

Informe Técnico Estudio Hidrológico e Hidráulico - Arroyo del Tigre

Punta del Tigre, San José
Junio 2019

Titular del Emprendimiento



Titular del Emprendimiento



Informe Técnico

Estudio Hidrológico e Hidráulico - Arroyo del Tigre

Proyecto:

Técnico Responsable: Ing. Civil H/S Carlos Amorín

Técnicos Colaboradores: Ing. Civil H/A Rodrigo Junes
Ing. Civil H/A Santiago Narbondo
Ing. Civil H/A Federico Vilaseca

Punta del Tigre, San José

Julio 2019

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETO	1
1.2 OBJETIVO	1
2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA.....	2
2.1 METODOLOGÍA	2
2.2 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	2
2.3 RESULTADOS	4
3. NIVELES DEL RÍO DE LA PLATA	6
4. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA.....	7
4.1 INTRODUCCIÓN.....	7
4.2 INFORMACIÓN DE BASE	8
4.2.1 Información topo-batimétrica	8
4.2.2 Registro de inundaciones.....	8
4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO.....	10
4.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO	12
4.4.1 Evento de calibración.....	12
4.4.2 Coeficiente de rugosidad de Manning	13
4.4.3 Condiciones de borde.....	13
4.4.4 Resultados	15
4.5 SIMULACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS.....	16
5. ESTUDIO DEL PREDIO.....	19
5.1 CARACTERIZACIÓN DEL DRENAJE.....	19
5.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA	22
5.3 ESTUDIO DE FLUJO EN ZANJAS	22
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	25

ANEXO I

MAPEO DE LÍNEAS DE CRECIDA Y PROFUNDIDADES ESTIMADAS

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2-1: CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LA CUENCA.....	4
TABLA 3-1: NIVELES DEL RÍO DE LA PLATA PARA DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO. VALORES EXPRESADOS EN METROS SOBRE EL CERO OFICIAL.....	6
TABLA 4-1: COTAS MÁXIMAS DE INUNDACIÓN DE REFERENCIA PARA EL EVENTO DE CALIBRACIÓN.	12
TABLA 4-2: COEFICIENTES DE RUGOSIDAD DE MANNING INICIALES.....	13
TABLA 4-3: RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN.	15
TABLA 4-4: COTAS MÁXIMAS DE INUNDACIÓN SEGÚN RECURRENCIA EN LAS SECCIONES TRANSVERSALES UBICADAS SOBRE EL PREDIO EN ESTUDIO.....	17
TABLA 4-5: COMPARACIÓN DE COTAS DE CALLE CON COTAS DE INUNDACIÓN ESTIMADAS.	18
TABLA 5-1: RESULTADOS DE NIVELES Y VELOCIDADES OBTENIDOS.	23
TABLA 5-2: RESULTADOS DE SIMULACIÓN CONSIDERANDO MANTENIMIENTO DE ZANJAS.....	24

