

ANÁLISIS DE CURVAS PROFUNDIDAD-CAUDAL EN UN TRAMO DEL RÍO MEDELLÍN (ANTIOQUIA, COLOMBIA)

Camilo Jaramillo Cardona

Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín, Colombia, cajacar71@eia.edu.co

Juan Fernando Barros Martínez

Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín, Colombia, pfjubar@eia.edu.co

RESUMEN

El presente proyecto se desarrolló a partir de información hidrológica, hidrógrafas de nivel y de caudal registradas en dos estaciones de medición, datos de geometría de 34 secciones transversales provenientes de levantamientos topográficos y batimétricos. Para la calibración y el estudio del comportamiento de las curvas profundidad-caudal se seleccionaron 9 crecientes que fueron transitadas en el modelo HEC-RAS 4.1 con el fin de analizar el comportamiento de las curvas profundidad-caudal en flujo no permanente.

Se llevó a cabo el análisis de sensibilidad para evaluar los resultados de las curvas profundidad-caudal teniendo en cuenta las características de la creciente, la forma de las secciones transversales y el coeficiente de Manning. Los resultados demuestran la estrecha relación que tiene la forma de la sección transversal con la trayectoria (*loop*) que define la curva profundidad-caudal, el alcance de las curvas de acuerdo a la magnitud de la creciente transitada y la afectación por el valor del coeficiente de Manning en dicha trayectoria.

Palabras claves: curvas profundidad-caudal, tránsito de crecientes, río Medellín.

ABSTRACT

This project was developed from hydrologic information, hydrographs of stage and discharged recorded at two measuring stations, geometry data from 34 cross sections that are the result of topographic and bathymetric surveys. For calibration and study the behavior of deep-discharge curves were selected 9 cross sections that were run in the HEC-RAS 4.1 with the aim of analyzing the behavior of deep-discharge curves in unsteady flow.

There was carried out the sensitivity analysis to assess the results of the depth-discharge curves taking into account the characteristics of the flood, the shape of the cross sections and the Manning coefficient. The results demonstrate the close relationship that has the shape of the cross section with the path (*loop*) that defines the depth-discharge curve, the scope of the curves according to the magnitude of the flood routing run and the value of the coefficient Manning on that path.

Keywords: rating curves, flood routing, Medellín river.

1. INTRODUCCIÓN

Los ríos o cauces sufren cambios en el tiempo debido a acciones naturales o antrópicas. Cuando se presenta un evento de creciente, se genera un desequilibrio en el régimen hidráulico del cauce, que produce un aumento considerable del caudal, el cual viaja a lo largo del canal. Este fenómeno es conocido como tránsito de crecientes y se fundamenta en el sistema de ecuaciones de Saint-Venant. Al ser un proceso complejo, se han desarrollado herramientas informáticas que permiten simular este fenómeno con mayor precisión y de forma sistemática.

Para el desarrollo del presente trabajo se adoptó el programa HEC-RAS para modelar condiciones de flujo no permanente en el tramo del río Medellín comprendido entre las poblaciones Girardota y El Hatillo. Durante el proceso de modelación se analizaron las variables que condicionan el comportamiento de las curvas profundidad-caudal, tales como la geometría de las secciones transversales, la forma y magnitud de las hidrógrafas y el coeficiente de Manning.

2. DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DE ESTUDIO

Ubicado en la Cordillera Central de los Andes se encuentra el Valle de Aburrá, conformado por los municipios de Sabaneta, Envigado, Copacabana, Girardota y Barbosa, en su margen oriental; Caldas, La Estrella, Itagüí y Bello en su margen occidental, y en su centro, la ciudad de Medellín, la cual es la capital del departamento de Antioquia al noroeste de Colombia con una población de 2'219.861 habitantes (DANE, 2005). El valle cuenta con una extensión de 1.152 km² pertenecientes a la cuenca del río Medellín, que recorre la ciudad de sur a norte y cuenta con una topografía irregular y pendiente, con altitudes que oscilan entre los 1.300 y los 2.800 msnm (AMVA, 2007). Mide un total de 70 km de longitud marcados por el río y cuenta con un ancho máximo de 10 km, siendo los estrechamientos más definidos los llamados Ancón Sur o de La Estrella y Ancón Norte, que encierran la zona conocida como Área Metropolitana Restringida, conformada por Medellín, La Estrella, Sabaneta, Envigado, Itagüí, Bello y Copacabana (Álvarez, 2005).

El tramo en estudio se encuentra a una altitud entre los 1.318 msnm y los 1.338 msnm entre las poblaciones Girardota y El Hatillo situadas a 26 km y 42 km respectivamente de la ciudad de Medellín en dirección noreste del Valle de Aburrá por fuera de la zona comprendida por el Área Metropolitana Restringida. El tramo se encuentra delimitado en dirección longitudinal, por las coordenadas 848.000 m y 854.500 m Este y en dirección latitudinal por las coordenadas 1.197.500 m y 1.202.000 m Norte, cuyo origen corresponde al Datum Bogotá, según el sistema de referencia adoptado por EPM en la ejecución del proyecto SIGMA (Álvarez, 2005).

