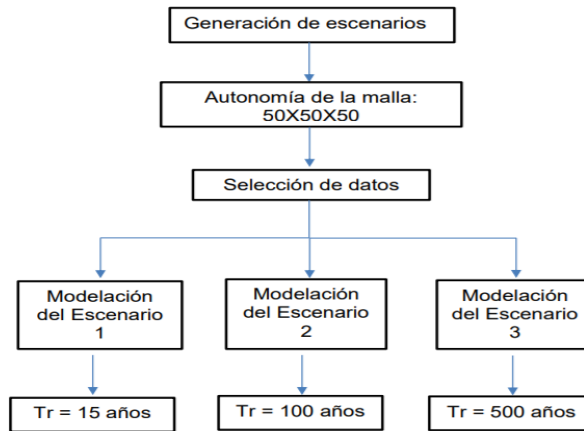
Respecto a los caudales de entrada se tuvieron en cuenta caudales máximos anuales de tres estaciones hidrológicas ubicadas en el área de estudio; las estaciones de entrada corresponden a: Margento (Río Cauca) y La Esperanza (Río Nechí), y para la salida se tiene en cuenta la estación de las flores (río Nechí). Para el análisis y procesamiento de los datos hidrológicos, e, autor utilizó el programa Hidroesta.

Para el ingreso de la rugosidad del cauce y áreas subsiguientes, se realizó la caracterización basados en el documento del Servicio Geológico de Estados 55 Unidos, de esta manera, se ingresaron al modelo datos de manning para el rio nechí de 0,032, para el rio cauca 0.03, para el área urbana del municipio de Nechi 0.06 y áreas subsiguientes se eligió por defecto vegetación densa del programa con un valor de 0,18.

#### **3.2.4. Resultados y discusión**

Para el análisis de resultados y discusión de los mismos el autor genero tres escenarios basados en los criterios mostrados en la Figura 11.

**Figura 11 Generación de escenarios**



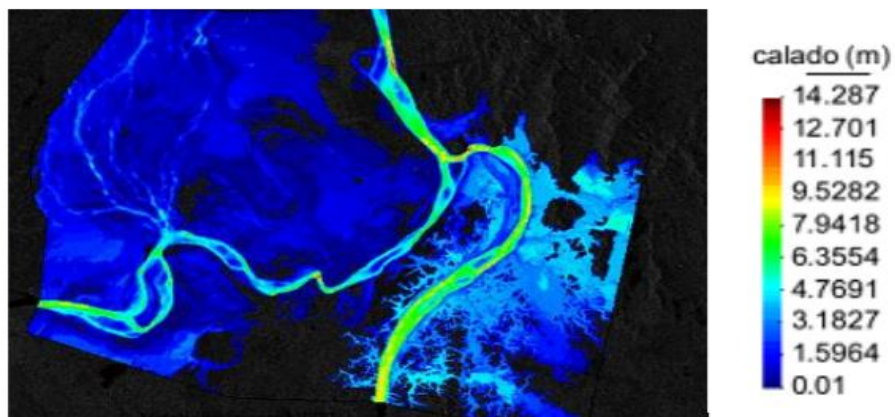
Fuente: (Caicedo, 2017)

**3.2.4.1. Calado (lámina de agua) y manchas de inundación**

En el estudio se presentan los resultados de calado para los tres escenarios en un tiempo de una hora. Como se evidencia en el Escenario 1 (Figura 12) para un periodo de retorno de 15 años se presenta desbordamiento del caudal del río generando inundaciones sobre las área subsiguientes; los calados en el cauce oscilan entre los 6 y 7 m, mientras que en área del municipio los calados oscilan entre 1 y 1.3 m.

