VERIFICACIÓN DE LA DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE MANEJO Y PRESERVACIÓN AMBIENTAL DE LA QUEBRADA ZANJÓN DEL AHORCADO, EN BOGOTÁ

ENSAYO

TRABAJO DE GRADO

FRANK VARGAS BELTRÁN

INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL DE LOS RECURSOS NATURALES

BOGOTÁ, D.C. 10 MAYO 2015

VERIFICACIÓN DE LA DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE MANEJO Y PRESERVACIÓN AMBIENTAL DE LA QUEBRADA ZANJÓN DEL AHORCADO, EN BOGOTÁ

FRANK VARGAS BELTRÁN

INGENIERO CIVIL

Ensayo presentado como requisito parcial para optar al título de

Especiacista en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales

Directora: Erika Johana Ruíz Suárez

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO INTEGRAL DE LOS RECURSOS NATURALES

BOGOTÁ, D.C. 10 MAYO 2015

VERIFICACIÓN DE LA DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE MANEJO Y PRESERVACIÓN AMBIENTAL DE LA QUEBRADA ZANJÓN DEL AHORCADO, EN BOGOTÁ

VERIFICATION OF THE MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL PRESERVATION ZONE (MEPZ) OF AHORCADO CREEK, IN BOGOTA

Frank Vargas Beltrán

Ingeniero Civil

von_Werra@yahoo.it

Fecha de Recepción: 10 Mayo 2015.

Fecha de Aprobación: 10 Junio 2015.

RESUMEN

La ciudad de Bogotá cuenta con un rico Sistema Hídrico, pero que dado su alto crecimiento poblacional y la pobre conciencia ambiental de sus pobladores, esta es una razón por la que se ha hecho necesaria la delimitación de la Zona de Manejo y Preservación Ambiental (ZMPA) de las quebradas en el Distrito Capital, amparada en estudios técnicos, sociales y prediales, bajo el Plan de Ordenamiento Territorial (POT, Decreto 190 2004).

El alcance de este informe cubre sólo parte del estudio técnico, en específico el hidrológico-hidráulico y ambiental para determinar la ZMPA de la quebrada Zanjón Del Ahorcado, en la localidad de Ciudad Bolívar, con el objeto de verificar el área de inundación de aquel cuerpo de agua y su impacto en el asentamiento urbano en sus límites.

Palabras clave: ZMPA; Flujo en canales abiertos; Plan de Ordenamiento Territorial.

ABSTRACT

Bogotá has a rich Water System, but given its high population growth and poor environmental awareness of its inhabitants, this is a good reason why the Management and Environmental Preservation Zone (ZMPA, MEPZ) of streams in the Capital District is set, covered by technical, social and property studies under the Land Use Planning (Colombian ordinance 190 2004).

The scope of this report covers only part of the technical study, specifically the hydrologic-hydraulic and property to determine the MEPZ for the Hangman's creek, in Bogotá, in order to verify the floodplain of that body water and its impact on urban settlement boundaries.

Keywords: *ZMPA (MEPZ); open-channel flow; Land Use Planning.*

INTRODUCCIÓN

Los planes de desarrollo para el Distrito Capital, incluyen proyectos de Restauración Ecológica y Ambiental de sus cuerpos hídricos.

En específico para los canales, ríos y quebradas, estos proyectos inician con la delimitación de sus rondas hidráulicas, partiendo de aspectos hidrológicos, geotécnicos, socailes y prediales.

En el presente artículo, se discute la delimitación de la Zona de Manejo y Preservación Ambiental de una quebrada, al Sur de la Ciudad, con base en aspectos hidrológicos para que, con la subsiguiente modelación hidráulica, puedan tomarse otras alternativas de delimitación con el propósito de disminuir costos de adquisición de predios.

1. MATERIALES Y MÉTODOS.

Este estudio se realiza en cuatro fases:

1.1. Visita de campo: con el propósito de inspeccionar la situación actual de la zona, se realiza un recorrido por la quebrada dentro de lo que cubre su eje (alrededor de 1 Km) y se toman fotografías. Esto para determinar la situación predial que afecten la ZMPA de la misma.

1.2. Zonificación ambiental: con el propósito de identificar las unidades de paisaje dentro de la zona de influencia de la zona de estudio y realizar los indicadores de

calidad para la destacar los factores críticos socio-ambientales que afectan al sector.

1.3. Análisis de lluvias: se cuenta con datos históricos de lluvia en la zona, suministrados por el IDEAM. Con estos se estima el caudal máximo en la quebrada (ver MARCO TEÓRICO).

1.4. Modelación hidráulica y determinación de la ZMPA: esta fase incluye el manejo de software especializado (HEC-RAS) para el cálculo de perfiles de flujo y área de inundación de la Quebrada, según la metodología exigida por la Empresa de Acueducto, Agua y Aseo de Bogotá, EAB-ESP (ver MARCO TEÓRICO).

2. OBJETIVO GENERAL.

Comprobar si la delimitación de la Ronda Hidráulica de un curso hídrico de 30 metros es óptima teniendo como base criterios hidrológicos e hidráulicos.

3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Establecer la Zona de Manejo y Recuperación Ambiental de la quebrada con base en las características hidrológicas en la localidad.

- Considerar la posibilidad de delimitar dicha zona de una corriente de agua con ancho variable.

- Determinar los predios (de haberlos) que afectan dicha zona.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

La mayor parte de cuerpos hídricos de la Ciudad poseen problemas de afectación de su Zona de Manejo y Preservación Ambiental (ZMPA) debido a construcciones que aunque no necesariamente son ilegales, producen el deterioro ambiental de dichos cuerpos. Varias entidades públicas se han puesto a la tarea de velar por la restauración ecológica de humedades y quebradas, y para ello se ha llevado a cabo la adquisición o compra de predios para tal fin.

Sin embargo, la condición social en muchas localidades de Bogotá que gozan de una importante concentración de quebradas, hacen que la calidad del recurso hídrico se vea gravemente afectado.

5. JUSTIFICACIÓN.

Según la normativa actual, por la que se adopta el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), en el artículo 78 del decreto 190 2004, se define la Ronda Hidráulica (que incluye la ZMPA) de un cuerpo de agua como "…una franja paralela o alrededor de los cuerpos de agua, medida a partir de la línea de mareas máximas (máxima inundación), de hasta 30 metros de ancho…"

La determinación de los 30 metros de ancho obedece a una serie de estudios sociales, geotécnicos e hidráulicos que no necesariamente son prácticos, debido sobre todo a asentamientos complejos de la población y que hacen difícil su reubicación.

Por lo anterior, mediante este informe, se pretende buscar alternativas técnicas al cálculo de dicha franja, buscando el balance entre la protección del cuerpo hídrico y la calidad de vida.

6. METODOLOGÍA.

El análisis presentado aquí se limita al ambiental e hidrológico; por tal motivo se tendrá como insumo la visita de campo y la relación de valores históricos de lluvia medidos en estaciones meteorológicas e hidrológicas. Estos datos son suministrados en forma tabular por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). De estas tablas, podrá realizarse la estimación del caudal pico para la quebrada objetivo. El método elegido para dicho cálculo es el del Método Racional, debido al área de la cuenca y su sencillez de uso.

La visita de campo ofrece una visión actual de la condición social, ambiental y sanitaria de la quebrada, en pos de esclarecer si se ha urbanizado dentro de la ZMPA.

Una vez realizada la estimación hidrológica y con la inspección en campo, podrá llevarse a cabo el análisis y cálculo para la franja de Ronda Hidráulica. Este proceso se llevará a cabo con la ayuda de un programa computacional especializado.

Con la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica, puede saberse los predios que tienen relación con la quebrada de estudio, en la forma que invadan la ZMPA.

7. MARCO TEÓRICO.

Un estudio de delimitación de un cuerpo hídrico se basa en el análisis físico (topográfico); social (la forma como la urbanización y características de la población circunvecina le afecta, y como esta se relaciona con la misma); geológico (tipo material depositado en su cauce y forma como se emplaza en el suelo, zonificación, análisis de estabilidad y riesgo), ambiental (con base en las características naturales de la zona) e hidrológico (estimación de caudales máximos según análisis de lluvias y caracterización de la cuenca: área, longitud del cauce principal, forma.), con el que se calcula el nivel de aguas máximas y por tanto el límite de la Ronda Hidráulica y de la ZMPA.

7.1. ESTIMACIÓN DEL CAUDAL PICO – MÉTODO RACIONAL.

Con este método, se supone que un caudal es máximo cuando debido a cierta intensidad de lluvia sobre un área de drenaje, es producido por esa precipitación que se mantiene por un tiempo igual al tiempo de concentración del caudal en el punto en consideración (Monsalve, G).

