

MODELACIÓN DE TRÁNSITO DE CRECIENTES EN EL RÍO ABURRÁ-MEDELLÍN PARA UNA PROPUESTA DE SU RESTAURACIÓN

✉ ANDRÉS FELIPE MARÍN MUÑOZ¹
JUAN FERNANDO BARROS MARTÍNEZ²

RESUMEN

La cuenca del río Aburrá-Medellín está localizada sobre la cordillera central, en el departamento de Antioquia. El río nace en el Alto de San Miguel en el municipio de Caldas y atraviesa 10 municipios hasta finalmente unirse con el río Grande, donde cambia de nombre a río Porce.

El tramo del río Aburrá-Medellín comprendido entre el nacimiento y su entrada al municipio de Caldas ha sufrido grandes alteraciones en sus condiciones naturales debido a la explotación de materiales para construcción. También se ha visto afectado por la deforestación de su cuenca y la introducción de fauna no nativa que han afectado la disponibilidad del recurso y su calidad.

El proyecto tiene como objetivo formular alternativas de restauración para algunos tramos del río Medellín que presentan un alto grado de afectación antrópica. Para el análisis hidrológico e hidráulico se utilizaron los programas HEC-HMS, HEC-RAS e Iber como soporte técnico para establecer las medidas de restauración. Se espera que los resultados de este proyecto sirvan como apoyo para otros de mayor alcance como el POMCA, el proyecto Bio 2030 y los Parques del Río Medellín.

PALABRAS CLAVES: Modelación hidráulica; modelación hidrológica; restauración de cauces.

MEDELLIN-ABURRÁ RIVER STREAMFLOW AND FLOOD ANALYSIS MODEL FOR ITS STREAM RESTORATION PROPOSAL

ABSTRACT

The basin of Aburrá-Medellín River is located at the central range, in the center of the department of Antioquia. The river is born in the Alto de San Miguel at the Caldas municipality and it goes through 10 municipalities until it finally merges with Grande River, where it changes its name to Porce River.

¹ Ingeniero Civil, Universidad EIA, Joven Investigador Colciencias, MSc (c) en Hidroinformática, Erasmus+ Euroaquae.

² Ingeniero Civil, Universidad EIA, MSc en Hidráulica Universidad Nacional de Colombia, PhD en Educación, Universidad de Antioquia.



Autor de correspondencia: Marín Muñoz A.F. (Andrés Felipe): Calle 47 N° 42 - 60 Apt. 2501, Medellín, Colombia; / Tel.: (4) 300 524 90 99
Correo electrónico: anmamun71@gmail.com

Historia del artículo:

Artículo recibido: 6-V-2015/ Aprobado: 26-X-2016
Disponible online: 30 de febrero de 2017
Discusión abierta hasta abril de 2018

The stretch of Aburrá-Medellín River included between the source and its entrance to the Caldas municipality has suffered severe degradations of its natural conditions due to the exploitation of construction material. It has also affected resource availability and its quality.

The project aims to formulate river restoration alternatives for some stretches of Medellín River that present elevated levels of anthropic affectation. For the hydrologic and hydraulic analyses, HEC-HMS, HEC-RAS and Iber programs were used as technical support to establish the restoration measures. The results of this project will help as support for other major projects such as the POMCA, Bio 2030 project and Medellín River Park..

KEYWORDS: Hydraulic modeling; Hydrologic modeling; River restoration.

MODELAGEM DE TRÁNSITO DE CRESCENTES NO RIO ABURRÁ-MEDELLÍN PARA UMA PROPOSTA DE SUA RESTAURAÇÃO

RESUMO

A bacia do rio Aburrá-Medellín está localizada sobre a cordilheira central, no departamento de Antioquia. O rio nasce no Alto de San Miguel no município de Caldas e atravessa 10 municípios até finalmente juntar – se com o rio Grande, onde muda de nome a rio Porce.

O trecho do rio Aburrá-Medellín compreendido entre o nascimento e sua entrada ao município de Caldas tem sofrido grandes alterações em suas condições naturais devido à exploração de materiais para construção. Também se viu afetado pela desflorestação de sua bacia e a introdução de fauna não nativa que têm afetado a disponibilidade do recurso e sua qualidade.

O projeto tem como objetivo formular alternativas de restauração para alguns trechos do rio Medellín que apresentam um alto grau de afetação antrópica. Para a análise hidrológico e hidráulico utilizaram-se os programas HEC-HMS, HEC-RAS e Iber como suporte técnico para estabelecer as medidas de restauração. Espera-se que os resultados deste projeto sirvam como apoio para outros de maior alcance como o POMCA, o projectoBio 2030 e os Parques do Rio Medellín.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem hidráulica; Modelagem hidrológica; Restauração de canais.

1. INTRODUCCIÓN

El tránsito de crecientes en un río se estudia a partir de factores hidrológicos e hidráulicos. La crecienete introduce una variación en el caudal que viaja a lo largo del canal natural o artificial. Para representar un evento de crecienete se han desarrollado herramientas informáticas, como el modelo HEC-HMS, que se utiliza para modelar los factores hidrológicos, mientras que los modelos HEC-RAS 5.0 (versión beta de prueba actualizada en octubre de 2014) e Iber 2.2 son utilizados para modelar los factores hidráulicos bajo condiciones de flujo unidimensional

o bidimensional. La modelación hidráulica permite el diseño de obras hidráulicas o modificaciones al cauce con el fin de mejorar las condiciones de flujo de un canal artificial o natural.

Teniendo en cuenta que hasta el momento ningún proyecto técnico o de investigación sobre el río Aburrá-Medellín ha sido desarrollado con fines de restauración de la corriente, el presente proyecto espera marcar un lineamiento en ese sentido que propicie la posibilidad de un manejo del río más acorde con la biodiversidad ecológica y el bienestar social de las poblaciones cercanas al río. El grupo de

investigación SITE (Sostenibilidad, Infraestructura y Territorio) perteneciente a la Universidad EIA, ha desarrollado varios proyectos de investigación orientados hacia la restauración de corrientes y se ha nutrido de proyectos internacionales desarrollados en otros países.

La restauración de cauces se sustenta en los resultados obtenidos de las modelaciones hidráulicas para los escenarios de creciente en los tramos estudiados, se diseñaron medidas de restauración para un tramo ubicado en la parte baja de la cuenca donde las condiciones de flujo del río mostraron una mejoría de acuerdo con condiciones de referencia establecidas y se plantearon alternativas de modelación en los tramos restantes.

2. METODOLOGÍA

El proyecto se desarrolló en cuatro procesos consecutivos. El primero de ellos consistió en la recolección de información base, de acuerdo con su disponibilidad y utilidad. Posteriormente se realizó la modelación hidrológica y la modelación hidráulica basadas en los eventos extremos seleccionados, y finalmente se propuso el diseño de las medidas de restauración para las necesidades específicas del tramo.

El proyecto cuenta con información cartográfica, hidrológica e hidráulica disponible en las corporaciones ambientales que tienen vinculación con el río Aburrá-Medellín (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia y Cornare), así como con información secundaria de estudios realizados por las Empresas Públicas de Medellín (EPM), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). El procesamiento de la información cartográfica e hidrológica disponible se apoyó en programas de sistema de información geográfica como ArcGIS e HidroSIG y la información detallada para la modelación del tránsito de crecientes fue procesada a partir de la herramienta de dibujo AutoCAD Civil 3D y los modelos hidráulicos HEC-RAS 5.0 e Iber 2.2.

La modelación hidrológica presenta dos metodologías, la primera modelación utiliza la información básica para la obtención de la delimitación de la cuenca y los caudales medios a partir de balance hídrico a largo plazo para cada tramo de estudio en el río Aburrá-Medellín; la segunda corresponde a la obtención de los caudales de creciente mediante métodos de lluvia-escorrentía para los tramos de interés y verificado a partir de información secundaria del Plan de Manejo y Ordenación de la Cuenca del río Aburrá (POMCA) e información de estaciones limnográficas suministradas por EPM.