La zona de interés, situada entre las estaciones limnigráficas Girardota (RMS-22) y El Hatillo (RMS-13) pertenecientes a la red hidrometeorológica de EPM, es de fácil accesibilidad hoy en día, principalmente por la doble calzada entre Bello-Hatillo conocida como Autopista Norte o Troncal de Occidente (Ruta Nacional 25) ubicada en la ribera occidental del río donde también se encuentra la línea del Ferrocarril de Antioquia. Al otro costado del río (margen derecha) está la Vía Machado la cual va desde Bello, pasando por Copacabana, hasta El Hatillo. Es una zona de suelos de origen coluvial en las laderas y aluvial a lo largo del río. El material predominante corresponde a anfíbolitas, neis y afloramiento del batolito Antioqueño, principalmente Tonalita y Granodiorita. (POMCA, 2007)

En cuanto a fallas tectónicas, se encuentra la presencia de la falla Don Matías a ambos márgenes del río Medellín y la falla El Guadual ubicada por la vía que conduce al Alto de Matasanos y sobre la autopista Medellín-Barbosa. En general esta área norte del valle presenta baja amenaza sísmica en ambos márgenes de la llanura aluvial del río, mientras se registra grados medio y alto en las laderas de escarpes rocosos con altas pendientes. (POMCA, 2007)

Las inmediaciones de la llanura del río Medellín en el tramo de estudio son clasificadas según el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del río Aburrá (POMCA) como suelo rural en protección dentro del área demarcada para el municipio de Girardota y como suelo rural en el área del municipio de Barbosa. En su estudio de mapas de zonificación, se ilustra la no restricción de pastoreo en la zona, en donde predominan los usos pecuarios, agrícolas y mineros.

La zona está actualmente contemplada entre las áreas de protección del Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y es conocida como la zona de protección hídrica del río Medellín. Corresponde a una zona de vida de bosque

húmedo Premontano (BHPM) tal como lo definió Holdrige en su sistema de clasificación en 1967. En el lugar se cuenta con cerca de 15 especies de árboles como el sauco de monte, el encenillo, el arrayán, el aguacatillo, entre otros, con alturas promedio entre 15 y 20 m. Al estar sobre piso térmico templado, la temperatura media del lugar oscila entre 18 °C y 24 °C, con una pluviosidad media, al registrarse un promedio anual de lluvia cercano a los 1500 mm. Sin embargo es importante el control orográfico que ejercen las montañas sobre el clima, pues existe un incremento de las precipitaciones en lo alto de las laderas (Álvarez, 2005).

3. DATOS

La información topográfica e hidrológica es la base para el desarrollo de la presente investigación. Corresponde a la caracterización técnica del tramo en estudio y es el insumo necesario para ingresar los datos de entrada en el modelo HEC-RAS.

3.1 TOPOGRAFÍA

El tramo de estudio es un tramo de comportamiento sinuoso en donde EPM realiza periódicamente levantamientos topográficos de algunas secciones, las cuales se encuentran espaciadas irregularmente.

El levantamiento realizado en el año 2001 consiste en 34 secciones transversales (**Error! Reference source not found.**). Comienza en la sección 36, ubicada 567,5 m aguas arriba del puente de acceso al municipio de Girardota en donde opera la estación limnigráfica RMS-22 hasta la sección 19 ubicada debajo del puente El Hatillo en la estación RMS-13. Para el subtramo comprendido entre la descarga La Tasajera y el puente de acceso al corregimiento de El Hatillo cuenta con levantamientos más actualizados, de los años 2001, 2003, 2005, 2006 y 2009. La información seleccionada para la elaboración del proyecto consiste en la combinación del levantamiento del año 2001 para el subtramo Girardota-La Tasajera y del año 2009 para La Tasajera-Puente El Hatillo.

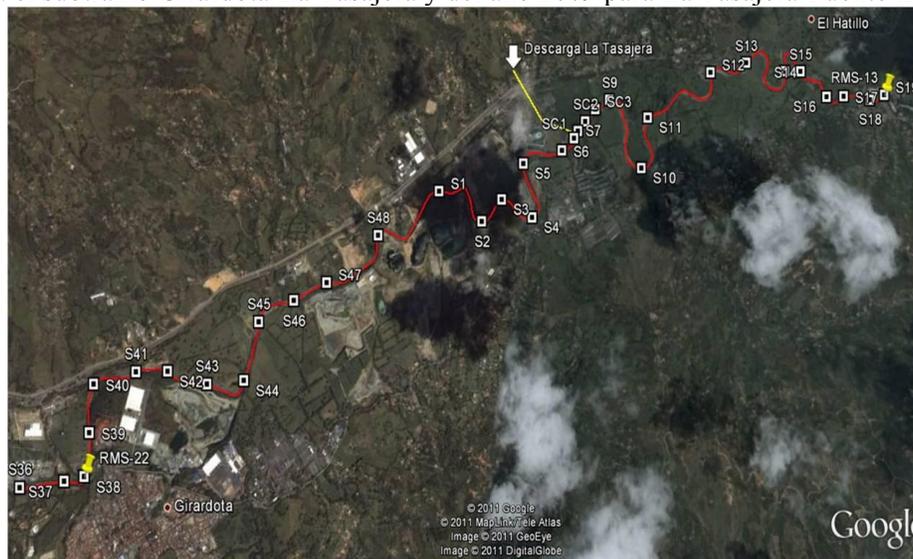


Figura 1.- Distribución espacial de secciones transversales en el tramo de estudio (Google Earth)