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1: UBICACIÓN DEL PREDIO EN ESTUDIO (DELINEADO EN BLANCO).	1
FIGURA 2-1: CUENCA DE INTERÉS.	3
FIGURA 2-2: IZQUIERDA: USOS DEL SUELO PRESENTES EN LA CUENCA. DERECHA: UNIDADES DE SUELO PRESENTES EN LA CUENCA.	4
FIGURA 2-3: HIDROGRAMAS PARA LOS PERÍODOS DE RETORNO CONSIDERADOS.....	5
FIGURA 3-1: AJUSTE A GEV DE LOS NIVELES MÁXIMOS ANUALES DEL RÍO DE LA PLATA EN EL PUERTO DE MONTEVIDEO.....	6
FIGURA 4-1: UBICACIÓN DEL PREDIO EN ESTUDIO SOBRE IMAGEN SATELITAL DE GOOGLE EARTH.....	7
FIGURA 4-2: SECCIONES TRANSVERSALES.	9
FIGURA 4-3: REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL ALCANCE DE LA INUNDACIÓN EN EL EVENTO DE DICIEMBRE DE 2018.....	9
FIGURA 4-4: IZQUIERDA: CORTE TRANSVERSAL DE LA SECCIÓN ST4 INGRESADA AL MODELO, UBICADA AGUAS ARRIBA DE AV. ITALIA Y BERRO, DEFINIDA EN BASE A RELEVAMIENTO CON GPS Y CURVAS DEL SGM. DERECHA: CORTE TRANSVERSAL DEL TRAMO RECTIFICADO DEL CANAL DE DERIVACIÓN INGRESADO AL MODELO, EN BASE A LA INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR UTE.....	10
FIGURA 4-5: GEOMETRÍA INGRESADA AL MODELO DEL GRUPO DE ALCANTARILLAS DE AV. ITALIA Y BERRO, DETERMINADA EN BASE AL RELEVAMIENTO EN CAMPO.	10
FIGURA 4-6: PERFIL LONGITUDINAL DEL CAUCE INGRESADO AL MODELO, ABARCANDO EL CAUCE PRINCIPAL HASTA LA BIFURCACIÓN Y EL CANAL DE DERIVACIÓN.....	11
FIGURA 4-7: ESQUEMA EN PLANTA DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO, SEGÚN SE INGRESÓ A HEC-RAS.	11
FIGURA 4-8: NOMENCLATURA DE SECCIONES TRANSVERSALES EN ZONA DE ESTUDIO.....	12
FIGURA 4-9 : HIDROGRAMA DE CAUDAL INGRESADO COMO CONDICIÓN DE BORDE AL MODELO PARA EL EVENTO DE CALIBRACIÓN.	14
FIGURA 4-10: CONDICIÓN DEL RÍO DE LA PLATA OBSERVADA DURANTE EL EVENTO DE CALIBRACIÓN.....	14
FIGURA 4-11: CURVA DE INUNDACIÓN PARA EL EVENTO DE CALIBRACIÓN.....	15
FIGURA 4-12: COMPARACIÓN DE CURVAS DE INUNDACIÓN PARA EL EVENTO DE PERÍODO DE RETORNO 100 AÑOS CON CONDICIÓN DE BORDE DE TIRANTE NORMAL EN LA DESEMBOCADURA, Y ASIGNANDO UN NIVEL EN EL RÍO DE LA PLATA CORRESPONDIENTE A PERÍODO DE RETORNO 100 AÑOS.....	16
FIGURA 4-13: CURVAS DE INUNDACIÓN SOBRE EL PREDIO EN ESTUDIO PARA DISTINTA RECURRENCIA.	17
FIGURA 5-1: ALCANTARILLA QUE CONDUCE EL AGUA DE LOS CANALES A TRAVÉS DEL CAMINO DE ACCESO AL PARQUE COSTERO.	19
FIGURA 5-2: IMAGEN SATELITAL DEL TERRENO, EN LA CUAL SE APRECIAN LAS ZANJAS QUE LO ATRAVIESAN.	20
FIGURA 5-3: MODELO DIGITAL DE TERRENO GENERADO A PARTIR DEL RELEVAMIENTO CON DRONE.....	21
FIGURA 5-4: CURVAS DE NIVEL DEL PREDIO GENERADAS A PARTIR DEL MDT.	21
FIGURA 5-5: CURVA DE REMANSO PRODUCIDA CON CONDICIÓN DE BORDE DE TIRANTE NORMAL AGUAS ABAJO.	23
FIGURA 5-6: CURVA DE REMANSO PRODUCIDA CON CONDICIÓN DE BORDE AGUAS ABAJO CORRESPONDIENTE AL TIRANTE PRODUCIDO POR CRECIDA DE ARROYO DEL TIGRE DE 10 AÑOS DE PERÍODO DE RETORNO.....	23
FIGURA 5-7: CURVA DE REMANSO EN CASO CON MANTENIMIENTO DE ZANJAS.....	24

1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETO

El objeto de estudio del presente informe técnico es el predio donde se implantará un Parque Solar Fotovoltaico de hasta 50 MW de potencia, el cual se ubica sobre Avenida Italia y Berro, departamento de San José, al Noroeste de la central eléctrica de ciclo combinado Punta del Tigre. La ubicación del mismo se muestra en la Figura 1-1.



