acueducto
AGUA, ALCANTARILLADO Y ASEO DE **BOGOTÁ**

MEMORANDO INTERNO

2620001-2018-DIE-160

Bogotá D.C., 06 de Abril de 2018

PARA: ROLANDO HIGUITA RODRIGUEZ
Director Gestión Ambiental del Sistema Hídrico

DE: Dirección Ingeniería Especializada

ASUNTO: Modelación hidrológica e hidráulica del Canal Sucre y el Canal Limitante del Norte para la condición de caudal correspondiente al período de retorno de cien (100) años. Aviso SAP No. 400064494.

Cordial saludo Dr. Higuita,

En atención al aviso de servicio del asunto donde la Dirección Gestión Ambiental del Sistema Hídrico le solicita a la Dirección de Ingeniería Especializada (DIE) realizar la modelación hidrológica e hidráulica de los canales Sucre y Limitante del Norte para el caudal correspondiente al período de retorno de cien (100) años, a continuación se presentan los resultados del análisis realizado:

1. Introducción

El canal limitante del norte se inicia en la cota 2722.22 m.s.n.m. en la divisoria de aguas de la quebrada Las Delicias, frente a la universidad Politécnico Grancolombiano. Se desarrolla de norte a sur con rumbo sur-occidental en una longitud de 1100 metros, hasta su entrega al canal Sucre en la cota 2709 m.s.n.m. Es un canal recubierto en concreto el cual fue diseñado considerando cuatro tramos, cuyas secciones se incrementan longitudinalmente hacia aguas abajo.

Y EULT
13 ABR. 2018
9:37AM

EAB - ESP

Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

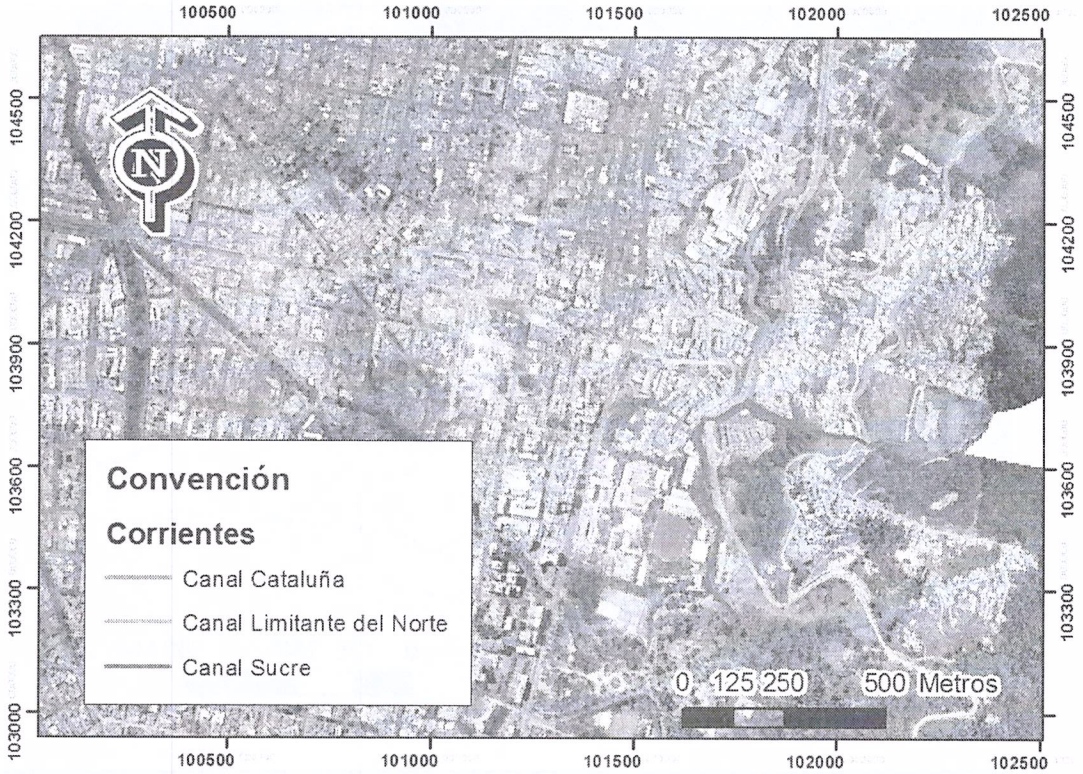


Figura 2. Localización del Canal Limitante del Norte y del Canal Sucre.

2. Información básica

El tramo analizado del canal Sucre drena un área de 62.02 hectáreas, las cuales incluyen el área de drenaje del Canal Limitante del Norte. Para la delimitación de las áreas de drenaje se consultaron las memorias de diseño del canal Limitante del Norte, las cuales se encuentran consignadas en el Proyecto No. 61, ejecutado por la firma Consultoría y Sistemas Limitada, en el año 1973. Las áreas de drenaje georreferenciadas de los planos de diseño del Canal Limitante del Norte se muestran en la Figura 3. De igual, forma, para el canal Cataluña se consultaron los correspondientes planos de diseño, ejecutados por el consorcio "MUR Proyectos Ltda. & Samuel Hernández Ayala" mediante el contrato No. 1-02-7200-568-2000. Las áreas de drenaje georreferenciadas de los planos de diseño del Canal Cataluña se muestran en la Figura 4. Adicional a la información de diseño de referencia, utilizando curvas nivel cada metro, suministradas por la Dirección de Información Técnica y Geográfica (DITG) de la EAB, se realizó un análisis de áreas de drenaje en el programa ArcGIS, cuyo resultado se muestra en la Figura 5. Como resultado de la revisión de la información previa y el análisis realizado a partir de la información topográfica, se delimitaron las áreas de drenaje mostradas en la Figura 6.

Para efectos del análisis realizado en los canales Limitante del Norte y Sucre, cuyos resultados se presentan en este informe, únicamente se consideraron las áreas de drenaje de la 1 a la 5. El área 6 es drenada por el canal Cataluña y el área 7 es drenada por el tramo final del canal Sucre, el cual no fue incluido en este análisis.