3.2 HIDROLOGÍA

La fuente principal de información hidrológica necesaria para el proceso de investigación es Empresas Públicas de Medellín (EPM) que cuenta actualmente con una red de estaciones hidrometeorológicas conformada por 198 estaciones para la medición de caudales, lluvias, temperaturas, radiación solar, humedad relativa, dirección del viento, velocidad y otras variables climáticas.

Después de un proceso de depuración de información se escogieron nueve crecientes para ser transitadas en el modelo. Consisten en hidrógrafas de tres días de duración en donde la fecha de inicio corresponde a un día antes del que se desarrolla la creciente principal y la fecha de fin a un día después de esa creciente.

Se considera que el fenómeno de alta lluvia es uno de los principales aportes que permite que el caudal aumente en gran medida durante el tramo de estudio, por lo que se hizo necesaria la información de hidrógrafas de precipitación. Se analizaron las hidrógrafas de precipitación junto con hidrógrafas de creciente, para identificar el comportamiento conjunto de ambos eventos en la creciente del 2 de junio de 2011 como el máximo tránsito registrado por EPM en los últimos años, en donde se registró un caudal instantáneo de 418,26 m³/s en la estación RMS-22 de Girardota que corresponde a un período de retorno de entre 25 y 60 años.

4. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para el proceso de calibración se parte de nueve crecientes seleccionadas, de las cuales se descartan dos crecientes por no contar con información de registro en la estación RMS-13 de El Hatillo. Se tiene que las siete crecientes a transitar son la N.º1 (16/05/2005), N.º2 (30/04/2006), N.º3 (26/10/2007), N.º4 (20/05/2008), N.º5 (14/11/2010), N.º7 (27/04/2011) y N.º8 (02/06/2011).

Con el fin de caracterizar las propiedades que condicionan el comportamiento de las hidrógrafas resultantes en El Hatillo se realizaron una serie de modelaciones. El primer análisis o modelación preliminar consiste en comparar la hidrógrafa resultante en el modelo con respecto a la real, partiendo de no contar con información de aportes y teniendo características como coeficiente de Manning de 0,025 y valores de coeficientes de contracción y expansión de 0,1 y 0,3 respectivamente.

En la Figura 2 se presentan los resultados de la modelación preliminar para la última sección aguas abajo en donde opera la estación RMS-13 de El Hatillo en el caso de la creciente N.º4 (20/05/2008).

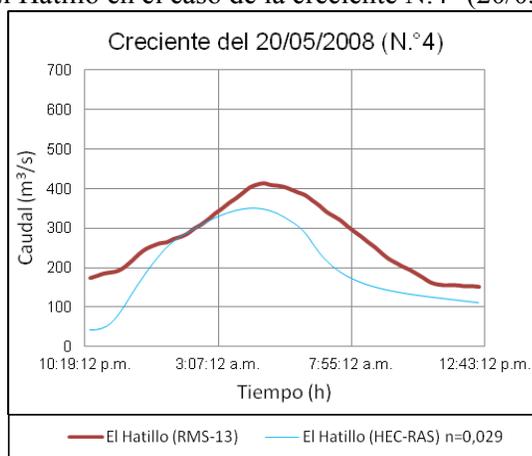


Figura 2.- Hidrógrafa de flujo en la sección 19 – Modelación preliminar

Se encuentra que en las 7 crecientes transitadas el pico de la hidrógrafa resultante en el modelo se da antes y por debajo del pico real, el cual es medido por la estación limnigráfica. La forma de la hidrógrafa es muy similar a la real, sin embargo, al ingresar una condición inicial al modelo de caudal base del río de 41,28 m³/s, el resultado comienza a partir de este valor.

Al presentarse el pico de la hidrógrafa resultante antes de la real, se decide cambiar el coeficiente de Manning por ser el factor que condiciona el comportamiento temporal del tránsito, acelerando o desacelerando el flujo.

4.1 MODELACIÓN DE CRECIENTES CAMBIANDO EL COEFICIENTE DE MANNING

Con el fin de identificar el efecto que genera el cambio del coeficiente de Manning en el comportamiento de las hidrógrafas resultantes, se transitaron las siete crecientes con nueve consideraciones distintas. Seis tránsitos se hicieron cambiando el coeficiente de Manning para toda la sección transversal. Los valores escogidos fueron: n=0,029; n=0,040; n=0,050; n=0,060; n=0,070 y n=0,080.