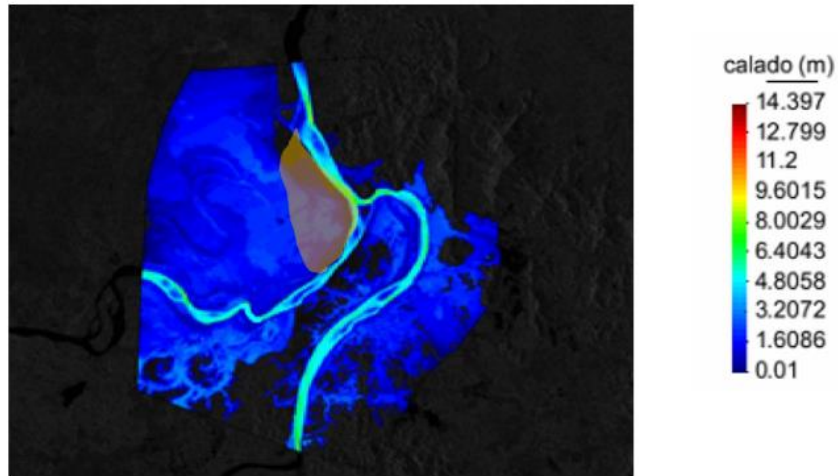
En el escenario 2 (Figura 13) con un periodo de retorno de 100 años los calados en la zona urbana llegan hasta los 3,2 m de altura. Por ultimo para el escenario 3 (Figura 14), con periodo de retorno de 500 años el aumento en el nivel del cauce llega hasta los 11 y respecto a la mancha de inundación se evidencian calados de hasta 3,2 m.

**Figura 12. Resultados calado escenario 1. (PR: 15 años)**



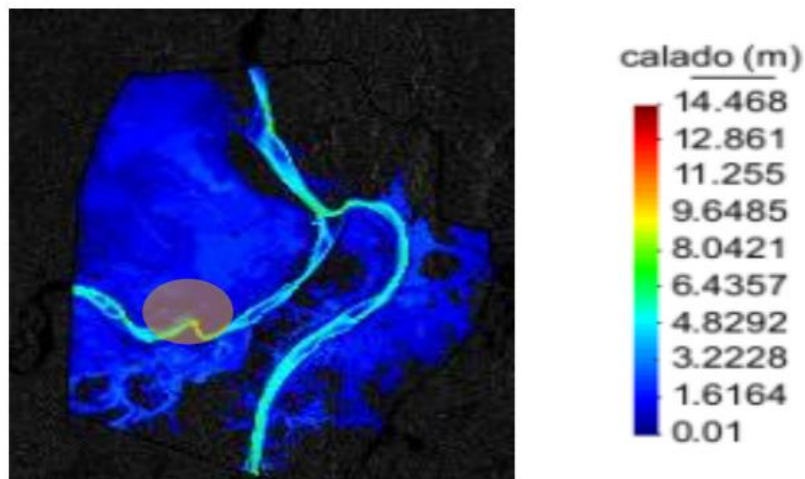
Fuente: (Caicedo, 2017)

**Figura 13. Resultados calado escenario 2. (PR: 100 años)**



Fuente: (Caicedo, 2017)

**Figura 14. Resultados calado escenario 3. (PR: 500 años)**

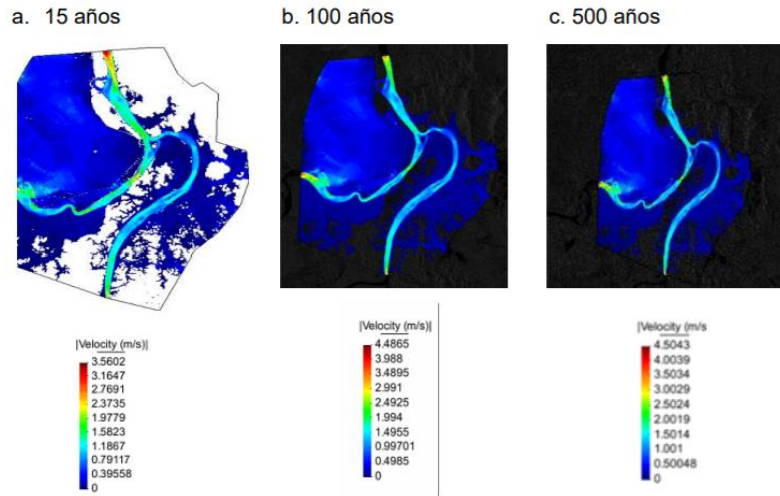


Fuente: (Caicedo, 2017)