La información base para obtener el caudal por balance hídrico a largo plazo es un modelo de elevación digital del terreno de toda la cuenca del río Aburrá-Medellín obtenido de la misión SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de la Nasa, un mapa de precipitación media y un mapa de evapotranspiración obtenidos del POMCA; la escala de los modelos digitales es de 30 m X 30 m de tamaño de pixel. Los resultados de la delimitación de los tramos de interés y sus respectivas subcuencas se presentan en la **Figura 1**.

La **Figura 1** presenta la delimitación de la cuenca del río Aburrá-Medellín con las 4 zonas con caracterización geomorfológica similar, a la izquierda (sistema de coordenadas planas MAGNA SIRGAS Colombia Bogotá zona centro) y la delimitación de las micro cuencas de los tramos de estudio a la derecha (sistema de coordenadas esféricas WGS 1984). En la **Tabla 1** se presenta el punto que delimita los tramos de estudio.

La información base para obtener los caudales de creciente varía de acuerdo con la metodología utilizada. Ya que se utilizaron métodos de lluvia-escorrentía, la información base corresponde a: las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) de 17 estaciones pluviográficas localizadas dentro de la cuenca, las características morfológicas de la cuenca con el fin de obtener el tiempo de concentración y el tiempo de tránsito aproximado para cada tramo de interés, las características geomorfológicas obtenidas del POMCA y, tipo y usos

del suelo del IGAC para obtener las condiciones de respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación extrema como la infiltración y la escorrentía, el número de curva y la humedad antecedente del suelo. El modelo hidrológico de tanques detallado para el cálculo de los caudales extremos de la cuenca del río Aburrá-Medellín se presenta en la **Figura 2**.

Se compararon los resultados obtenidos del tránsito de crecientes hidrológicas con HEC-HMS con información recuperada de EPM y el POMCA que contiene el cálculo de caudales extremos a partir de métodos estadísticos de 10 estaciones limnigráficas en el río Aburrá-Medellín con sus respectivos caudales medios y caudales de 2,33 y 100 años de periodo de retorno.

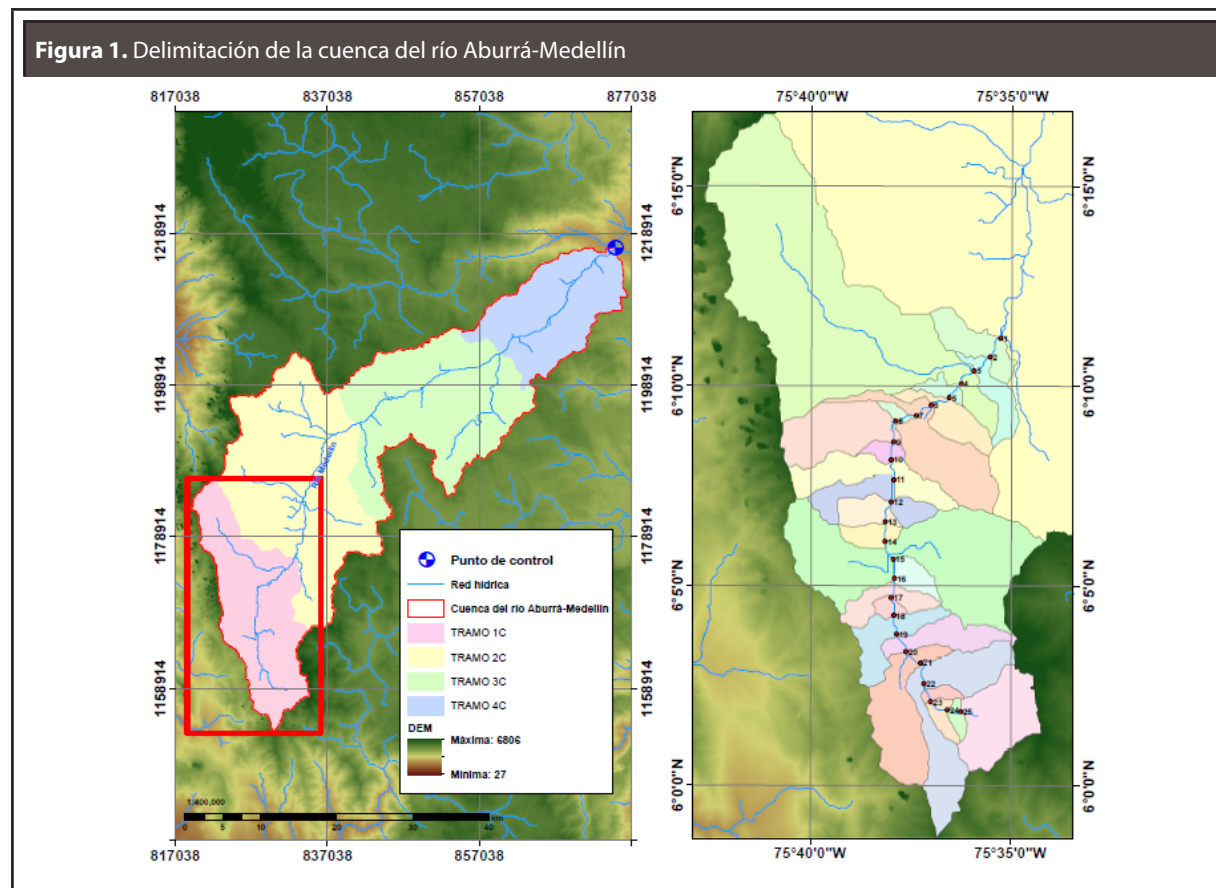
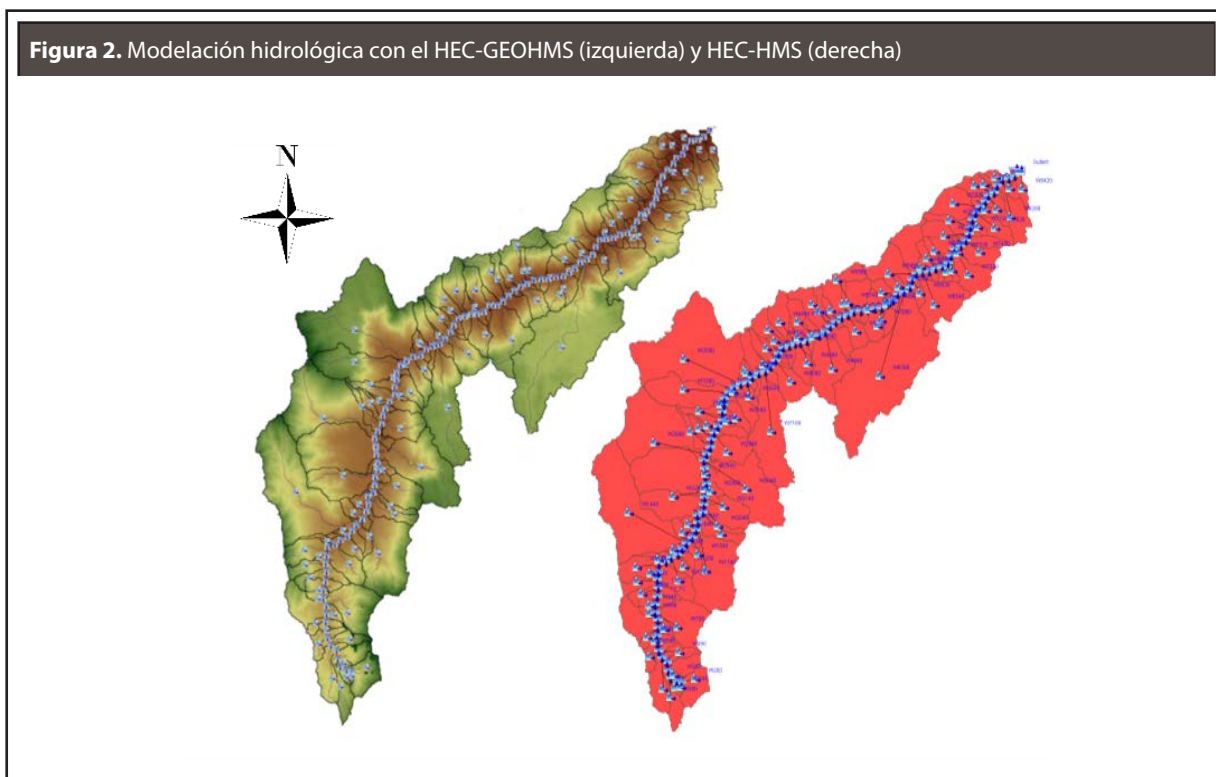


