



LOGOS

Ingeniería - Consultoría

PROYECTO DE DISEÑO DE OBRAS PARA LA RECUPERACIÓN DE

LOS ARROYOS ANTEQUERA Y TACUARÍ

INFORME DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA

ABRIL DE 2.018



LOGOS

Ingeniería - Consultoría

1. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES : ESTUDIOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS

Se presenta seguidamente las actividades y sub-actividades realizadas con la descripción de cómo se llevaron a cabo y los resultados.

1.1. Identificación de la zona de estudio

El área de estudio principal para los estudios hidrológicos e hidráulicos es el cauce del arroyo Tacuarí, desde la calle Manuel Gondra al sur, hasta la calle Florencio Villamayor al Norte, lo cual corresponde a la zona de la Chacarita Alta (territorio con la cota 63 m.s.n.m. como mínima).

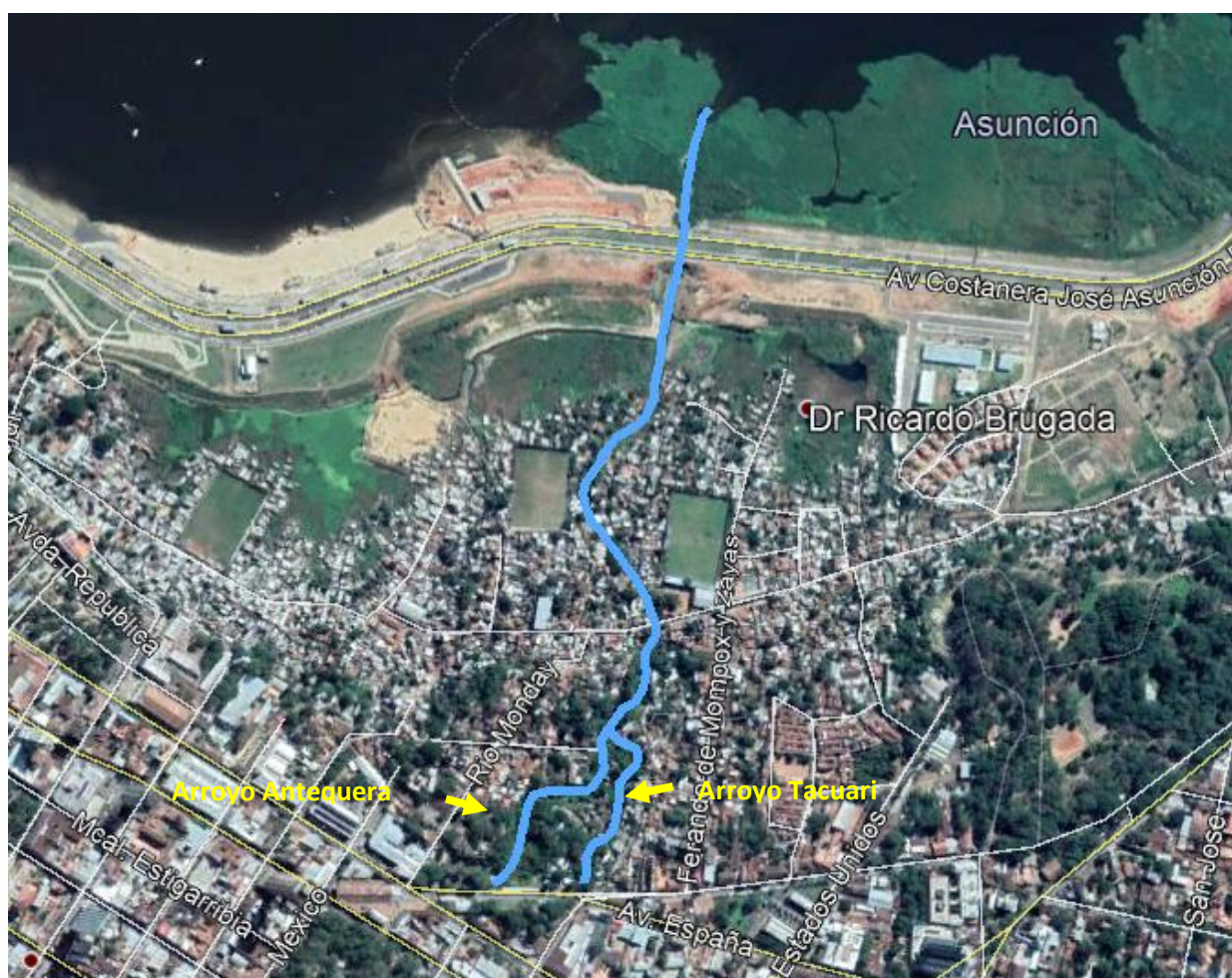


Figura H1. Ubicación de los arroyos Antequera y Tacuarí (línea celeste) visualizado en Google Earth



Figura H2. Fotografías varias de la zona de la Chacarita Alta

Fuente: Gonzalo Garay, 2014

1.2. Descripción general del régimen hídrico

La Chacarita Alta en la zona definida por el proyecto es impactada por dos fenómenos hídricos bien diferenciados:

1. Inundaciones fluviales: Durante las inundaciones del Río Paraguay con un periodo de recurrencia muy importante sufre los efectos de estas pero solo en las viviendas ubicadas en la zona muy cercana a la calle Florencio Villamayor. Esta afectación ya fue marcada por el catastro del año 2000, que puede visualizarse en color verde en la Figura H3. Dicha línea fue elaborada considerando los niveles registrados en la mayor crecida histórica registrada en la inundación 1981/82. Los trabajos topográficos realizados indican que la inundación ingresa en el cauce del arroyo más arriba de Florencio Villamayor pero sin alcanzar a las viviendas. Ello puede visualizarse en la Figura H4 y podría deberse a las erosiones que se producen en el cauce como consecuencia de las elevadas pendientes y las lluvias explicadas en el punto siguiente. Si bien la inundación no alcanza a las viviendas, la presencia de niveles elevados de agua durante un periodo de tiempo prolongado debilita la base de los taludes del cauce natural, pudiendo provocar el deslizamiento de dichos taludes y la afectación a viviendas que se encuentran arriba de los mismos.

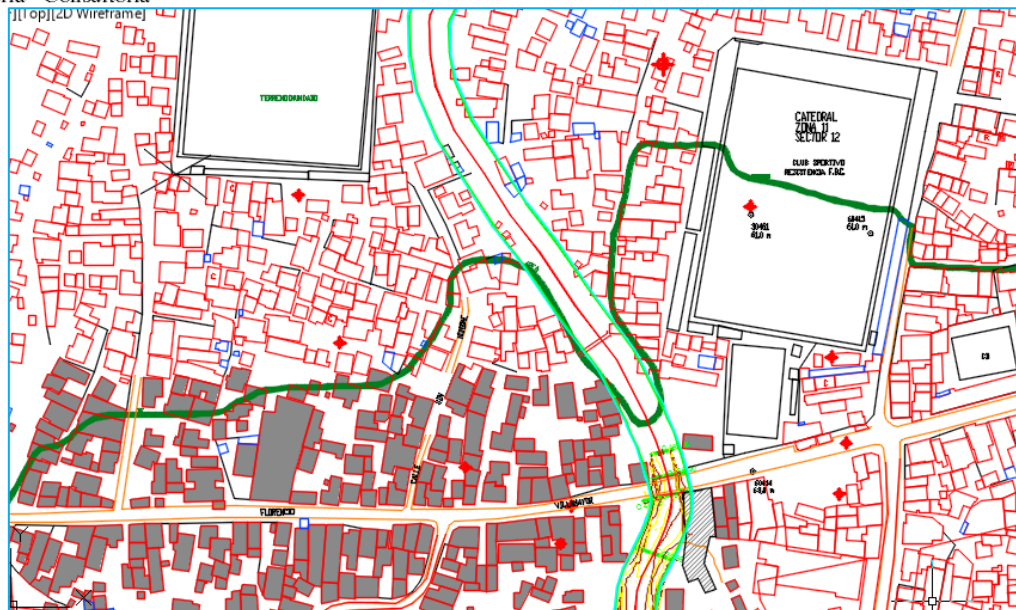


Figura H3. Línea de inundación según Catastro Año 2000



Figura H4. Línea de inundación según topografía realizada

2. Inundaciones pluviales: si bien Chacarita Alta está por encima de Florencio Villamayor, su otro límite, que constituye la Calle Gondra en la zona de estudio, la separa de la zona alta en la cual se generan los volúmenes de agua que dan inicio a los arroyos Antequera y Tacuari que atraviesan la zona a intervenir. La lluvia que se produce en más de 140 hectáreas de la cuenca alta con una densidad de construcción y porcentajes de impermeabilización elevados escurren hasta llegar al inicio de los arroyos sobre la calle Gondra en un tiempo menor a 15 minutos. El desnivel entre la Calle Gondra y la Calle Florencio Villamayor es de 21 metros,



por lo que los arroyos mencionados poseen pendientes elevadas. Las lluvias torrenciales en la cuenca alta, sumada a las elevadas pendientes de los arroyos producen inundaciones repentinas que afectan principalmente la estabilidad de los costados de los arroyos que en su mayor extensión no están protegidos. Cuando la pendiente es elevada se producen velocidades muy altas que además de afectar la estabilidad, generan mucho peligro de arrastre de personas.