EAB - ESP

Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

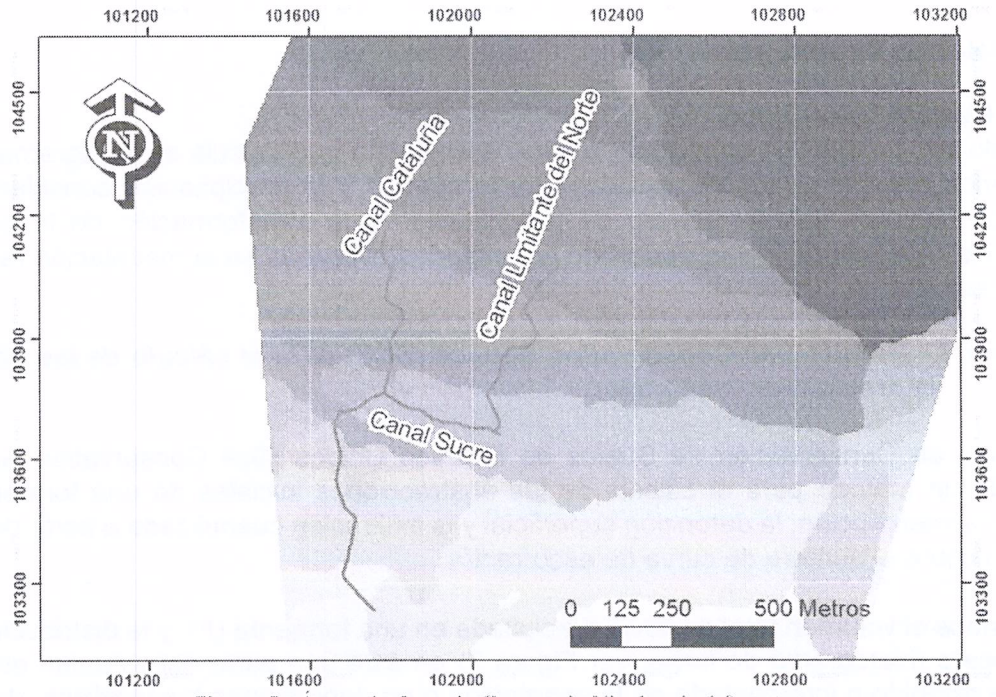


Figura 5. Áreas de drenaje Curvas de Nivel cada 1.0 metro.

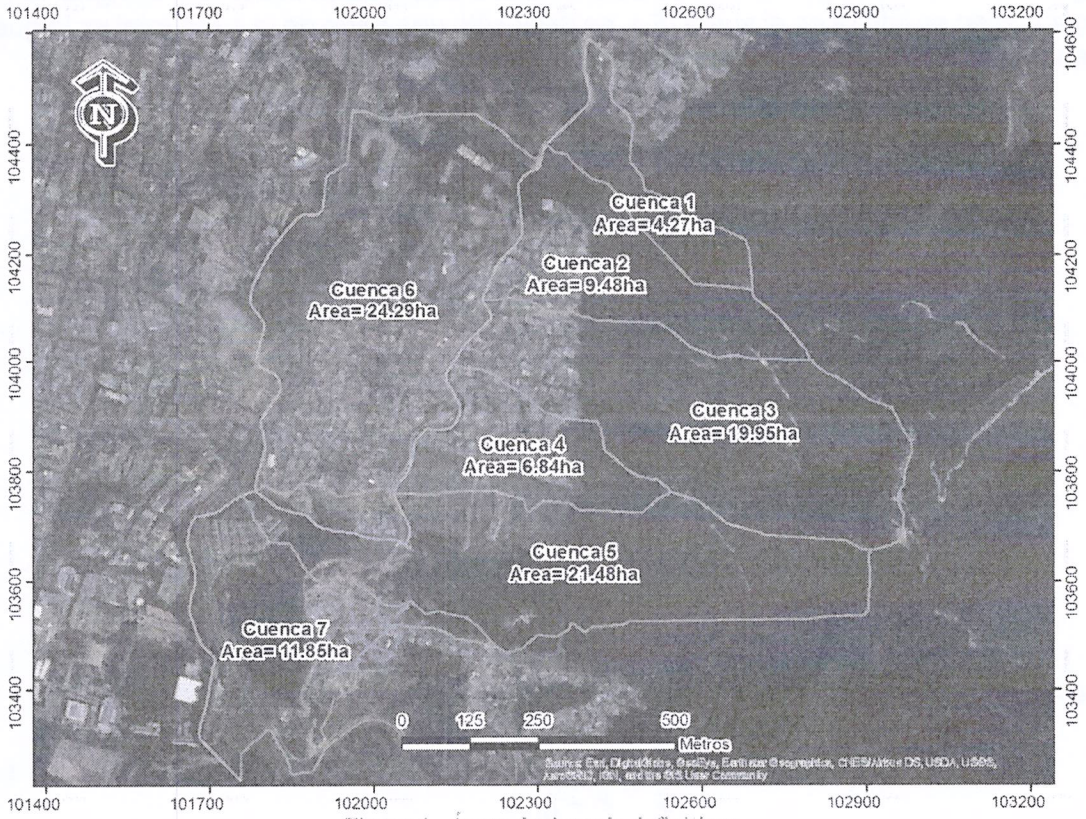


Figura 6. Áreas de drenaje definitivas.

EAB - ESP

Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

Donde S es la retención potencial máxima, o el almacenamiento. Siguiendo con la deducción de la precipitación efectiva, por el principio de continuidad se tiene que,

$$P = P_e + I_a + F_a \qquad \text{Ecuación 2}$$

Combinando las dos ecuaciones anteriores se obtiene,

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \qquad \text{Ecuación 3}$$

Siendo esta última la ecuación con la que se calcula la precipitación de exceso, donde las abstracciones iniciales pueden ser expresadas en términos del almacenamiento, a partir de la expresión $I_a = C_a S$, donde C_a es un coeficiente que varía entre 0.15 y 0.20 para cuencas colombianas.

El almacenamiento en la cuenca se puede expresar en términos de un parámetro adimensional que tiene en cuenta las características geomorfológicas del suelo, su uso y cobertura vegetal. Este parámetro es conocido, de acuerdo con la metodología propuesta por el SCS, como el número de curva (CN).

El número de curva depende de la clasificación hidrológica del suelo, realizada a partir de la geomorfología de la zona de estudio, el uso del suelo, la condición del suelo, es decir, si es pobre, aceptable o buena, y la condición de humedad antecedente. Este parámetro varía entre 0 y 100, siendo un suelo con capacidad de almacenamiento infinito aquel que presenta un CN igual a 0, y un suelo sin ninguna retención o infiltración aquel que presenta un CN igual a 100.

3.1.2. Transformación lluvia escorrentía – Hidrograma unitario del SCS.

A partir de varias series de hidrogramas reales correspondientes a cuencas de diversos tamaños, ubicadas en distintos sitios de los Estados Unidos, el SCS desarrolló un hidrograma unitario sintético adimensional el cual es función del área, la pendiente de la cuenca y que es válido para una lluvia de una duración determinada. En este hidrograma, el caudal máximo se expresa en términos del área de drenaje (*A*) en kilómetros cuadrados, y el tiempo al pico (*Tp*), a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_p = \frac{2.08A}{T_p} \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde

$$T_p = \frac{tr}{2} + tp \qquad \text{Ecuación 5}$$

Donde tr es el tiempo de duración de la lluvia y tr el tiempo de rezago o de retardo de la cuenca que se define como el tiempo comprendido entre el centroide del hidrograma de precipitación de exceso y el pico del caudal en el hidrograma. Cuando se conoce el tiempo de concentración (T_c), es posible determinar el tiempo de retardo asumiendo que $tr = 0.6T_c$.