Dos consideraciones adicionales a las seis mencionadas, consisten en la combinación de dos coeficientes de Manning para cada sección; uno para el canal principal y otro para las llanuras de inundación. Estas

consideraciones tienen un mayor sentido físico, pues el material aluvial que arrastra y reviste el canal principal es de características distintas a la composición de las llanuras de inundación en donde normalmente se encuentra una espesa capa vegetal acompañada por árboles y arbustos, los cuales generan mayor obstáculo a la corriente. Se escogieron entonces un Manning de 0,029 en el canal y $n=0,050$ en las llanuras para la primera consideración, y en la segunda se tomó un $n=0,040$ en el canal principal y un $n=0,050$ para las llanuras de inundación.

A continuación (Figura 3 **Error! Reference source not found.**) se presenta el resultado de la hidrógrafa en la sección 19 de El Hatillo al transitar la creciente con las 9 consideraciones descritas.

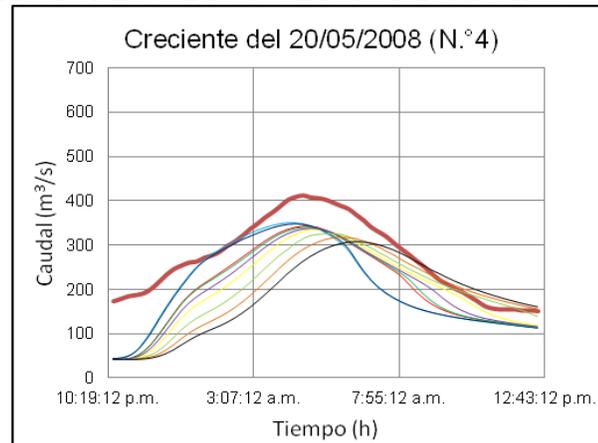


Figura 3.- Hidrógrafa resultante según el coeficiente de Manning

Para todas las crecientes se tiene que un valor de Manning de 0,029 genera el mayor pico de caudal, en un tiempo antes que el pico de la hidrógrafa real, mientras que un $n=0,080$ es un valor tan elevado que causa un gran retardo del pico y además deforma el comportamiento del tránsito.

Por otro lado, se observa cómo a medida que aumenta el valor del coeficiente de Manning, la hidrógrafa se va atenuando hasta aplanar el pico máximo.

Se tiene como resultado, que valores de Manning entre 0,040 y 0,050 se comportan muy similares a los verdaderos tránsitos y que su pico máximo corresponde en el mismo instante de tiempo a la hidrógrafa real. Por lo anterior se deduce que el comportamiento más aproximado lo genera la combinación de coeficientes, al tener un $n=0,040$ en el canal principal y un $n=0,050$ en ambas llanuras de inundación.

A partir de los resultados encontrados se determinó continuar el análisis con tres crecientes para su calibración. Estas crecientes ocurrieron el 16/05/2005, el 20/05/2008 y el 14/11/2010.

4.2 MODELACIÓN DEFINITIVA DEL TRÁNSITO DE CRECIENTES

Para la modelación de las tres crecientes seleccionadas, se amplió el rango de las hidrógrafas en Girardota y El Hatillo, con el fin de que la hidrógrafa inicial comience en un valor cercano al caudal base ingresado en el modelo. Como el pico de las crecientes del 20/05/2008 y del 14/11/2010 no proviene desde valores cercanos al caudal base, se hizo necesario hacer una simplificación, proyectando la pendiente de ascenso de la hidrógrafa, tal como se ilustra en la Figura 4.

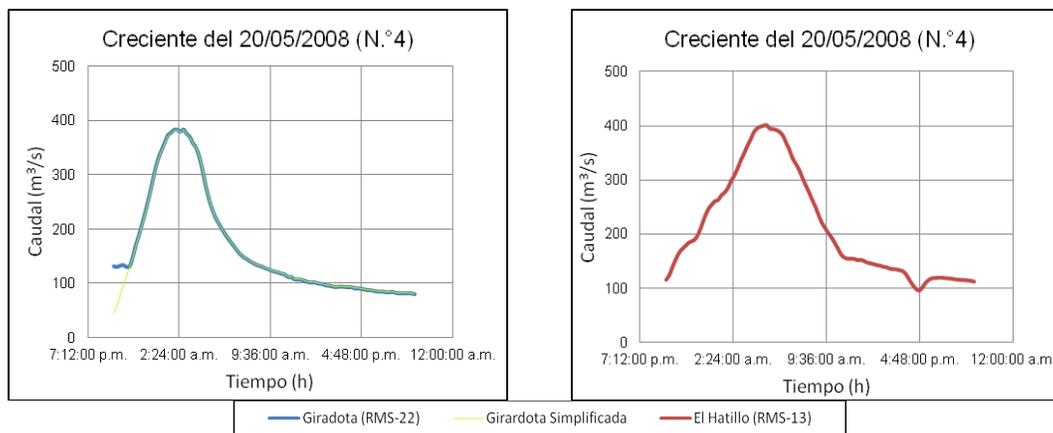


Figura 4.- Hidrógrafa ampliada

De los análisis anteriores se dedujo que a pesar de la similitud en la forma de las hidrógrafas, el pico máximo de caudal en el modelo es inferior al pico real, lo que a su vez se manifiesta en que a lo largo del tránsito, se transporte un menor volumen de agua. Fue necesario entonces identificar los posibles aportes al tramo en estudio para las crecientes seleccionadas. Aportes tales como la precipitación en el tramo, la escorrentía o drenaje de la cuenca, las corrientes tributarias y la descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera.