#### 3.2.4.2. Velocidad

Respecto a los resultados de velocidad en los tres escenarios, las máximas velocidades obtenidas en el modelo oscilan entre los 0,39 a 0,70 m/s para un periodo de retorno de 15 años, 0,49 m/s y 0.50 m/s para periodo de retorno de 100 años y de 0.99 m/s a 1 m/s ara l periodo de retorno de 500 años,

**Figura 15. Resultados velocidad tres escenarios**



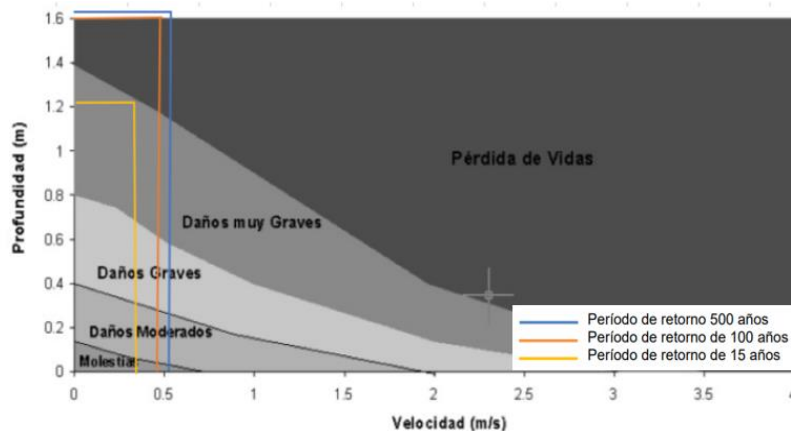
Fuente: (Caicedo, 2017)

### 3.2.5. Conclusiones del estudio

Como principal conclusión, el desarrollo del estudio permite evidenciar las manchas de inundación generadas por tres condiciones hidrológicas con periodo de retorno de 15, 10 y 500 años sobre el área urbana del municipio de Nechí en el Departamento de Antioquia, alcanzando velocidades de hasta 1 m/s y la altura de la lámina de agua en las zonas inundables puede llegar a alturas de 3m, en el escenario más desfavorables.

Esta información permitió al autor realizar un análisis de amenaza por inundación teniendo en cuenta las variables de velocidad y calado, los resultados se presentan en la Figura 16 donde evidencia que en eventos hidrológicos con periodos de retorno 100 y 500 años se generan daños muy graves e incluso pérdida de vidas.

**Figura 16 Análisis de amenaza por inundación**



Fuente: (Caicedo, 2017) Adaptado: Autor 2021

De la misma forma, con los resultados del modelo hidrodinámico el autor plantea de manera breve un sistema de alerta temprana, mediante la propuesta de instalación de reglas limnimétricas en el cauce del río y alternativa de construcción de viviendas palafíticas en zonas el municipio de Nechi.

### **3.3. CASO ESTUDIO 3. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES POR MÁXIMAS AVENIDAS DEL RIO QUÍNUAS EN EL CENTRO POBLADO LA QUISPA**

#### **3.3.1. Resumen**

El estudio contempla la realización e implementación de un modelamiento hidráulico del río Quínoas en el centro poblado Quispa mediante el modelo bidimensional IBER, que permita identificar las zonas de inundación ante eventos de máximas avenidas de caudal.