El Método Racional es uno de los más utilizados para la estimación del caudal máximo asociado a determinada lluvia de diseño. Se utiliza normalmente en el diseño de obras de drenaje urbano y rural. Y tiene la ventaja de no requerir de datos hidrométricos para la determinación de Caudales Máximos. Tiene aplicación para cuencas pequeñas, de hasta 20Km^2

La expresión utilizada es:

$$Q = \frac{CIA}{360} \qquad (1)$$

De donde:

Q: caudal pico, en mcs.

C: Coeficiente de escorrentía, que depende del tipo, características y condiciones del suelo, permeabilidad de la superficie, pendiente y vegetación. Se define en función del agua de lluvia que discurre libremente sobre el suelo, que no se infiltra. Se trata de un parámetro que puede estimarse, como se verá más adelante.

I: Intensidad de lluvia, en mm/h. Su valor se obtiene de las curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca y para una frecuencia igual al período de retorno seleccionado.

A: Área de la cuenca, en Ha.

7.1.1. Curvas de intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

Las Curvas IDF son de amplio uso en los métodos de diseño de drenajes pluviales, canales abiertos de drenaje y presas puesto que su objeto es el cálculo de la intensidad de lluvia. Su uso considera que existen registros de precipitaciones máximas en una estación meteorológica (pluviométrica) cercana al sitio en el que se realizará el análisis –o diseño de la estructura hidráulica- que requiera de esta herramienta Hidrológica.

En líneas generales, para ejecutar el análisis IDF, se tabulan los registros obtenidos de las bandas pluviográficas de la estación de medición para diversas duraciones. Dependiendo del tipo de análisis, estas duraciones podrán ser de 5, 10, 15, 30, 45 minutos y 1, 2, 3, 6, 12, 24 horas.

Para cada año y para cada una de las duraciones seleccionadas, se obtendrá la precipitación máxima, y con ésta se calculará la intensidad de la lluvia en función de la duración.

La serie de Intensidades obtenidas se ajusta entonces a una ley de distribución de probabilidades para eventos extremos (Gumbel, por ejemplo) a fin de presentar, para períodos de retorno prefijados (frecuencias), una o más curvas que relacionen la duración con la Intensidad.

7.1.2. Período de Retorno.

En términos numéricos se define como la probabilidad de que se presente una precipitación (lluvia) cada cierto tiempo (expresado en años), lo que significa el tiempo que tardaría un valor extremo de lluvia (relacionado con el caudal pico) en alcanzar o superar su valor. En general, la esa probabilidad de ocurrencia puede expresarse como:

$$P = \frac{1}{T_p} \qquad (2)$$

Siendo T_p el período de retorno, expresado en años.

En la práctica, la delimitación hidráulica de la Ronda de un cuerpo de agua se calcula para un período de retorno de 100 años debido al tiempo esperado de recuperación ambiental de aquel y al riesgo de inundación adoptado; este riesgo es asumido según

datos históricos de lluvia en el sector, en la forma que conlleve problemas con la población vecina.

Ese riesgo (R) admisible, se determina en función del período de retorno (T_p), dada la vida útil (n, en años) de la estructura hidráulica o, en este caso, la expectativa de recuperación del cauce (Ven Te Chow, Hidrología Aplicada):

$$R = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_p}\right)^n \tag{3}$$

Según esto, si el riesgo admisible considerado es de 45% (medio), si se espera un tiempo de recuperación de la quebrada de unos 60 años, el período de retorno adoptado debería ser de 100 años.

7.1.3. Coeficiente de Escorrentía.

Este parámetro puede estimarse de dos formas:

- Directa: mediante la relación de los valores históricos de lluvia y escorrentía, medidos en estaciones meteorológicas e hidrológicas, respectivamente. Este método se usa si existe una amplia red de esas estaciones, y se parte de la base de que el coeficiente de escorrentía presenta poca variación por la escasa variación de características de suelo y lluvia.

- Indirecta: mediante el uso de tablas o mapas de coeficiente, según sea la relación entre el tipo de suelo y cobertura vegetal. Este método se aconseja si no existen estaciones meteorológicas e hidrológicas en la zona de estudio, o por lo menos en su cercanía. La Tabla 1 ofrece la medida de estimación de este parámetro en función de la pendiente del terreno y tipo de suelo.

Tabla 1. Coeficiente de escorrentía, según tipo de suelo y pendiente

Cobertura Vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada >50%	Alta 50%-20%	Media 20%-8%	Suave 8%-1%	Despreciable <1%
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos y vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierva y grama	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosques y vegetación densa	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Fuente: Benítez, et al. 1980.

Como no hay estación hidrológica cercana, se utilizará este método para la estimación del coeficiente.

7.2. DELIMITACIÓN DE LA RONDA HIDRÁULICA (RH) Y ZONA DE MANEJO Y PRESERVACIÓN AMBIENTAL (ZMPA).

La normatividad vigente define claramente los parámetros para definir los límites de la RH y ZMPA de los cuerpos de agua según criterios técnicos, legales e institucionales. Estos criterios se definen en la Tabla 2 y se definen en exclusivo para las quebradas ubicadas en las localidades de Ciudad Bolívar y Usme, en el Distrito Capital.

Tabla 2. Dimensiones y anchos de la RH y ZMPA de quebradas en las localidades de Usme y Ciudad Bolívar.

Caso 1	En áreas de reserva forestal protectora de los cerros orientales.	Ancho único de la RH: 30 m; Ancho único de la ZMPA: 15m.
Caso 2	En zonas suburbanas	Ancho de la RH entre 6 m y 30 m a partir de la creciente de los 100 años para pendientes superiores a 60% en sus márgenes. La ZMPA tendrá un ancho único máximo de 15 m y será definida con criterios geotécnicos, ambientales y urbanísticos.

Caso 3	Zonas urbanas consolidadas	La RH tendrá un ancho constante y corresponderá a la creciente de los 100 años. La ZMPA tendrá un ancho único máximo de 15 m y será definida con criterios geotécnicos, ambientales y urbanísticos.

Fuente: EAB-ESP.

Se entiende por ancho único la distancia tomada desde el eje de la quebrada hasta el límite considerado de la Zona de Manejo y Preservación Ambiental o Ronda Hidráulica.

8. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE LA QUEBRADA ZANJÓN DEL AHORCADO.

La quebrada Zanjón del Ahorcado, que nace a una altura cercana a los 2850 msnm, y es afluente de la quebrada Zanjón de la Muralla; pertenece a la localidad de Ciudad Bolívar en el sur de Bogotá. Discurre en dirección preferencial NW, posee una longitud total cercana de 990 m. Es objeto del presente estudio, gran parte de su recorrido, desde la vía de acceso a la cantera, hasta la desembocadura en la quebrada Zanjón de la Muralla, correspondiendo al trato recientemente canalizado. Posee un lineamiento rectilíneo, el cual se emplaza en terrenos semiondulados. A lo largo de su recorrido, la Quebrada atraviesa viviendas pertenecientes al barrio Potosí. Sobre sus márgenes se aprecia cobertura de pastos con mayor densidad en el costado izquierdo.

8.1. ZONIFICACIÓN AMBIENTAL.

Tras la visita de campo, se reconocieron las siguientes unidades de paisaje dentro de la zona de influencia del tramo de estudio:

- **Pastizal arbustivo:** matorrales y arbustos dispersos en la margen izquierda de la Quebrada, que se expanden hasta cubrir zonas de rellenos durante la construcción del canal. Se trata de una faja continua de pastizales de kikuyo mezcladas con arbustos.

- **Potreros:** esta unidad se presenta en la margen derecha de la Quebrada bordeando las viviendas que allí se ubican. La componen eucaliptos dispersos con plantaciones de saúcos y acacias. Los potreros son en pasto kikuyo sin mantenimiento, con basuras vertidas por los habitantes de la zona. Sus terrenos son ondulados y húmedos (producto de aguas residuales domésticas).

- **Cultivos:** ocupan la margen izquierda, y los componen hortalizas, medicinales y frutales.

- **Paisaje suburbano:** se encuentra definido dentro de la matriz de pastizales y cultivos y se presenta en el costado derecho del cauce. Son potencialmente urbanizables porque se hayan potreros entre casas o edificaciones. No existen trazados de calles ni se cuentan con servicios básicos.

Fotografía 1. Asentamientos en la ZMPA de Zanjón Del Ahorcado, cerca de la estación topográfica K0+343.18
Fuente: Autor.

