acueducto
AGUA Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ

MEMORANDO INTERNO

2620001-2019-DIE-663

Bogotá D.C., 8 de noviembre de 2019

PARA: JULIE ANDREA MARTINEZ MENDEZ
Directora (e) Gestión Ambiental del Sistema Hídrico

DE: Dirección Ingeniería Especializada

ASUNTO: Ajuste al modelo hidráulico de la quebrada Las Delicias de acuerdo con la mesa técnica entre DGASH-EAAB, SDA y CAR. Aviso SAP No. 400069953.

Atendiendo la solicitud de servicio donde la Dirección de Gestión Ambiental del Sistema Hídrico (DGASH) le solicita a la Dirección de Ingeniería Especializada (DIE) realizar el ajuste del modelo hidráulico de la quebrada las Delicias desarrollado por la DIE en el año 2018 según los acuerdos alcanzados en la mesa técnica realizada por la DGASH-EAAB, SDA y CAR (en adelante mesa técnica); a continuación, se describen las actividades realizadas para dar respuesta a su solicitud.

1 Antecedentes

La DIE realizó la modelación hidráulica e hidrológica de la quebrada las Delicias y los resultados le fueron remitidos a la DGASH mediante el Memorando Interno No. 2620001-2018-DIE-225 del 16 de mayo del año 2018. La modelación hidráulica se realizó mediante un modelo unidimensional en el tramo comprendido entre la carrera 5 este y la calle 62 con carrera 2 donde la quebrada es entubada. Como resultado de la mesa técnica se acordó efectuar el reajuste de la modelación hidráulica realizada previamente, para tal fin la EAAB adquirió el compromiso de modelar únicamente el tramo de la quebrada que se encuentra dentro del perímetro urbano de la ciudad, adicionalmente el modelo ajustado debe incluir los caudales rurales estimados por la CAR mediante la modelación hidrológica de la parte de la cuenca que se encuentra dentro de su jurisdicción.

2 Introducción

La quebrada Las Delicias hace parte del sistema hídrico de la localidad de Chapinero. Nace en los Cerros Orientales de Bogotá a una elevación 3305 m.s.n.m. y fluye en dirección oriente-occidente en sección abierta en una longitud de 4,477 metros, para posteriormente ingresar al sistema de drenaje combinado de la ciudad en la carrera tercera con Calle 62, en una tubería de sección de herradura de base y altura de 1.6 metros en su tramo inicial. La cuenca corresponde mayoritariamente a zona de reserva forestal con un incremento del área urbanizada en la parte baja de la misma; mientras que en el cauce los suelos son predominantes depósitos de coluvión de cantos gruesos y semi-redondeados inmersos en una matriz limosa orgánica. La modelación hidráulica se realizó en el tramo que comprende los últimos 872 metros de la quebrada hasta el punto en que ingresa a la red de drenaje de la ciudad.

19 NOV. 2019
8:44 am



Figura 1. Cauce natural de la quebrada Las Delicias.



Figura 2. Lugar de ingreso de la quebrada Las Delicias al sistema de alcantarillado.

3 Modelación hidrológica

De acuerdo con los compromisos adquiridos en la mesa técnica, los caudales generados por el drenaje de las áreas de la cuenca localizados en predios rurales ubicados en la jurisdicción de la CAR serían estimados por esta, mientras que los de las áreas de drenaje ubicados dentro del perímetro urbano de la ciudad deberían ser estimados por la EAAB. A continuación, se describen los procedimientos seguidos para el cálculo de los caudales en cada caso.

3.1 Caudales cuenca rural

La Dirección de Recursos Naturales de la CAR realizó la modelación hidrológica de la cuenca rural de la quebrada Las Delicias, cuyo informe técnico se adjunta a este. En el análisis realizado por la CAR se determinó que la parte de la cuenca ubicada en su jurisdicción tiene las características morfológicas mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros morfológicos de la quebrada Las Delicias. Fuente: CAR.

NOMBRE	MUNICIPIO	ÁREA [Km^2]	LONGITUD DE DRENAJES [Km]	DENSIDAD DE DRENAJE [Km/Km^2] 1:25000	PERÍMETRO [Km]	LONGITUD DEL CAUCE [km]	ΔH [m]	PENDIENTE [m/m]	ANCHO W [Km]	COEFICIENTE DE FORMA HORTON [Kf]	COEFICIENTE DE COMPACIDAD GRAVELIUS [Kc]	INDICE DE ALARGA-MIENTO
Delicias	Bogotá Rura	3.20	20.95	6.55	7.8	4.28	574	0.134	0.75	0.17	1.2	5.7

La modelación hidrológica fue realizada en el programa HEC-HMS utilizando la metodología del hidrograma unitario del Soil Conservation Service. La información de precipitación se introdujo mediante un hietograma generado según la metodología de los bloques alternos. El volumen de precipitación correspondiente al período de retorno de 100 años fue obtenido mediante el ajuste de la información histórica de precipitación máxima en 24 horas de la estación La Casita a la Distribución de Valor Extremo Generalizado. El tiempo de concentración de la cuenca fue estimado en 26.42 minutos y se estimó un valor de 91 para el parámetro CN. Una vez ejecutado el modelo para las condiciones descritas, se obtuvo un caudal máximo de 10.5 m^3/s para el período de retorno de 100 años, tal como se muestra en la Figura 3.