En la visita de campo realizada el 14 de octubre de 2011, se identificaron cerca de 20 tributarios. Por falta de registro de los aportes de caudal de estas corrientes, se hizo una aproximación asumiendo los cauces como canales rectangulares con los siguientes datos hidráulicos: velocidad de la corriente de 0,5 m/s para cauces con ancho del canal entre 0,0 y 0,3 m; velocidad de 0,8 m/s para cauces entre 0,4 y 2,0 m; y velocidad de 1,0 m/s para cauces entre 2,0 y 10,0 m. La sección transversal se estimó con medidas de referencia del lugar. Se procedió a estimar un caudal máximo para los aportes de diez veces su base y ser ingresados al modelo como hidrógrafas de flujo con el comportamiento de la lluvia en cada periodo de tiempo. La forma en la que se hizo este cálculo fue identificando los valores máximos de cada evento de lluvia, y por consiguiente los demás valores corresponden a un porcentaje de ese máximo. En la Figura 5 se presentan los aportes de los tributarios en sus respectivas secciones.

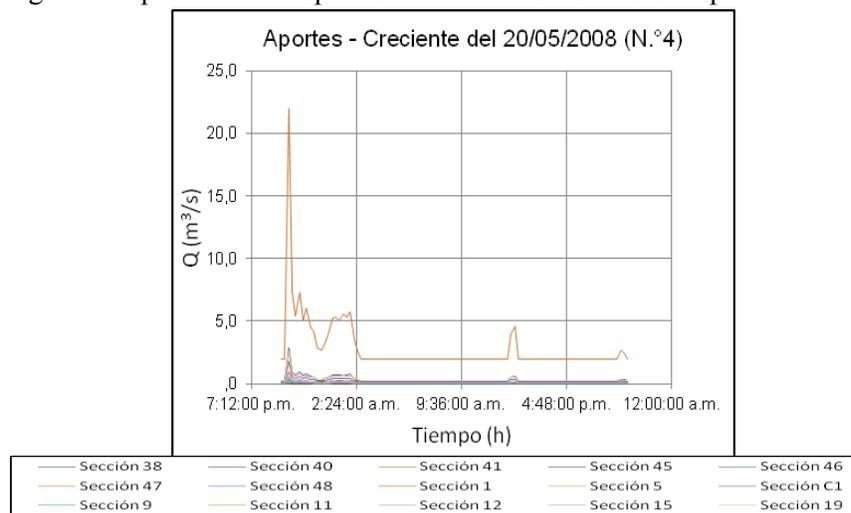


Figura 5.- Hidrógrafas de flujo para los aportes de tributarios

4.3 TRÁNSITO DE CRECIENTE DEL 20/05/2008

Para la modelación definitiva de la creciete del 20/05/2008, se siguió con todas las consideraciones enunciadas en el proceso de calibración. Se corrió el modelo con la combinación de coeficientes de Manning de 0,040 en el canal principal y $n=0,050$ en ambas llanuras de inundación. Se ingresaron las hidrógrafas de flujo de los tributarios identificados y se contempló la descarga de la central hidroeléctrica La Tasajera, con un valor de $13 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando opera una máquina turbogeneradora, $26 \text{ m}^3/\text{s}$ cuando operan dos y $40 \text{ m}^3/\text{s}$ para las tres.

A continuación se ilustra la hidrógrafa resultante de la sección 19 en donde opera la estación limnográfica RMS-13 de El Hatillo (Figura 6).

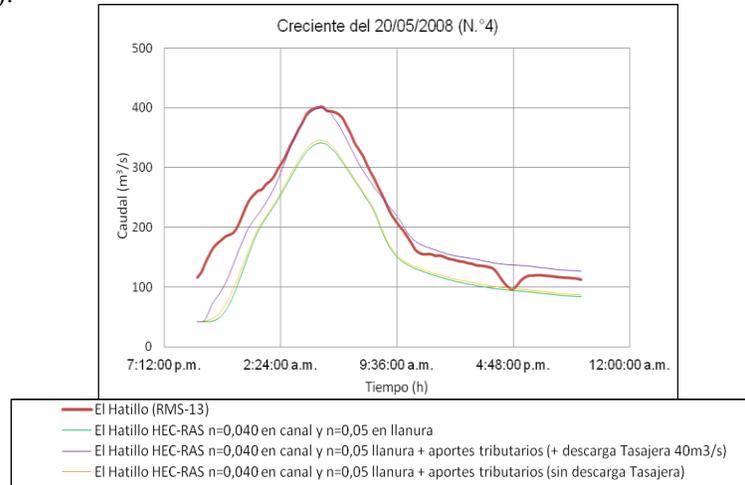


Figura 6.- Hidrógrafa resultante en El Hatillo (20/05/2008)