TABLA 1. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE DELIMITACIÓN DE TRAMOS DE ESTUDIO

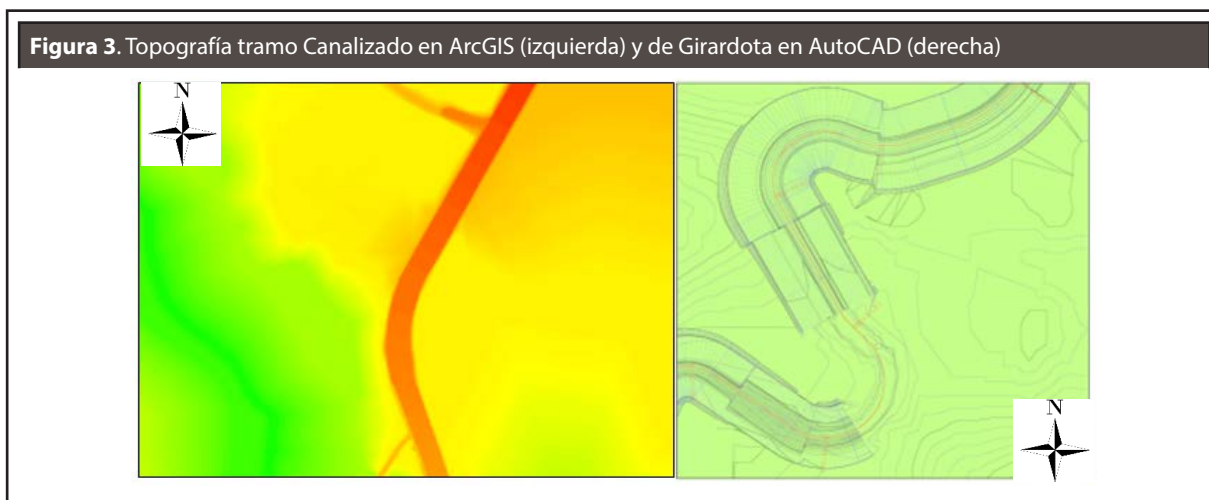
Punto	Abscisa (m)	Coordenadas (m)		Descripción de la localización
		Este	Norte	
1_1C	27.500	832.826	1'176.114	500 m aguas arriba de la confluencia con la quebrada Ayurá.
1_2C	52.900	841.000	1'194.000	Entrada casco urbano del municipio de Copacabana.
1_3C	78.400	859.889	1'203.130	1,5 km aguas arriba del casco urbano del municipio de Barbosa.
1_4C	95.600	874.887	1'216.960	Confluencia con el Río Grande – 0,8 km aguas arriba de Puente Gabino.

Figura 2. Modelación hidrológica con el HEC-GEOHMS (izquierda) y HEC-HMS (derecha)

Después de obtener el caudal base (balance hídrico) y el caudal de creciente verificado (modelo lluvia - escorrentía), se modelaron diferentes eventos críticos utilizando los caudales obtenidos mediante dos herramientas con el fin de comparar los resultados; estas fueron HEC-RAS e Iber, las cuales resuelven la ecuación de Saint Venant por volúmenes finitos para llegar a un resultado en cada punto de información; la primera la resuelve de forma implícita lo cual agiliza el tiempo de procesamiento, mientras que la segunda lo hace de forma explícita, teniendo que resolver las ecuaciones para todas las celdas hasta llegar a un punto de convergencia. Con ellas se realizó un análisis unidimensional (1D) y bidimensional (2D), respectivamente. La información base utilizada en ambas herramientas es la misma, la única diferencia es la metodología usada para obtener los resultados. Se utilizó la geomorfología obtenida de salidas de campo y fotografías del cauce, topografía detallada del cauce del río Aburrá-Medellín en escala 1:2.000 para el tramo canalizado entre

la quebrada Ayurá y Ancón Sur, al igual que algunas zonas pequeñas entre el puente de Girardota y el puente de El Hatillo, secciones transversales características de varios puntos del río a lo largo de todo su cauce y un modelo de elevación digital de detalle del río entre su nacimiento y la vereda La Clara en el municipio de Caldas. Un ejemplo de la topografía disponible se presenta en la **Figura 3**. Finalmente se utilizó el caudal medio del río y los hidrogramas de creciente para la generación de los escenarios y la calibración del modelo. Los tramos calibrados fueron modelados bajo condiciones de flujo permanente con el fin de obtener los valores requeridos para diseñar las medidas de restauración.

La modelación hidráulica se complementó con la herramienta de dibujo AutoCAD Civil 3D para el procesamiento de la topografía, la generación del perfil y de las secciones del río que luego fueron exportadas a HEC-RAS en formato Tiff (*Tagged Image File Format*), donde se agregó el coeficiente de Manning, las condiciones iniciales y de contorno.



La modelación hidráulica con Iber utilizó la misma imagen en formato Tiff utilizada para HEC-RAS, pero esta fue exportada a formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) desde ArcGIS, ya que este formato es más estable para la entrada de datos en Iber y la creación del MDT (Modelo Digital del Terreno), RTIN (*Rectangular Triangulated Irregular Network*) o como malla de información. Al ingresar la topografía, esta se debió procesar y fraccionar con diferentes tamaños de acuerdo con el detalle óptimo para cada zona, con el fin de mejorar el tiempo de procesamiento. Finalmente, al igual que con HEC-RAS, se agregó el coeficiente de Manning, las condiciones iniciales y de contorno que para ambos casos debían ser idénticas con el fin de permitir la posterior comparación de los resultados.

La comparación de los modelos hidráulicos permitió la selección del modelo que entregara los resultados con una mayor confiabilidad y bajo las mejores condiciones de procesamiento.

El modelo hidráulico se calibró bajo condiciones de flujo no permanente en los tramos en los cuales se contó con suficiente información de estaciones limnigráficas, pluviográficas y topografía. El tramo con la mayor recopilación de información fue el tramo entre Girardota y El Hatillo que contó con secciones transversales del río Aburrá-Medellín, al igual que con valores de lluvia y flujo que permitie-

ron una calibración del evento con 4 eventos extremos históricos entre 2007 y 2011.

Con el tramo calibrado se modelaron los tramos para sus condiciones de caudal medio, 2,33 años y 100 años, con el fin de obtener los parámetros insumo para el diseño de las medidas de restauración. Los parámetros obtenidos para cada caudal fueron: altura de flujo, ancho mojado, número de Froude, velocidad de flujo y tensión de fondo (diámetro crítico).

Otra variable necesaria para el diseño de las medidas de restauración fue el D50 el cual corresponde al diámetro del material promedio en peso, es decir, el tamaño del material de la curva granulométrica que corresponde al 50%. Para el caso del río Aburrá-Medellín se consiguió material de la zona con el fin de obtenerlo como información primaria. Para la mayor parte del río Medellín se utilizaron los valores de EPM de D50 para diferentes puntos del río para el año 2006.

Las medidas de restauración tenían como apoyo técnico el informe de "Manejo y restauración de cauces. Estudio de casos en los municipios de La Ceja y la Marinilla" (Zapata *et al.*, 2013), y las guías de diseño del *US Army Corps of Engineers* de los Estados Unidos de América "*Hydraulic Design of Stream Restoration Projects*" y "*Channel Restoration Design for Meandering Rivers*" que sirven como guía de diseño para diferentes condiciones de flujo y características geomorfológicas del cauce.

La metodología de Rosgen busca parametrizar la estructura geométrica y de material que un cauce naturalmente estable debe tener para no presentar condiciones adversas de erosión o deposición que puedan afectar su dinámica. A pesar de que los cauces hayan sido afectados, estos presentarán un desequilibrio en su clasificación de Rosgen demostrando que su estructura no se ajusta con las condiciones estables de flujo. Modificando la forma del cauce intervenido se espera recuperar la condición previa a tales intervenciones.