1.3. Elaboración de la base cartográfica digital de la zona de estudio

En este apartado se describen los pasos desarrollados para la obtención de la base cartográfica digital de la zona de estudio. Estos han sido los siguientes:

1. Generación del Modelo de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés): La generación del DEM para el área ocupada tanto por la cuenca alta como la cuenca baja del arroyo Tacuarí, se realizó a partir de datos disponibles de proyectos de aerofotogrametría (curvas de nivel de 1 m y 5 m) y batimetría, realizados en años anteriores. Estas curvas de nivel fueron ingresadas al software ArcGIS, y como primer paso para la generación del DEM, se creó una superficie de red irregular de triángulos (TIN, por sus siglas en inglés) con la herramienta *3D Analyst*. Finalmente, con la misma herramienta, se procedió a la generación del DEM a partir del TIN, el cual está cartográficamente en WGS 84 UTM 21 S, y la resolución espacial es de 5 m (pixel de 5 m). La Figura H4 (a) y (b) a continuación muestra el DEM generado para la zona que abarca la cuenca alta y la cuenca baja del arroyo Tacuarí respectivamente.
2. Generación de la red hidrográfica y delineación de cuencas y subcuencas: La generación de la red hidrográfica y de las cuencas de la zona de estudio se realizó nuevamente a través del software ArcGIS, con la herramienta *Hydrology*. Esta última herramienta hidrológica permite identificar sumideros, determinar la dirección de flujo, calcular la acumulación de flujo, delinear cuencas hidrográficas y crear redes de corrientes. Los DEMs ya generados se utilizaron como dato de entrada principal para el proceso de generación de la red hídrica y delimitación de cuencas. Las fases de este proceso se ilustran en la Figura H5. Además, la cuenca alta del arroyo Tacuarí fue dividida en subcuencas con el objetivo de lograr un análisis más detallado de las mismas. Para la delimitación fue utilizado el DEM de la zona de estudio que se presenta en la Figura H4 (b).

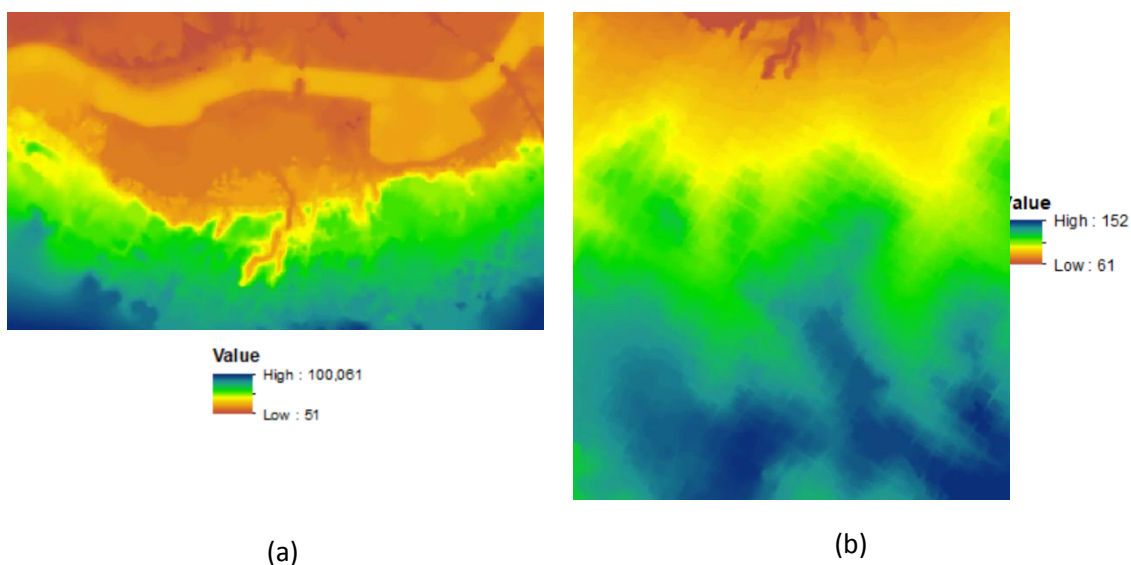


Figura H4. Modelos de elevación digital (DEM) de la zona de estudio con valores en msnm. (a) DEM de la zona que abarca a la cuenca baja del arroyo Tacuarí. (b) DEM de la zona que abarca la cuenca alta del arroyo Tacuarí.

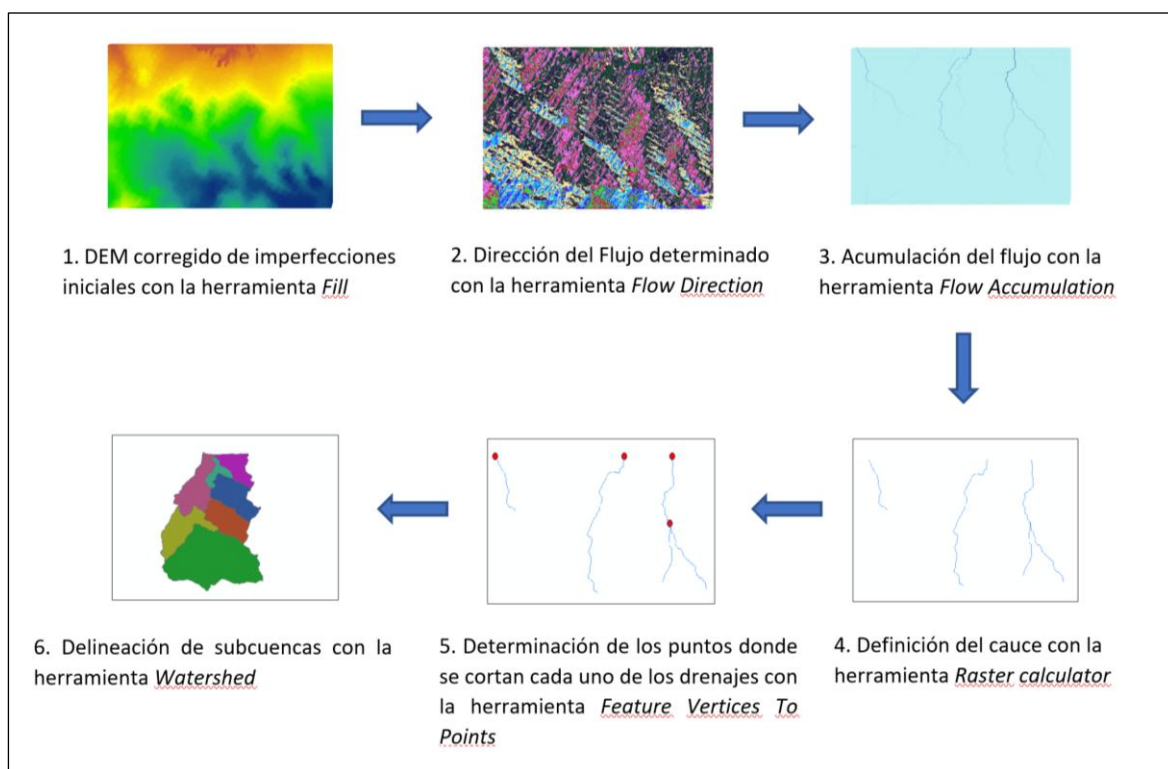


Figura H5. Pasos seguidos para la delimitación de cuencas y subcuencas del arroyo Tacuarí. En el ejemplo se muestran las imágenes correspondientes a la delimitación de la cuenca alta. El mismo procedimiento se aplicó para la delimitación de la cuenca baja.

Las características físicas principales a nivel de microcuenca fueron calculadas utilizando como dato de entrada el DEM generado tanto para la cuenca alta como para la cuenca baja en el software ArcGIS. Con la herramienta de *Calculate Geometry* fueron calculados los parámetros de área, perímetro, cota mínima (Zmín), cota máxima (Zmáx) y coordenadas del centroide, mientras que la pendiente media fue calculada con la herramienta *Slope*. Finalmente, para el cálculo del número de curva (CN) se siguió un procedimiento para el cálculo automático en el software ArcGIS, considerando los valores de número de curva para

	Subcuenca N°	Área (ha)	Perímetro (m)	Zmín	Zmáx	Pendiente media (%)	X centroide	Y centroide	Z centroide	CN
CUENCA ALTA	1	57,52	3413,51	112,00	149,00	6,12	436.727,81	7.202.097,04	133,65	94
	2	18,09	2626,40	106,15	139,37	5,86	436.440,14	7.202.456,29	122,38	94
	3	15,37	1857,21	106,06	141,00	7,11	436.881,60	7.202.598,09	123,16	94
	4	17,39	2059,95	93,00	130,02	6,53	436.965,55	7.202.910,68	110,64	94
	5	9,78	1609,15	81,00	108,00	5,42	436.972,08	7.203.283,59	93,75	91
	6	4,39	1416,92	81,00	104,00	5,33	436.786,29	7.203.241,54	93,29	94
	7	18,29	2503,84	84,31	120,00	7,04	436.544,72	7.203.053,79	101,83	92
CUENCA BAJA	1	24,11	2431,52	58,59	86,82	10,80	436.890,98	7.203.795,60	72,44	89

†

intos usos y grupos hidrológicos del suelo propuestos en el libro denominado *Hidrología Aplicada* de Ven Te Chow (1994).