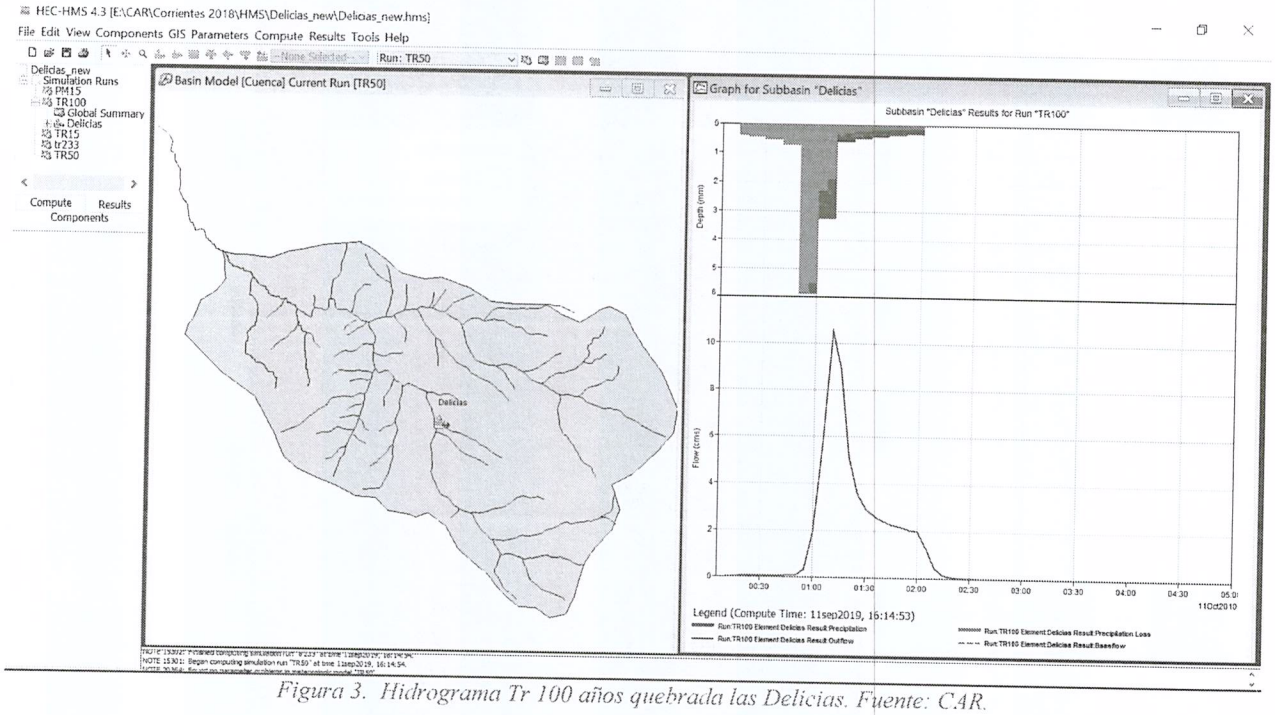


Figura 3. Hidrograma Tr 100 años quebrada las Delicias. Fuente: CAR.

3.2 Caudales cuencas urbanas

Para las cuencas localizadas dentro del perímetro urbano de la ciudad de Bogotá se construyó un modelo lluvia-escorrentía implementado en el programa HEC-HMS. Se utilizó el método de Soil Conservation Service (SCS) para el cálculo de las abstracciones iniciales y la precipitación efectiva, así mismo, se utilizó el hidrograma unitario del SCS para la transformación de la lluvia en escorrentía.

3.2.1 Propiedades de las sub-cuencas

La delimitación de la cuenca se realizó utilizando un modelo digital de elevaciones construido a partir de curvas de nivel descargadas del sitio de Infraestructura de datos espaciales para el Distrito Capital (IDECA), administrado por la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital. Como resultado del análisis se determinó que la cuenca de la quebrada Las Delicias tiene un área de 403.88 hectáreas, incluyendo el área rural que fue analizada por la CAR, y cuya extensión se muestra en la Figura 4. Para efectos del análisis hidrológico y definir los caudales de análisis, el área de la cuenca fue desagregada en tres sub-cuencas, teniendo en cuenta el área propia que drena el canal Las Delicias (afluente de la quebrada), la parte baja de la quebrada misma y la cuenca rural. En la Figura 4, la sub-cuenca 1 es la cuenca rural, modelada por la CAR, adicionalmente se muestra la sub-cuenca 2 que tiene un área de 43.95 hectáreas y la sub-cuenca 3 que tiene un área de 46.35 hectáreas.

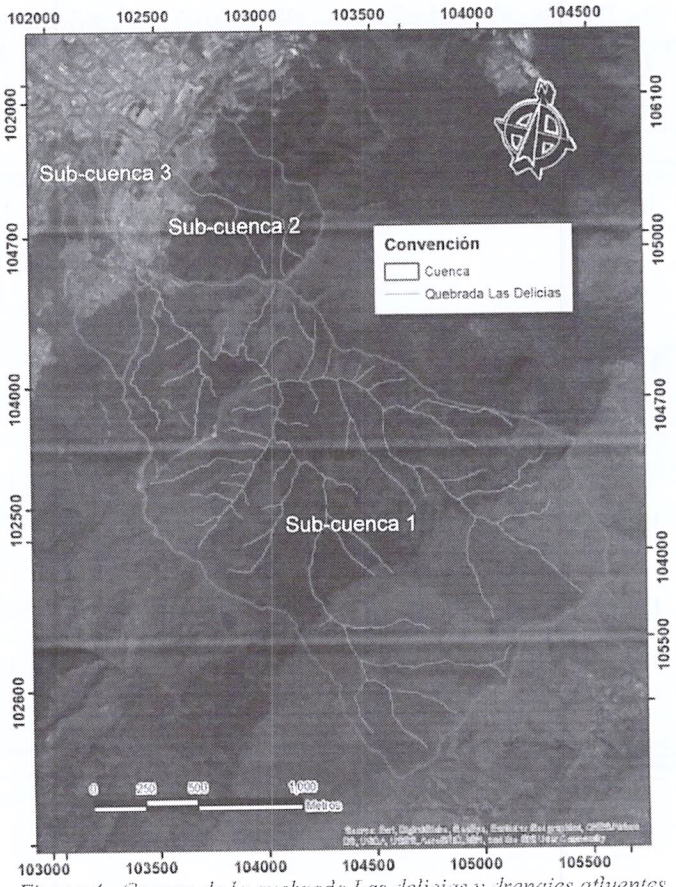


Figura 4. Cuenca de la quebrada Las delicias y drenajes afluentes.

Para la determinación del porcentaje de área impermeable se realizó una clasificación Ráster supervisada en el programa ArcGIS utilizando una imagen satelital reciente de la cuenca. Los porcentajes estimados de área permeable e impermeable para las tres sub-cuencas se muestran en la Tabla 2, el resultado gráfico de la clasificación realizada para la estimación de estos porcentajes se muestra en la Figura 5.

Tabla 2. Porcentaje de área impermeable cuenca de drenaje.

Sub-cuenca	% Impermeable	% Permeable
2	95.6	4.40
3	66.9	33.1

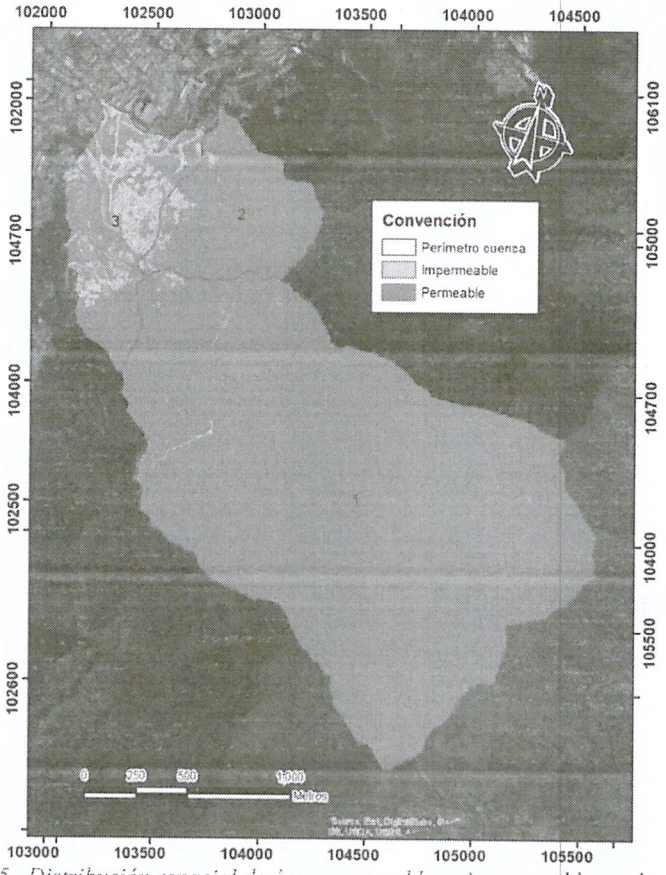


Figura 5. Distribución espacial de áreas permeables e impermeables en la cuenca.