EAB - ESP
Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

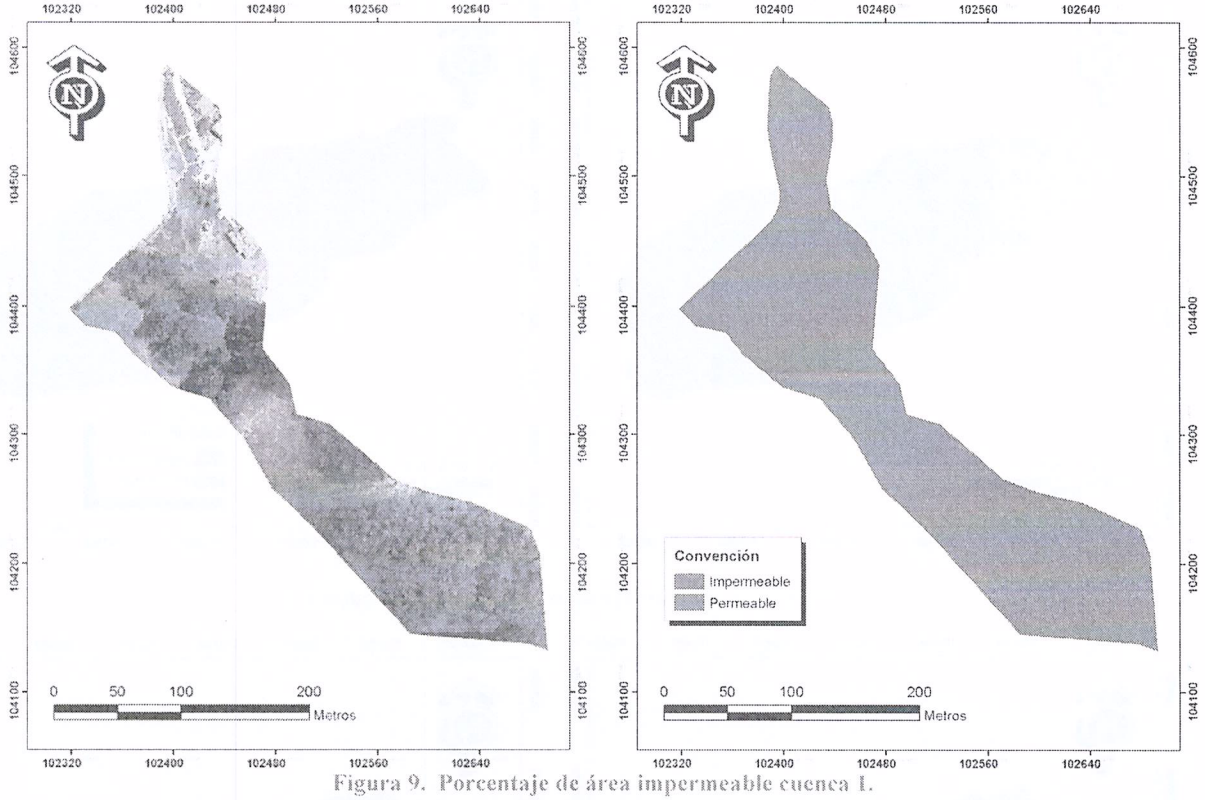


Figura 9. Porcentaje de área impermeable cuenca 1.

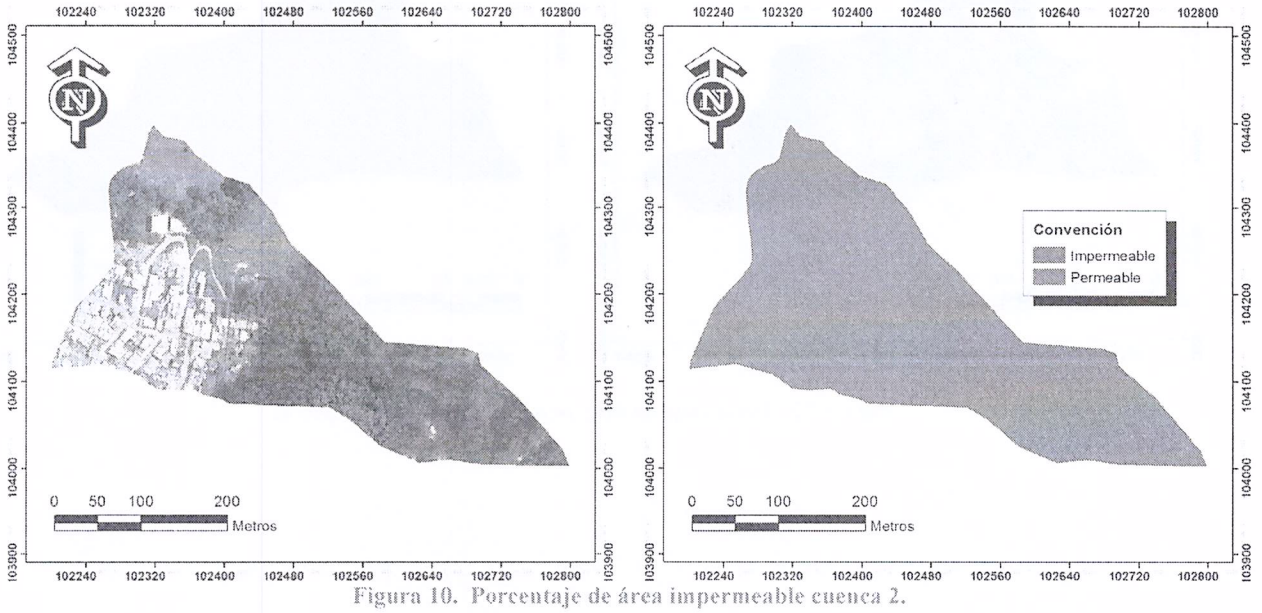


Figura 10. Porcentaje de área impermeable cuenca 2.