Figura H6. Ubicación de cuencas y sub-cuencas



Tiempo de Concentración

La estimación del tiempo de concentración se realizó considerando la longitud máxima a la salida de la subcuenca y la pendiente media de cada subcuenca (utilizando la plan altimetría disponible), mediante el método de Kirpich. Se dividió en subcuencas y se verificó el tipo de cauces, calles, canales y/o alcantarillas que existen a efectos de transitar los aportes de esas subcuencas a los puntos de ingreso al sistema de drenaje proyectado.

Coefficientes de Escorrentía

Los coeficientes de escorrentía de cada subcuenca son el resultado de una ponderación de los distintos usos de suelo y el porcentaje de área de cada uno de ellos. Se utilizó igualmente información correspondiente al Plan Maestro del Gran Asunción. En algunas subcuencas se consideraron coeficientes de escorrentía superiores a los determinados, teniendo en cuenta proyecciones de crecimiento estimadas. Los valores utilizados varían entre 0,60 y 0,72.

1.5. Informe de régimen hídrico e hidrología

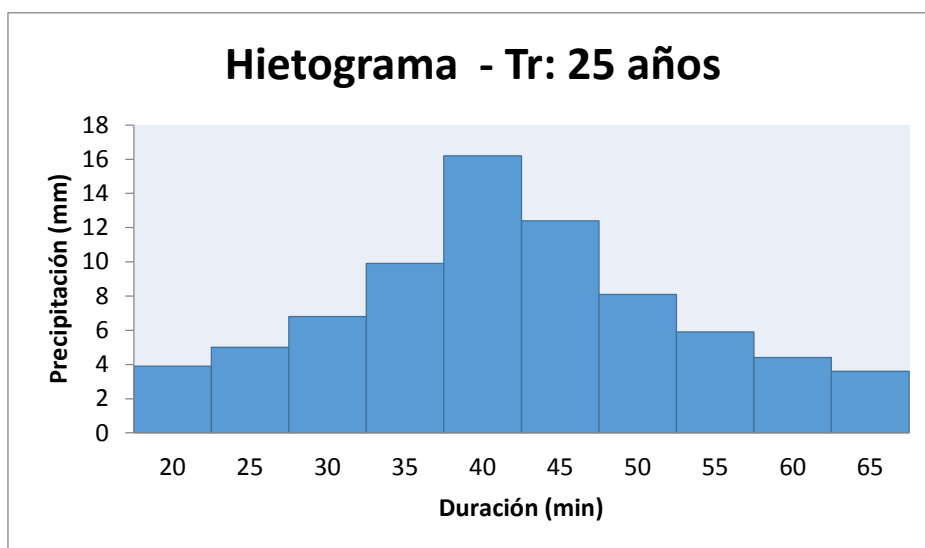
Los arroyos en estudio forman parte del macro-drenaje de la ciudad de Asunción y por lo tanto deben ser analizados con las consideraciones que se enuncian en sus ordenanzas. Según lo establecido por la Municipalidad de Asunción, los canales y alcantarillas deben calcularse para un periodo de recurrencia de 25 años y verificar su funcionamiento para 50 años.

Los datos de hidrología basados en las CURVAS IDF de Asunción han sido utilizados para la confección de lluvias sintéticas de 25 años para diseño y 50 años para su verificación.

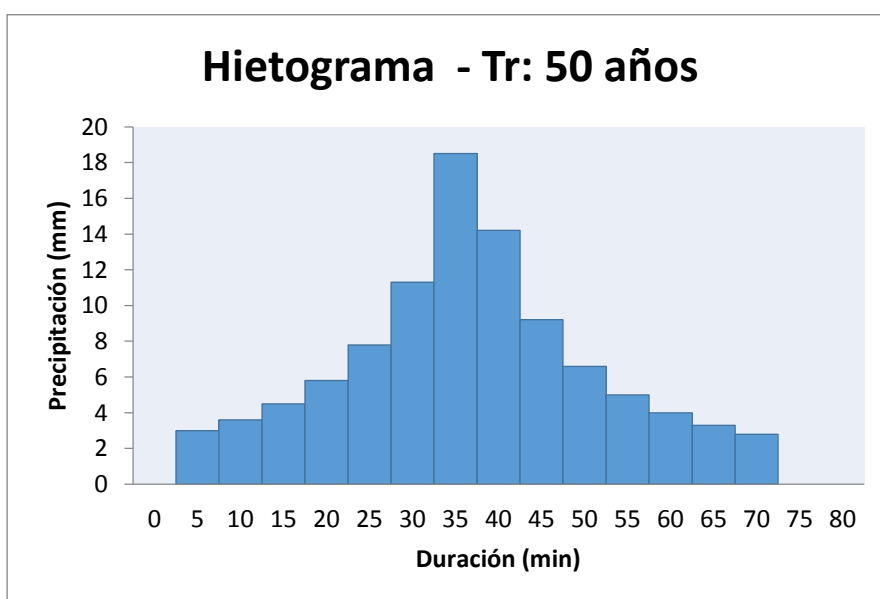
Como la modelación se realiza en régimen inpermanente, no existe un valor específico de caudal para cada arroyo. Mediante la modelación se determinan niveles y cuadales máximos alcanzados en cada tramo. Los resultados se presentan más adelante.

Precipitación sintética para diseño y verificación de los arroyos

Si bien se realizan verificaciones para tiempo de recurrencia bajos (2,5 y 10 años) y extremos como 100 años, la reglamentación de la Ciudad de Asunción establece que la infraestructura de drenaje sea calculada para 25 años y verificada para 50 años. Se presentan los gráficos de las lluvias utilizadas para el diseño.



Hietograma de Diseño, Tiempo de Retorno de 25 años.



Hietograma de Verificación, Tiempo de Retorno de 50 años.

Curvas IDF

Las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) utilizadas, fueron confeccionadas por la UNA/DINAC (Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ingeniería y la Dirección Meteorológica e Hidrológica), siendo actualizadas por CUEVAS-ROLÓN en el año 2009 (Figura H7 - Curvas IDF – ESTACIÓN ASUNCIÓN 1985-2009).

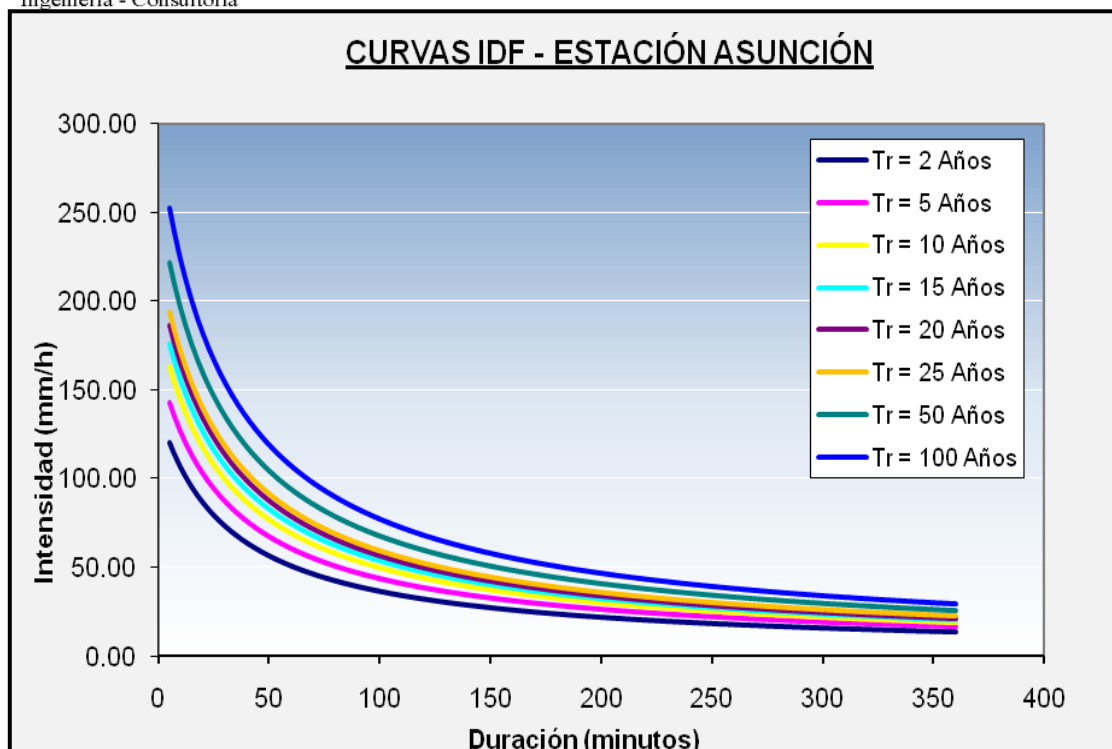


Figura H7 - Curvas IDF – ESTACIÓN ASUNCIÓN 1985-2009

La ecuación que permite calcular la intensidad de forma analítica (Ecuación 1 - Función Potencial, Aparicio 1997) es mostrada a continuación:

$$I = \frac{k * T^m}{(d + c)^n}$$

Ecuación 1 - Función Potencial, Aparicio 1997

Siendo k, n, m y c constantes para cada punto de estación (n son mostrados a continuación: Tabla 1 - Constantes para la estación de Asunción) mediante un análisis de correlación múltiple, valores ya ajustados para todos los periodos de retorno de interés. I es la intensidad de la precipitación en mm/hr, T el periodo de retorno en años y d la duración. Los valores de constantes para la estación en Asunción son mostrados a continuación:

Tabla 1 - Constantes para la estación de Asunción

k	2.251,92
m	0.190355
n	0.876305
c	28

Obteniéndose la siguiente expresión:



$$I = \frac{2.251,92 * T^{0.190355}}{(d + 28)^{0.876305}}$$

Ecuación 2 - Estación Asunción 1985-2009

Determinación de caudales

Para determinar el caudal máximo instantáneo que puede producirse en las cuencas de aporte es utilizada la ecuación del método racional (Ecuación 3 – Ecuación del método racional) como modelo de transformación lluvia-caudal.

$$Q = C \times I \times A$$

Ecuación 3 – Ecuación del método racional

Siendo C el coeficiente de escorrentía ponderado, I la intensidad de la lluvia en m/s y A el área de la cuenca expresada en m², parámetros calculados anteriormente.