De acuerdo con el mapa de coberturas de la tierra del Distrito Capital de Bogotá (2014), en esta cuenca se presenta un uso mixto que incluye bosque y arbustal, plantación forestal, pastos y cultivos, además de zonas urbanizadas. La determinación del valor del parámetro Número de Curva (CN) se realizó de manera ponderada según las áreas de cada uso. Se adoptó un CN de 74 para el área permeable, mientras que para el área impermeable de la cuenca, se adoptó un CN de 98 que corresponde a parqueaderos, techos y zonas pavimentadas, de acuerdo con lo recomendado en la Tabla 4-3 de la norma de diseño de alcantarillados NS-085. El valor adoptado de acuerdo con el área de cada uno de los usos se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Número de Curva de las cuencas.

Número	% Permeable	% Impermeable	CN Permeable	CN Impermeable	CN Ponderado
2	95.6%	4.45%	74	98	75.1
3	66.9%	33.05%	74	98	81.9

El tiempo de concentración se estimó mediante el método de velocidad teniendo en cuenta el recorrido desde el sitio más remoto de la sub-cuenca hasta el punto de salida. El perfil longitudinal de las sub-cuencas 2 y 3 se muestran en la Figura 6 y en la Figura 7. El tiempo de concentración se estimó en 15 y 18 minutos para las sub-cuencas 2 y 3 respectivamente.

Perfil longitudinal sub-cuenca 2

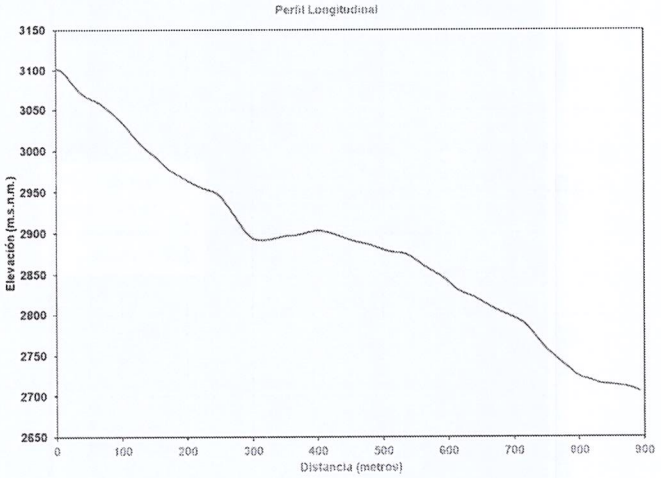


Figura 6. Perfil longitudinal Sub-cuenca 2.

Perfil longitudinal sub-cuenca 3

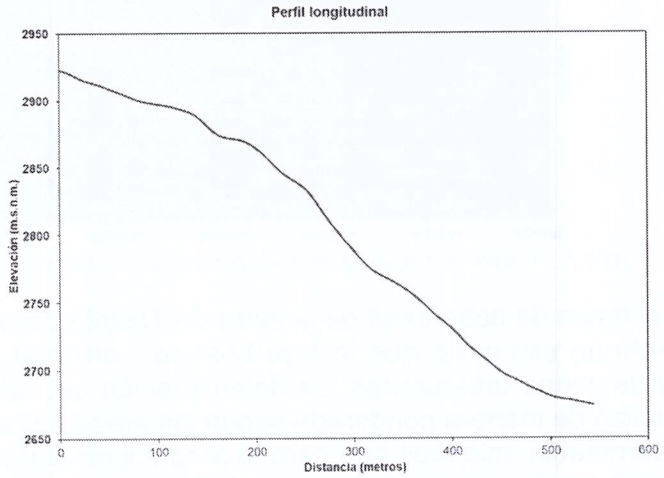


Figura 7. Perfil longitudinal sub-cuenca 3.

3.2.2 Tormenta de diseño

Una vez definida el área de drenaje, se determinó la curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) en el centroide de esta. Mediante las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) es posible estimar la intensidad de tormentas de distintas duraciones y para diferentes periodos de retorno. La curva IDF correspondiente al período de retorno de cien años se encuentra descrita por la siguiente expresión.

$$Intensidad = C_1(Duración + X_O)^{C_2} \qquad \textit{Ecuación 1}$$

Donde, los parámetros de la ecuación para el centroide de la cuenca de drenaje (coordenadas Norte: 103936.39271 Este: 103495.009) son los mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. Curva IDF.

C_1	X_0	C_2
2408.39271	12.4	-0.85173

Con el valor de la intensidad extraído de las curvas IDF, se calculó el volumen de lluvia total a distribuir como:

$$P(mm) = I\left(\frac{mm}{h}\right) * Duración\ (6\ horas) \qquad \textit{Ecuación 2}$$

$$P(mm) = 15.56\frac{mm}{h} * 6\ horas = 93.3\ mm \qquad \textit{Ecuación 3}$$

El hietograma de diseño presentado en la Figura 9, se realizó a partir de la distribución temporal mostrada en la Figura 8, la cual fue obtenida del análisis de eventos históricos de precipitación registrados en la ciudad de Bogotá. El volumen total de lluvia se distribuyó en una duración total de la tormenta de tres (3) horas que es la duración promedio de las lluvias en la ciudad, de acuerdo con las conclusiones de los últimos análisis de tormentas realizados en el marco de los dos últimos planes maestros de alcantarillado de la ciudad de Bogotá.

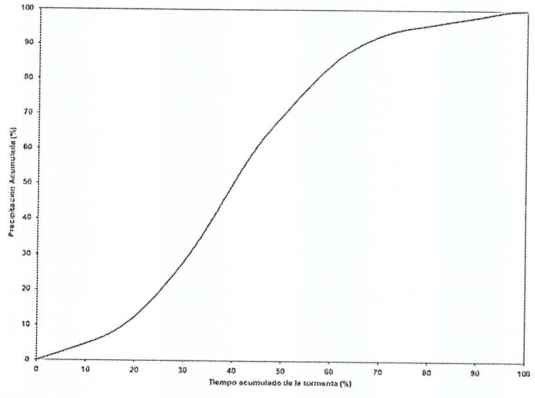


Figura 8. Distribución temporal tormentas. Duración 3 horas.