#### **3.3.2. Zona de estudio**

El estudio se realizó sobre un tramo del río Quínoas con una longitud a estudiar de 434.2 m y el área de análisis es de 10.46 ha en su paso por la municipalidad de Quispa, un municipio que ha tenido inundaciones considerables. La imagen satelital del área de estudio se presenta como

**Figura 17. Ubicación del área de estudio**



Fuente: (Aparicio, 2021)

### **3.3.3. Metodología**

El modelo digital de terreno fue desarrollado mediante el uso de información cartográfica de la cuenca descargada de la base de datos GEOGSPERU, y posteriormente fue contrastada y completada con información de levantamiento topográfico realizado en campo. Las curvas de nivel se realizaron en el programa Autocad Civil 3D y se obtuvo el modelo TIN mediante programa ArcGis con datos exportados en formato ASCII.

La información hidrológica se obtuvo de información de una estación ubicada en el área de estudio, el autor eligió precipitaciones máximas anuales y determinó los caudales para diferentes periodos de retorno mediante el método racional modificado.

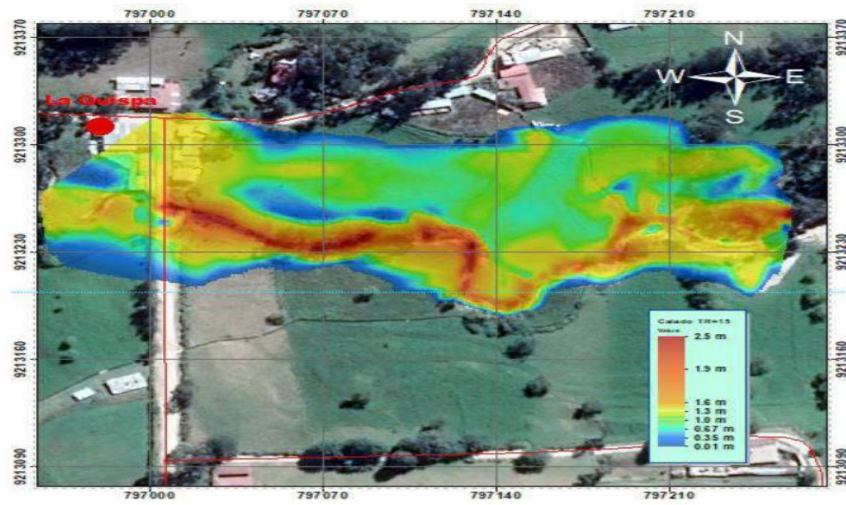
La asignación de rugosidades se realizó las establecidas por defecto en el programa Iber. Se creó una malla no estructurada de 262107 elementos. Para los periodos de retorno 15 años, 25 años y 40 años los caudales de modelación son 110, 123 y 136 m<sup>3</sup>/s respectivamente. Estos últimos fueron definidos como los escenarios de estudio.

### **3.3.4. Resultados y discusión**

#### *3.3.4.1. Calado y zonas inundables*

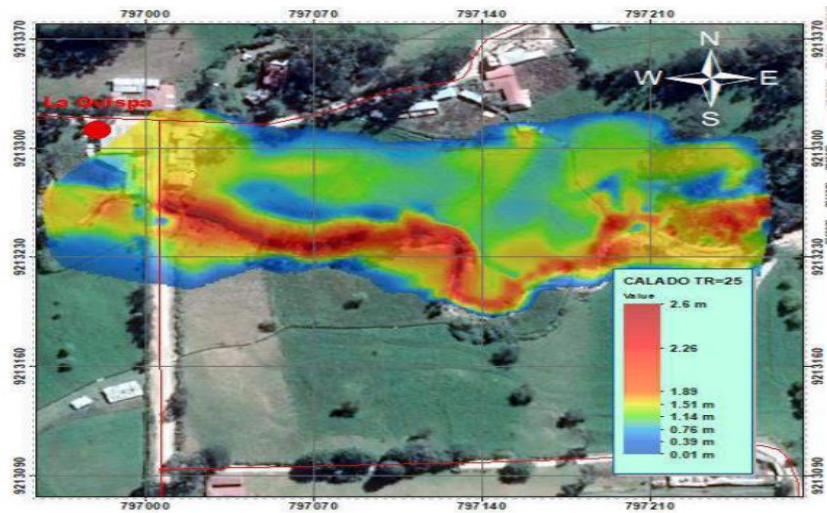
En la Figura 18 se presenta el escenario 1, se evidencia que el calado de agua de llega hasta incluso 2.5 m en el cauce del río y de 0.2 m por sobre el puente y en la zona del pueblo del caserío La Quispa, se evidenciaron calados de hasta 1.85 m. Para el escenario 2, presentado en la Figura 19 los calados en lecho del río alcanzan hasta los 2.6 m, las zonas aledañas alcanzan calados de 1.5 m y en la zona del caserío de Quispa llegan hasta los 2 m. Finalmente, para el escenario 3, Figura 20, en el lecho del río es de 2.6 m y en la zona del caserío llegan desde los 1.7 a 2.1 m.