El tramo 3C entre el puente de Girardota y El Hatillo es el tramo que más intervenciones presentó en el momento de diseñar las medidas de restauración debido a su alto grado de afectación antrópica, igualmente contó con un mayor detalle en información disponible para la calibración de los modelos y el posterior diseño; en este se trabajaron varios casos, el primer caso denominado "Original" presentaba las condiciones actuales del tramo calibrado, los diseños de meandros y secciones transversales denominados "Restaurado" corresponden a las alternativas de restauración diseñadas para modificar la clasificación de Rosgen general de la corriente.

Las condiciones de restauración fueron igualmente validadas de acuerdo con información geométrica recopilada en los tramos de estudio, entre los que se cuentan mapas históricos o ortofotografías previas a muchas intervenciones de canalización y rectificación, aunque carecen de una correcta caracterización y georreferenciación que hacen difícil su utilización. A pesar de esto, fue posible ajustar la geometría y predecir una condición base de restauración que buscara llevar al cauce a un estado previo a la intervención antrópica negativa.

Finalmente se analizaron los resultados obtenidos después de diseñar las medidas de restauración con el fin de determinar su eficiencia; con estos nuevos resultados se rediseñaron los puntos en los cuales se continuaron presentando dificultades, se replantearon las medidas y se analizaron nuevamente los tramos estudiados. Las intervenciones eran calculadas nuevamente con los modelos numé-

ricos de las guías de restauración, trazadas a partir de la herramienta AutoCAD Civil 3D y modeladas hidráulicamente con el modelo Iber 2.2 para verificar una vez más las nuevas características de flujo. La modelación para la verificación del comportamiento hidráulico se realizó bajo condiciones de flujo no permanente con el fin de identificar las variaciones en el tránsito de la onda a lo largo del tramo y los efectos de disipación generados por piscinas en el cauce principal y llanuras de inundación.

3. JUSTIFICACIÓN

En general, los beneficios ecológicos y sociales del desarrollo de medidas de restauración en una corriente abarcan los siguientes campos: control de inundaciones, estabilización de la corriente y control en el transporte de sedimentos, restablecimiento de condiciones naturales para la vegetación riparia, la fauna nativa y los ecosistemas aledaños, permite desarrollar el potencial recreacional y ecoturístico del tramo restaurado y mejora la calidad del agua. Toda intervención humana sobre una corriente afecta sus condiciones de flujo en el tramo intervenido, lo cual afecta igualmente las condiciones de flujo aguas arriba y abajo de la corriente.

Inicialmente se analizaron los beneficios, apoyados en el caso del río Aburrá-Medellín. Anteriormente este río contaba con una geomorfología fuertemente meándrica en todos sus tramos, con su banca y llanura de inundación bien definida. Los cambios que mayores impactos generaron fueron las múltiples rectificaciones y canalizaciones en su tercio medio que corresponde a la zona Urbana del Valle de Aburrá, con afectaciones similares en los tramos aguas arriba y aguas abajo pero a menor escala.

A pesar de que ambos tramos rurales han sufrido rectificaciones importantes, estos aún conservan condiciones naturales que pueden ser consideradas en un análisis de Rosgen. Pese a que estos tramos cuentan con una afectación importante y carecen de información de calidad, presentan las mejores condiciones para intervención e implementación.

El tramo rural aguas arriba se ha visto afectado por un mayor transporte de sedimentos y un aumento en los niveles de erosión en el lecho y la banca de la corriente, debido a la condición aguas abajo que acelera al flujo y a un continuo proceso extractivo en el lecho que ha acelerado todos los impactos negativos. Los problemas de erosión son especialmente notorios cerca del tramo rectificado y canalizado. Esto genera inestabilidad en las condiciones normales de flujo de la corriente y cambios en su forma y capacidad de soportar vida.

El tramo aguas abajo también presenta afectación con un mayor número de inundaciones para periodos de retorno menores a valores históricos, debido a que el tramo rectificado reduce el tiempo de concentración hacia el tramo aguas abajo. Además, como el canal no está completamente canalizado, este no cuenta con la misma capacidad hidráulica para transportar ese excedente de volumen en tan corto periodo de tiempo desbordando el excedente en su llanura de inundación. El aumento en la velocidad de flujo también ha generado un incremento en el transporte de sedimentos y los niveles de erosión en la banca. Los efectos negativos generados por estos eventos son más dañinos que los generados por las inundaciones, ya que las inundaciones a pesar de generar afectaciones humanas, han desplazado a las comunidades hacia las zonas no inundables, donde no se presentan afectaciones.

El efecto de las erosiones en ambos tramos ha generado inestabilidad en la corriente, desprendimiento de banca (derrumbes) y pérdida de hábitat para las especies de peces, mamíferos y plantas establecidas en la zona. El aumento del transporte de sedimentos ha disminuido la concentración de oxígeno en el agua y aumentado la turbiedad. El incremento en la velocidad de flujo también ha impedido el asentamiento de especies de peces y su procreación. Los beneficios de la restauración física del tramo abarcan el control de inundaciones, estabilización de la corriente y el mejoramiento de las condiciones naturales a lo largo del tiempo.

El control de inundaciones puede darse con un adecuado diseño de las medidas de restauración. Se podrían mejorar las condiciones previas al ser modificada la corriente, deteniendo el efecto negativo ocasionado por los cambios generados, dándole a la corriente una mayor capacidad de disipar las crecientes que generan inundaciones. También se esperaría una mejora en la estabilidad de la corriente y transporte de sedimentos al permitir la recuperación gradual de la corriente, generando zonas de baja velocidad (zonas de vida), donde los hábitats puedan establecerse nuevamente; todo esto implementando las medidas de restauración adecuadas de control de la erosión y transporte de sedimentos.

El restablecimiento de condiciones naturales para las especies nativas animales y vegetales amenazadas permite establecer un control sobre las condiciones de flujo, facilitando que las especies desplazadas recuperen esos espacios gradualmente. En caso de que el daño sea tan extenso que estas no puedan volver de forma natural, se podrían introducir de forma artificial.

Permite también desarrollar el potencial recreacional y ecoturístico del tramo restaurado para el aporte económico de las obras necesarias para implementar las medidas de restauración planteadas. Además, los beneficios económicos ayudan a la comunidad a tener mayor conciencia del valor de la conservación y de la restauración. Finalmente, la calidad del agua de los sectores restaurados mejoraría en gran medida por la creciente biodiversidad. El proyecto también ayudaría al desarrollo de nuevos planes de restauración en corrientes con problemáticas similares. De igual forma, serviría de soporte para proyectos de intervención tales como Bio 2030 y Parques del Río Medellín.