Se observa cómo la hidrógrafa resultante más cercana a la real es cuando se tienen en cuenta los aportes de tributarios y la descarga de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ de la central hidroeléctrica La Tasajera, en la geometría compuesta por secciones con coeficientes de Manning $n=0,040$ en canal principal y $n=0,050$ en sus llanuras de inundación. Sin embargo, se aclara que los registros reportados por el sistema de alerta temprana de EPM en la estación RMS-22 de Girardota dan cuenta de la suspensión en la generación de energía de la Central Hidroeléctrica La Tasajera durante la crecida, lo cual indica que debe mejorarse el cálculo de los aportes de los tributarios. Debe tenerse en cuenta una posible afectación en los registros tomados por la estación RMS-13 de El Hatillo por la presencia de un puente que no fue incluido en la simulación. En este caso la hidrógrafa real tiene un volumen equivalente de $18'333.477 \text{ m}^3$ mientras que la resultante escogida cuenta con $17'549.325 \text{ m}^3$ que corresponden al 95,72 %.

5. CURVAS PROFUNDIDAD-CAUDAL

Las curvas profundidad-caudal, conocidas en inglés como Loop rating curves, han sido estudiadas en los últimos años por diversos autores con el fin de identificar su comportamiento fluctuante. Su importancia se debe a que determinar el caudal de descarga de una corriente es esencial para estudios hidráulicos e hidrológicos y es utilizada para propósitos prácticos de gestión del agua (Kuhnle & Bowie, 1992). El valor de nivel del agua es crucial en la determinación de pronósticos de inundación.

Se han reconocido una serie de factores que ratifican los problemas asociados con el uso de las curvas de calibración de única relación para flujos no permanentes. La primera fuente de error está relacionada con que la medición de las curvas de calibración se realiza en condiciones de flujo normal, con valores que corresponden a un pequeño rango del flujo que se podría alcanzar en eventos de crecida, por lo que existe a su vez una gran incertidumbre en la extrapolación de estos valores para pronósticos de flujo alto. Además no se contemplan los efectos de propagación de onda. Cuando una onda de crecida se propaga a lo largo de un río, el frente de la onda se acerca con mayor velocidad a la sección transversal. Después de que el pico máximo pasa la sección, la parte trasera de la onda reduce su velocidad. Esta secuencia de aceleración–desaceleración produce un loop o histéresis en la relación profundidad-caudal, distinta a la relación biunívoca propia del flujo permanente.

Al pasar una tormenta a través de un tramo de un río, se provoca una curva envolvente de flujo no permanente, como se muestra en la Figura 7 **Error! Reference source not found.** Las implicaciones prácticas de esta curva son dos: 1) la máxima descarga y el nivel más alto de profundidad no llegan al mismo tiempo en un tramo del río, y 2) para la misma profundidad, la descarga es mayor durante la etapa de aumento que para la fase de caída (Iowa Flood Center, 2009).

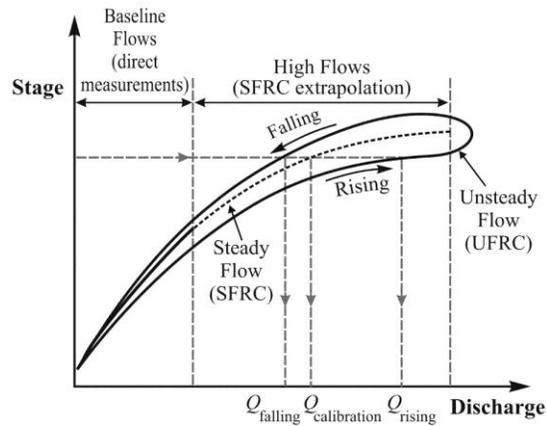


Figura 7.- Curva Profundidad-Caudal¹

Las formas de los loop en las curvas no son únicas, es decir, la relación profundidad-caudal varía de un caso a otro. La forma y alcance de la curva está determinado por el efecto combinado de variables geomorfológicas, hidrogeológicas (por ejemplo contenido de humedad y características del suelo) y meteorológicas (por ejemplo, intensidad de lluvia y duración). Por lo anterior se corrobora que estimar flujo no permanente a partir de la curva de flujo permanente es de una precisión limitada.

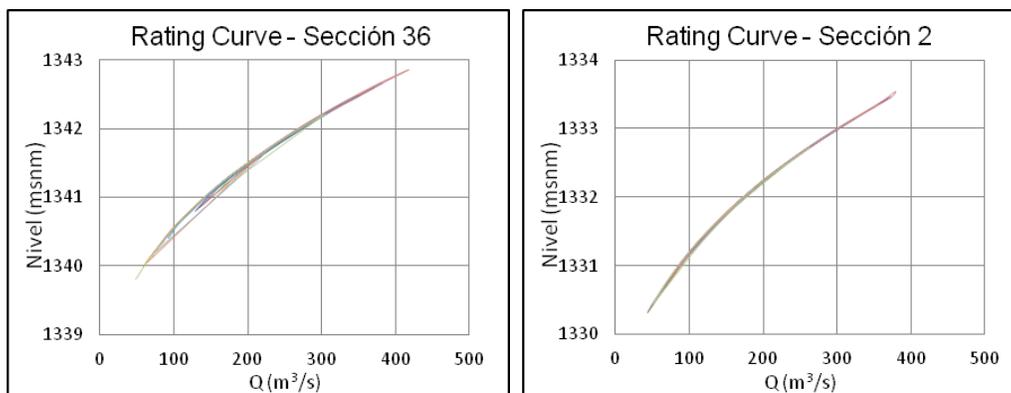
5.1 RESULTADOS

Como dato de entrada se determinó el caudal base del río en la sección 36 de Girardota igual a 41,28 m³/s siendo el valor promedio entre las hidrógrafas seleccionadas en los rangos en los que el flujo presenta condiciones normales.