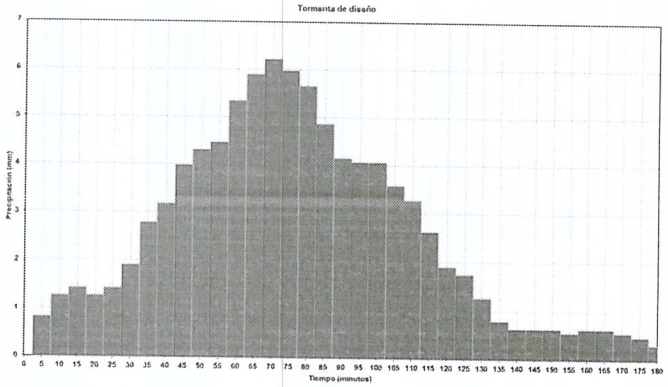


Figura 9. Hietograma de diseño. Duración 3 horas. Tr = 100 años.

3.2.3 Caudales de análisis

Realizada la modelación hidrológica en el programa HEC-HMS (Figura 10), se obtuvieron los caudales de escorrentía para un periodo de retorno de 100 años.

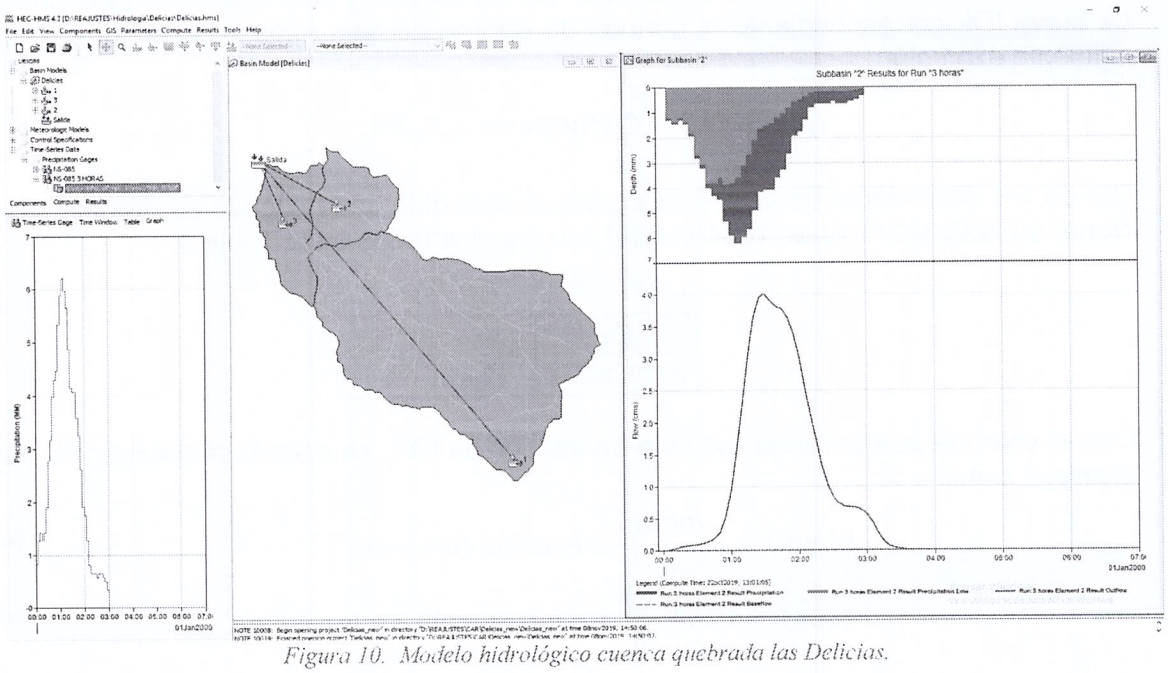


Figura 10. Modelo hidrológico cuenca quebrada las Delicias.

El hidrograma obtenido por la CAR en la modelación hidrológica de la cuenca rural se adicionó al obtenido por la DIE para la subcuenca 2, obteniéndose el mostrado en la Figura 11, el cual se introdujo en el modelo en el inicio del tramo modelado, coincidiendo con el límite del perímetro urbano de la ciudad. El hidrograma obtenido para cuenca 3 se muestra en la Figura 12, se introdujo justo aguas arriba de Box-Culvert de la Diagonal 57, tal como se muestra en la Figura 13.

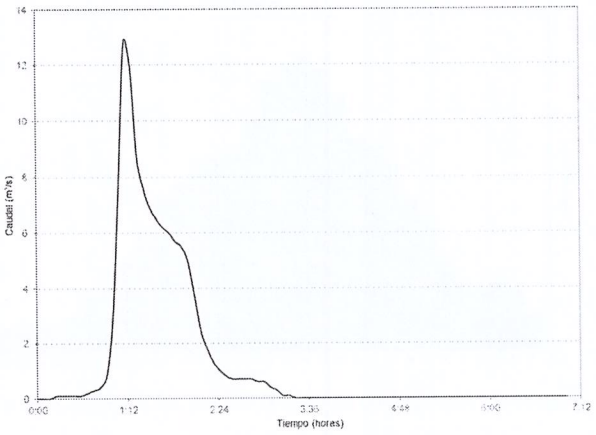


Figura 11. Hidrograma de entrada parte alta.

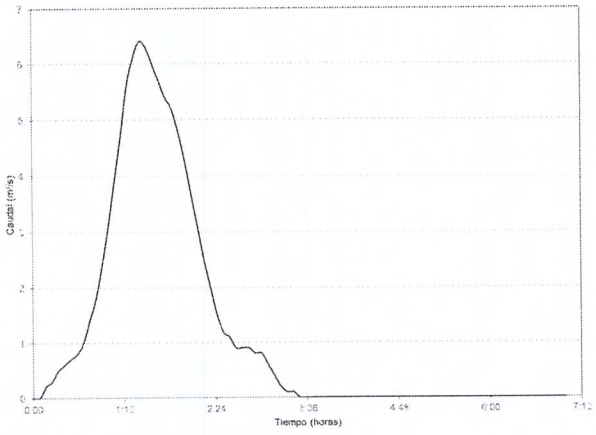


Figura 12. Hidrograma de entrada cuenca baja.