Figura 1-1: Ubicación del predio en estudio (delineado en blanco).

1.2 OBJETIVO

El objetivo general del presente informe consiste en la realización del Estudio Hidrológico e Hidráulico que permita cuantificar los riesgos de afectación de las crecidas del arroyo del Tigre sobre el proyecto de un Parque Solar Fotovoltaico, a localizarse próximo a la Central Térmica de Punta del Tigre, ubicada en el paraje Colonia Wilson, del Departamento de San José, según se indicara en la sección anterior.

Los objetivos particulares son:

- Determinar las zonas inundables del predio y el riesgo asociado aproximado, por la crecida del arroyo del Tigre.
- Analizar condiciones de drenaje actual del predio y especificar las recomendaciones necesarias para mejorar el mismo.

2. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

A los efectos de dar cumplimiento a los objetivos, se estudia, desde el punto de vista hidrológico la totalidad de la cuenca del arroyo del Tigre, con el objetivo de determinar los hidrogramas de crecida generados en la misma, ante eventos de precipitación de diferente período de retorno. Los hidrogramas resultantes, son luego utilizados como insumo para la modelación hidrodinámica, para determinar cotas máximas de inundación en el predio en estudio.

2.1 METODOLOGÍA

En primer lugar, se propone realizar una caracterización hidrológica de la cuenca con punto de cierre en el emplazamiento. Para ello se estudia en primera instancia la cuenca en su totalidad y luego, se evalúa la necesidad de dividirla en subcuencas de aporte. La división depende de los resultados obtenidos en el modelo hidrodinámico. De ser necesario, la cuenca se divide en una subcuenca de cabecera, que aporta al modelo en su sección de más aguas arriba, y también subcuencas de aporte lateral, correspondientes a los afluentes al arroyo en el tramo a modelar.

Para todos los casos, se delimita cada una de las subcuencas, trabajando en base a un sistema de información geográfica (SIG), utilizando un modelo digital de elevaciones del terreno (o MDT) de la cuenca. Se cuenta con dos modelos digitales de terreno de alcance nacional: SRTM (NASA) y RENARE con celdas de 90 m por 90 m y 30 m por 30 m respectivamente. Además se verifica el trazado de las subcuencas sobre fotografías satelitales, cartas del Servicio Geográfico Militar (SGM) de escala adecuada y en terreno, de modo de determinar la posible influencia de estructuras en la delimitación de las mismas.

Una vez caracterizada la cuenca, se propone la utilización del modelo hidrológico de eventos extremos del Natural Resources Conservation Service (NRCS, ex SCS; USDA 2010) para determinar los hidrogramas de diferente período de retorno. Este método es ampliamente utilizado en nuestro país para estimación de caudales extremos, y se cuenta con toda la información necesaria para su implementación. Como insumos para su aplicación se requiere información pluviométrica de eventos extremos, así como también las características y usos del suelo, número de curva, grupo hidrológico y tiempo de concentración de la cuenca.

2.2 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

En primer lugar se procede al trazado de cuenca, que se realiza en un sistema de información geográfica (SIG) mediante el procesamiento del MDT elaborado por la RENARE a partir de las curvas de nivel cada 10 metros del SGM. En la Figura 2-1 se muestra la cuenca. El trazado de la cuenca se verifica posteriormente sobre fotografías satelitales y cartas del SGM de escala adecuada.