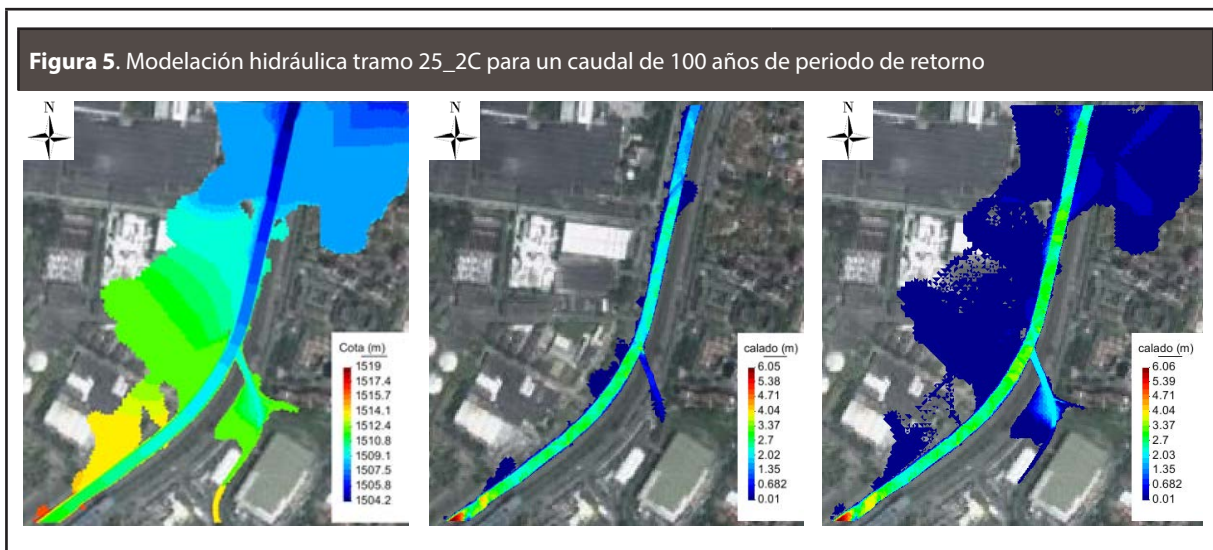
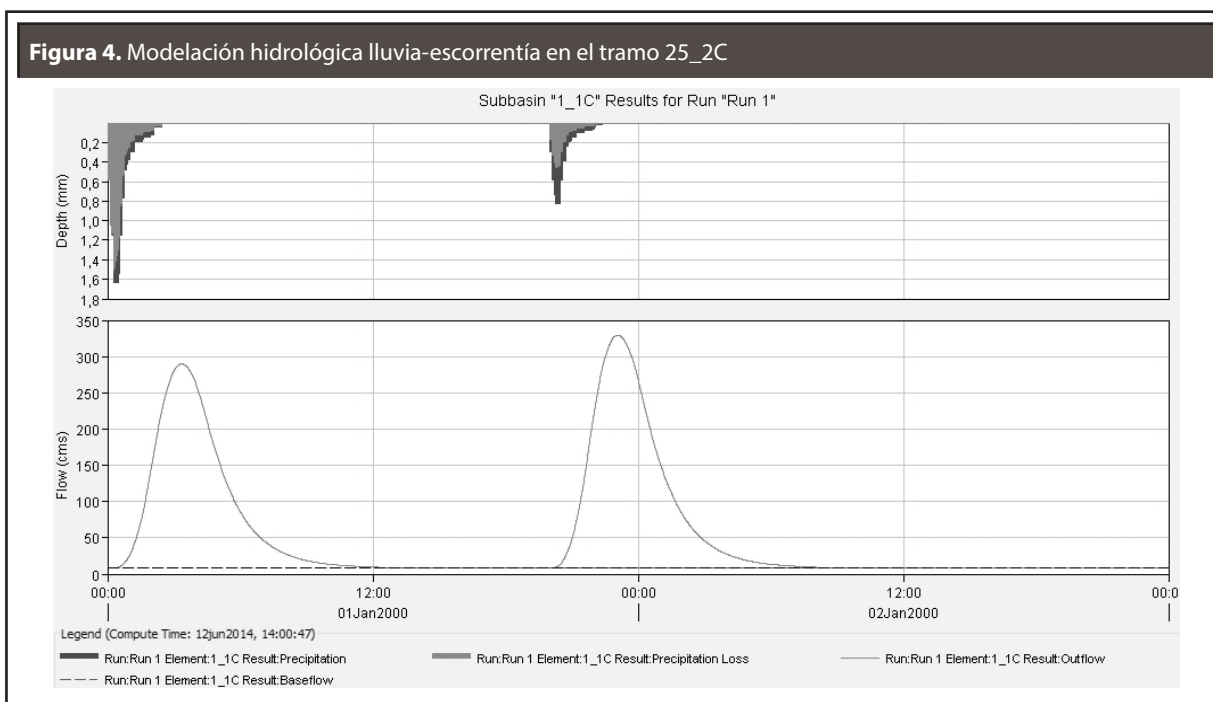
En definitiva, el río Medellín es un elemento natural que estructura el desarrollo urbano del Valle de Aburrá, pero equivocadamente antes era visto como un obstáculo para la urbanización de zonas útiles, lo cual generó la proliferación de las canalizaciones, y un pensamiento colectivo de que esta era la única forma de desarrollo cerca de una corriente

fluvial. Este proyecto busca cambiar la forma en la que las personas ven el río y presentar alternativas de desarrollo acordes con las necesidades actuales de conservación y restauración de los ecosistemas.

4. RESULTADOS

El tramo del río comprendido entre 500 m aguas arriba de la desembocadura de la quebrada

La Ayurá en el río Aburrá-Medellín y el puente de La Aguacatala cuenta con un canal recubierto en hormigón con lecho natural. El régimen de flujo es marcadamente mixto, con predominancia supercrítica bajo condiciones normales y presenta una llanura de inundación amplia pero muy poblada por construcciones e infraestructura urbana, como se muestra en la **Figura 5**.



La **Figura 5** presenta la modelación hidráulica de una creciente hidrológica para un periodo de retorno de 100 años en el tramo 25_2C. El primer cuadro muestra el mapa de elevación digital utilizado en el modelo; la imagen del centro presenta la mancha de agua en el canal principal cuando empieza a desbordar al canal en la llanura de inundación, y el cuadro de la derecha muestra la mancha de inundación para flujo permanente del caudal de 100 años de periodo de retorno.

En el tramo 25_2C el paso de la creciente tanto para el modelo 1D como el 2D fue similar para condiciones de flujo normales. El régimen del flujo fue supercrítico, mientras que para caudales extremos el régimen de flujo fue mixto, con cambios

de régimen muy notorios a lo largo del recorrido, inundando una vasta llanura tanto en la margen izquierda como en la derecha. El modelo 1D presentó unas condiciones de inundación más desfavorables ya que sobredimensionó el paso del agua en la llanura de inundación; también tuvo dificultades para presentar la mancha debido a las condiciones de frontera que genera el modelo y no presentó una condición que sí mostró el modelo 2D en dos puntos de importancia para los resultados: el primero en la llanura de inundación y el segundo en la desembocadura de la quebrada La Ayurá. En ambas zonas se presentaron condiciones de contraflujo en el momento del paso de la creciente, causando problemas y afectaciones en las zonas cercanas, como se muestra en la **Figura 6**.