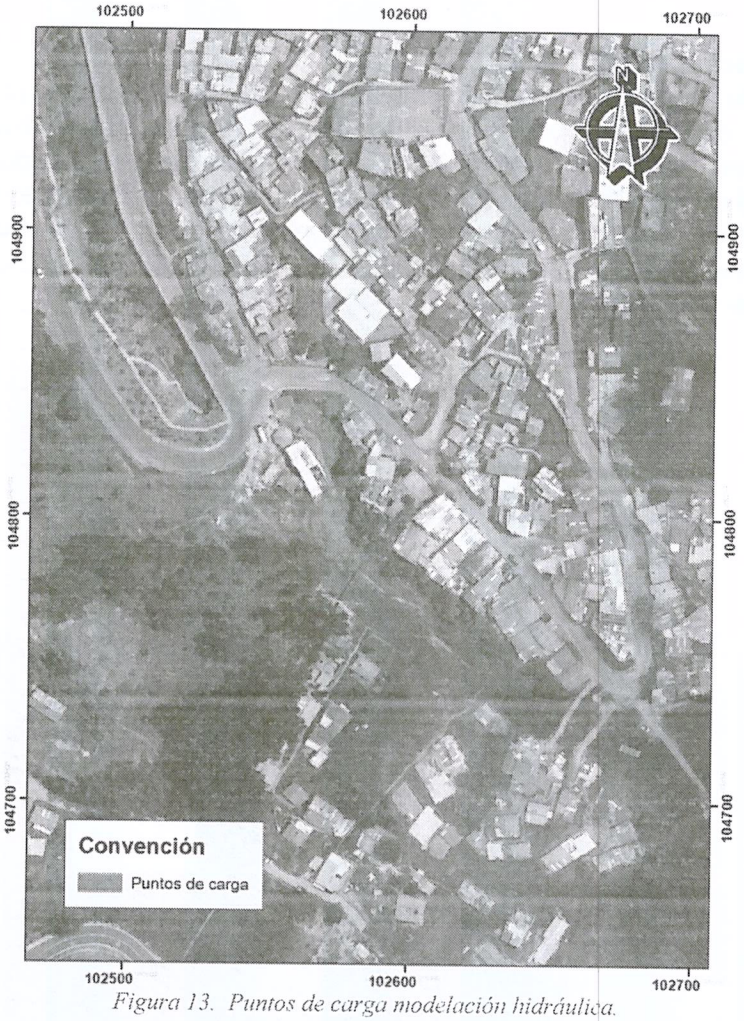


Figura 13. Puntos de carga modelación hidráulica.

4 Modelación hidráulica

La versión inicial del modelo hidráulico de la quebrada Las Delicias, la cual fue remitida a la DGASH mediante el Memorando Interno No. 2620001-2018-DIE-225 del 16 de Mayo del año 2018, es un modelo unidimensional de Flujo Gradualmente Variado desarrollado en la versión 5.0.3 del programa HEC-RAS. En atención a su solicitud de actualización del modelo hidráulico, se tuvo en cuenta la información disponible y las características del programa de modelación empleado, y con base en esto se decidió desarrollar un modelo completamente nuevo en la versión 5.0.7 del programa HEC-RAS, el cual es un modelo bidimensional de Flujo no permanente. Para el análisis de flujo bidimensional bajo condiciones de flujo no permanente, HEC-RAS utiliza un algoritmo implícito de Volúmenes Finitos. El algoritmo de solución implícito permite pasos computacionales más grandes que los métodos explícitos, a la vez que proporciona una gran estabilidad y robustez. El dominio computacional de la quebrada Las Delicias fue definido en el programa HEC-RAS mediante una malla de 3643 celdas con un área promedio de 31.14 m^2. Se incluyeron breaklines en las márgenes del cauce principal, de manera que se generaron celdas que presentan caras orientadas, garantizando resultados con un mayor grado de confiabilidad.

4.1 Información topográfica

Para realizar la modelación hidráulica bidimensional es esencial contar con un modelo de terreno con alto nivel de detalle y precisión. El modelo de terreno puede provenir de distintas fuentes, formatos y nivel de detalle. En la modelación hidráulica de la quebrada Las Delicias, se utilizó un modelo digital de elevaciones (Figura 14) construido por la Dirección de Información Técnica y Geográfica de la EAAB, a partir de levantamientos topográficos de campo ejecutados en el año 2018, complementados con información LiDAR del año 2008 en sitios en los que se requirió un mayor nivel de refinamiento.

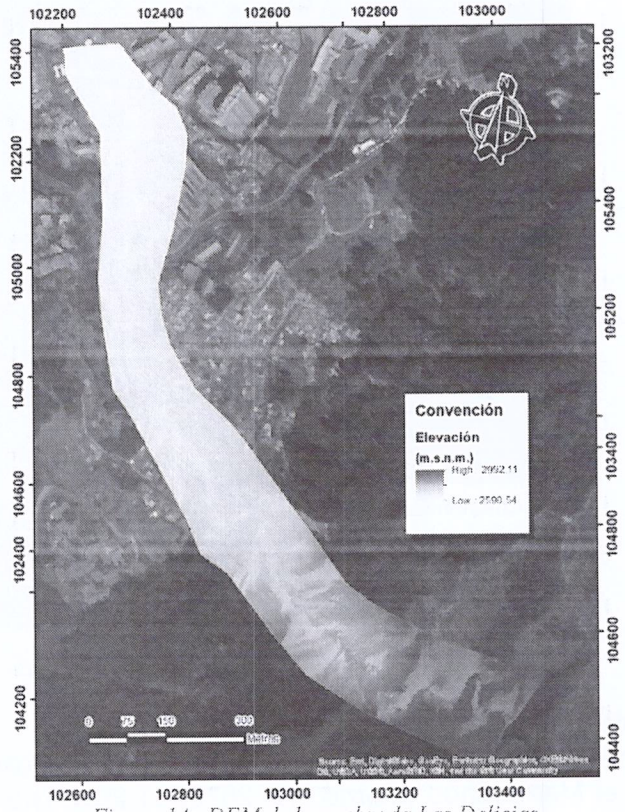


Figura 14. DEM de la quebrada Las Delicias.

4.1.1 Estructuras

A lo largo del tramo modelado existen varias estructuras que pueden clasificarse en cuatro clases de la siguiente manera.

a. Estructuras de paso

Son estructuras construidas por la comunidad para atravesar el cauce, en su mayoría fueron construidas de manera artesanal y se constituyen en obstáculos para el flujo. Debido a sus características presentan una geometría que no puede definirse en el programa empleado, por lo tanto, no fueron incluidas en el modelo. La DIE recomienda el retiro de tales estructuras y proyectar nuevas tomando como referencia los niveles máximos obtenido en la modelación hidráulica, los cuales son indicados en los resultados del presente informe.



Figura 15. Estructura de paso artesanal.

b. Box-Culvert

En la Diagonal 57 existe el Box-Culvert mostrado en la Figura 16. Esta estructura fue incluida en el modelo mediante la modificación del DEM de acuerdo con la geometría de la estructura. El tablero de la estructura no fue incluido en el modelo, sin embargo, se verificó que este no fuera alcanzado por el nivel máximo de la creciente de análisis.