1.6. Modelos hidrológicos e hidráulicos

Inicialmente se ha utilizado el programa HEC RAS para determinar las condiciones de funcionamiento hidrológico e hidráulico del sistema en las condiciones actuales. El programa HEC RAS (River Analysis System) ha sido desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, de los Estados Unidos, siendo uno de los modelos hidráulicos más utilizados en la modelización hidráulica de cauces.

Los insumos necesarios para aplicar el modelo Hec-ras son los siguientes:

- Datos geométricos: Secciones transversales del cauce y llanura de inundación. Dichas secciones se introducen mediante la cota (msnm) de varios puntos, de este modo, mediante la cota de dos secciones contiguas, separadas por una distancia conocida, el modelo calcula la pendiente de ese tramo. También se consideran las Características del material del canal y de la llanura de inundación (coeficiente de manning n). El coeficiente de rugosidad define las pérdidas por fricción entre otras pérdidas.
- Caudales máximos correspondientes a Tiempos de retorno.

Las fases del programa son:

- a-) Creación de un nuevo proyecto.
- b-) Datos geométricos.
- c-) Datos de caudales y condiciones de contorno.
- d-) Cálculo.
- e-) Observación de los resultados.

A. Geometría



A.1. Arroyo

Se realiza la modelación de los arroyo Antequera y Tacuarí en su tramo superior. El tramo principal (Antequera) tiene una longitud de 446 m y el brazo derecho (Tacuari) 227 m. En la progresiva 181 m del cauce principal se produce la intersección con el brazo derecho.

Entonces primeramente se dibuja el arroyo, el sentido del mismo debe ser de aguas arriba hacia aguas abajo. Ello quiere decir, en el sentido de escurrimiento del flujo, que en este caso es de sur a norte (Ver Figura H8.). Las secciones realizadas por la topografía correspondieron a las solicitadas para una correcta modelación hidráulica. Se consideraron los cambios de pendiente, de ancho de la sección y las características de las mismas en cuanto a su comportamiento hidráulico.

A.2. Secciones transversales

Luego, en base al relevamiento topográfico puntos (x, y) en coordenadas UTM con cotas (z) en msnm se construyen las secciones transversales necesarias para introducir la geometría en el modelo Hec-ras. (Ver Figura H8.).

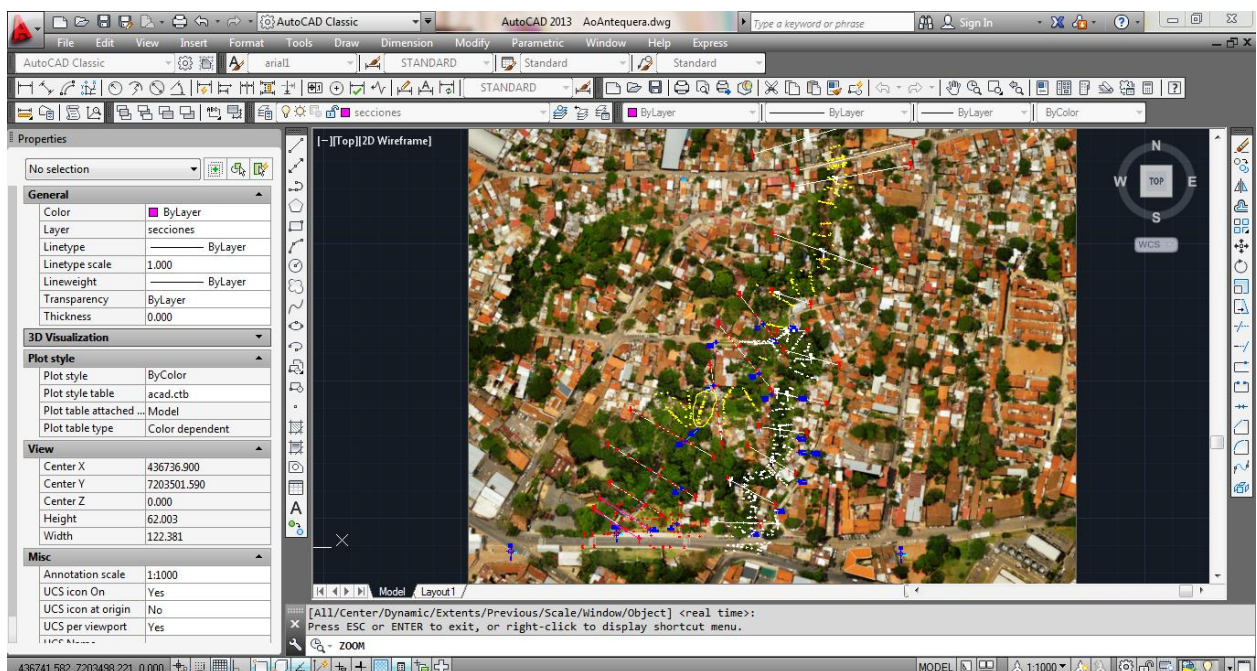


Figura H8. Puntos topográficos relevados visualizados en AutoCAD.

A diferencia de las progresivas de proyecto, la identificación de las secciones del Hec-ras se realiza de aguas abajo hacia aguas arriba porque el análisis de flujo se realiza con influencia de los niveles de agua que se produce en la sección ubicada debajo de la analizada (efecto de remanso).

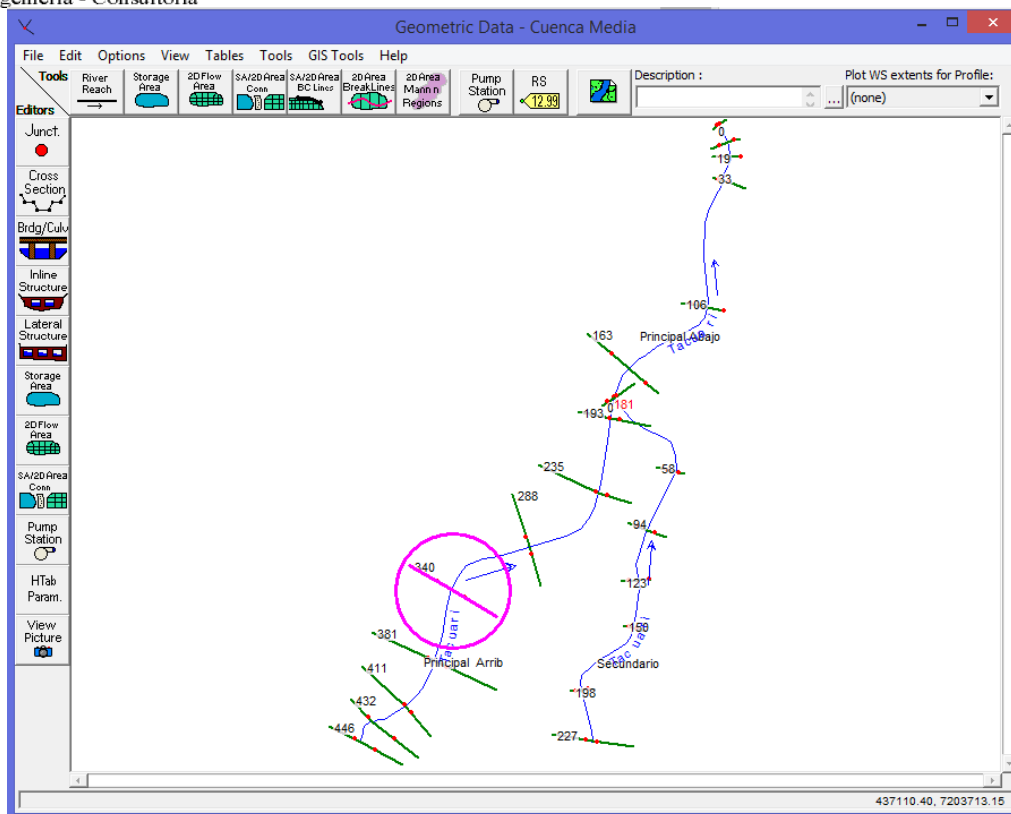


Figura H9. Arroyo y secciones transversales visualizadas en el programa Hec-Ras.