Se utilizó en el modelo HEC-RAS 4.1 la geometría del tramo de estudio con un Manning de 0,029 como valor base (Álvarez, 2005). Estos datos iniciales se conservaron en todos los procesos que se realizaron con el fin de analizar el comportamiento de las curvas profundidad-caudal. Estos análisis se desarrollaron con hidrógrafas de único pico de distintas duraciones, con el fin de no obtener múltiples resultados en forma de ciclos.

5.1.1 ANÁLISIS DE LAS CURVAS PROFUNDIDAD-CAUDAL DE ACUERDO CON LA CRECIENTE TRANSITADA

El interés del presente análisis es conocer cómo varían las curvas de calibración en una misma geometría del tramo de estudio, con diferentes crecientes, que corresponden a distintas formas, duración y alcance máximo de caudal. Para efectos de simplificación, se presentan algunos de los resultados de las curvas de calibración en la Figura 8.



¹ Tomado de la página de Iowa Flood Center (IFC), cuya dirección electrónica es: <http://www.iowafloodcenter.org/projects/streamflow-measurements-during-floods/>

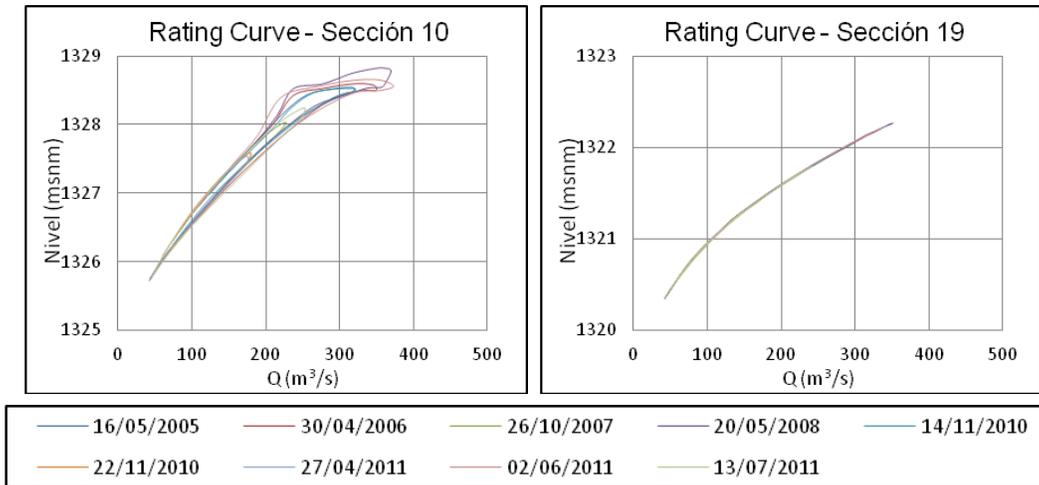


Figura 8.- Curvas de calibración de acuerdo a la creciente transitada

Se observa en la Figura 8 que existe una tendencia de comportamiento de las curvas profundidad-caudal para cada sección topográfica. Entre los resultados se aprecia cómo a cada hidrógrafa le corresponde un alcance de la curva, siendo la mayor creciente y por consiguiente la de mayor alcance, la registrada el 2 de junio del 2011. Se tiene también que existe tendencia a una transición de la amplitud de las curvas para pasar desde las más cerradas hasta las más amplias.

5.1.2 ANÁLISIS DE LAS CURVAS PROFUNDIDAD-CAUDAL DE ACUERDO CON LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE MANNING

El coeficiente de Manning depende de numerosas variables, como la rugosidad de la superficie, la vegetación, la irregularidad y el alineamiento del canal, la sedimentación, la erosión y la obstrucción. Para el desarrollo del presente análisis se comenzó con un $n=0,029$. A partir de este valor se asumió un $n=0,015$ como un límite inferior y luego valores cada 0,01, obteniendo valores de Manning de 0,040, 0,050, 0,060 y 0,080 como límite superior. Los resultados de las secciones 36 y 10 se presentan en la Figura 9 en donde se muestra el efecto del coeficiente de Manning en las curvas profundidad-caudal. En las secciones, el comportamiento es ordenado y sigue una secuencia. Se aprecia cómo con un $n=0,015$ se logra un alcance mayor de la curva en cuanto a valores de flujo, mientras que se tiene el menor valor de altura para la lámina de agua. Caso contrario se presenta para un valor $n=0,080$ en donde la curva se empina considerablemente, se obtiene un alcance menor de caudal y los niveles de altura en la lámina de agua llegan a ser muy altos, pues al tener una rugosidad elevada, el flujo se desacelera y el agua se acumula entre las secciones.