**Figura 18. Resultados de altura de lámina de agua. PR 15 años.**



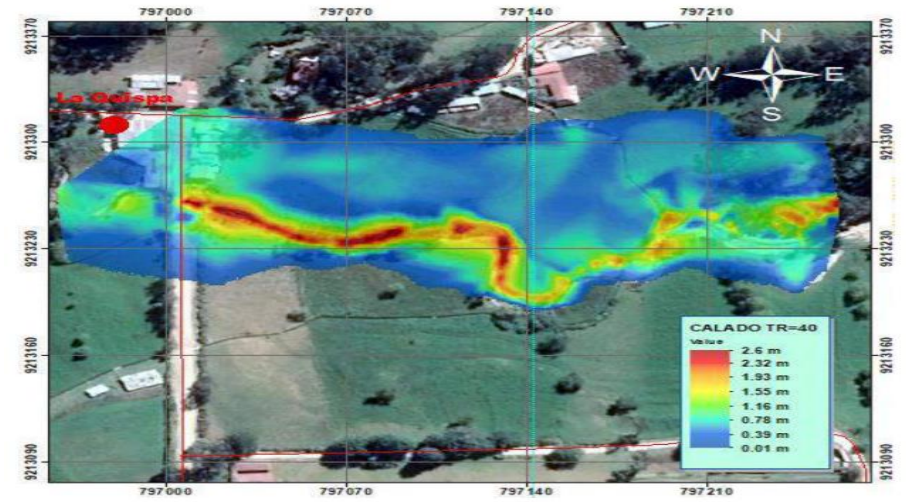
Fuente: (Aparicio, 2021)

**Figura 19. Resultados de altura de lámina de agua. PR 25 años.**



Fuente: (Aparicio, 2021)

**Figura 20. Resultados de altura de lámina de agua PR 40 años.**

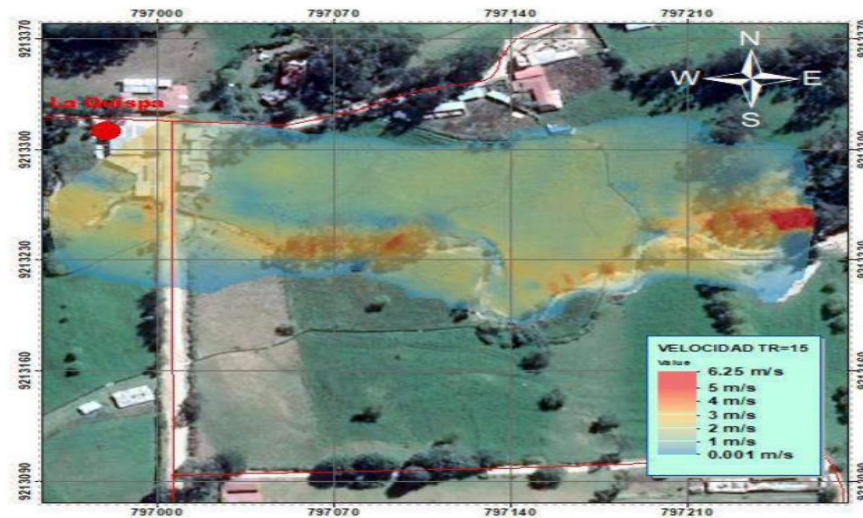


(Aparicio, 2021)