EAB - ESP

Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

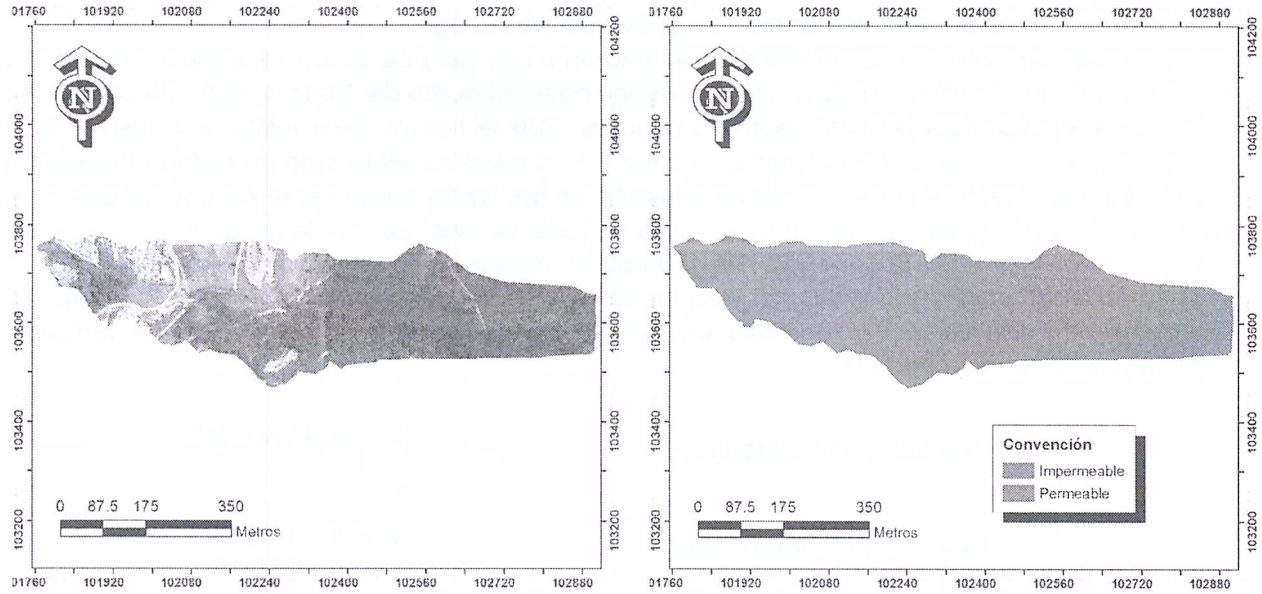


Figura 13. Porcentaje de área impermeable cuenca 5.

3.2.2. Parámetro Número de Curva (CN)

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, tomando como referencia la clasificación ráster descrita en la sección 3.2.1. Se adoptó un CN de 80 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, ponderado de acuerdo al área de cada uno de los usos se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Número de Curva de las cuencas.

Cuenca	% Permeable	% Impermeable	CN Permeable	CN Impermeable	CN Ponderado
1	89.95	10.05	80	98	81.8
2	78.75	21.25	80	98	83.8
3	87.89	12.11	80	98	82.2
4	62.55	37.45	80	98	86.7
5	88.11	11.89	80	98	82.1
6	50.38	49.62	80	98	88.9
7	63.57	36.43	80	98	86.6

EAB - ESP
Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co
ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

Longitud 2 = 421.29 m
Pendiente 2 = 0.17 m/m
Velocidad 2 = 2.01 m/s (según Ecuación 8)
Tiempo de viaje = 3.5 minutos

Tiempo de viaje total = 4 minutos. Se asume tiempo de concentración mínimo de 15 minutos según requerimiento de la norma NS-085.

Cuenca 2

El perfil longitudinal del terreno desde el punto más alejado de la cuenca 2 hasta el punto de ingreso al canal se muestra en la Figura 15. A partir de este se identificaron dos tramos, teniendo en cuenta la pendiente del terreno y/o las características de la superficie.

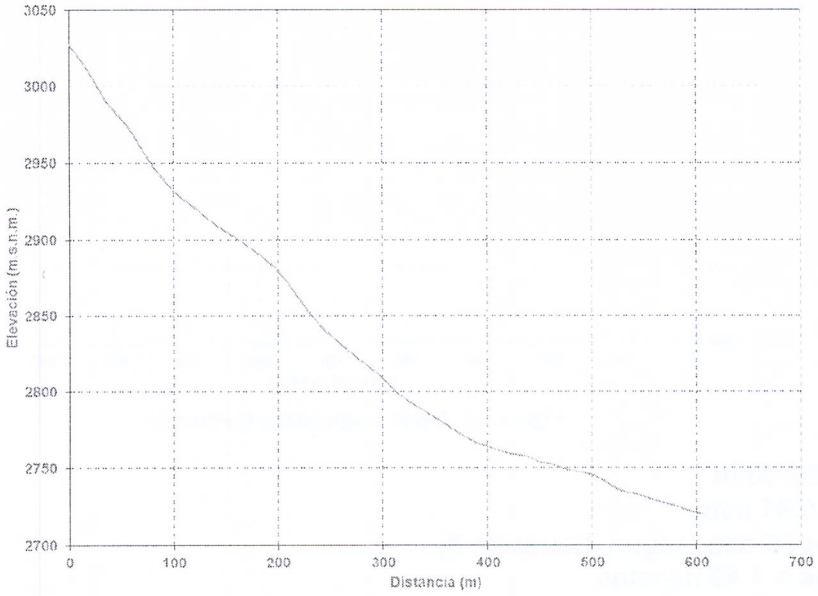


Figura 15 Perfil longitudinal Cuenca 2

Longitud 1 = 392.49 m
Pendiente 1 = 0.66 m/m
Velocidad 1 = 3.98 m/s (según Ecuación 8)
Tiempo de viaje = 1.64 minutos.

Longitud 2 = 207.94 m
Pendiente 2 = 0.22 m/m
Velocidad 2 = 2.01 m/s (según Ecuación 7)
Tiempo de viaje = 1.19 minutos.

EAB - ESP

Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

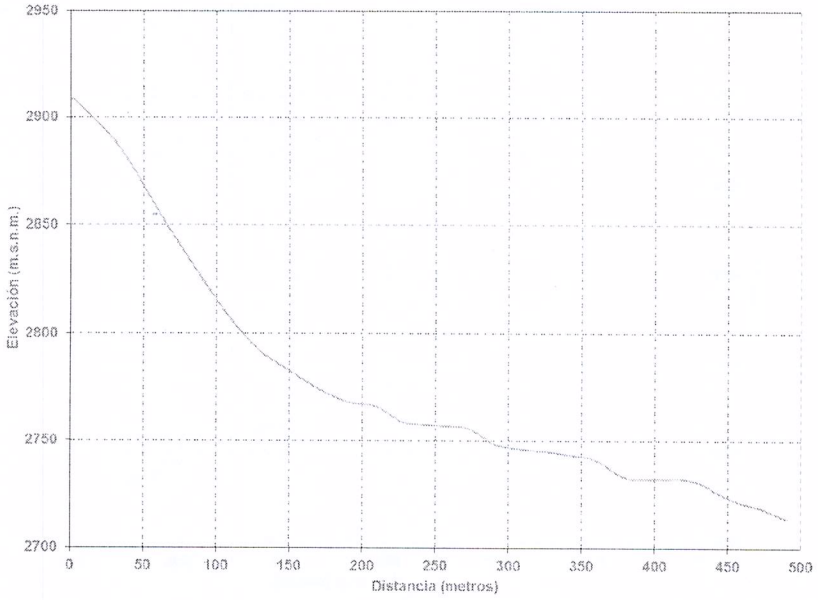


Figura 17. Perfil longitudinal Cuenca 4.

Longitud 1 = 194.87 m
Pendiente 1 = 0.8021 m/m
Velocidad 1 = 4.40 m/s (según Ecuación 8)
Tiempo de viaje = 0.74 minutos.