A.3. Coeficiente de Manning (n)

Se selecciona valores de coeficiente de rugosidad para el tramo principal y las planicies de inundación de los valores propuestos por Ven Te Chow en su libro *Hidráulica de Canales Abiertos*. En lo que respecta a las planicies de inundación, el valor de n por lo general es mayor que el del canal en sí y su magnitud depende de la condición superficial o de la vegetación. Para el arroyo sin intervención se consideraron valores de manning de 0,04 en el canal y 0,06 en los laterales.

B. Caudales

Se introducen los caudales correspondientes al tiempo de retorno 50 años. Los mismos tienen valores de $16,6 \text{ m}^3/\text{s}$ proveniente del colector de la calle Tacuarí, y $31,8 \text{ m}^3/\text{s}$ proveniente del colector de la calle Antequera. Las cuencas de Chacarita Alta generan caudales que también son introducidos a ambos arroyos. Estos caudales fueron determinados con el modelo Storm and Sanitary Analysis, el cual se menciona posteriormente.

C. Resultados

Como puede visualizarse en la Figura H10, como ejemplo, en una de las secciones la altura de agua en metros. La sección está identificada en el modelo como 340 (ver Figura H9). Esto permite verificar el nivel de inundación en cada sección de estudio para diferentes periodos de retorno.



LOGOS

Ingeniería - Consultoría

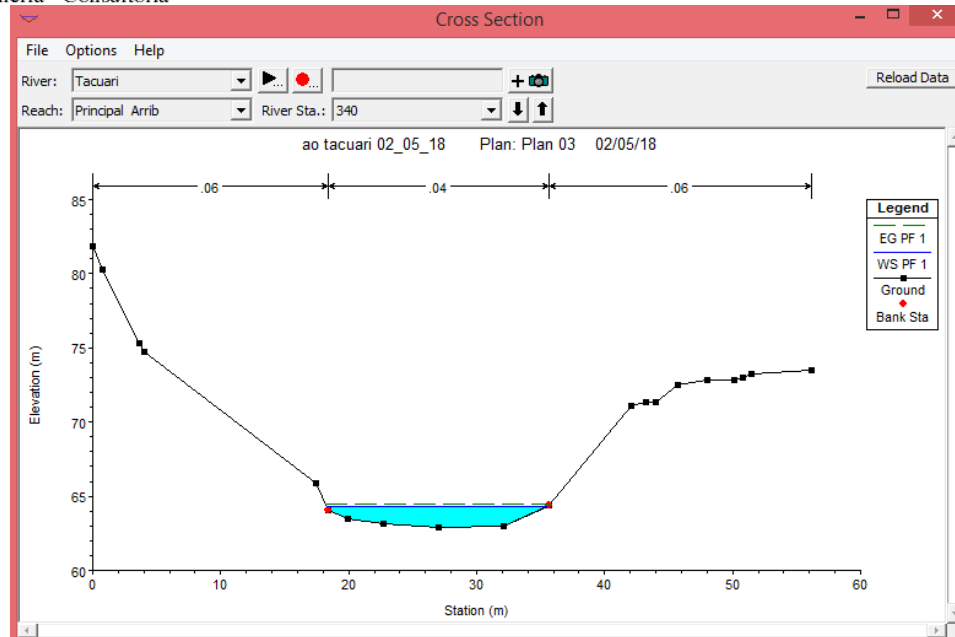


Figura H10. Altura del agua en msnm resultado de la modelación de caudal correspondiente a Tr 50 años en una sección del cuace principal.

En las figuras H11, H12 y H13 se visualizan los perfiles longitudinales de los arroyos Tacuari y Antequera antes de la intersección de ambos y luego de que los mismos se junten. En estos perfiles se visualiza el nivel de agua generado en cada sección.

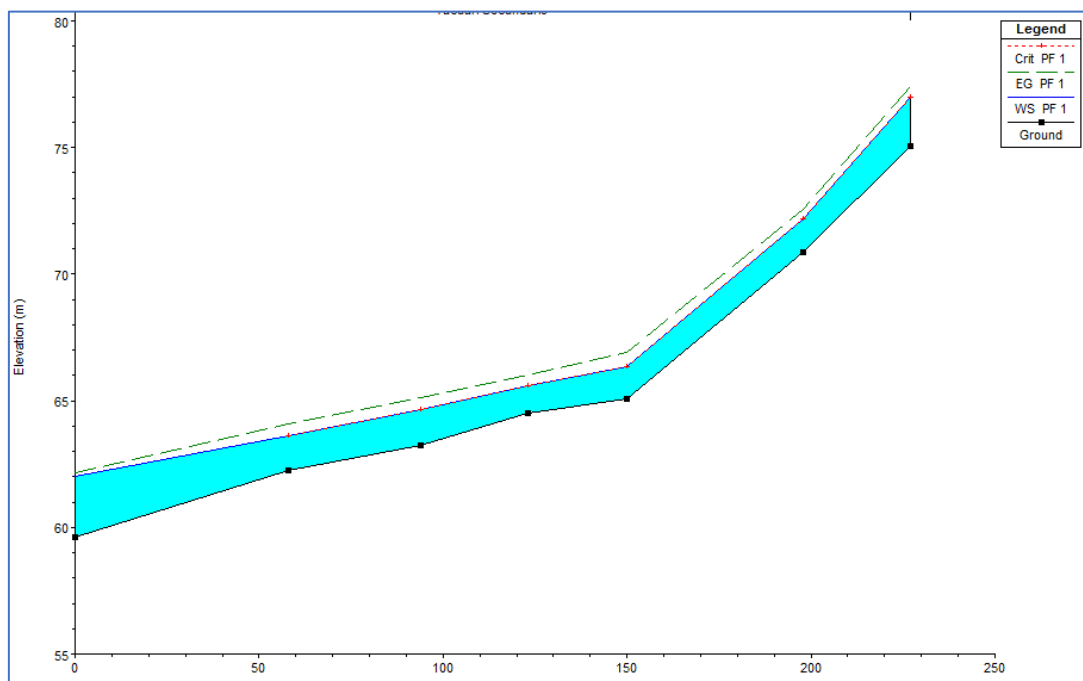


Figura H11. Perfil longitudinal con altura de agua del brazo derecho (Arroyo Tacuari).

**LOGOS**

Ingeniería - Consultoría

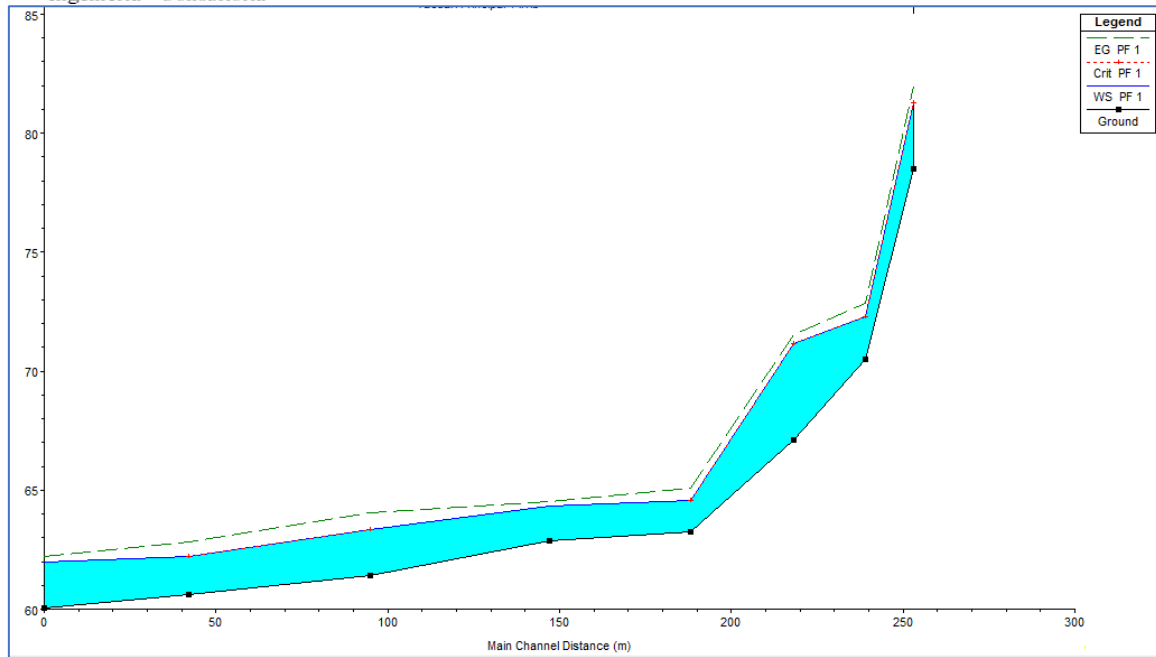


Figura H12. Perfil longitudinal con altura de agua del Arroyo Antequera aguas arriba de la intersección.