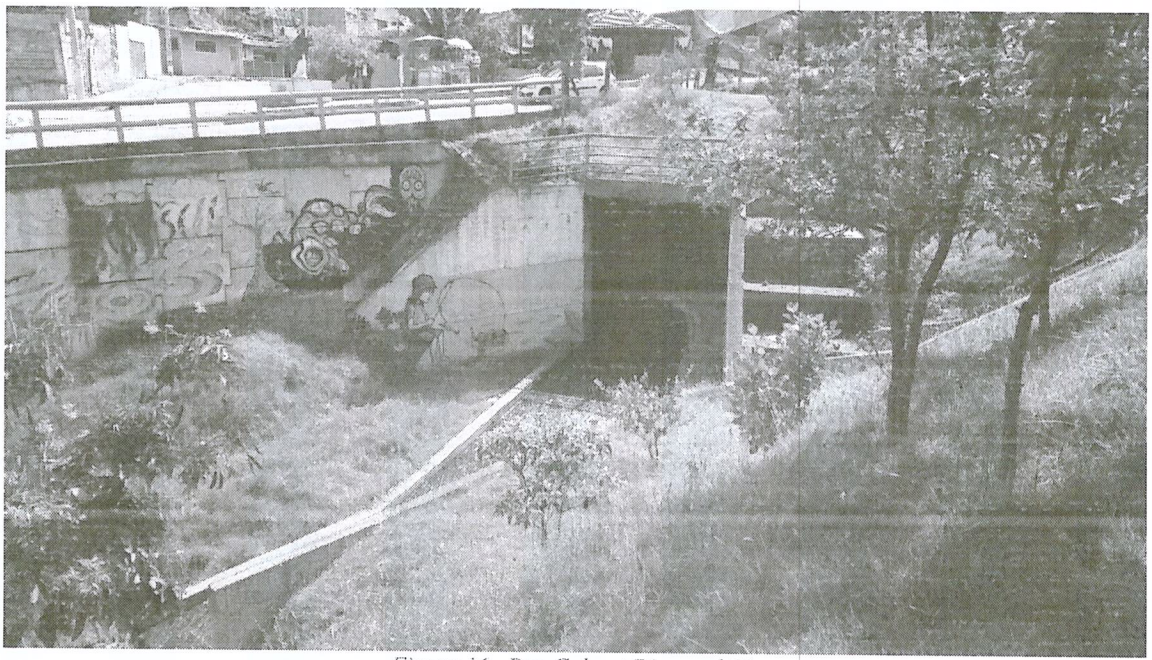


Figura 16. Box-Culvert Diagonal 57.

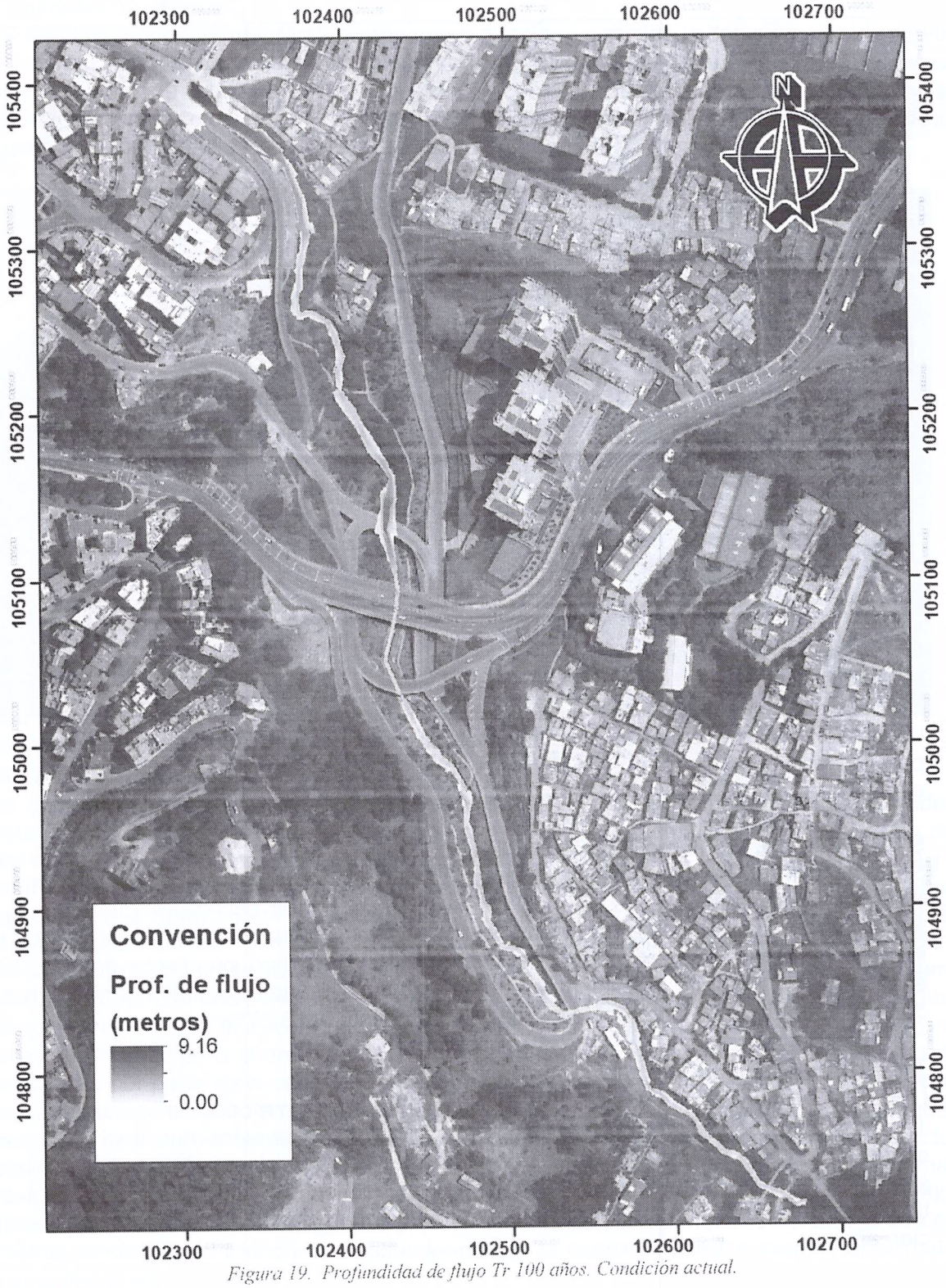


Figura 19. Profundidad de flujo Tr 100 años. Condición actual.

Los resultados muestran que en la parte alta del tramo modelado existen dos puentes artesanales construidos por la comunidad (Figura 20 y Figura 21), en los cuales a pesar que el tablero se encuentra localizado por encima del nivel obtenido para el caudal de análisis, presentan varias estructuras de soporte que afectan el flujo de la quebrada, incrementando el riesgo de inundaciones, por lo tanto la DIE recomienda el reemplazo de estos puentes por unos de mayores especificaciones técnicas y que utilicen un sistema estructural que evite las obstrucciones al flujo en la quebrada.