### 3.3.4.2. Velocidades

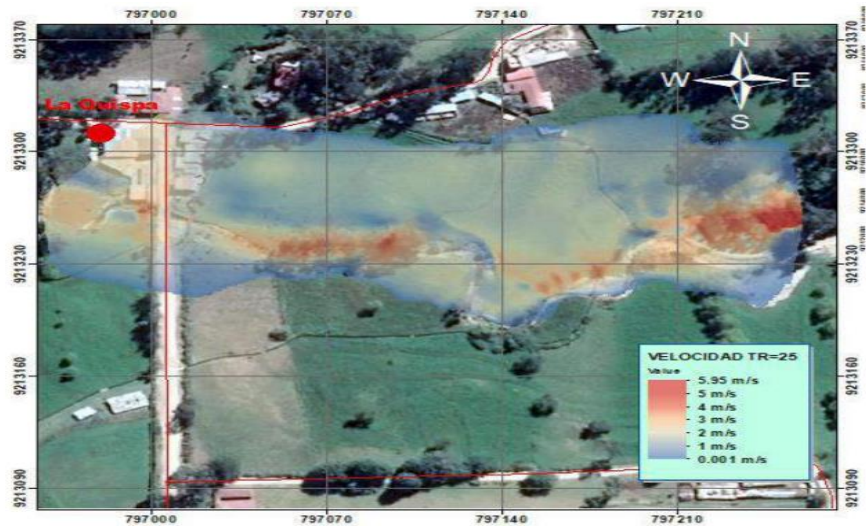
Para el escenario 1 (Figura 21), los resultados de velocidades la velocidad en el lecho del río es de 6.25 m/s y de 2.3 m/s en el caserío de Quispa. Respecto, al escenario 2 (Figura 22) las velocidades del río alcanzan los 5.95 m/s y de 3.5 en el caserío de Quispa. Por último en el escenario 3 (Figura 23), las velocidades en el río son de 6 m/s y 1.2 en el caserío.

**Figura 21. Resultados de velocidad – Periodo de retorno 15 años**



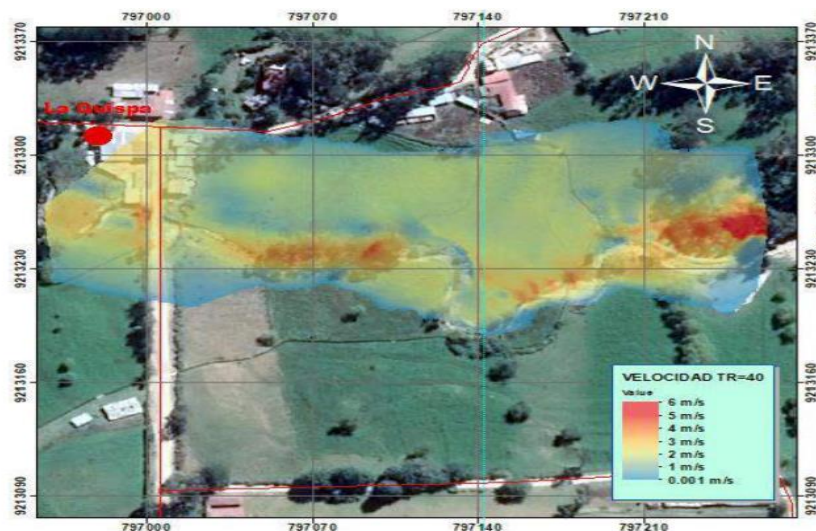
Fuente: (Aparicio, 2021)