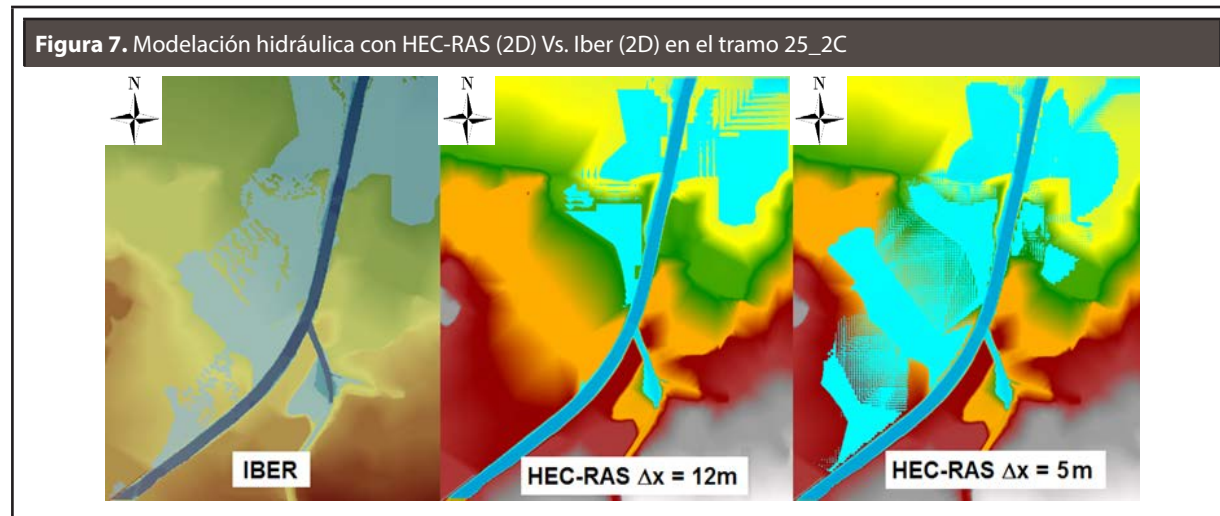
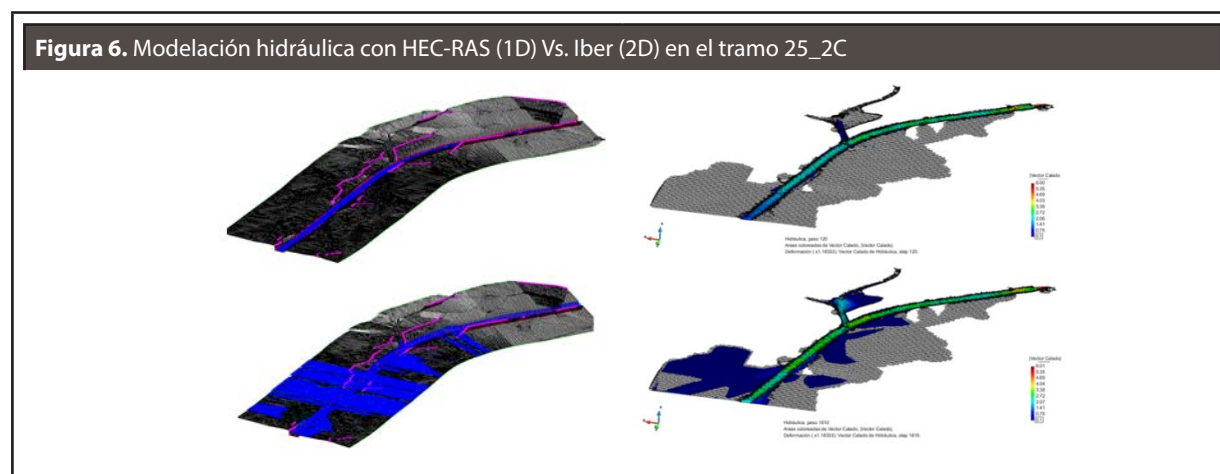
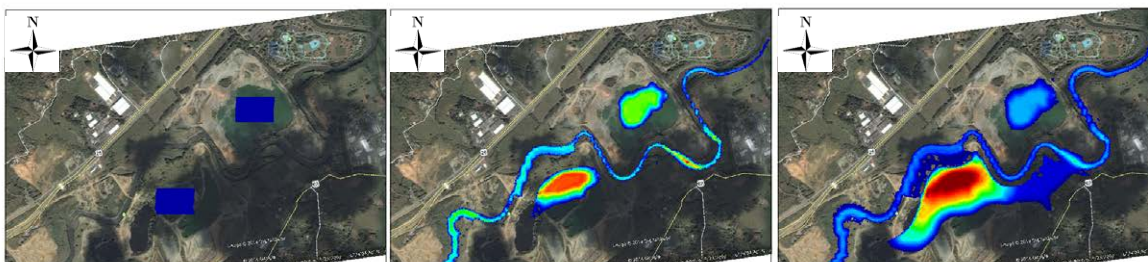


Figura 8. Modelación hidráulica tramo 10_3C – zona Girardota

La **Figura 6** presenta en la parte superior la mancha generada por el tránsito aproximado del caudal medio a lo largo del tramo de estudio. En la parte inferior se aprecia la mancha generada en el momento de alcanzar el caudal pico de la creciente de 100 años de periodo de retorno para ese punto del río; las dos figuras del lado izquierdo son los resultados del modelo en HEC-RAS, mientras que los de la derecha son los resultados del modelo en Iber.

La nueva versión de HEC-RAS 5.0, versión beta para el momento en el cual se realizó el estudio, permite el cálculo hidráulico bidimensional, dándole la posibilidad de comparar los resultados con el modelo Iber, como se presenta en la **Figura 7**.

La **Figura 7** presenta los resultados de modelar bidimensionalmente para flujo permanente con Iber y HEC-RAS con tamaño de malla de 12 m y 5 m. Se aprecia la similitud entre la mancha de Iber y la de HEC-RAS de 5 m, debido al detalle de la topografía que es mejorado utilizando un tamaño de celda menor. Para el caso bajo condiciones de flujo permanente la mancha presenta en HEC-RAS e Iber condiciones similares, pero al analizar el tramo bajo condiciones de flujo no permanente, las condiciones de flujo que más se acomodan a la propagación de la onda en el tramo es la correspondiente al de tamaño de malla de 12 m.

Para el modelo de Iber en tramos en los cuales la longitud de circulación es extensa o se presentan pozos que retienen el flujo, mientras estos se llenan, se presentaban problemas en el momento de modelar el evento del tránsito de cualquier creciente sin

importar su caudal pico, ya que en el momento de llegar a algún punto de empozamiento, presentaba una disipación inexistente. Para evitar que se presentara este efecto, se debe precalentar el modelo para aproximarlo a las condiciones previas esperadas en el momento de ocurrir la creciente. Se modeló un caudal base durante el periodo de retraso de la onda para llenar estos espacios en el canal, y para los pozos se utilizó una herramienta de Iber que permite llenarlos a un nivel conocido en las celdas de información (**Figura 8**).

La **Figura 8** presenta la secuencia de lo descrito en el párrafo anterior. La primera imagen muestra el paso 0 de modelación; en este solo se muestran los cuadros con información topográfica a los cuales se les asignó la condición de altura de flujo inicial. La segunda imagen presenta el tránsito del caudal base en el paso 15 de modelación, lo que equivale a 75 minutos de tiempo de circulación del agua, lo cual representa el tiempo que tarda el caudal base en llegar desde la sección de entrada hasta el final del tramo. Finalmente, el paso 87 de modelación muestra la mancha generada después de 7 horas y 15 minutos del tránsito de la creciente.

La caracterización geomorfológica para el tramo de Girardota – El Hatillo para las condiciones de flujo actuales arrojó que el cauce presenta una predominancia de tipo F y B, los cuales no representan las condiciones naturales del cauce del río, ya que el tipo F representa un canal altamente erosionado y encañonado, mientras que el tipo B corresponde a un río de alta pendiente (mayor a 2%), sin meandros

y con un canal moderadamente encañonado. Todo lo mencionado se presenta en la **Tabla 1**. Igualmente se presenta la mancha de inundación para 100 años de periodo de retorno en la **Figura 9**; en esta se detallan las grandes afectaciones por inundación a lo largo del tramo, principalmente en su zona media.

Las condiciones de flujo para el tramo de Girardota – El Hatillo después de diseñar las medidas de restauración se presentan en la **Tabla 2**, en la cual se aprecia el mejoramiento de las condiciones geomorfológicas, acondicionándose a unas condiciones más aproximadas a las esperadas en el tramo,

de acuerdo con los diseños de curvas de meandros y secciones transversales de las guías del *US Army Corps of engineers* de los Estados Unidos, *Channel Restoration Design for Meandering Rivers* (2001) y *Hydraulic Design of Stream Restoration Projects* (2001). Al mejorar las condiciones de flujo en el tramo también se disminuye el riesgo por inundación en zonas no designadas como llanuras de inundación, como se muestra en la **Figura 10**.

Comparando las manchas e inundación presentadas en la **Figura 9** y **Figura 10** se aprecia la magnitud de la intervención requerida en el tramo.