Longitud 2 = 291.22 m
Pendiente 2 = 0.17 m/m
Velocidad 2 = 2.55 m/s (según Ecuación 7)
Tiempo de viaje = 1.90 minutos.

Tiempo de viaje total = 2.64 minutos. Se asume tiempo de concentración mínimo de 15 minutos según requerimiento de la norma NS-085.

Cuenca 5

El perfil longitudinal del terreno desde el punto más alejado de la cuenca 5 hasta el punto de ingreso al canal se muestra en la Figura 18. A partir de este se identificaron dos tramos, teniendo en cuenta la pendiente del terreno y/o las características de la superficie.

EAB - ESP
Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

3.3. 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.

$$Intensidad = C_1(Duración + X_O)^{C_2}$$ Ecuación 9

Donde, los parámetros de la ecuación para el centroide de la cuenca de drenaje (coordenadas Norte: 103884.99 Este: 102268.92) son los mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Curva IDF.

C_1	X_0	C_2
2892.51382	14.7	-0.88988

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

$$P(mm) = I\left(\frac{mm}{h}\right) * Duración\ (6\ horas)$$ Ecuación 10

$$P(mm) = 14.83\frac{mm}{h} * 6\ horas = 88.95\ mm$$ Ecuación 11

El hietograma de diseño presentado en la Figura 20, se realizó a partir de la distribución temporal mostrada en la Figura 19, la cual fue obtenida del análisis de eventos históricos de precipitación registrados en la ciudad de Bogotá.

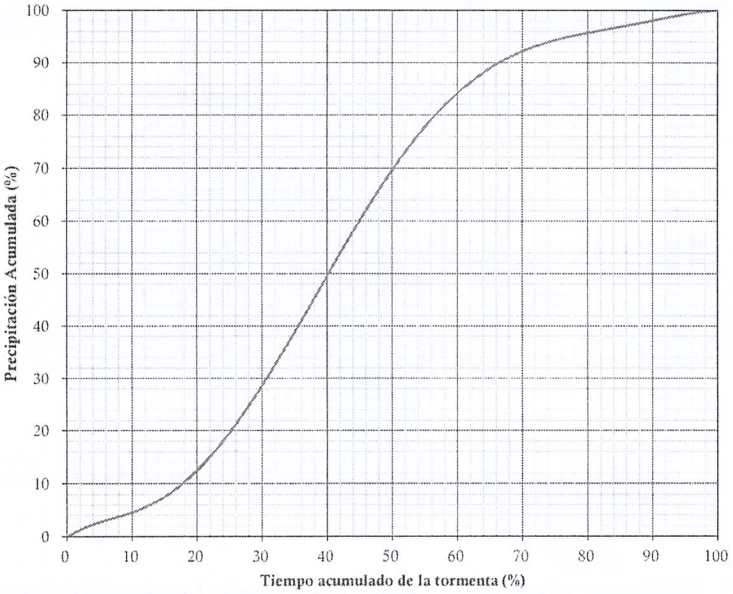


Figura 19. Distribución temporal tormentas. Duración 6 horas.

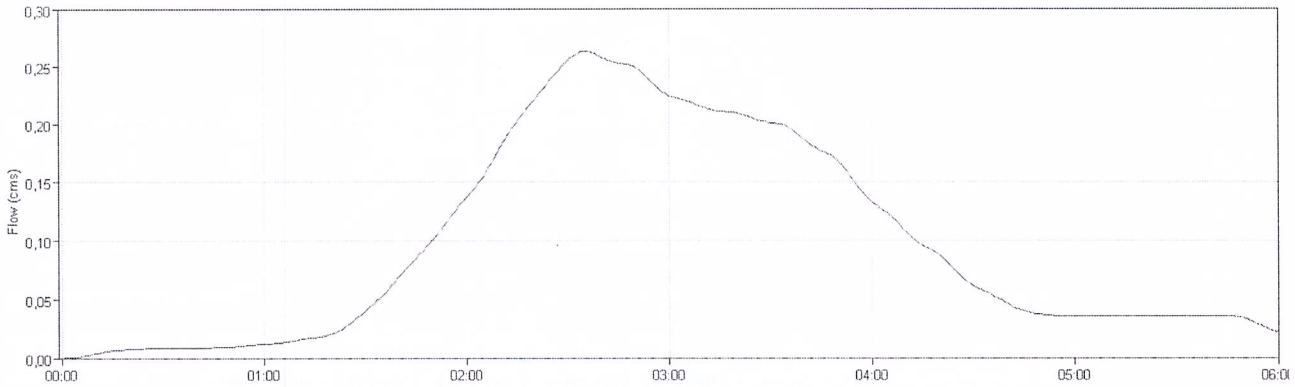


Figura 22. Caudal de escorrentía Tr 100 años. Cuenca 1. Caudal Pico 0.26 m^3/s.

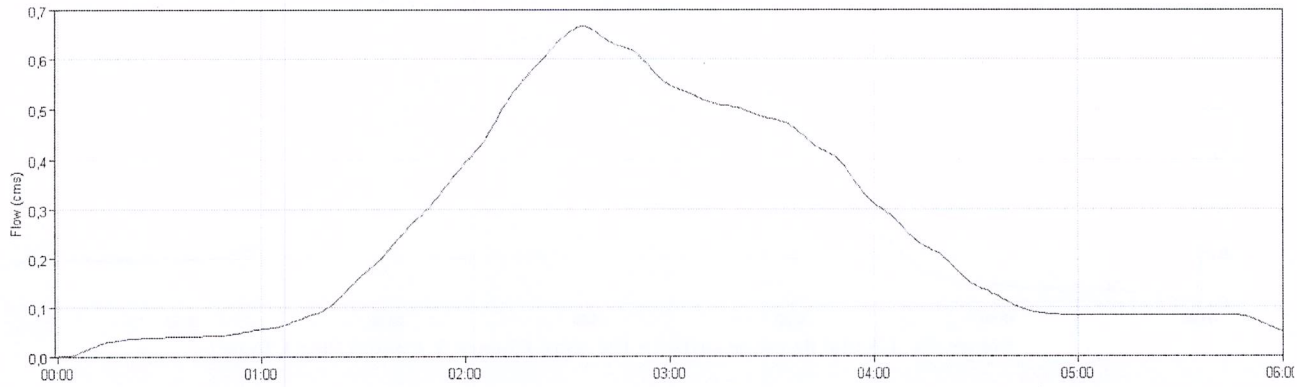


Figura 23. Caudal de escorrentía Tr 100 años. Cuenca 2. Caudal Pico 0.67 m^3/s.