**Figura 22. Resultados de velocidad – Periodo de retorno 25 años**



Fuente: (Aparicio, 2021)

**Figura 23. Resultados de velocidad – Periodo de retorno 25 años**



Fuente: (Aparicio, 2021)

### 3.3.4.3. Conclusiones del estudio

Mediante el desarrollo del modelo hidrodinámico en Iber, se lograron obtener resultados en términos de calado, velocidad y peligrosidad para tres escenarios con tres periodos de retorno de 15, 25 y 40 años, lo que permitió identificar las zonas potencialmente inundables en áreas aldeñas al río Quinuas y principalmente en la zona urbana del centro poblado de Quispa.

#### 4. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

La implementación de modelos hidrodinámicos en el estudio y la gestión de los recursos hídricos, especialmente en estudios de inundabilidad permite la posibilidad de obtener información fiable para anticiparse ante fenómenos importantes que impliquen amenazas o riesgo para la población e infraestructura presente en zonas aledañas a los cauces.

Respecto al uso del modelo Iber, desde su aplicabilidad, es una herramienta robusta en la modelización de la identificación de zonas potencialmente inundables, para las que el flujo tenga características bidimensionales, de la misma manera en sistemas en los que se deba considerar y analizar los fenómenos ocurridos en la presencia de estructuras de ingeniería proyectadas. Dependiendo del grado de detalle requerido el modelo Iber permite la incorporación de estructuras con distintas opciones que le dan al modelo un mayor o menor grado de aproximación de los resultados al fenómeno real modelizado.

Otra de las grandes potencialidades del modelo Iber es la cantidad de parámetros y resultados que genera en su módulo de post- proceso, esta información incluye entre otras, mapas de resultados máximos de las principales variables (calado, cota y velocidad) para cada punto de la malla, garantizando la observación de los escenarios más desfavorables para todo el conjunto de la simulación.

Referente a la presentación de resultados en el modelo Iber, la forma gráfica y con animación, permite el entendimiento de las situaciones modeladas por personal que no hace parte de la rama de ingeniería pero que si hace parte de las entidades que toman decisiones respecto a fenómenos de riesgo por inundabilidad.

Los resultados generados por las modelaciones hidrodinámicas, en los casos analizados realizados con el modelo Iber , permite el conocimiento de las zonas de inundación, la altura de la lámina de agua y velocidad en estas zonas, con el fin de utiliza estos resultados como insumo para la toma de decisiones, socialización de problemáticas relacionadas con inundación a la población de las áreas aledañas a las zonas de estudio, determinación de mapas de amenaza y de riesgo, así como, la implementación de obras de infraestructura que permitan disminuir el riesgo por eventos no deseados.

## 5. BIBLIOGRAFIA

Aparicio, C. (2021). *IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS INUNDABLES POR MÁXIMAS*. Cajamarca: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA.

Caicedo, Y. (2017). *MODELACIÓN HIDRODINÁMICA PARA LA DETERMINACIÓN DE*. Bogotá: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.

E. Bladé, L. C.-C. (2014). Iber: herramienta Delaware simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional Delaware Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 1-10.

F. Torres-Bejarano, J. P. (2016). La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Volume 32, Issue 3*, 163-172.

Iberaula. (14 de 12 de 2021). *Iberaula*. Obtenido de <https://www.iberaula.es/>

IDEAM. (13 de 12 de 2021). Obtenido de IDEAM:  
<http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

J. Murillo, P. B.-N. (2008). Aplicación del modelo bidimensional GUAD-2D para la determinación de zonas inundables en el TM de Fraga (Huesca). *Universidad de Zaragoza e INCLAM*.

Luis Timbe Castro, P. W. (2011). Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones. *MASKANA*.

Santiago Ochoa, T. R. (2016). Modelación hidrodinámica del tramo medio del río. *FCEfyN*.

WSP. (2021). *Análisis de Herramientas de Modelización Hidráulica bidimensional*.