Una vez obtenida la cuenca se procede a realizar la caracterización de los principales parámetros hidrológicos de la misma. En cuanto a las características de la cuenca se identifica y cuantifica las áreas para cada uso de suelo en base al mapa de usos de suelos de la RENARE corregido por imágenes satelitales y se cuantifica la unidad hidrológica de suelo respectiva según la carta de suelos y las unidades de suelo presentes en la cuenca, de acuerdo a lo que se muestra en la Figura 2-2. También se calcula el área total, tiempo de concentración (Kirpich 1948), y los parámetros de relevancia del cauce principal para la cuenca.

Una vez realizado el procesamiento inicial se asigna el Número de Curva (método NRCS, USDA, 2010) para cada uso y grupo hidrológico asociado a la unidad de suelo de la cuenca y luego se pondera por área de manera de obtener un número de curva representativo para la cuenca. Se presentan los resultados en la Tabla 2-1.

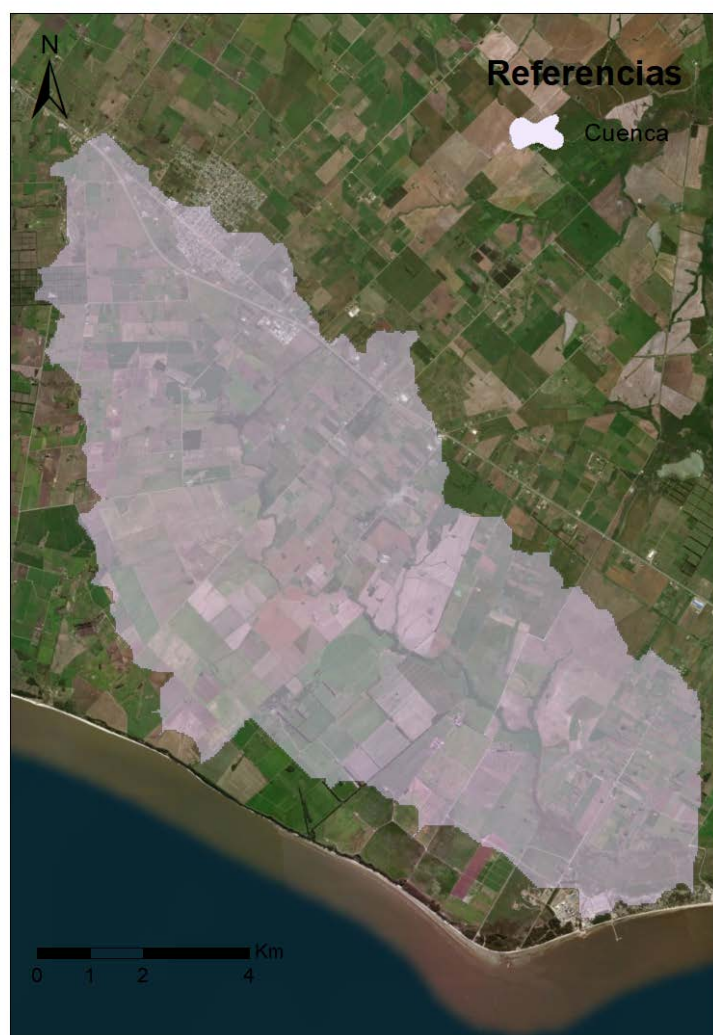


Figura 2-1: Cuenca de interés.



Figura 2-2: Izquierda: usos del suelo presentes en la cuenca. Derecha: unidades de suelo presentes en la cuenca.

Tabla 2-1: Características hidrológicas de la cuenca.

Área (km ²)	Largo Cauce (km)	Pendiente Cauce (%)	Tc (horas)	Grupo Hidrológico	Numero de Curva Ponderado
89,83	24,89	0,23	8,44	D	86

2.3 RESULTADOS

La modelación hidrológica se basa en el método del Número de Curva (USDA, 2010) propuesto por el NRCS, ampliamente utilizado en cuencas rurales y suburbanas de Uruguay. Una vez realizado el procesamiento inicial y obtenido el Número de Curva correspondiente a cada subcuenca se procede a implementar el método.