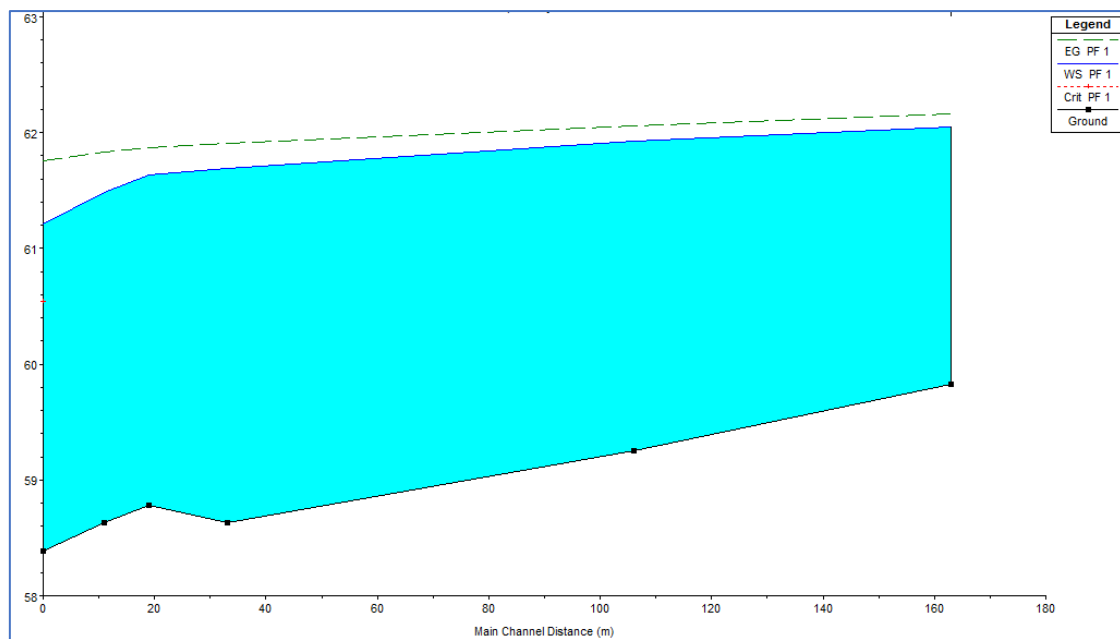


Figura H13. Perfil longitudinal con altura de agua del brazo principal aguas abajo de la intersección.

Ya para los caudales de 10 años y con mayor razón para caudales mayores, el nivel de agua es bajo pero las velocidades son muy elevadas, fruto de las pendiente elevadas en todo el trayecto de los arroyos por la Chacarita Alta. Por tanto los problemas generados corresponden a erosiones de las márgenes y descalce de estructuras existentes, no a inundación de los sectores ocupados por viviendas. Un mayor o menor nivel de agua no implica un aumento detectable del área de inundación, como consecuencia de que los bordes de los cauces son empinados.



Se incluyó por ello la modelación hidro-dinámica de los arroyos para diseñar los tramos necesarios que garanticen la disminución de las velocidades. Esto se realiza con un modelo hidrodinámico en el que las modificaciones de la configuración de las estructuras previstas modifican los caudales máximos generados, pudiendo de esta manera simular como un sistema. Se ha utilizado para ello el modelo Storm and Sanitary Analysis.

La modelación incluye la zona alta de la Ciudad desde donde llegan las alcantarillas colectoras, la Chacarita Alta y la Chacarita Baja hasta el cruce de la Costanera. La modelación de la cuenca alta se realiza para determinar los caudales de llegada a la cuenca media que es la que será intervenida. La cuenca baja recibirá los impactos que se generan por las modificaciones de la cuenca media y por ello se incluyen en la modelación. Un esquema general de la modelación se presenta en la Figura H14. Se indican los puntos en los cuales se introducen las cuencas de la zona alta identificadas en la Figura H6. En la cuenca alta el agua escurre por calles y alcantarillas pluviales que llegan a la cuenca media. La cuenca media recibe los caudales puntuales de la cuenca alta. En la figura H15 se muestran las cuencas media y baja con los tramos esquematizados.

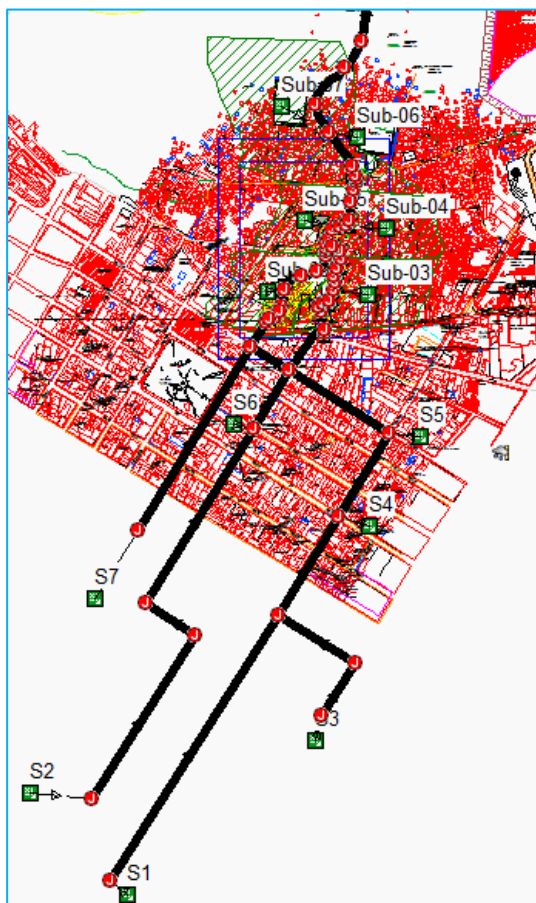


Figura H14. Modelación de las cuencas alta, media y baja.

En la Figura H15 se aprecian los tramos estudiados y las soluciones planteadas para cada uno de ellos. Los tramos están constituidos por secciones de forma trapecial formadas por gaviones en sus laterales y colchonetas en el fondo. Se generan pequeños saltos para



disminuir las pendientes y en consecuencia las velocidades. Este análisis se realizó en forma conjunta con el área de ingeniería, ya que la configuración de las secciones impacta en la modificación de los caudales.

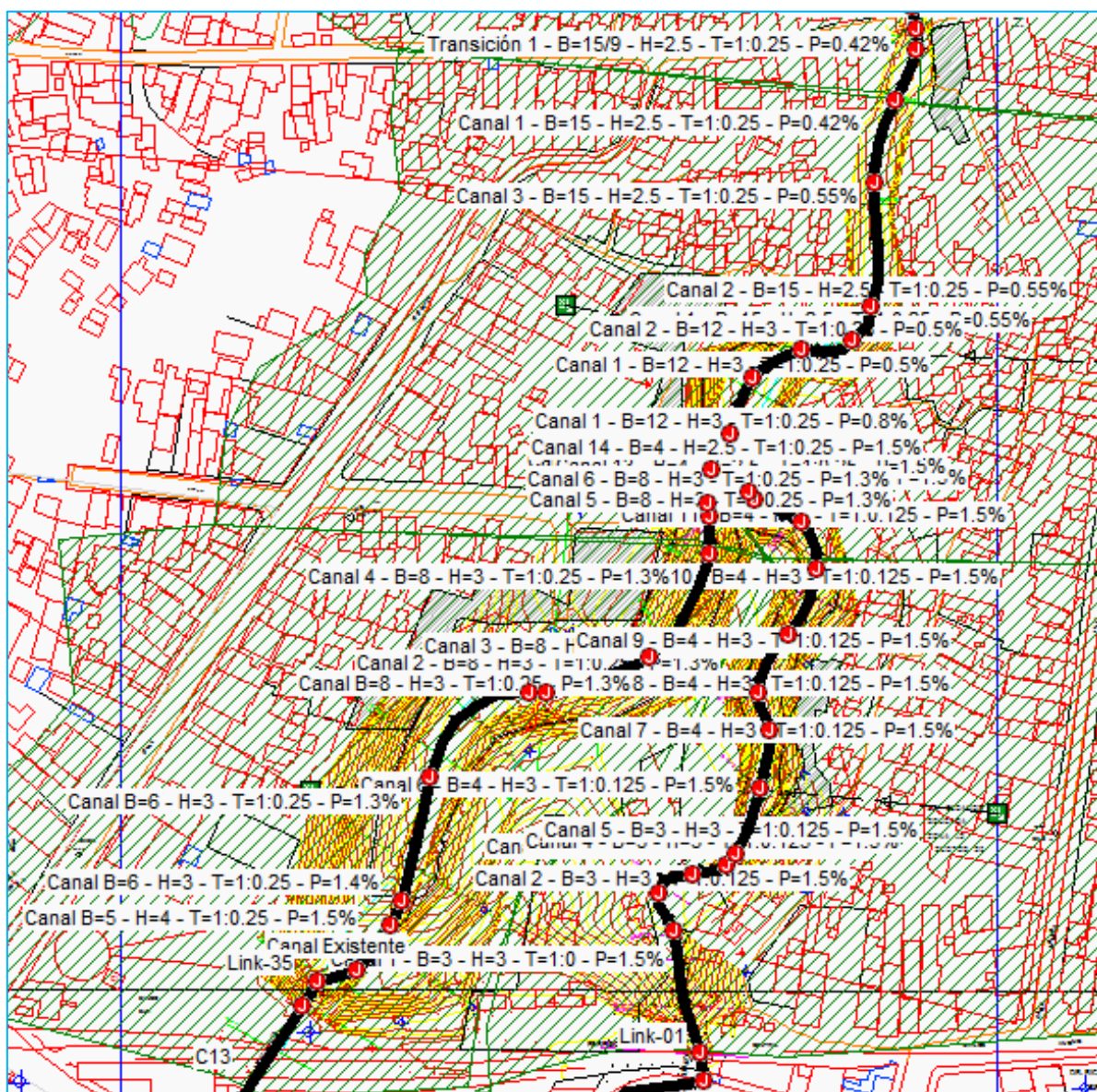


Figura H15. Modelación de las cuencas media y baja.