8.2. INDICADORES DE CALIDAD AMBIENTAL.

Luego de definirse la zonificación ambiental, se describen a continuación algunos indicadores ambientales que ayudan en la definición de la calidad ambiental general de la microcuenca limitada por la zona de estudio. Estos indicadores son los siguientes:

Tabla 3. Indicadores de calidad ambiental de Zanjón Del Ahorcado

Indicador	Medidas	Resultado
Asentamientos	Tipo, ubicación espacial y extensión aproximada alrededor de la microcuenca.	1) La Quebrada fue canalizada por lo cual se convierte en un canal de aguas residuales y lluvias. 2) Existen asentamientos de carácter sub-normal frecuentes a lo largo de la margen derecha de la Quebrada. 3) Las viviendas no cuentan con servicio de alcantarillado.
Vegetación	Tipo, estado y extensión aproximada.	1) La vegetación más representativa son pastizales arbustivos a lo largo de la margen izquierda.

Indicador	Medidas	Resultado
Canteras	Presencia o no en el área de influencia.	1) No hay explotación del subsuelo. 2) Presencia de áreas de relleno con gran aporte de sólidos a las aguas.
Nacimientos de agua	Presencia o no en el área de influencia.	1) No se presentan nacimientos de aguas freáticas.
Agua	Cantidad aproximada, calidad visual, color y olor.	1) No son permanentes porque el canal permanece seco en temporadas sin lluvia. 2) Tiempo de concentración bajo debido a la pendiente y velocidades por estar canalizado.
Estado sanitario	Presencia y tipo de residuos o desechos en la Ronda Hidráulica.	1) Mal estado sanitario. 2) Presencia frecuente de basuras. 3) Drenaje de aguas residuales al canal.

Fuente: Autor.

Fotografía 2. Estado sanitario de Zanjón Del Ahorcado. Zona de confluencia con Zanjón De La Muralla
Fuente: Autor.

9. HIDROLOGÍA.

El propósito de su análisis, es estimar los caudales máximos para períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años en la quebrada Zanjón Del Ahorcado para así llegar a delimitar su Ronda Hidráulica y de ella la Zona de Manejo y Preservación Ambiental.

En el área correspondiente a su cuenca, junto con la de Zanjón De La Muralla, no se cuentan con estaciones de medición del IDEAM; por tal motivo, dichos caudales se

estimarán indirectamente, a partir de la intensidad máxima de lluvia, su coeficiente de escorrentía y el área de drenaje, como insumos para la utilización del Método Racional.

9.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA.

Se trata de una cuenca alargada, que nace a los 2875 msnm y desemboca por la margen izquierda de Zanjón De La Muralla, a 2694 msnm.

Para su caracterización, se realizaron secciones transversales desde la vía de acceso a la cantera (carrera 37), siguiendo su lineamiento (calle 82 Sur) hasta su desembocadura en Zanjón de La Muralla, cubriendo una longitud de 650m aproximadamente.

Las secciones topográficas (cuya numeración no es igual a la de la modelación) se localizan en los siguientes puntos

Tabla 4. Secciones tomadas en la Quebrada.

Sección	Estación
1	K0+343.18
2	K0+472.2
3	K0+581.78
4	K0+783.44
5	K0+906.19

Fuente: Gerencia Ambiental, EAB-ESP.

Se aclara que durante los últimos meses, la EAB ha realizado obras de rehabilitación de la Quebrada, y este análisis se realiza del tramo canalizado.

La parte alta de la quebrada presenta pendiente topográfica fuerte, del orden de 200m/Km; la Tabla 5 presenta las características morfométricas de las cinco áreas en las que se ha dividido el tramo de estudio:

Tabla 5. Parámetros morfométricos de la Quebrada en su tramo de estudio.

Sección	Área (m2)	Longitud (m)	Elevación máxima (msnm)	Elevación mínima (msnm)	Pendiente	Tiempo de concentración (min)
1	84000	343.18	2875	2786	0.26	2.934
2	122000	472.2	2875	2763	0.237	3.89
3	133000	581.78	2875	2746	0.221	4.692
4	236000	783.44	2875	2716	0.203	6.091
5	281000	906.19	2875	2694	0.2	6.861

Fuente: Gerencia Ambiental, EAB-ESP.

Para la delimitación de la cuenca, localización de secciones transversales y cálculos, se tomó como base la cartografía IGAC, plancha 246-II-B-1, escala 1:10000.

Fotografía 3. Vista general del canal, desde su margen derecho
Fuente: Autor.

9.2. METODOLOGÍA EMPLEADA.

En cada estación correspondiente a una sección de la quebrada, se tomaron características del cauce y del talud.

Con el ánimo de obtener los caudales de diseño, correspondientes a un período de retorno de 100 años y así delimitar la Ronda Hidráulica (RH) y Zona de Manejo y Preservación Ambiental (ZMPA), la cuenca se ha subdividido en cinco subcuencas aferentes a cada sección transversal.

Para el cálculo de caudales máximos de cada subcuenca, se utiliza el Método Racional, como se explicó en la sección 7.1.

9.2.1. Análisis de lluvia.

Este análisis está fuera del alcance de este artículo, sin embargo, IRH Ingeniería y Recursos Hídricos Ltda., para la EAB-ESP en 1995, ha realizado un estudio denominado “Curvas de Intensidad-Frecuencia-Duración de las Estaciones e Isolíneas de Intensidad”.

En este estudio, en su volumen 11, se estableció la lluvia de diseño para la cuenca Zanjón Del Ahorcado.

En su estudio, IRH dividió en áreas la Sabana de Bogotá según sesenta y dos estaciones hidrológicas de la época, asignando a cada una de ellas su correspondiente valor de IDF en función de su distribución espacial y por medio de interpolación entre estaciones.

Con base en esto, se tomó la información de intensidad máxima correspondiente al nodo más cercano a la cuenca de la quebrada Zanjón Del Ahorcado para la estimación de caudales máximos y de ella las intensidades máximas para los períodos de retorno.

Así pues, la curva IDF corresponde a la ubicación 996.858N, 989.670E, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de la curva IDF más cercana a la cuenca de Zanjón Del Ahorcado

Período de Retorno (años)	C1	X0	C2
10	3239.1	21	-1.06
25	4076.9	20.4	-1.08
50	4591.3	19.8	-1.08
100	5150.6	19.5	-1.08

Fuente: IRH Ingeniería y Recursos Hídricos, 1995.

La Tabla 7, se desprende de los parámetros anteriormente descritos:

Tabla 7. Curva IDF del nodo más cercano a la cuenca de Zanjón Del Ahorcado

Duración del aguacero (min)	Tr = 3 años	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
15	47.9	58.3	69.7	82	93.2	104.2
30	34	41	48.5	56.4	63.8	71
60	21.3	25.5	29.8	34.2	38.5	42.7
120	12	14.3	16.6	18.8	21.1	23.3
360	4.3	5.1	5.8	6.4	7.1	7.9

Fuente: IRH Ingeniería y Recursos Hídricos, 1995.

Con estos mismos, puede construirse las respectivas curvas, como se muestra en la Figura 1.