A continuación, en la Figura 2-3, se presentan los hidrogramas para diferentes períodos de retorno obtenidos.

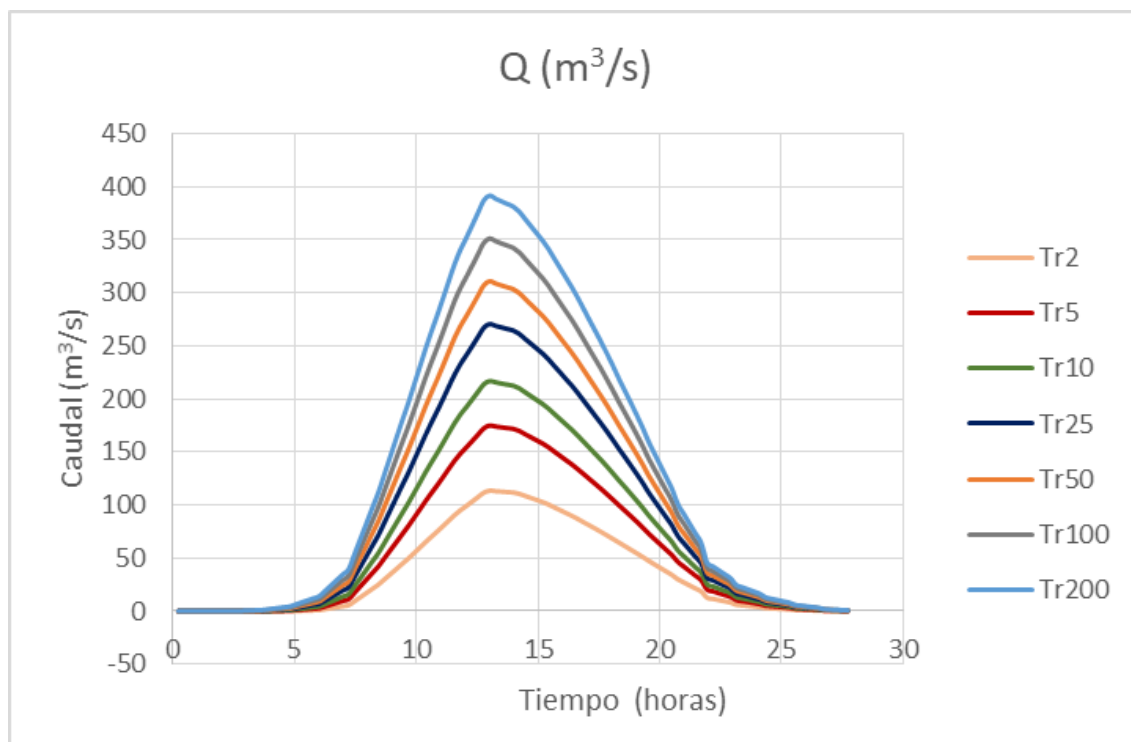


Figura 2-3: Hidrogramas para los periodos de retorno considerados.

3. NIVELES DEL RÍO DE LA PLATA

Debido a que como condición de borde aguas abajo del modelo hidrodinámico se utilizan niveles en el Río de la Plata, se pretende conocer el comportamiento de los mismos para eventos extremos en la zona de interés.

Para ello se realiza la caracterización del régimen extremal de niveles a partir de la serie de niveles del Río de la Plata en el puerto de Montevideo. Dichos niveles se expresan respecto al cero Oficial.