Las figuras H16 y H17 muestran perfiles longitudinales de sectores de ambos arroyos. Los mismos se presentan aquí al solo efecto de ejemplificar los resultados obtenidos. En anexo se presenta todo el tramo de ambos arroyos.



LOGOS

Ingeniería - Consultoría

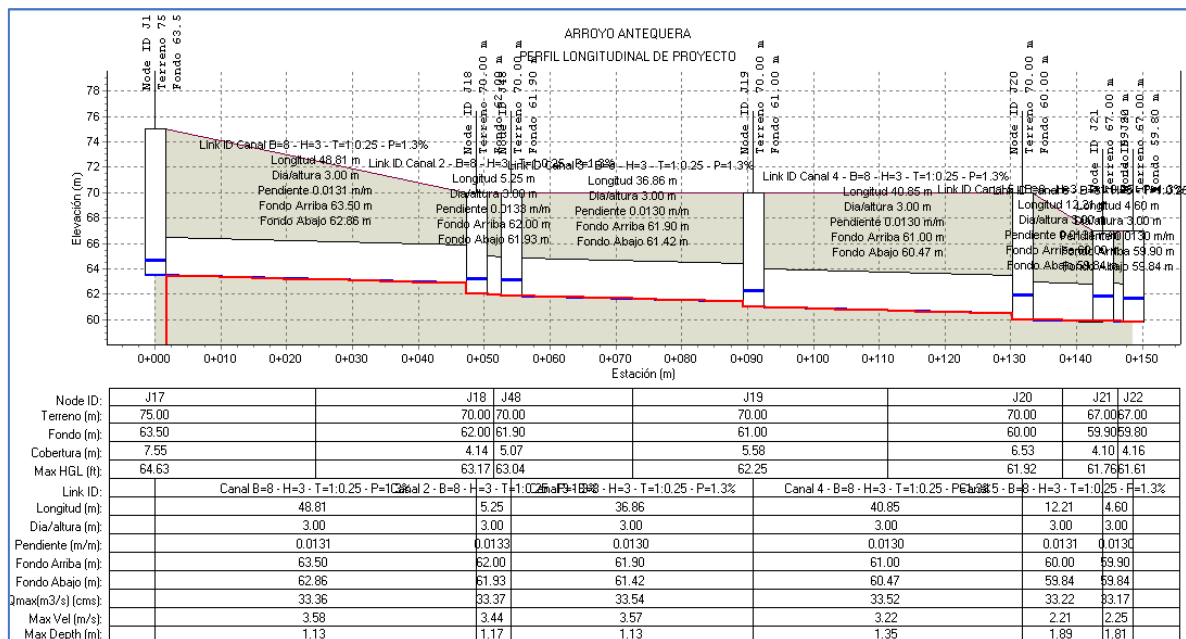


Figura H16. Perfil transversal de un sector del Arroyo Antequera.

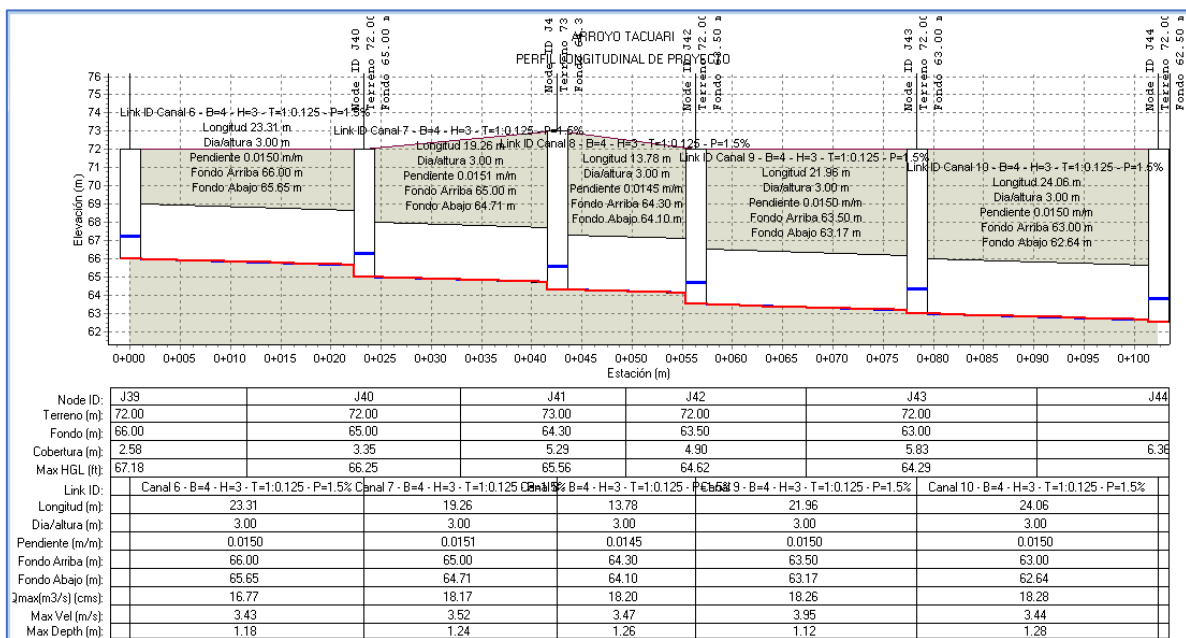


Figura H17. Perfil transversal de un sector del Arroyo Tacuari.

1.7. Amenazas por Inundación y Avenidas Tropicales



La divisoria entre las zonas alta y baja de la Chacarita que corresponde a la Calle Florencio Villamayor es igualmente la divisoria entre el tipo de eventos que constituyen amenazas. Si bien las avenidas tropicales afectan a la zona baja en el sector adyacente al Arroyo, su mayor problema constituye la inundación correspondiente a la subida del Río Paraguay.

En contraposición, Chacarita Alta es afectada por las avenidas tropicales o lluvias torrenciales que se generan en la cuenca alta y en el lugar. Estas lluvias generan escurrimientos a muy alta velocidad en los arroyos, los cuales erosionan las márgenes sobre las cuales están asentadas las viviendas. Muchas de estas están en riesgo de colapso, por lo cual se han diseñado secciones que estabilizan las márgenes y el fondo, recuperando sectores que fueron erosionados para uso público.

1.8. Obras de Mitigación y Protección Propuestas.

Mediante la modelación desarrollada se dimensionaron las estructuras necesarias para soportar las avenidas. Considerando que Asunción solicita que los drenajes se calculen para 25 años y se verifique para 50 años y que los arroyos estudiados forman parte del Macrodrenaje, se ha realizado el diseño para 50 años de recurrencia.

En general la altura de los muros laterales diseñados es mayor que lo necesario para las alturas de agua que se producen. Ello debido a que están preparados para recuperar las márgenes de los arroyos. Se presentan a continuación secciones típicas utilizadas. La Figura H18 muestra las secciones típicas diseñadas, las cuales son solo indicativas, ya que forman parte del diseño de ingeniería.