TABLA 2. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE ROSGEN EN GIRARDOTA BAJO CONDICIONES ACTUALES									
	1	2	3	4	5	6	7	8	TOTAL
Incisión	2,77	1,24	2,32	1,12	1,15	2,13	1,87	2,16	1,85
W/D Pr 2,33	33,80	29,28	31,48	31,01	35,11	23,59	24,25	24,12	29,08
W/D Pr 100	93,52	36,30	72,96	34,76	40,46	50,27	45,31	52,20	53,22
Sinuosidad	1,96	2,15	1,80	1,56	1,81	1,88	1,83	2,16	1,89
Tipo	C	F	C	F	F	B	B	B	B
Pendiente	-0,054	0,025	0,021	0,021	0,051	0,040	0,002	-0,224	-0,015

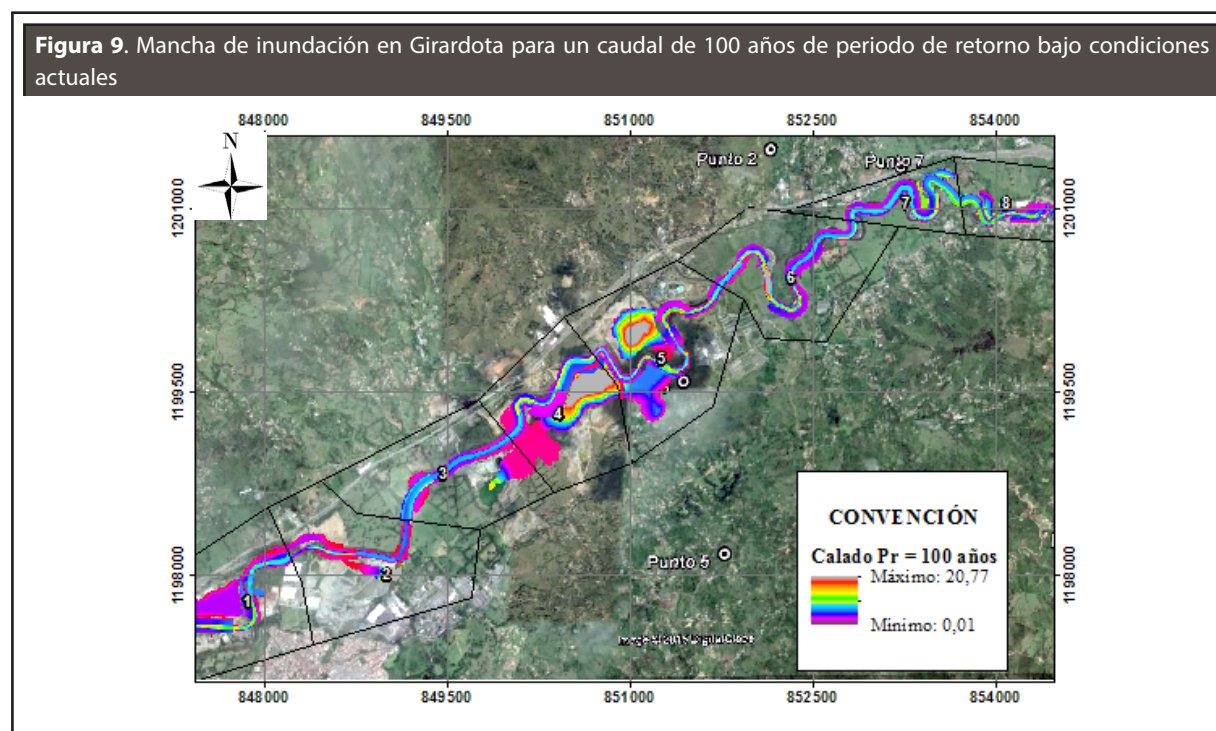
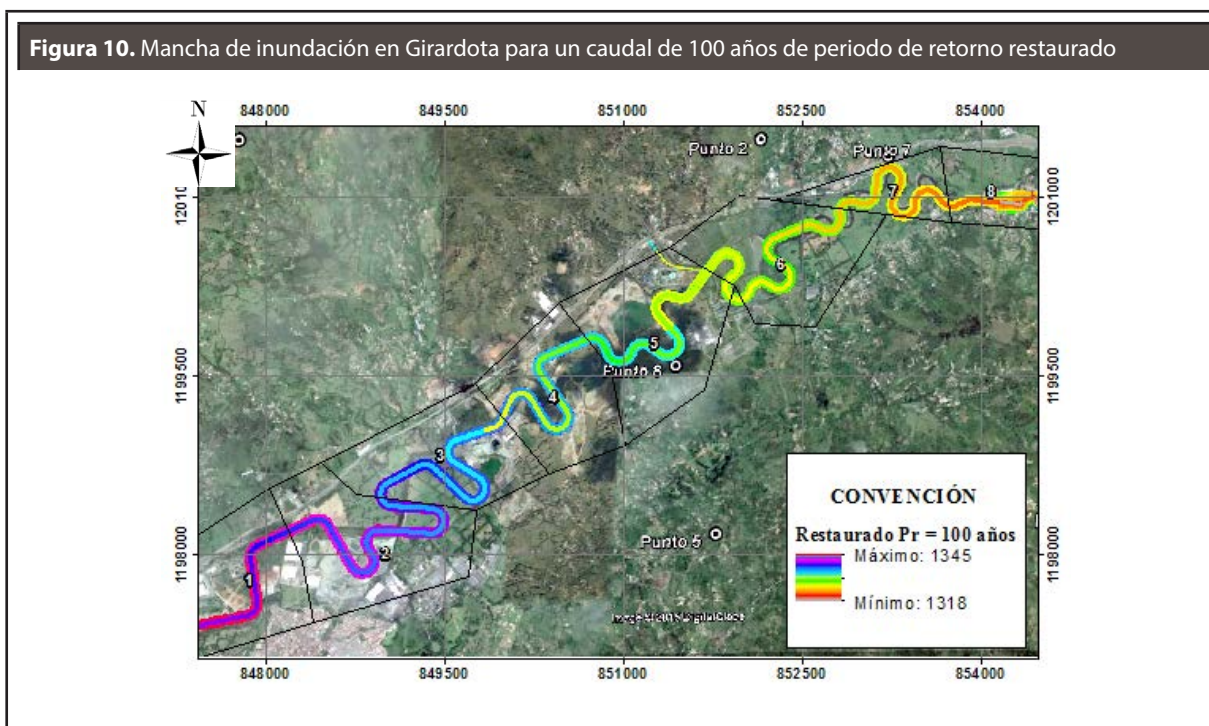


TABLA 3. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE ROGEN EN GIRARDOTA RESTAURADO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	TOTAL
Incisión	2,66	2,63	2,66	2,71	2,50	2,71	2,53	2,56	2,71
W/D Pr 2,33	12,38	12,25	12,38	12,38	12,00	12,75	12,25	13,00	12,13
W/D Pr 100	33,26	31,96	32,61	31,30	33,91	31,30	33,91	33,59	30,98
Sinuosidad	2,47	2,44	2,47	2,31	2,36	2,31	2,44	2,50	2,41
Tipo	C	C	C	C	C	C	C	C	C
Pendiente	0,089	0,099	0,081	0,087	0,089	0,086	0,097	0,085	0,085

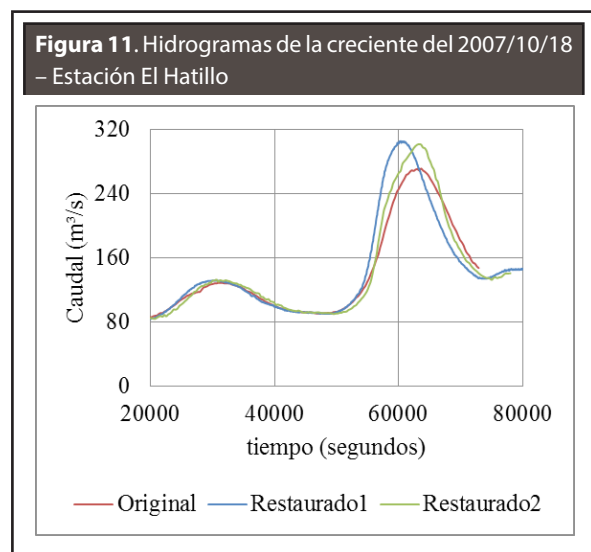


La modelación hidráulica, después de implementar las medidas de restauración para el tramo de estudio de Girardota – El Hatillo, entregó resultados inesperados del tránsito de la onda a lo largo del tramo, principalmente por el tiempo de recorrido de la onda entre ambos puntos de control y el nivel de disipación esperado. Todo esto se aprecia en la **Figura 11**. El caso Original representa el río bajo las condiciones actuales, el caso Restaurado1 representa el río intervenido en su primer tercio, agregando 1,5 km de meandro y finalmente el caso

Restaurado2 representa una intervención total del río, agregando más de 4 km extra de meandros.

La **Figura 11** muestra los tránsitos de la creciente registrada el 18 de octubre de 2007 para el canal actual “Original” y para los canales de dos propuestas de restauración. Analizando los resultados de las modelaciones se vio que el caudal correspondiente a esa creciente se encuentra muy cerca del caudal de 2,33 años de periodo de retorno, también llamado caudal formador, por lo que en el momento de transitar la creciente para los casos en los cuales

se restauró el cauce, el caudal se encontraba en el nivel máximo necesario para empezar a verter hacia la llanura de inundación; por esta razón, a pesar de que la creciente debe recorrer más para llegar hasta el punto aguas abajo, la diferencia entre los niveles de disipación después de establecer las medidas de restauración no es tan significativa.