Para el estudio del régimen extremal se extrae la serie de máximos anuales para el periodo 1964-2018, en el cual se cuenta con al menos registros diarios en todo el periodo a excepción de 5 años. Una vez obtenida la serie de máximos anuales se ajusta la misma a una distribución GEV. Se presenta en Figura 3-1 el ajuste y en Tabla 3-1 los valores de nivel para diferentes periodos de retorno obtenidos del ajuste.

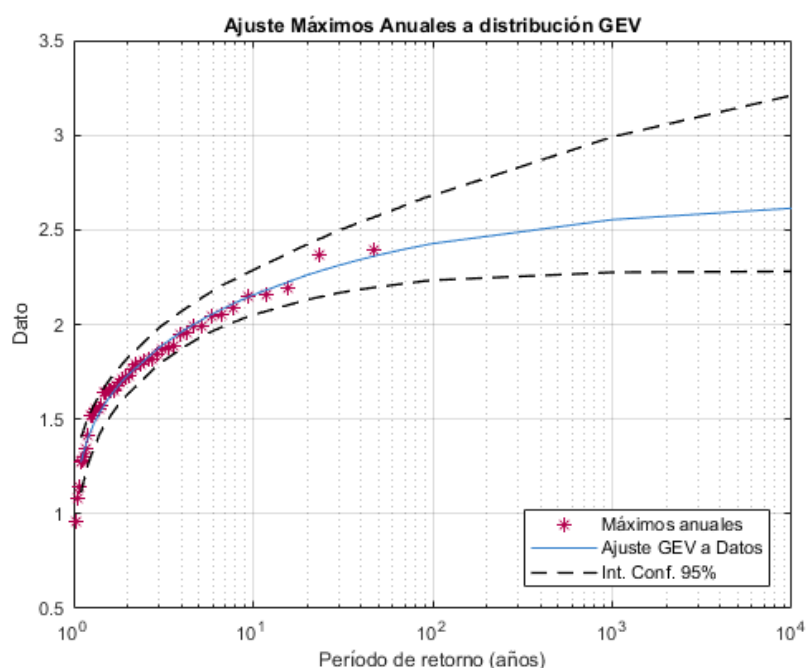


Figura 3-1: Ajuste a GEV de los niveles máximos anuales del Río de la Plata en el Puerto de Montevideo.

Tabla 3-1: Niveles del Río de la Plata para diferentes periodos de retorno. Valores expresados en metros sobre el cero Oficial.

Período de retorno (años)	Intervalo inferior (m)	Ajuste (m)	Intervalo superior (m)
2	1,63	1,73	1,82
5	1,93	2,02	2,13
10	2,05	2,16	2,29
20	2,13	2,26	2,42
50	2,20	2,37	2,58
100	2,23	2,43	2,68
1000	2,28	2,55	2,99

4. MODELACIÓN HIDRODINÁMICA

4.1 INTRODUCCIÓN

En esta sección se describe el proceso de implementación del modelo hidrodinámico 1D del arroyo del Tigre, en el tramo próximo a su desembocadura sobre el Río de la Plata. Para ello se determina el riesgo de inundación de dicho arroyo sobre el predio en estudio.

El predio se ubica próximo a la Central Térmica de Punta del Tigre, en el paraje Colonia Wilson, sobre la calle Av. Italia y Berro. El mismo está dentro de la planicie de inundación del arroyo del Tigre, el cual atraviesa dicha zona desde el Noroeste hacia el Sudeste, desembocando en el Río de la Plata (ver Figura 4-1).



Figura 4-1: Ubicación del predio en estudio sobre imagen satelital de Google Earth.

Como se puede ver, aproximadamente a 2 km de la desembocadura del arroyo existe una derivación artificial, que actualmente atraviesa la Central Térmica. Su último tramo fue canalizado recientemente, en el marco de la instalación de dicha planta. Por lo tanto la desembocadura se encuentra ramificada, lo cual se tiene en cuenta en el estudio.