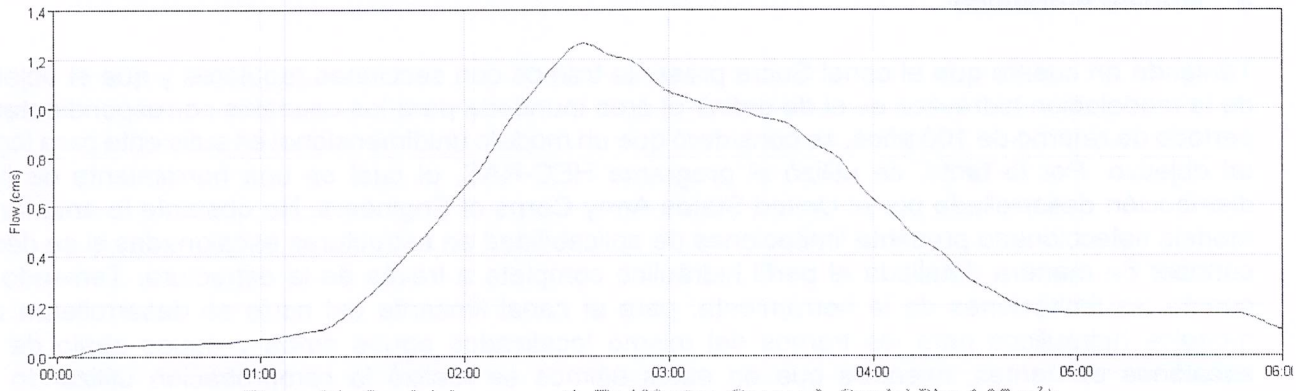


Figura 24. Caudal de escorrentía Tr 100 años. Cuenca 3. Caudal Pico 1.27 m^3/s.

EAB - ESP

Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

4.1. Información Topográfica

La Dirección de Información Técnica y Geográfica (DITG) realizó el levantamiento topográfico del Canal Limitante del Norte y del Canal Canal Sucre hasta el sitio de la confluencia con el canal Cataluña; El levantamiento comprendió 5702 puntos topográficos, incluyendo las estructuras de paso existentes. Adicionalmente, la DITG construyó un modelo digital de elevaciones (DEM) combinando la información levantada del canal con información tipo LiDAR levantada en el año 2008.

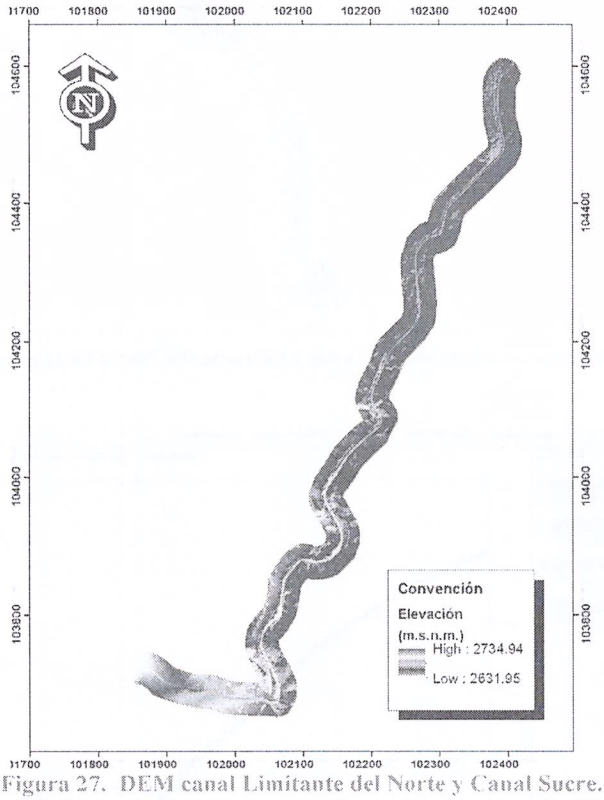


Figura 27. DEM canal Limitante del Norte y Canal Sucre.

El modelo digital de elevaciones elaborado por la DITG fue empleado en la construcción de los modelos hidráulicos mediante la herramienta HEC GeoRAS, la cual funciona en el programa ArcGIS.

En el canal Limitante del Norte se desarrollaron dos modelos debido a la existencia de un tramo escalonado, el cual no puede ser modelado con suficiente precisión en el modelo empleado. El primero tramo correspondió a los 465.16 metros iniciales, los cuales fueron esquematizados mediante 224 secciones transversales; debido a que el canal se encuentra revestido en concreto, se utilizó un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.015, de acuerdo con lo establecido en la norma NS-085. Se incluyeron las estructuras de paso existentes a lo largo de este tramo del canal. En la Figura 28 se muestra en una vista en planta la representación del canal Limitante del Norte en el programa HEC-RAS y en la Figura 29 una de las secciones transversales utilizadas para definir la geometría del canal.

EAB - ESP

Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

necesario interpolar secciones transversales en este tramo con base en la información existente justo aguas arriba y aguas abajo del mismo. El proyecto contempla la reconformación de la sección original del canal, previa a la ocurrencia del movimiento en masa, por lo tanto la interpolación de las secciones es una aproximación válida. El tramo se encuentra ubicado entre las calles 44A Y 45B, a lo largo de la carrera 3A BIS E (Figura 31).

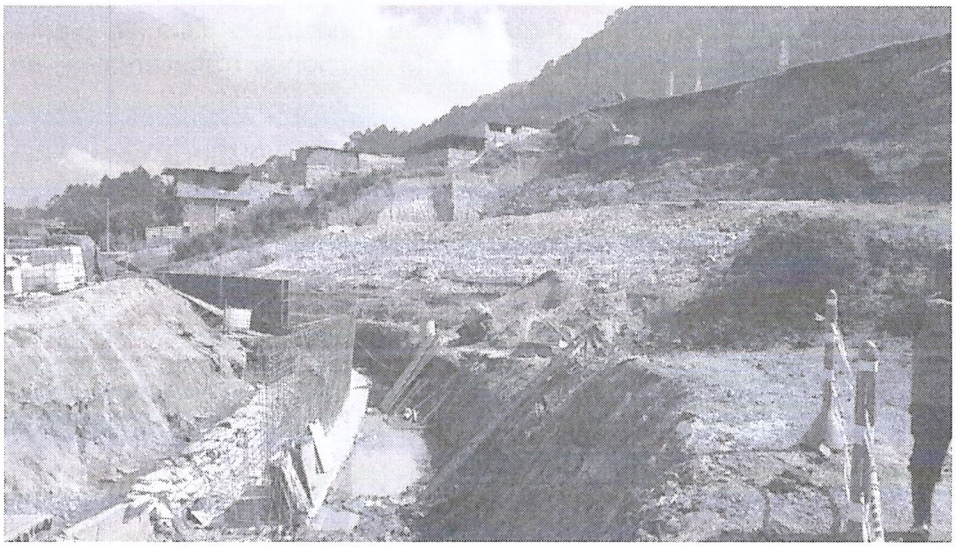


Figura 30. Esta de obra en el canal Limitante del Norte al momento del levantamiento topográfico.



Figura 31. Tramo del canal limitante del Norte en obras durante el levantamiento topográfico.