Figura 20. Puente construido por la comunidad.

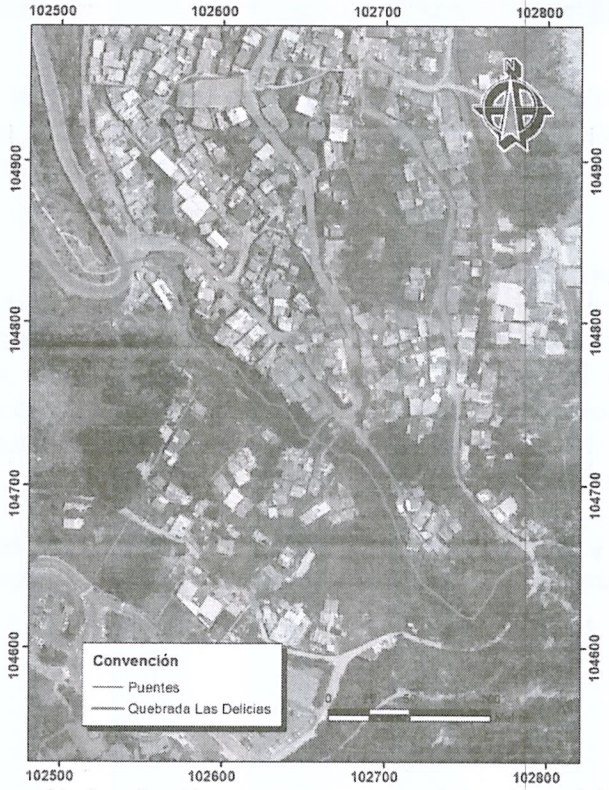


Figura 21. Localización puentes que generan obstrucciones al flujo.

Adicionalmente, el puente peatonal localizado 40 metros aguas abajo del inicio del tramo modelado de la quebrada Las Delicias (Figura 22), se encuentra por debajo del nivel del agua obtenido para la creciente analizada, por lo tanto, se recomienda su relocalización o su construcción por encima de la cota 2666.15 m.s.n.m., que es nivel del agua obtenido en el sitio donde actualmente se encuentra.

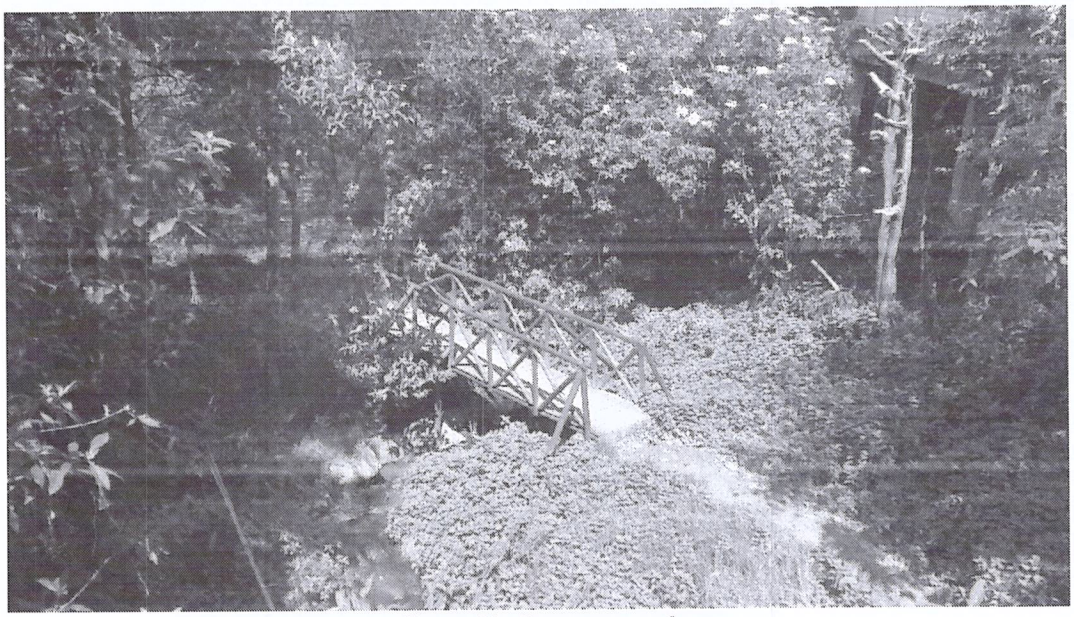


Figura 22. Puente peatonal.

Finalmente, en el Box-Culvert localizado en la Diagonal 57, el nivel máximo del agua para la creciente de análisis alcanza la cota 2654.70 m.s.n.m. mientras que la cota clave en el lugar más bajo se encuentra en la cota 2657.06 m.s.n.m. por lo que no tiene problemas de falta de capacidad.

5.2 Condición proyectada

Los resultados generales de profundidad de flujo en el tramo modelado se muestran en la Figura 23, donde se puede observar que en el sector de la Calle 62 con Carrera 3 no se presentarían los desbordes de la condición actual cuando se incluye la conexión al nuevo colector de alcantarillado pluvial construido por la Zona 2. Sin embargo, la mancha de la inundación cubre ligeramente la vía debido a que en este sector el modelo digital de elevaciones desarrollado por la DITG presenta una resolución menor.

Las conclusiones y recomendaciones dadas con base en los resultados de la condición actual para las demás estructuras son igualmente válidos para esta condición.