El modelo se implementa usando el software HEC-RAS, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército Estadounidense (USACE). El mismo es ampliamente utilizado, tanto a nivel nacional como internacional, para el diagnóstico de inundaciones en ríos de llanura. En base al mismo se determinan cotas de inundación en el predio para distintos períodos de retorno. A su vez se estudia la posible influencia del nivel en el Río de la Plata sobre el régimen de inundaciones, así como el de las estructuras hidráulicas instaladas en la zona.

4.2 INFORMACIÓN DE BASE

Para la implementación del modelo es necesario contar con información topográfica y batimétrica del cauce y su planicie de inundación, así como también con series de caudales en la cuenca y niveles en su desembocadura, que definan sus condiciones de borde. A su vez es necesario contar con registros de algún tipo que indiquen cotas máximas de inundación durante eventos ocurridos en el pasado, para poder calibrar correctamente el modelo.

La determinación de los hidrogramas de caudal que genera la cuenca, y el análisis estadístico de los niveles en el Río de la Plata se describen en las secciones anteriores. A continuación se describe el resto de la información que fue utilizada durante la implementación del modelo.

4.2.1 Información topo-batimétrica

La información topográfica y batimétrica se obtiene de tres fuentes: 1) un relevamiento de secciones transversales y obras hidráulicas realizado in situ; 2) información de relevamientos anteriores proporcionada por UTE y 3) curvas de nivel cada 5 metros del Servicio Geográfico Militar (SGM). Todas las cotas se trasladan al Cero Oficial, utilizando este como referencia vertical a lo largo de todo el estudio.

Durante el relevamiento, llevado a cabo en el mes de abril de 2019, se toman, mediante GPS diferencial, datos de 9 secciones transversales del cauce, abarcando parte de su planicie de inundación. El mismo día se realiza también un relevamiento fotográfico aéreo mediante UAV sobre la zona de estudio. A su vez se releva la geometría de las principales obras hidráulicas involucradas en el problema. En total se consideran en el problema 4 puentes y alcantarillas.

Durante un estudio hidráulico antecedente, realizado con el objetivo de estudiar la rectificación del tramo final del canal de desvío, en las proximidades de la central, se relevaron secciones transversales de dicho canal, en toda su extensión, y del tramo final del cauce natural del arroyo. Esta información fue proporcionada por UTE, y permite caracterizar la geometría del cauce luego de la bifurcación.

La información mencionada no abarca las planicies de inundación del arroyo en su totalidad, por lo que se utilizan complementariamente las curvas de nivel cada 5 metros del SGM para completar las secciones transversales. En la Figura 4-2 a continuación se muestran todas las secciones relevadas, luego de procesada toda la información.

4.2.2 Registro de inundaciones

Se cuenta con una serie de fotografías aéreas registrando el evento de crecida ocurrido durante el mes de diciembre de 2018, proporcionadas por UTE. Solo en una de ellas se puede ver parcialmente el alcance de la inundación sobre la zona de estudio, la cual se muestra a continuación en la Figura 4-3.

En la fotografía se observa que la inundación alcanza en una zona el pie del terraplén de la calle que bordea al terreno, perpendicular a Av. Italia y Berro, y que se acumula algo de agua al Sur del mismo, donde se ve una vivienda, que no llega a ser alcanzada por el agua.

El modelo se calibra en base a este evento, procurando lograr una correcta simulación de la mancha de inundación que se aprecia en las fotografías.