EAB - ESP
Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

4.2. Condiciones de Frontera

En los dos modelos del canal Limitante del Norte y del Canal Sucre se utilizó como condición de frontera aguas arriba la profundidad normal, calculada con la pendiente del terreno en el inicio de cada tramo. Para el modelo de la parte alta del canal Limitante del Norte se utilizó una pendiente de 0.002, y para la parte baja una pendiente de 0.004, mientras que para el canal sucre una pendiente de 0.19. En los modelos del canal Limitante del Norte se utilizó para ambos casos la profundidad crítica como condición de frontera aguas abajo, esto teniendo en cuenta que en ambos casos se presentan caídas libres y no existe ningún tipo de restricción hidráulica que impida la ocurrencia de esta bajo condiciones normales de operación. Para el canal Sucre se utilizó la profundidad normal como condición de frontera aguas abajo.

Los caudales de análisis utilizados fueron los valores máximos estimados en la sección 3.4 acumulados hacia aguas abajo y ubicados al inicio de cada uno de los tramos correspondientes a las áreas de drenaje mostradas en la Figura 6.

4.3. Resultados de la modelación

4.3.1. Estructura escalonada canal Limitante del Norte

En el tramo indicado en la Figura 34, de acuerdo con el levantamiento topográfico realizado, existe un tramo escalonado de 35 metros de longitud (Figura 35). Los escalones tienen en promedio una altura de 0.75 metros y una longitud de 5 metros. De acuerdo con la información suministrada por DITG, en este tramo la profundidad del canal se encuentra entre 1 y 1.5 metros.



Figura 34. Tramo escalonado Canal Limitante del Norte.

EAB - ESP
Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

En un canal rectangular, la profundidad crítica de flujo se calcula según la Ecuación 12.

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \qquad \text{Ecuación 12}$$

Donde q es el caudal por unidad de ancho y g es la constante gravitacional. Si el nivel del agua en el extremo aguas abajo corresponde a flujo subcrítico, ocurre un resalto hidráulico inmediatamente aguas abajo del impacto de la napa. La longitud de caída, la altura de la piscina y las profundidades de flujo d_1 y d_2 pueden ser estimadas a partir de las siguientes correlaciones empíricas.

$$\frac{L_d}{\Delta_z} = 4.3 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta z}\right)^{0.81} \qquad \text{Ecuación 13}$$

$$\frac{d_p}{\Delta z} = \left(\frac{d_c}{\Delta z}\right)^{0.66} \qquad \text{Ecuación 14}$$

$$\frac{d_1}{\Delta z} = 0.54 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta z}\right)^{1.275} \qquad \text{Ecuación 15}$$

$$\frac{d_2}{\Delta z} = 1.66 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta z}\right)^{0.81} \qquad \text{Ecuación 16}$$

Se tiene que en este tramo del canal, ancho del canal (B) = 1.15 metros, Altura del escalón (Δz) = 0.75 metros y Longitud del escalón = 5.0 metros. En este tramo el caudal máximo estimado corresponde a 0.93 m^3/s.

El caudal unitario se calcula dividiendo el caudal de análisis sobre el ancho del canal $q = Q/B$, por lo tanto se tiene que q = 0.81 m^2/s.

Utilizando la Ecuación 12 se calcula la profundidad crítica. $d_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$= 0.41 m.

La longitud de caída del chorro se calcula a despejando partir de la Ecuación 13, $L_d = \left(4.3 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta z}\right)^{0.81}\right) \cdot \Delta z$ obteniéndose que L_d= 1.95 m, la cual es inferior a la longitud del escalón, garantizándose la ocurrencia del resalto en el mismo.

La profundidad de flujo de la piscina se calcula despejando d_p de la Ecuación 14 $d_p = \left(\left(\frac{d_c}{\Delta z}\right)^{0.66}\right) \cdot \Delta z$, obteniéndose que d_p = 0.5 metros. Lo cual garantiza la ocurrencia de flujo saltante.

La profundidad de flujo d_1 en el sitio de impacto de la napa se calcula al despejar de la Ecuación 15 $d_1 = \left(0.54 \cdot \left(\frac{d_c}{\Delta z}\right)^{1.275}\right) \cdot \Delta z$, obteniéndose un valor de 0.185 m. Finalmente, despejando de la Ecuación 16 se obtiene que $d_2 = 0.76\,m$. Teniendo en cuenta que la profundidad del canal en este tramo es mayor a este valor, se garantiza que para las condiciones evaluadas el flujo se mantendrá confinado dentro del canal.

EAB - ESP

Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS

4.3.3. Modelo parte baja del Canal Limitante del Norte

Los resultados de la modelación indican para este tramo del Canal Limitante del Norte, este tiene capacidad suficiente para transportar los caudales de análisis, sin embargo, al igual que en el tramo inicial no cumple con los requerimientos exigidos de borde libre. El área inundada para las condiciones evaluadas se muestra en la Figura 38.