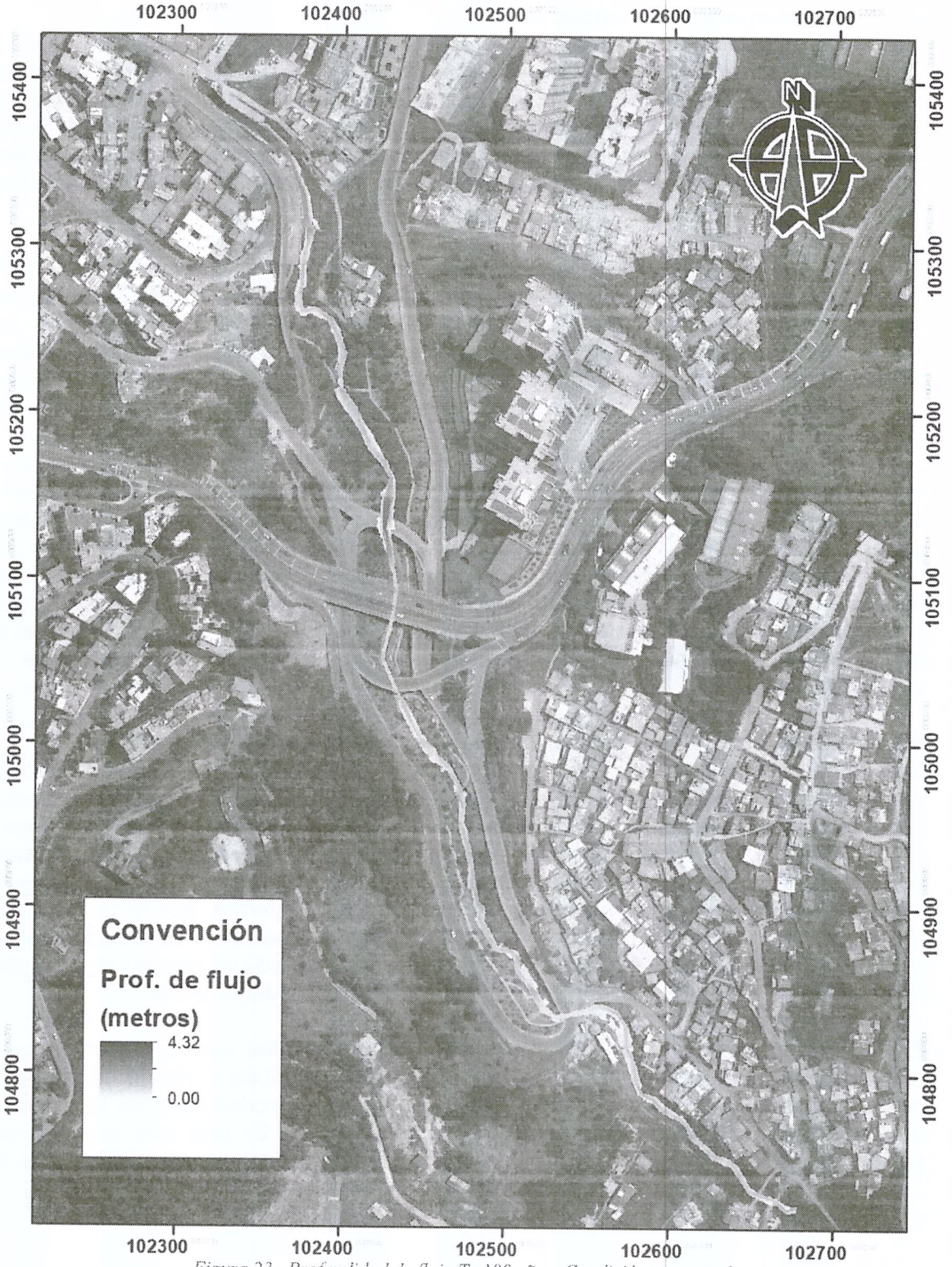


Figura 23. Profundidad de flujo Tr 100 años. Condición proyectada.

6 Conclusiones y recomendaciones

Se realizó la modelación hidrológica de la quebrada Delicias para la creciente correspondiente al periodo de retorno de 100 años en el programa HEC-HMS, para tal fin se desarrolló un modelo lluvia escorrentía que incluyó la delimitación de las subcuencas de drenaje, la determinación de la tormenta de diseño construida a partir de las curvas IDF y el análisis de las características de impermeabilidad y usos en las distintas subcuencas, lo cual permitió la obtención de los caudales de análisis.

Se desarrolló la modelación hidráulica de la quebrada mediante un modelo bidimensional desarrollado en el programa HEC-RAS, en el que se empleó un modelo digital de elevaciones construido a partir del levantamiento topográfico ejecutado por la Dirección de Información Técnica y Geográfica (DITG) de la Empresa en el que se tomaron las secciones transversales de la quebrada y se realizó el levantamiento detallado de las estructuras de cruce que permitió determinar el área inundada por el caudal correspondiente al período de retorno de 100 años.

Los resultados de la modelación hidráulica permitieron determinar que la tubería en la que es entubada la quebrada a la altura de la Calle 62 con Carrera 3, no tiene la capacidad hidráulica suficiente para conducir el caudal correspondiente al período de retorno de 100 años, lo cual genera desbordamientos en el tramo final de la quebrada. De igual forma, se determinó que con la nueva tubería que se construyó en la calle 62 no se presentan los desbordamientos de la condición actual. Hasta la fecha de elaboración del presente informe, no se ha realizado la conexión entre la quebrada y la nueva tubería de 1.7 metros de diámetro, por lo que es importante que la estructura cuente por lo menos con la misma capacidad de la tubería, la cual fue la condición evaluada.

Es importante aclarar que, a pesar de que el entubamiento de quebradas no es una condición deseable, ocurrió de manera histórica a medida que se produjo el crecimiento de la ciudad y en respuesta a la contaminación de estas corrientes por la descarga de aguas residuales. Los conductos de alcantarillado enterrados se diseñan para períodos de retorno inferiores a los cien (100) años, condición de diseño para las corrientes de agua superficiales. La normatividad vigente considera un período de retorno de 10 años para el diseño, lo que implica caudales de diseño inferiores al utilizado en el análisis presentado en este informe, por lo tanto, los resultados obtenidos para la condición actual se pueden considerar esperados. La sección canalizada de la quebrada se analizó para el caudal correspondiente al período de retorno de cien años, el cual típicamente es el caudal utilizado para la delimitación de rondas hídricas.

Existen dos puentes peatonales artesanales (Figura 21), los cuales presentan una serie de soportes que obstruyen el flujo en la quebrada, incrementando el riesgo de inundaciones. Se recomienda la reconstrucción de los puentes con mayores especificaciones técnicas y utilizando un sistema estructural que evite este tipo de obstrucciones. En este sitio, para la creciente con período de retorno de cien años, el nivel de la quebrada alcanza la cota 2667.34 m.s.n.m.

También se encontró un puente peatonal (Figura 22) que se encuentra por debajo del nivel del agua obtenido para el caudal de análisis, por lo tanto, se recomienda su relocalización o su construcción por encima de la cota 2666.15 m.s.n.m., que es nivel del agua obtenido en el sitio donde actualmente se localiza.

Finalmente, debido a la falta de mediciones directas en la quebrada Delicias, no fue posible realizar la calibración del modelo hidrológico ni del modelo hidráulico desarrollados. Sin embargo, se recomienda que ante la disponibilidad de este tipo de información, se realice la calibración del modelo y análisis de la incertidumbre.

Cordialmente,

DIEGO GUTIÉRREZ BOHORQUEZ
Director Ingeniería Especializada

Anexo: Un DVD que contiene: 1) Modelo Hidrológico HEC-HMS EAAB y CAR (rural), 2) Modelo Hidráulico HEC-RAS, 3) Ráster área inundación Tr 100 años condición actual y proyectada, 4) Shape área inundación Tr 100 años condición actual y proyectada, 5) Información colector nuevo construido, 6) Levantamiento topográfico y DTM en 195 MB (335 archivos en 53 carpetas).

Copia: Dirección de Ingeniería Especializada, Consecutivo.

Revisó: Daniel Rodríguez Amaya – Profesional Especializado.

Elaboró: Fabio A.