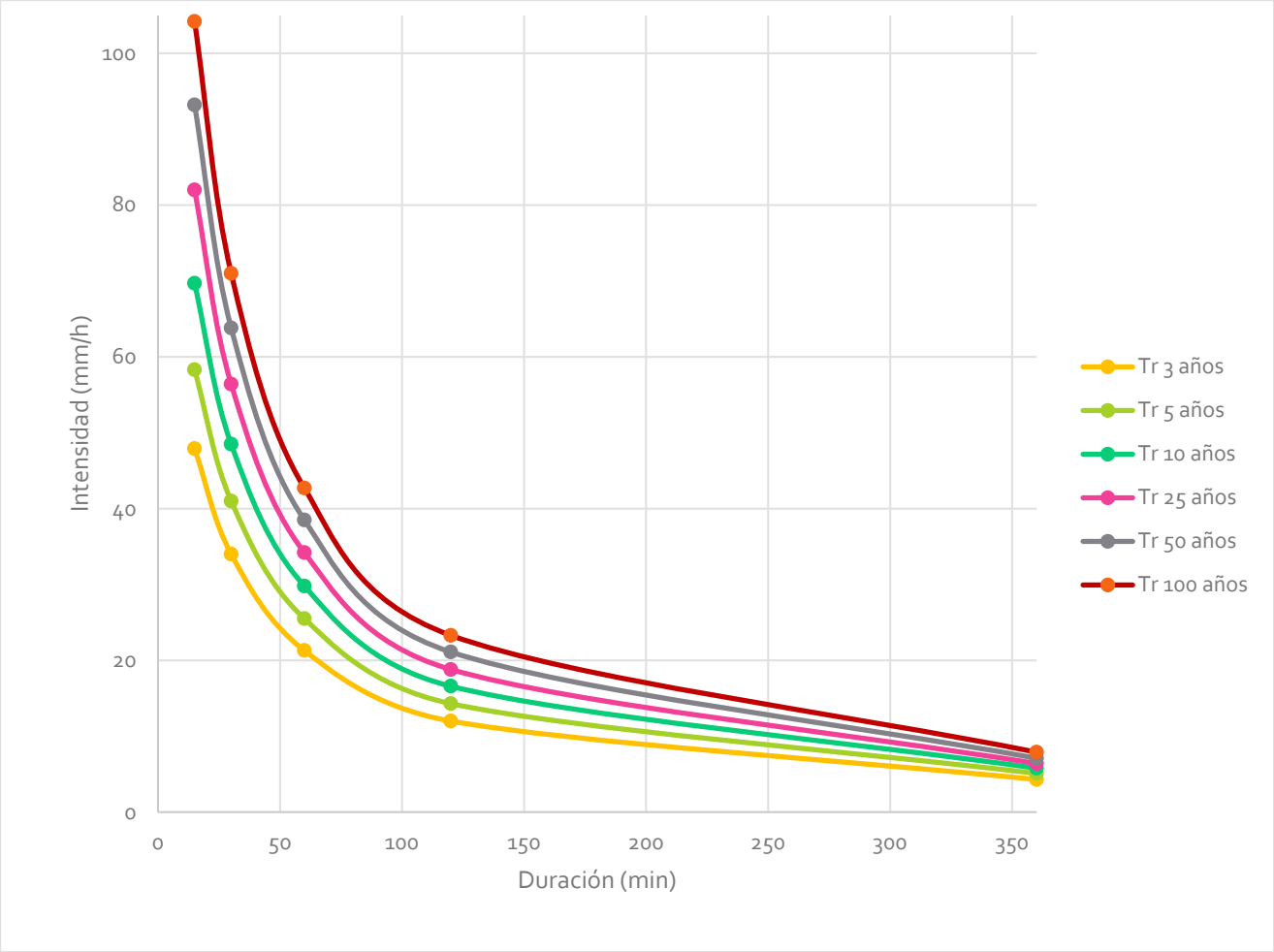


Figura 1. Curvas IDF del nodo más cercano a la cuenca de Zanjón Del Ahorcado
Fuente: Autor.

Para cada una se los sectores en los que se dividió el tramo de estudio, se determinó el tiempo de concentración, y con base de este parámetro se halló las intensidades de lluvia de diseño para los períodos de retorno señalados. Estas intensidades (en mm/h) se muestran en la Tabla 8, y se calcula como sigue:

$$I_{max} = C_1(T_c + X_0)^{C_2} \tag{4}$$

De donde T_c es el tiempo de concentración de la cuenca, en minutos; C1, C2 y X0 son constantes dadas para el nodo más cercano (ver Tabla 6).

Tabla 8. Valores de la lluvia de diseño de Zanjón Del Ahorcado

Sección	Intensidad máxima 10 años	Intensidad máxima 25 años	Intensidad máxima 50 años	Intensidad máxima 100 años
1	111.86	135.80	157.30	179.01
2	107.31	130.04	150.45	171.12
3	103.76	125.55	145.14	165.00
4	98.09	118.41	136.69	155.29
5	95.22	114.80	132.43	150.39

Fuente: Autor.

Finalmente, según la Método Racional (sección 7.1), se estiman los caudales máximos para la quebrada Zanjón Del Ahorcado, cuyos valores según los períodos de retorno se muestran en la Tabla 9:

Tabla 9. Caudales pico estimados de Zanjón Del Ahorcado

Sección	Caudal pico 10 años (mcs)	Caudal pico 25 años (mcs)	Caudal pico 50 años (mcs)	Caudal pico 100 años (mcs)
1	0.632	0.772	0.898	1.024
2	1.604	1.951	2.263	2.577
3	1.931	2.345	2.716	3.091
4	2.691	3.261	3.773	4.291
5	2.837	3.432	3.968	4.511
6	4.758	5.744	6.631	7.533
7	5.500	6.631	7.649	8.687

Fuente: Autor.

Para el cálculo de los caudales pico, se estima un coeficiente de escorrentía de 0.74, correspondiente a una cuenca urbanizada, de alta pendiente (ver Tabla 1).

10. HIDRÁULICA.

10.1. METODOLOGÍA EMPLEADA.

El procedimiento para la realización es el siguiente:

1) Insumo: trabajo topográfico realizado por la EAB en la ZMPA de la Quebrada. Este trabajo constó del levantamiento de poligonal para determinar la pendiente del lecho del canal (entiéndase por el tamo canalizado de la quebrada).

2) Determinación de los parámetros hidráulicos de cada una de las cinco secciones del tramo de estudio. Este cálculo se realiza con ayuda de software especializado para el análisis de flujo en canales abiertos: HEC-RAS 4.1, del United States Army Corps of Engineers (USACE).

3) Cálculo de la curva de calibración de caudales para cada sección transversal (también con el uso de HEC-RAS), para una creciente de 100 años.

4) Estimación de la sección de flujo, perfiles y ancho hidráulico para una creciente correspondiente (uso de HEC-RAS).

5) Determinación del área de inundación para la creciente dada y por consiguiente la Ronda Hidráulica y Zona de Manejo y Preservación Ambiental de la Quebrada.

10.1.1. Visita de campo.

La visita de campo se realizó con el ánimo de identificar las secciones base para el presente análisis y saber la situación actual de la quebrada, prestando especial interés en los predios que afectan la Ronda Hidráulica, el lecho y las orillas, además de observar el régimen hidráulico del flujo de agua y buscar huellas de crecientes en el lecho.

Durante la visita, se observó que:

- La quebrada Zanjón Del Ahorcado es un cauce homogéneo con un lecho semirrecto en el tramo de estudio y pendiente topográfica fuerte durante su primera mitad.
- Cauce canalizado en concreto se sección trapezoidal, con casas invadiendo su ZMPA en su tramo alto.

En la Tabla 10 se muestran las características visuales del lecho en el tramo de estudio:

Tabla 10. Características de las secciones transversales de estudio

Sección	Estación		Correspondiente HEC-RAS		Características de la sección transversal
1	K0+	343.2	K0+	0	Lecho natural cubierto por algunas herbáceas y pastizales, cauce en tierra.
2	K0+	472.2	K0+	129.02	Lecho natural cubierto por algunas herbáceas y pastizales, canal en concreto.
3	K0+	581.8	K0+	238.6	Lecho natural cubierto por algunas herbáceas y pastizales, canal en concreto.
4	K0+	783.4	K0+	440.26	Lecho natural cubierto por algunas herbáceas y pastizales, canal en concreto.

Sección	Estación		Correspondiente HEC-RAS		Características de la sección transversal
5	K0+	906.2	K0+	573	Lecho natural cubierto por algunas herbáceas y pastizales, canal en concreto.

Fuente: Autor.

La Figura 2 muestra la localización del tramo del recorrido y ZMPA de la Quebrada.

Figura 2. Ubicación de la zona de estudio de la quebrada Zanjón Del Ahorcado.
Fuente: Google Earth.