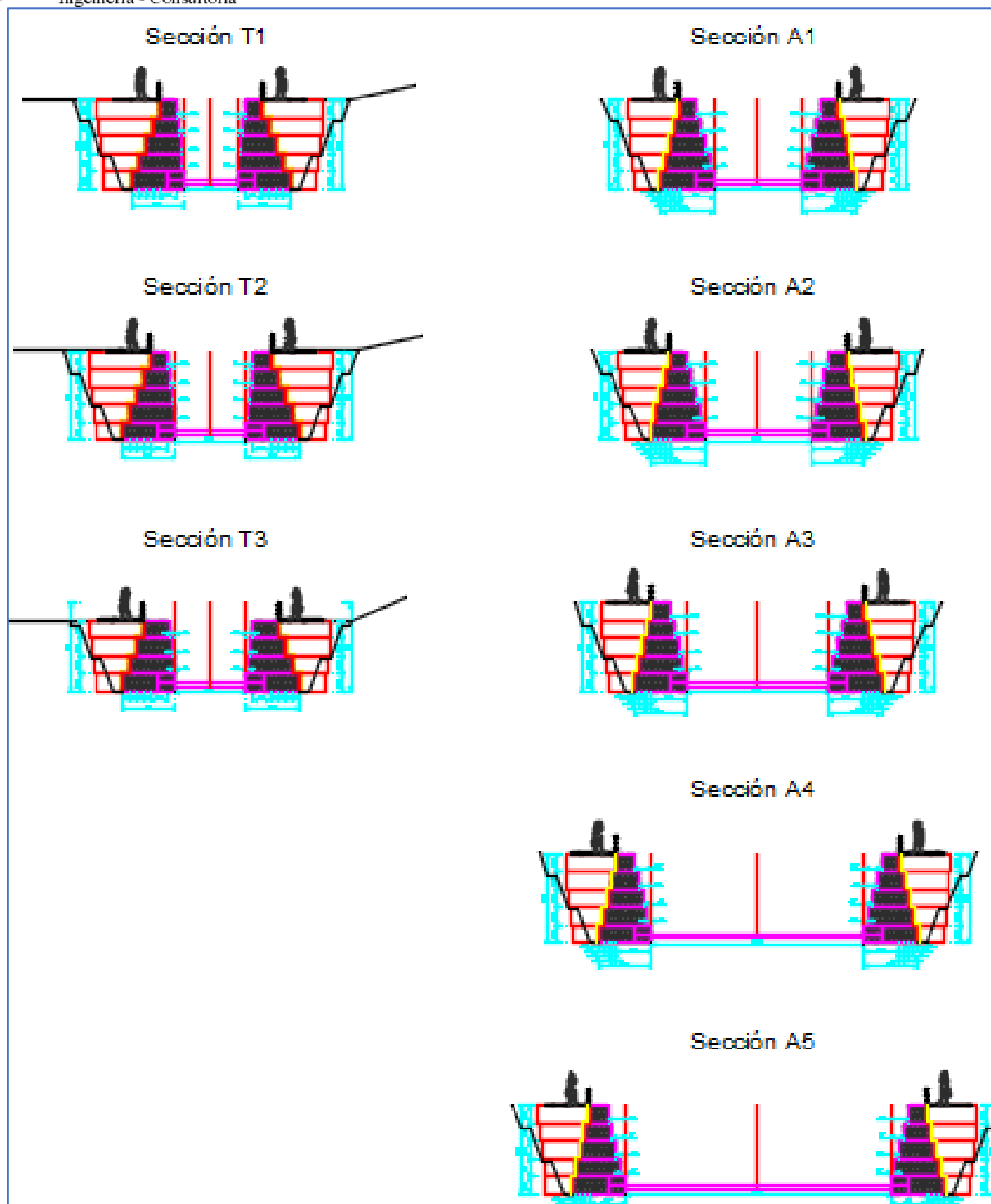


Figura H18. Secciones típicas de los arroyos.

En la Figura H19 se presenta un ejemplo de recuperación de márgenes con la inclusión de camineros sobre los muros y en el talud recuperado. Lo correspondiente a la recuperación de taludes se presenta en el diseño de ingeniería.

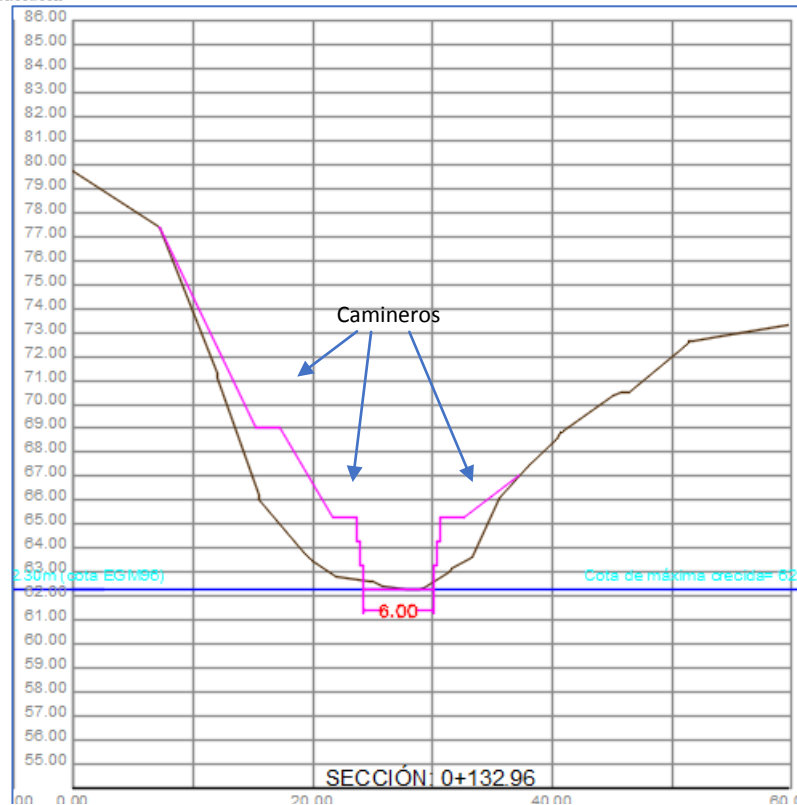


Figura H19. Sección típica y recuperación de área pública. Corresponde a Prog. 0+132.96

Par disminuir las velocidades se diseñaron tramos cortos con gradas de una altura máxima de 50 cm. La simulación ha demostrado que con gradas de hasta 50 cm no es necesaria la instalación de disipadores de energía adicionales. Un ejemplo de las gradas planteadas se presenta en la Figura H20. En el diseño de ingeniería se presenta todo el tramo estudiado. Mediante esta corrección de pendientes las velocidades no sobrepasan 4 m/seg para una recurrencia de 50 años.

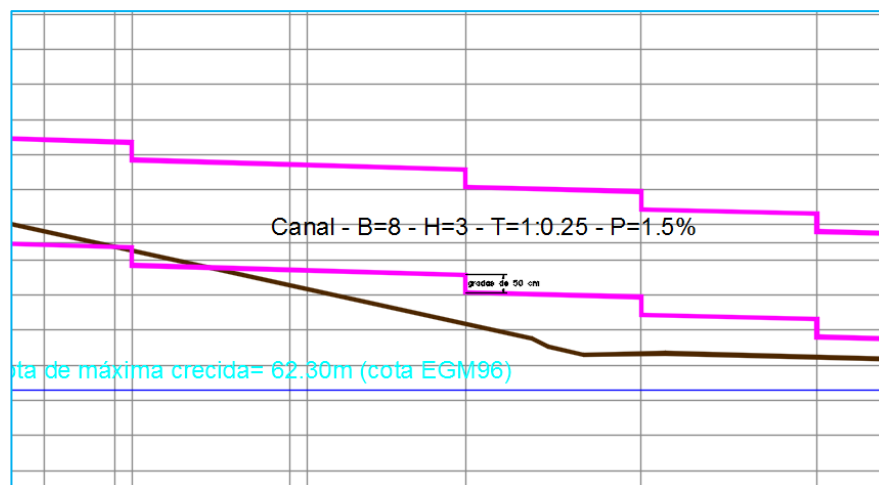


Figura H20. Perfil longitudinal de un tramo.



En la Figura H21 se presenta la planimetría de un tramo con los datos de las secciones, los tramos y las pendientes de los mismos. En el anexo se presentan todos los tramos en planimetría con la correspondiente identificación de medidas.

Este tipo de arroyos que recibe un aporte muy grande de agua de una cuenca superior y una pendiente elevada vá erosionando el fondo y se profundiza. Por ello en la mayor parte del tramo de proyecto (cuenca media) el mismo está bien definido. El problema principal de este tipo de arroyos es la erosión que produce en las márgenes por las elevadas velocidades. Por ello las mismas deben protegerse. La configuración planimétrica trató de respetar en mayor medida la ubicación actual del arroyo, considerando la necesidad de protección en los sectores de mayor erosión identificados en el análisis geotécnico y de ingeniería. No se planteó ningún tipo de rectificación porque ello implicaría una mayor afectación a viviendas ubicadas en las márgenes.

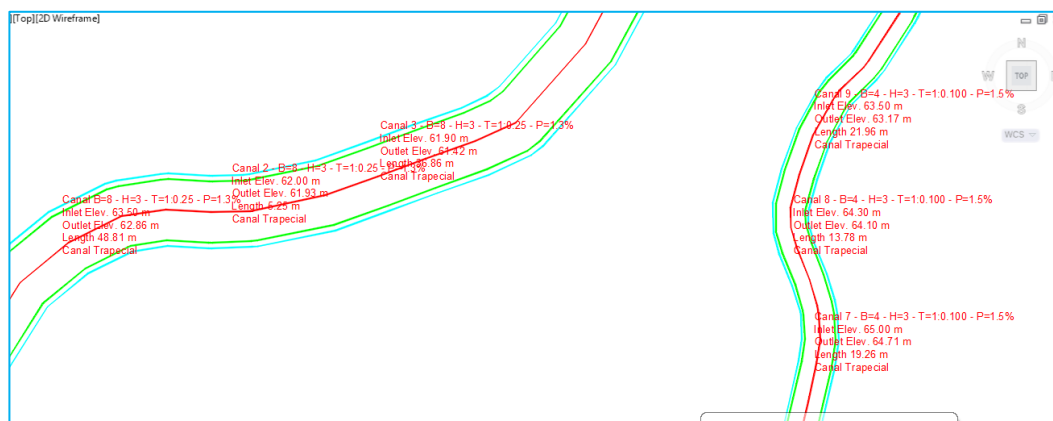


Figura H21. Planimetría de un tramo con las características del mismo.