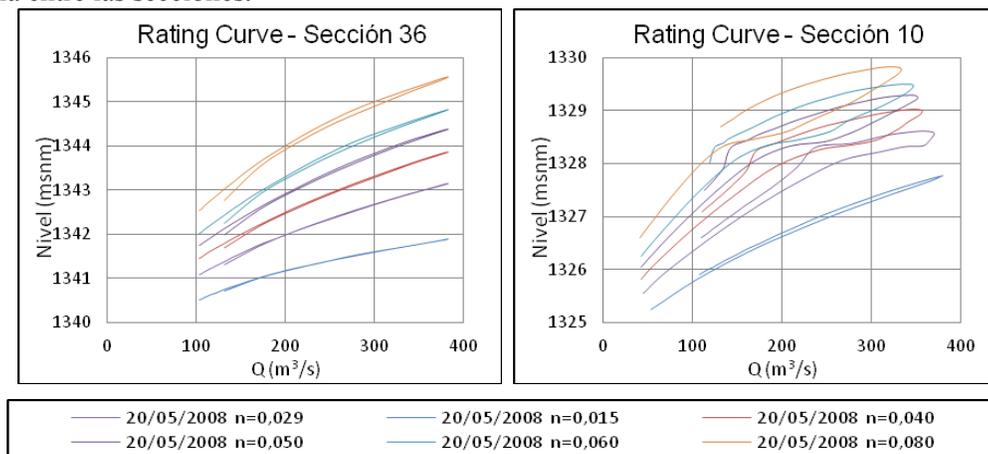


Figura 9.- Curvas de calibración del 20/05/2008 según el coeficiente de Manning

6. CONCLUSIONES

Para el análisis del comportamiento de las curvas profundidad-caudal, es recomendable ingresar al modelo HEC-RAS 4.1 hidrógrafas simplificadas con un solo pico; de lo contrario se obtienen histéresis de varios ciclos. Se comprobó que los resultados de la simulación son iguales cuando se ingresa hidrógrafa de nivel o hidrógrafa de flujo-nivel en la condición de borde aguas arriba.

En el momento de transitar diversas crecientes en una misma topografía, se encontró que existe una tendencia de comportamiento en las curvas de calibración profundidad-caudal para cada sección transversal y se genera una conexión con las secciones vecinas al presentarse una transición para pasar de curvas con loop cerrado a un loop amplio.

Es notable el efecto del coeficiente de Manning en el comportamiento de las curvas profundidad-caudal. A menor valor de Manning, se alcanzan mayores caudales y menores profundidades. Este proceso se explica sabiendo que al tener una rugosidad elevada, el flujo se desacelera y existe acumulación de agua entre las secciones, mientras que si el revestimiento del canal es liso, el flujo aumenta su velocidad y transporta el caudal con una menor profundidad. Por último, la forma de las curvas profundidad-caudal también es alterada por la variación del coeficiente de Manning, pues a medida que aumenta su valor, existe una tendencia a ampliarse el loop.

7. RECONOCIMIENTOS

Los autores agradecen al Área de Hidrometría e Instrumentación de las Empresas Públicas de Medellín por su constante disposición y el apoyo en la información, que permitió la realización del presente estudio.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, L. M. (2005, noviembre 29). Propuesta de calibración de un modelo para el tránsito de crecientes en un tramo del río Medellín. Estación Girardota-Puente El Hatillo. Envigado, Antioquia, Colombia.
- AMVA. (2007, Junio). Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Retrieved Marzo 5, 2011, from Área Metropolitana del Valle de Aburrá: http://www.metropol.gov.co/compartidos/docs/ESTANDARES_DE_GEOINFORMACION_AMVA_V1_3%20.pdf
- DANE. (2005). DANE. Retrieved agosto 10, 2011, from <http://www.dane.gov.co/censo/files/libroCenso2005nacional.pdf>
- Iowa Flood Center. (2009). Iowa Flood Center. Retrieved abril 22, 2011, from Iowa Flood Center: <http://www.iowafloodcenter.org/projects/streamflow-measurements-during-floods/>
- Kuhnle, R. A., & Bowie, A. J. (1992). University of Nebraska - Lincoln. (U.-A. /. Faculty, Ed.) Retrieved marzo 07, 2011, from University of Nebraska - Lincoln: [http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1321&context=usdaarsfacpub&sei-redir=1#search="Loop+Rating+Curves+from+Goodwin"](http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1321&context=usdaarsfacpub&sei-redir=1#search=)
- POMCA. (2007). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá (Nº 1, 2000 ejemplares ed.). Medellín, Antioquia, Colombia.

Autorización y Renuncia

Los autores autorizan a LACCEI para publicar el escrito en las memorias de la conferencia. LACCEI o los editores no son responsables ni por el contenido ni por las implicaciones de lo que esta expresado en el escrito