10.2. MODELACIÓN HIDRÁULICA.

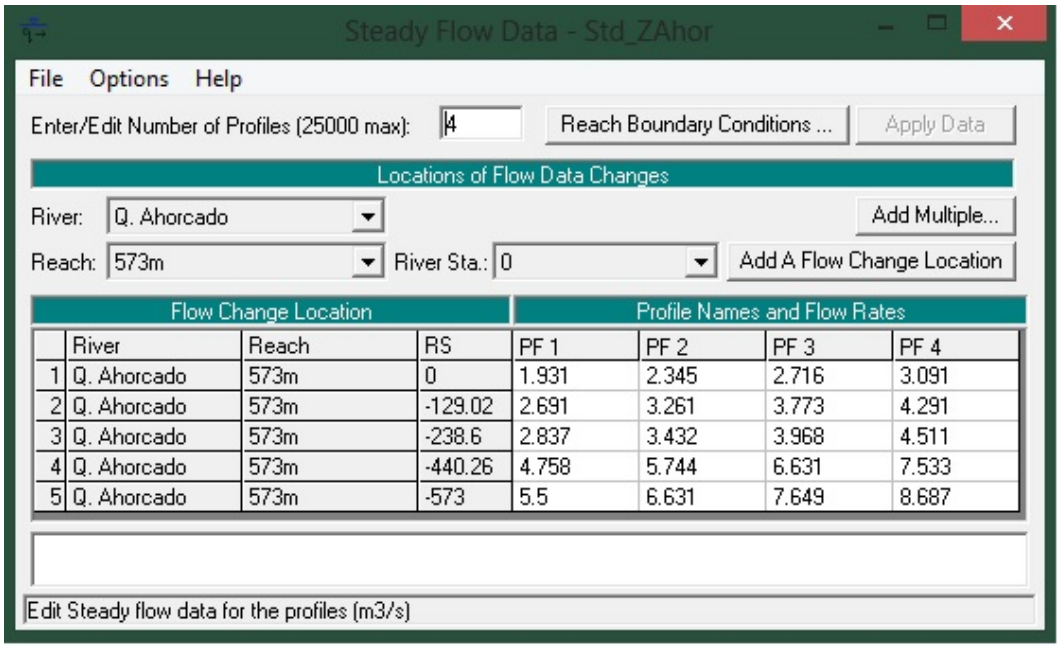
Para la modelación hidráulica, con ayuda de HEC-RAS 4.1, y para su uso se cuenta con los siguientes parámetros:

- **Geometría:** replanteo topográfico realizado por la EAB y montaje en un Sistema de Información Geográfica de los puntos geo-referenciados, que incluye caracterización de las secciones transversales base del canal (Tabla 10). Esta información es el primer insumo para la introducción de datos en el programa.
- **Interpolación de información suministrada:** con la información de la sección y topografía del canal, se realiza la interpolación de secciones a lo largo del tramo

de estudio. Esta interpolación se realiza para la distancia entre cada sección calculada no sobrepase los 5 cm.

- **Tipo de flujo:** En la sección 9.2.1, se realizó el análisis de precipitación en la zona de estudio de la quebrada Zanjón Del Ahorcado. Como se sabe, el Método Racional fue el empleado para tal fin; razón por la cual se ha realizado la modelación con un régimen de flujo permanente para cada uno de los períodos de retorno. En la Figura 3 se muestran los parámetros ingresados en HEC-RAS para las secciones del canal (que en este caso son para la sección K0+343.2y que son iguales para las demás por tratarse de flujo permanente) y en donde se leen los caudales máximos calculados (en mcs) de cada período de retorno (ver Tabla 8). De esta forma, el perfil de flujo 1 (PF1) corresponde a un período de retorno de 10 años, el perfil de flujo 2 (PF2) es al período de retorno de 25 años, PF3 al de 50 años y PF4 al de 100 años.

- **Simulación hidráulica:** Como proceso final para la realización de los cálculos, es necesario ingresar al sistema el tipo de régimen que se esperaría para las condiciones del proyecto (subcrítico, supercrítico o combinación de estos).



	River	Reach	RS	PF 1	PF 2	PF 3	PF 4
1	Q. Ahorcado	573m	0	1.931	2.345	2.716	3.091
2	Q. Ahorcado	573m	-129.02	2.691	3.261	3.773	4.291
3	Q. Ahorcado	573m	-238.6	2.837	3.432	3.968	4.511
4	Q. Ahorcado	573m	-440.26	4.758	5.744	6.631	7.533
5	Q. Ahorcado	573m	-573	5.5	6.631	7.649	8.687

Figura 3. Parámetros de flujo permanente en HEC-RAS
Fuente: Autor.

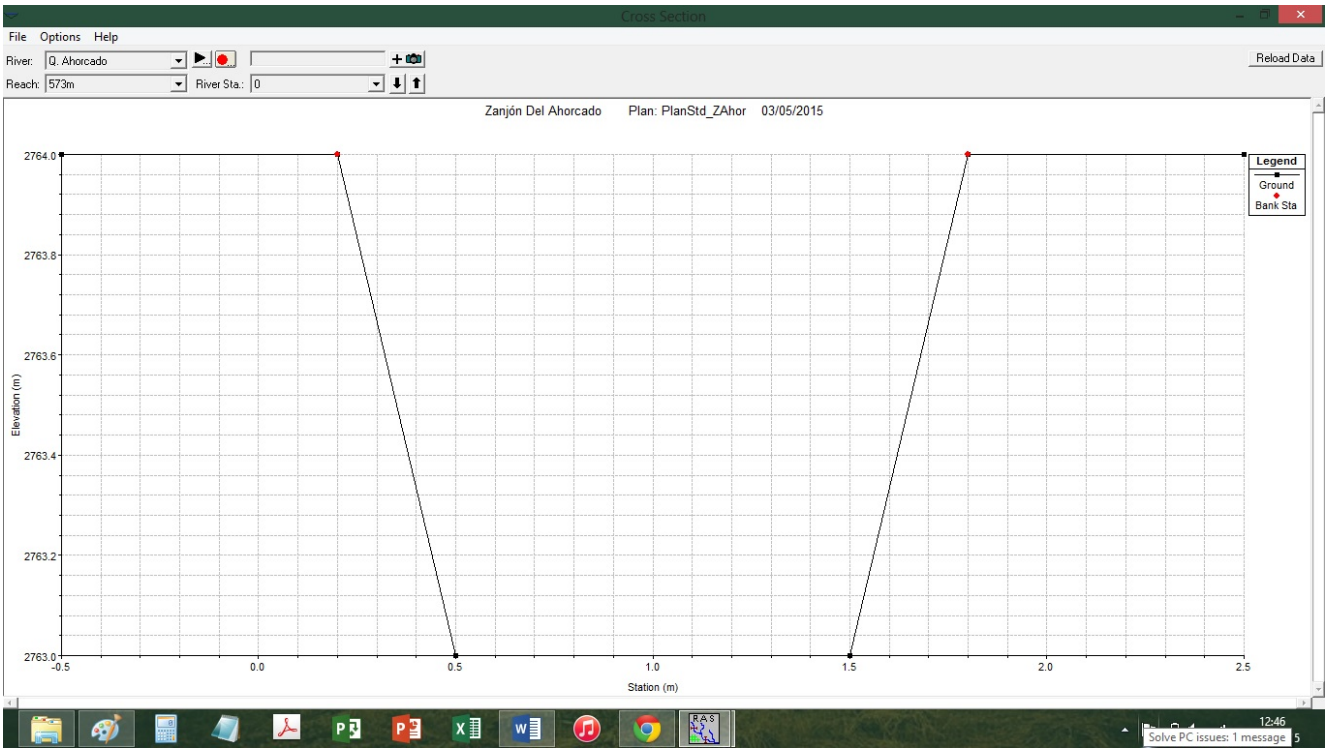


Figura 4. Sección 1, o K0+343.2 (K0+0 en HEC-RAS)
Fuente: Autor.