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El uso de modelos 1D no es recomendable para zonas donde el flujo del agua es marcadamente bidimensional, ya que los resultados generados no representarían de forma precisa la realidad de las condiciones de flujo en el tramo modelado. Para este caso, el uso de modelos 2D permite la obtención de resultados de mejor calidad.

El tramo urbano en la parte media de la cuenca esta mayormente canalizado pero para casos extremos en los cuales la protección de la banca es insuficiente, la generación de la inundación es bidimensional por lo que un modelo acoplado 1D-2D sería más recomendable, pero este tipo de modelos requiere un mayor detalle de información y mayor tiempo de generación del modelo.

El caso entre Girardota y Barbosa, a pesar de que el cauce ha sido fuertemente alterado y recti-

ficado en muchas zonas, se podría considerar bidimensional debido a que conserva una composición meándrica que genera zonas de recirculación y zonas de alta velocidad en una misma sección transversal afectando considerablemente las condiciones de flujo y los resultados hidráulicos. Igualmente para casos extremos la generación de la mancha de inundación es marcadamente bidimensional.

El tiempo de ahorro entre un modelo 1D-2D y uno 2D bajo condiciones de detalle de información similares es considerablemente mejor, por lo que para realizar una modelación hidráulica 2D se debe analizar la capacidad de procesamiento de información de la máquina utilizada. Se debe tener en cuenta que esta relación puede variar dependiendo del área procesada, su detalle, el tiempo de procesamiento y el intervalo entre pasos del proceso, y para optimizar el tiempo de procesamiento se debe sacrificar la calidad de alguno de estos procesos, lo cual afecta negativamente la calidad de los resultados. Comparando el tiempo de procesamiento entre HEC-RAS e Iber, el primero tardaba entre un 2% y un 3% del tiempo que le tomaba a Iber obtener resultados.

Los resultados de la modelación del tránsito de crecientes, además de servir como insumo para diseñar adecuadas medidas de restauración, permite tomar decisiones en entornos claves como: la planificación urbana y de usos del suelo, control y mitigación del riesgo, aprovechamiento del recurso hídrico y planes de intervención en tramo de un río.

A pesar de que el Valle de Aburrá cuenta con una red de estaciones de medición e información topográfica de buena calidad, la disponibilidad de esa información de forma libre y accesible y la variabilidad espacial de esa información limitan el alcance de gran cantidad de proyectos a la zona urbana entre Envigado y Bello, ya que cuenta con una mayor amplitud tanto en escala como en distribución de la información. En general, la topografía es la mayor carencia en las zonas rurales donde el detalle del río se pierde fácilmente; el tramo entre Girardota y Barbosa contó con información de secciones transversales que facilitaron su caracterización, mientras

que otros tramos con menos información no fueron caracterizados correctamente.

Antes de iniciar la modelación hidráulica se deben verificar los datos de entrada: la geometría, estructuras, coeficiente de Manning, condiciones de borde e intervalo de tiempo de cálculo, ya que algún error en estos datos puede generar inestabilidad en el modelo, haciendo que la corrida de los datos se detenga o bien que continúe pero entregando resultados que no representen correctamente el evento que se pretende modelar.

El transporte de sedimentos no fue analizado en ninguno de los modelos hidráulicos desarrollados debido a que este parámetro requiere un amplio número de variables que son imposibles de obtener para la zona y su calibración sería insuficiente. El modelo Iber incluye un módulo de transporte de sedimento, pero este es muy sensible a cambios en sus variables de entrada y requiere una mayor calibración y cantidad de variables medidas. El D10 y D50 fueron utilizados para la calibración del número de Manning y como parámetro de entrada de las ecuaciones empíricas de restauración de cauces presentados en las guías de diseño.

Las medidas de restauración suponen que el tamaño de partícula D10 y D50 en los tramos restaurados se va a conservar a lo largo del tiempo después de su implementación y que solo serán modificadas las condiciones geométricas que alterarán las condiciones de flujo a lo largo del cauce hasta encontrar una condición de equilibrio. Se esperaría que cambios en las condiciones de flujo alteren el transporte de sedimento y el tamaño de partícula en cada zona. Este cambio puede llevar a otros proyectos que se enfoquen en una mayor recolección de información de las condiciones no hidráulicas y los posibles cambios generados.

La modelación hidráulica de los tramos de estudio después de establecer las intervenciones en el cauce es fundamental para determinar posibles afectaciones directas o indirectas que se puedan generar por las modificaciones realizadas al alineamiento del río o a su forma. La principal afectación

que se encontró en el tramo de estudio de Girardota – El Hatillo fue el aumento del caudal pico debido a la eliminación de varios pozos y debido a que para el caudal de la creciente analizada, el efecto de la llanura de inundación era nulo, mientras que bajo las condiciones actuales, ese caudal inunda gran cantidad de terrenos que se podrían considerar como llanura de inundación.

REFERENCIAS

- Álvarez, L.M. (2005). *Propuesta de calibración de un modelo para el tránsito de crecientes en un tramo del río Medellín. Estación Puente de Girardota – Puente de El Hatillo*. Envigado, Antioquia.
- Artemisa, Unicauca. (2015). *Parte II. Transporte de sedimentos*. Cali, Valle del Cauca.
- Chow, V.T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Colombia. Nomos S.A.
- Chow, V.T. (1994). *Hidrología Aplicada*.
- EAFIT (2014) Bio 2030, Plan director de Medellín y el Valle de Aburrá. [Online] Disponible en: <http://www.eafit.edu.co/minisitios/bio2030/Paginas/inicio.aspx>
- EDU. (2014). Parque Botánico del río Medellín. [Online] Disponible en: <http://www.edu.gov.co/index.php/proyectos/parque-vial-del-rio>
- EPA. (2008). Fundamentals of the Rosgen Stream Classification System. [Online] Disponible en: U.S. Environmental Protection Agency. [Consultado en 2014].
- FLUMEN and GEAMA (2012). *Iber, Manual de referencia*. España.
- IDEAM (2010). *Leyenda nacional de cobertura de la tierra*. Bogotá S.C. Scripto Ltda.
- IGAC (2005). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras*. Medellín: Departamento de Antioquia. Bogotá, Colombia.
- Jaramillo, C. (2011). *Modelación del tránsito de crecientes con el HEC-RAS en un tramo del río Medellín*. Envigado, Antioquia, Colombia.
- USDA-NRCS (2007). Part 654- National Engineering Handbook. Chapter 11 Rosgen geomorphic channel design. De: United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. [Online] Disponible en: <http://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17771.wba>. [Consultado en 2014].

- MACDT, AMVA, CORNARE, CORANTIOQUIA, UNAL (2008). Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del río Aburrá (POMCA). Medellín, Antioquia.
- Marín, A. (2013). Modelación del tránsito de creciente con el HEC-HMS y HEC-RAS en un tramo del río Medellín. Envigado, Antioquia.
- Rosgen, D.L. (1994). A classification of natural rivers. *Catena* (22), pp. 169-199.
- US Army Corps of Engineers (2012). River analysis hydraulic reference manual. Washington DC.
- US Army Corps of Engineers (2012). Hydrologic modeling system HEC-HMS. User's Manual. Washington DC.
- Zapata, J.; Barros, J.; Vallejo, L. (2012). *Fundamentos de restauración de ríos para las políticas públicas colombianas*. Envigado, Antioquia.
- Zapata, J.; Barros, J.; Vallejo, L. (2014). *Manejo y restauración de cauces. Estudio de casos en el municipio de La Ceja y de Marinilla*. Envigado, Antioquia.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Marín Muñoz, A.F.; Barros Martínez, J.F. (2016). Modelación de tránsito de crecientes en el Río Aburrá-Medellín para una propuesta de su restauración. *Revista EIA*, 13(26), julio-diciembre, pp. 153-168. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.24050/reia.v13i26.165>