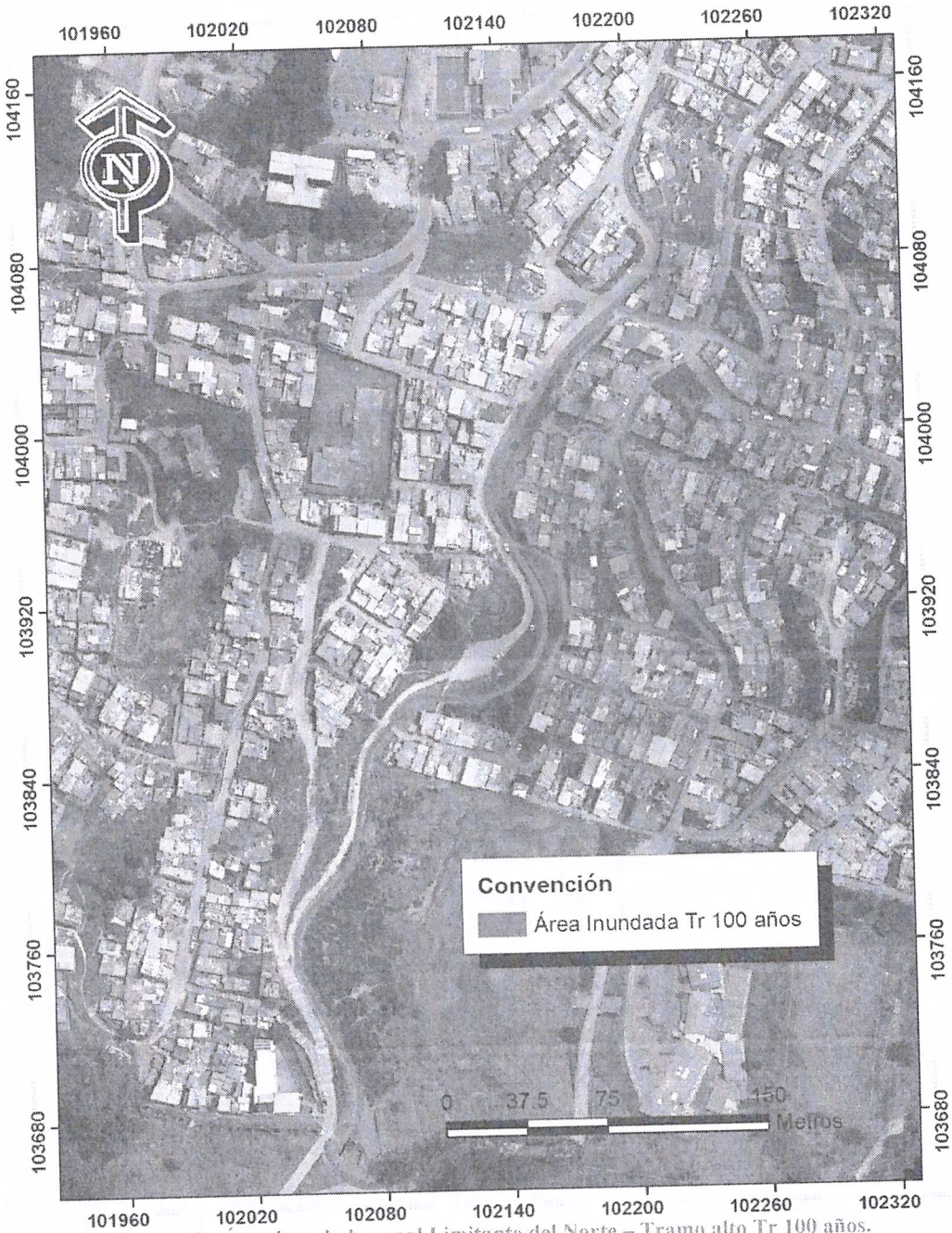


Figura 38. Área inundada canal Limitante del Norte – Tramo alto Tr 100 años.

Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

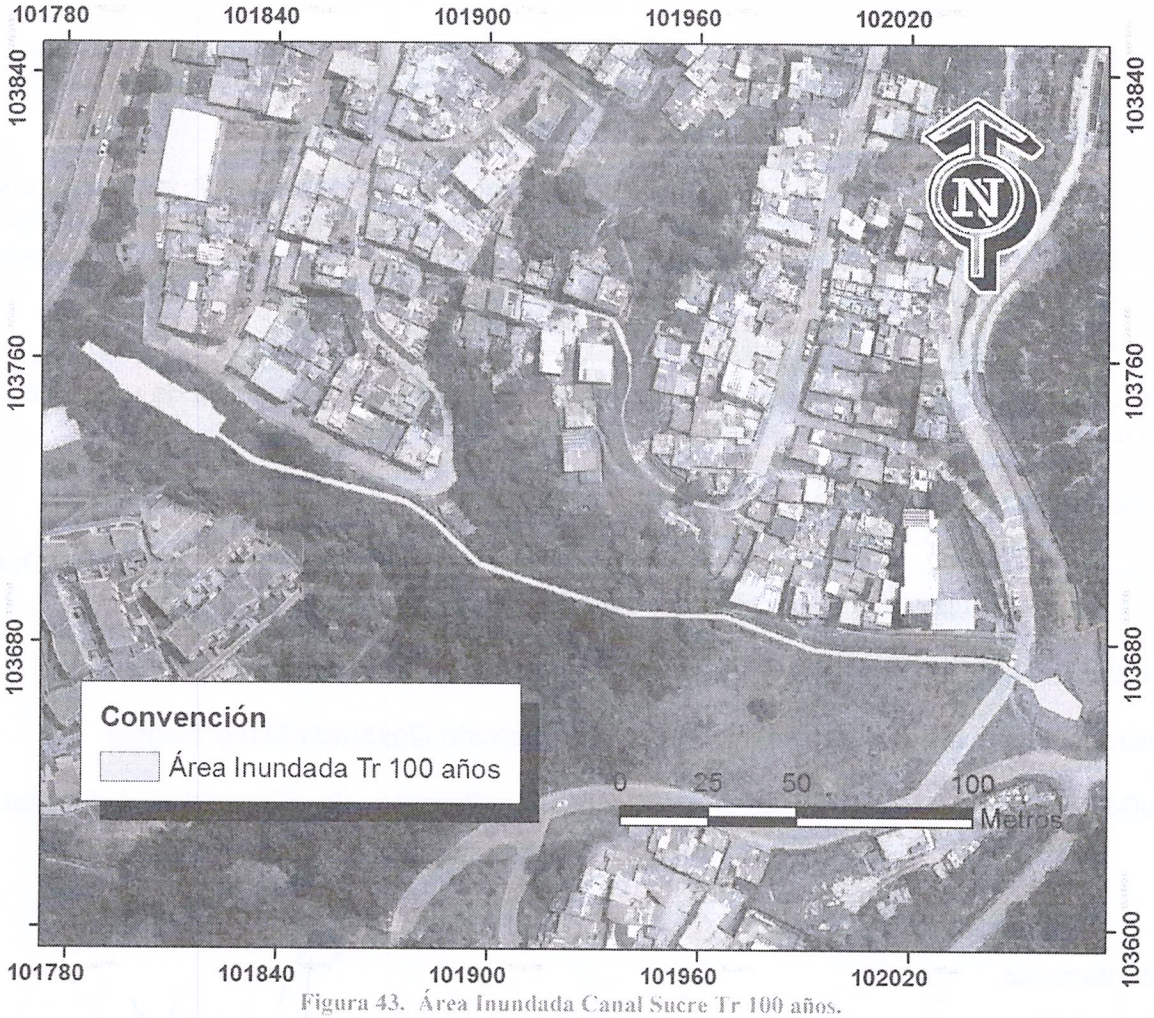


Figura 43. Área Inundada Canal Sucre Tr 100 años.

5. Conclusiones y recomendaciones

La modelación hidráulica realizada de los canales Limitante del Norte y el tramo escalonado del Canal Sucre, permitió determinar que estos tienen capacidad para conducir sin desbordamientos el caudal correspondiente al período de retorno de cien años, sin embargo, en el canal limitante del norte no se cumple con los requerimientos de borde libre, situación que se ve agravada porque la sección del canal se ha reducido debido a movimientos en masa que requieren un tratamiento urgente, así como por la construcción artesanal de estructuras de paso por parte de la comunidad.

Con respecto a la capacidad hidráulica del Canal Limitante del Norte, es importante destacar que en la evaluación realizada en (INGETEC S.A., 1988), aunque utilizando una metodología de estimación de caudales distinta, se determinó que este canal sólo tendría capacidad hidráulica suficiente si se construyera el denominado Canal Paralelo Limitante del Norte, el cual se proyectó para drenar la parte alta de la cuenca y descargar en el canal Sucre. Teniendo en cuenta este antecedente, se debe realizar una evaluación integral que permita determinar la necesidad de construir el canal paralelo.

EAB - ESP
Av. Calle 24 # 37 - 15. Código Postal: 111321. Bogotá D.C. - Colombia.
PBX: (571) 3447000. www.acueducto.com.co

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C.
BOGOTÁ MEJOR PARA TODOS