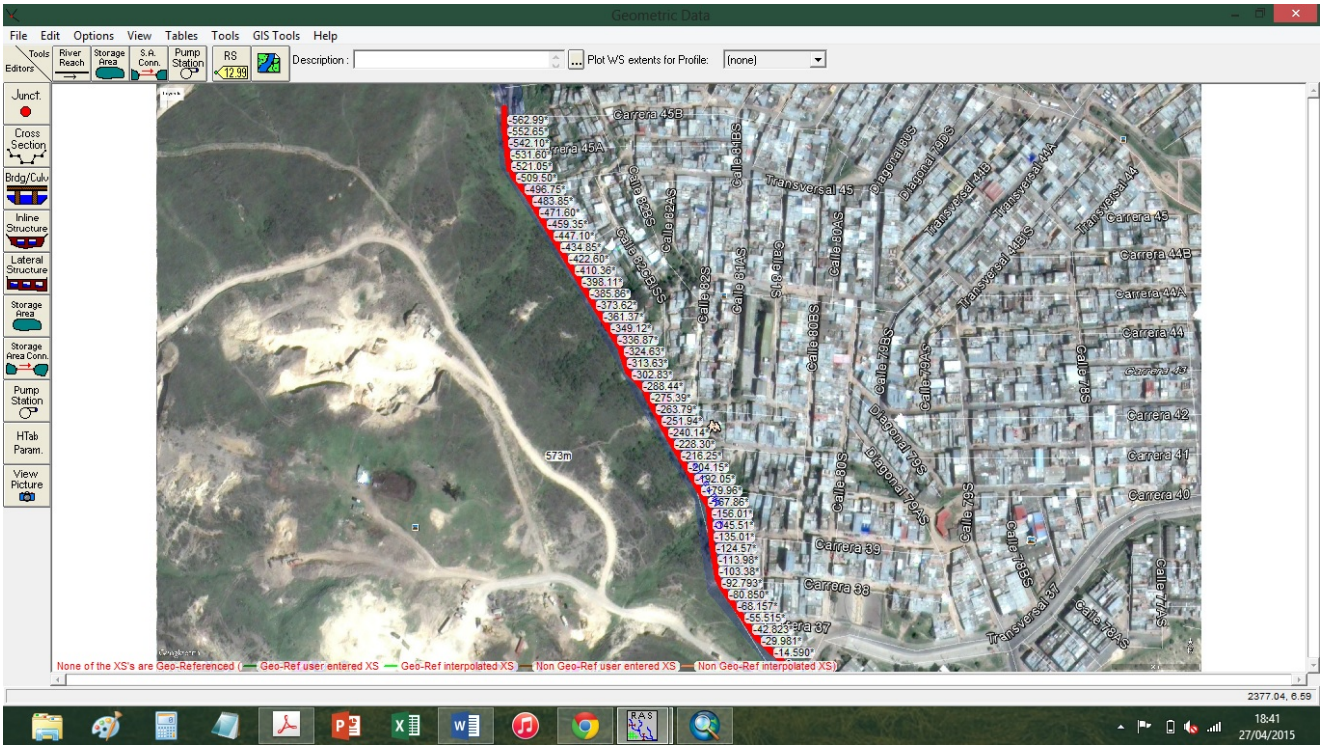


Figura 5. Planta de la quebrada con secciones interpoladas.
Fuente: Autor.

La Figura 4 y la Figura 5 muestran la sección transversal número 1 (K0+343.2) y la planta de la Quebrada con las estaciones interpoladas (la sección 1 se ubica abajo, en la figura) en HEC-RAS, respectivamente. Se aclara que el canal se ha construido recientemente en concreto, por tal motivo se ha tomado una rugosidad constante de Manning 0.013 tanto en el lecho como en los taludes.

A lo largo del tramo de estudio, no hay estructuras hidráulicas que influyan en el comportamiento del flujo.

11. RESULTADOS Y ANÁLISIS.

Los archivos y tablas resultantes de la modelación hidráulica se presentan adjuntos a este informe.

Para un período de retorno de 100 años, se presentan los siguientes resultados:

- **Velocidad de flujo en el canal, en mps:**
  - Mínima: 1.33.
  - Máxima: 3.39.
  - Media: 2.82.

- **Régimen de flujo:** Subcrítico a Transicional. Con Froude:
  - Mínimo: 0.33.
  - Máximo: 1.1.
  - Medio: 0.91.

- **Pendiente de flujo:** suave, a excepción de tramos en donde se presenta resalto hidráulico, como se muestra en las figuras siguientes. Se aclara que en las mismas, se muestra la línea de energía total (en verde) y la de pendiente crítica (en rojo).

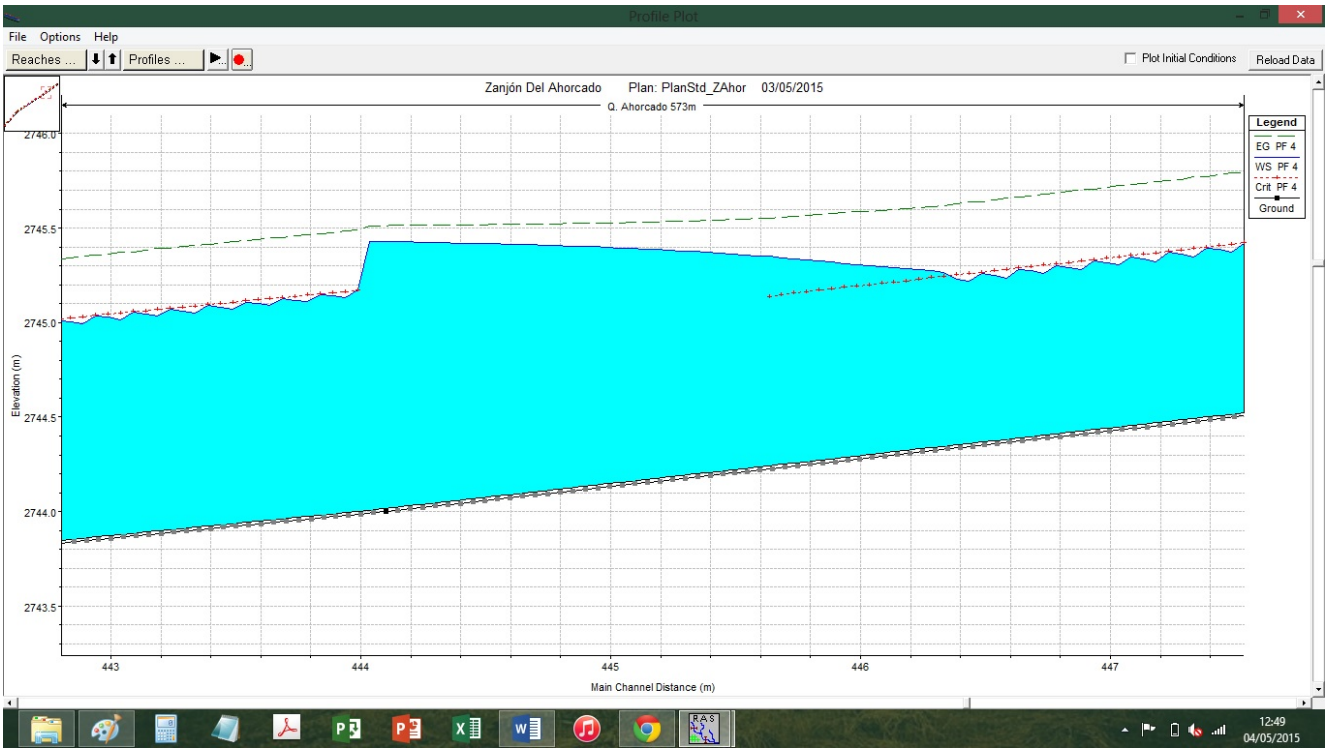


Figura 6. Resalto hidráulico entre estaciones K0+127 y K0+129
Fuente: Autor.

En la Figura 6 se observa el perfil de flujo que se presentaría en la quebrada Zanjón Del Ahorcado tras una precipitación correspondiente a un período de retorno de 100 años entre las estaciones K0+127 y K0+129, lugar donde existe una disminución leve en la pendiente del lecho del canal. En la sección inicial de ese resalto, se presentaría una sección de flujo como se muestra en la Figura 7. Nótese que tras el resalto, el régimen de flujo volvería a ser transicional.

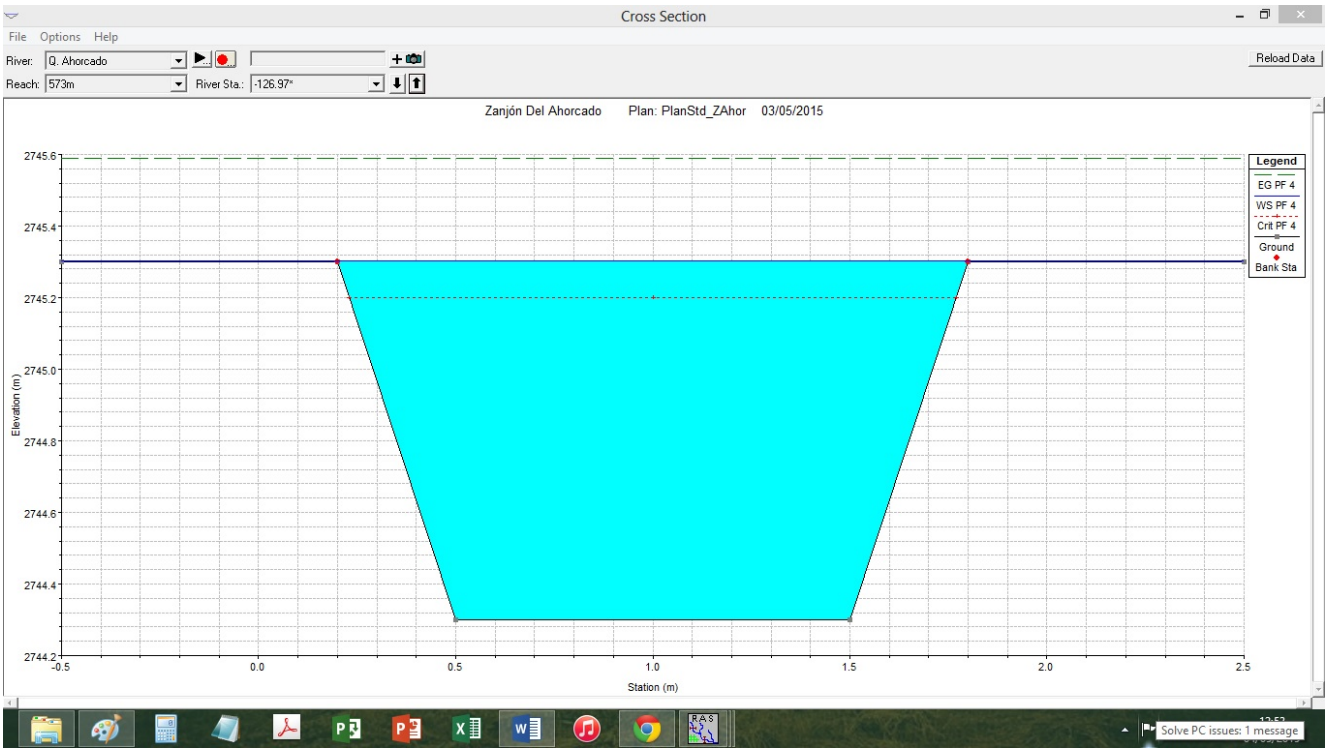


Figura 7. Sección de flujo en la estación K0+126.97
Fuente: Autor.

La Figura 7 muestra la sección de flujo que se presentaría en la estación K0+126.97 y en general en las adyacentes (debido al resalto) en el caso de un episodio de lluvia con período de retorno de 100 años. La sección, limitada a la cubierta en concreto, muestra que para las condiciones de frontera existirían unas condiciones de flujo tales que se sobrepasarían a la capacidad de la sección para un posible resalto hidráulico. Nótese que el nivel de aguas alcanzaría la cota de las bancas.

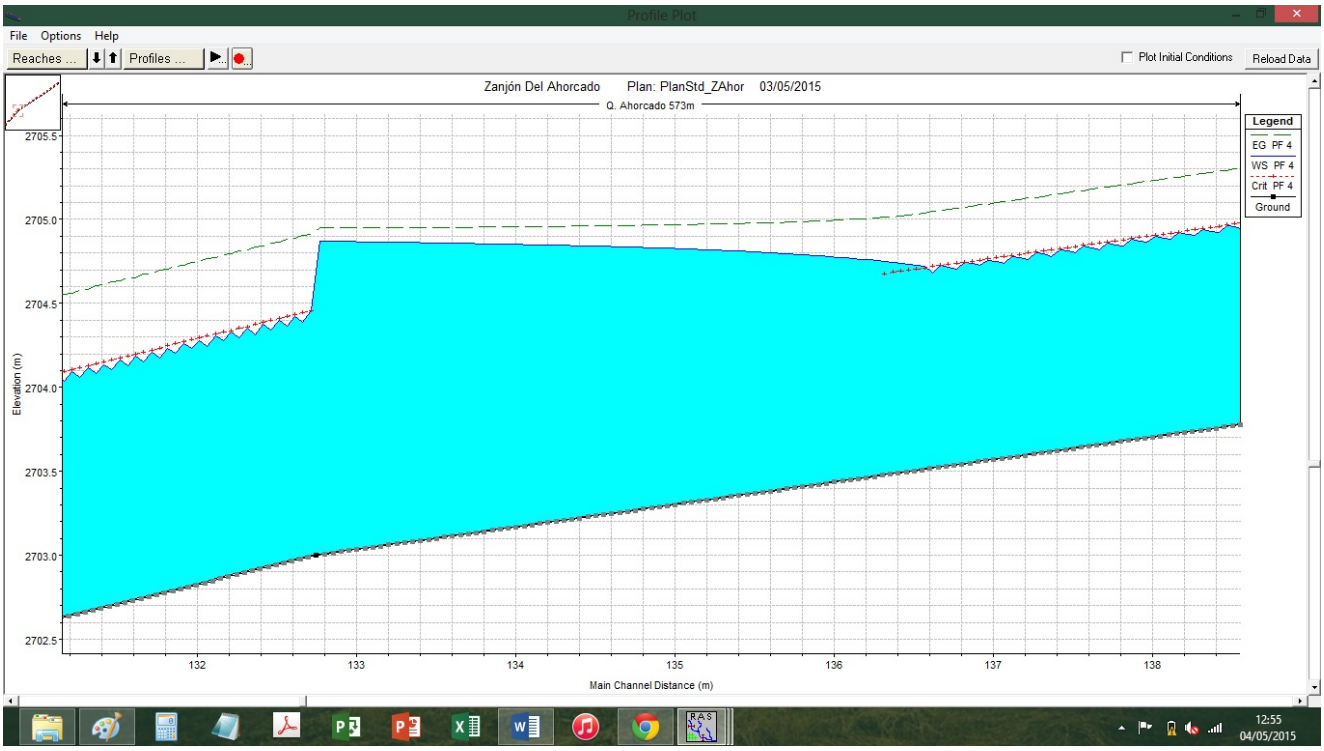


Figura 8. Resalto hidráulico entre estaciones K0+437 y K0+440
Fuente: Autor.

La Figura 8 y la Figura 9 muestran dos posibles resaltos hidráulicos. El primero de ellos tras un aumento fuerte en la pendiente topográfica del lecho del canal entre las secciones K0+437 y K0+440; el segundo, se presentaría en sección K0+571, cuando el lecho del canal cambia nuevamente de pendiente.

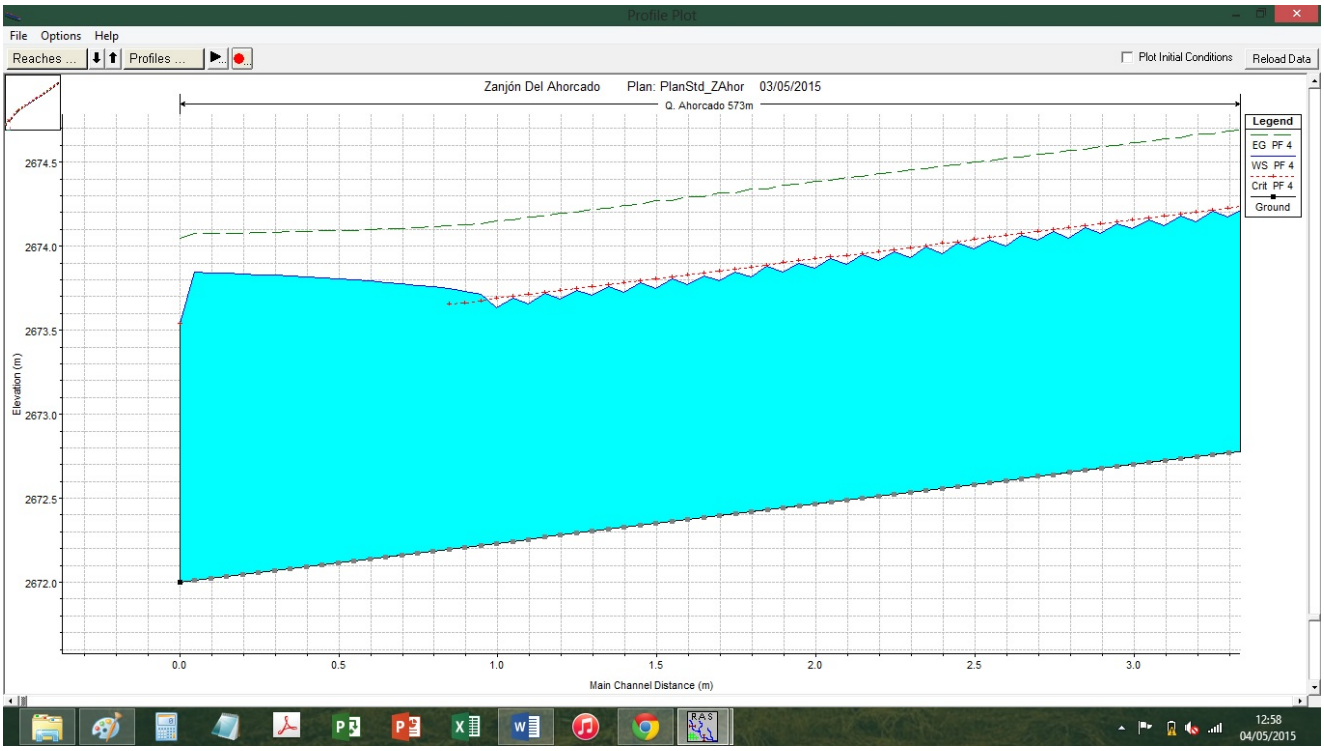


Figura 9. Resalto hidráulico entre estaciones K0+572 y K0+573
Fuente: Autor.

Por estos fenómenos, bajo las condiciones de lluvia máxima esperada, podría esperarse entonces una capacidad insuficiente en parte del tramo del canal, como se observa en la planta general de la Figura 10.

En dicha figura se observa (en rojo), el tramo para el que la ZMPA de Zanjón Del Ahorcado tendría mayor afectación en caso de un evento de lluvias máximas. Dicho tramo, correspondiente hasta cerca de la estación K0+128, coincide con la zona donde el canal tiene su primer cambio de pendiente de lecho y se presenta resalto hidráulico.

Se aclara que la estación inicial se muestra en la parte superior de la imagen.

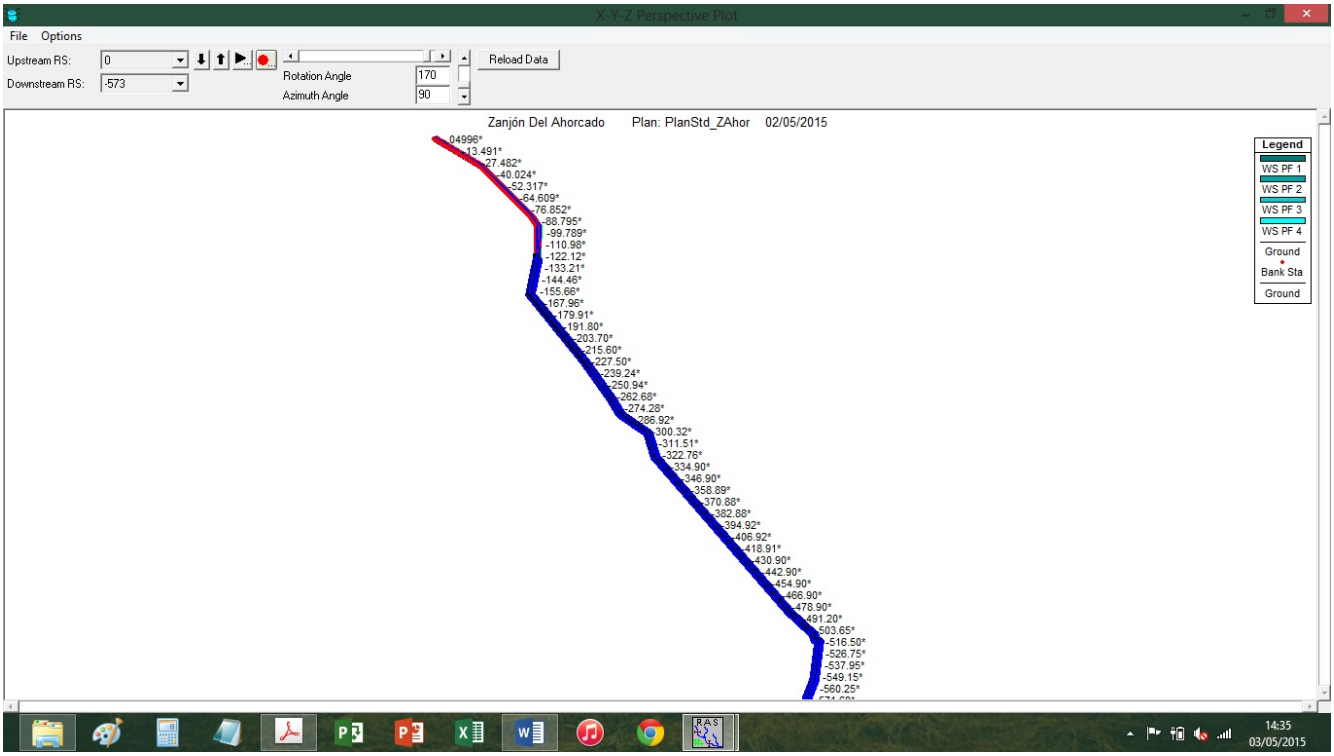


Figura 10. Planta general con TR=100 años.
Fuente: Autor.

Estas características de flujo se acentúan debido a que:

- El cauce, intervenido ahora en casi todo su trayecto, hace que el tiempo de concentración de la cuenca de la Quebrada disminuya drásticamente debido a las altas velocidades y pendientes.

- La presencia de basuras, que limitan la capacidad hidráulica en el cauce.

- En lugar de estructuras hidráulicas para la evacuación, Zanjón Del Ahorcado drena directamente a Zanjón De La Muralla.

12. DISCUSIÓN.

Con base en lo anterior, se presenta lo siguiente:

- Para la delimitación de la ZMPA de una corriente de agua, ¿podría considerarse un ancho de franja variable, considerando la variación de las características de flujo a lo largo de dicho curso?

- Como se ha mostrado en la sección 11, bajo condiciones de máximo caudal esperado y con las características topográficas de alta pendiente, la capacidad hidráulica del canal podría sobrepasarse sólo en un tramo del canal, lo que sugiere que para la delimitación de la ZMPA de un curso de agua bajo criterios hidráulicos podría obedecer a considerar un antro de franja decreciente.

- El anterior postulado podría favorecer la inversión de un proyecto de recuperación ecológica al hacer posible disminuir el número de predios que deberían adquirirse para ese propósito.

13. RECOMENDACIONES.

- Podría considerarse la posibilidad de delimitarse la ZMPA de una corriente de agua con ancho de franja variable; esto tomando como base la variabilidad de las condiciones de flujo y por tanto disminuiría los costos de inversión para proyectos de restauración ecológica.

- La cuenca de la Quebrada ha sido endurecida (construida) y descuidando su cobertura vegetal. Es recomendable la instauración de programas de reforestación y de protección del cauce, además de otros concernientes con la educación hacia la disposición de basuras.

- Existen especies no nativas como el eucalipto en el margen derecho de la Quebrada, consumen más agua y no regulan tan bien el caudal hídrico como en los bosques naturales. Por otro lado, son especies que poseen raíces muy fuertes, que hacen de ellos una fuerte competencia de la vegetación nativa. Es recomendable su reemplazo progresivo con especies nativas, de mejor regulador del caudal.

14. CONCLUSIONES.

Aunque la delimitación de la RH y ZMPA de una corriente de agua obedece a criterios técnicos más allá de los aquí tratados, podría establecerse un orden de aplicabilidad de tales criterios de acuerdo con su preponderancia en los caracteres ambientales y sociales en torno a la zona de influencia del cuerpo de agua.

Con base en lo anterior, y con estudios técnicos de otras áreas, podría definirse cuál o cuáles de todos ellos determinan la delimitación. Con esto, si por ejemplo el estudio geotécnico y de estabilidad determina que no hay riesgo de afectación ambiental y social,

podría considerarse al hidrológico e hidráulico como determinante para la delimitación de la RH y ZMPA.

Esto último disminuiría considerablemente los costos de inversión de los proyectos de restauración ambiental de las quebradas del Distrito.

15. GLOSARIO.

- Zona de Manejo y Preservación Ambiental (ZMPA): Es la franja de terreno de propiedad pública o privada contigua a la Ronda Hidráulica, destinada principalmente a propiciar la adecuada transición de la ciudad construida a la estructura ecológica, la restauración ecológica y la construcción de la infraestructura para el uso público ligado a la defensa y control del sistema hídrico. (POT. Decreto 190 2004).

- Ronda Hidráulica (RH): Zona de protección ambiental e hidráulica no edificable de uso público, constituida por una franja paralela o alrededor de los cuerpos de agua, medida a partir de la línea de mareas máximas (máxima inundación), de hasta 30 metros de ancho destinada principalmente al manejo hidráulico y restauración ecológica. (POT. Decreto 190 2004).

- Corredor Ecológico de Ronda (CER): Abarca la RH y la ZMPA de un curso hídrico.

- Recuperación ambiental: Restauración de las condiciones ambientales de un área para su uso seguro, saludable y sostenible.

- mcs: medida de caudal, en metros cúbicos por segundo.

- mps: medida de velocidad, en metros por segundo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1) Chow, Ven Te (2000). Hidráulica de Canales Abiertos. Bogotá, D. C. Ed. MacGraw-Hill. p. 87-121; 221.

2) Monsalve, Germán (2000). Hidrología en la Ingeniería. Bogotá, D. C. Ed. Escuela Colombiana de ingeniería. p. 212-214.

3) Decreto 190 2004. Artículo 78.