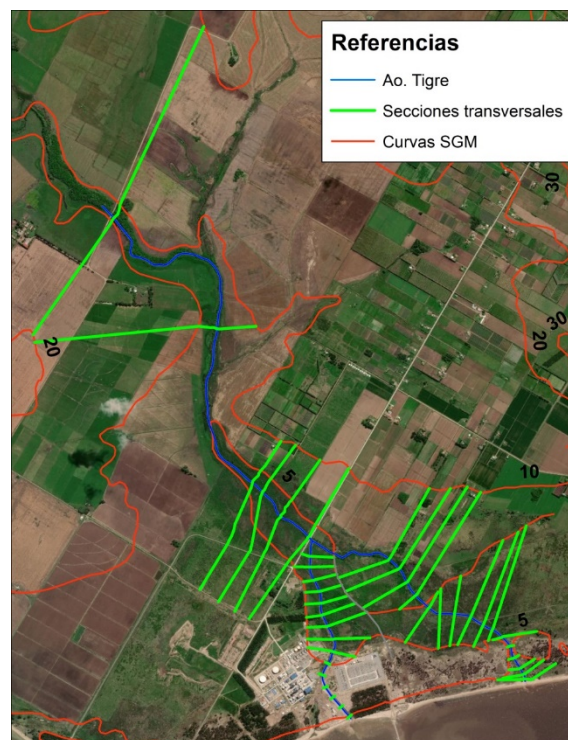


Figura 4-2: Secciones transversales.



Figura 4-3: Registro fotográfico del alcance de la inundación en el evento de diciembre de 2018.

4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El modelo abarca el tramo final del arroyo del Tigre, extendiéndose desde un camino rural ubicado algunos km aguas arriba de la zona de estudio (donde se relevó una de las secciones transversales) hasta su desembocadura, representando ambos brazos de la bifurcación: el cauce natural y el canal de desvío.

Sobre el mismo se coloca la información de las 4 alcantarillas relevadas, con el objetivo de representar correctamente sus efectos sobre el flujo. También se coloca una estructura de vertido artificial que vincula los dos brazos bifurcados, permitiendo al modelo intercambiar agua de uno a otro durante eventos de crecida. Se decide realizar esta simplificación al constatar, observando las fotos del evento de referencia, que la planicie de inundación ubicada entre ambas ramas se ve totalmente inundada durante crecidas debido a su baja pendiente. De este modo, se representa con fidelidad el comportamiento de los cauces en ese tramo.

A continuación, desde la Figura 4-4 a la Figura 4-7 se presenta una serie de imágenes para ilustrar la geometría ingresada al modelo, y su configuración final.

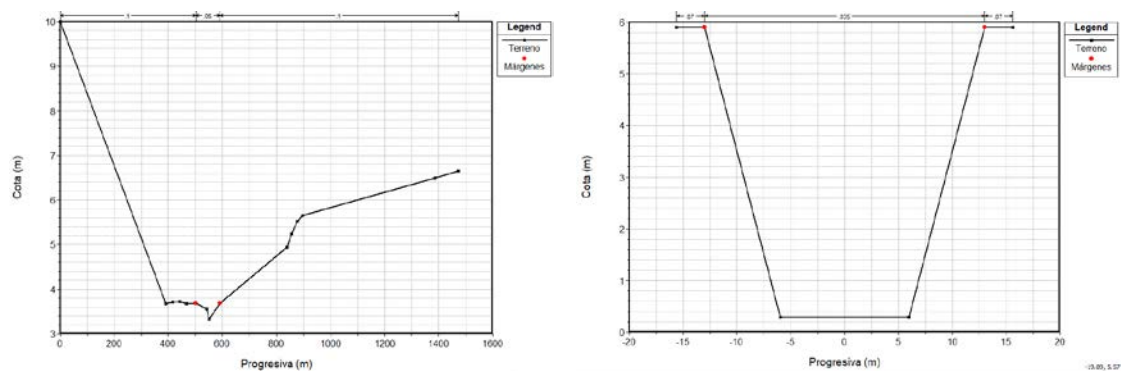


Figura 4-4: Izquierda: corte transversal de la sección ST4 ingresada al modelo, ubicada aguas arriba de Av. Italia y Berro, definida en base a relevamiento con GPS y curvas del SGM. Derecha: corte transversal del tramo rectificado del canal de derivación ingresado al modelo, en base a la información proporcionada por UTE.

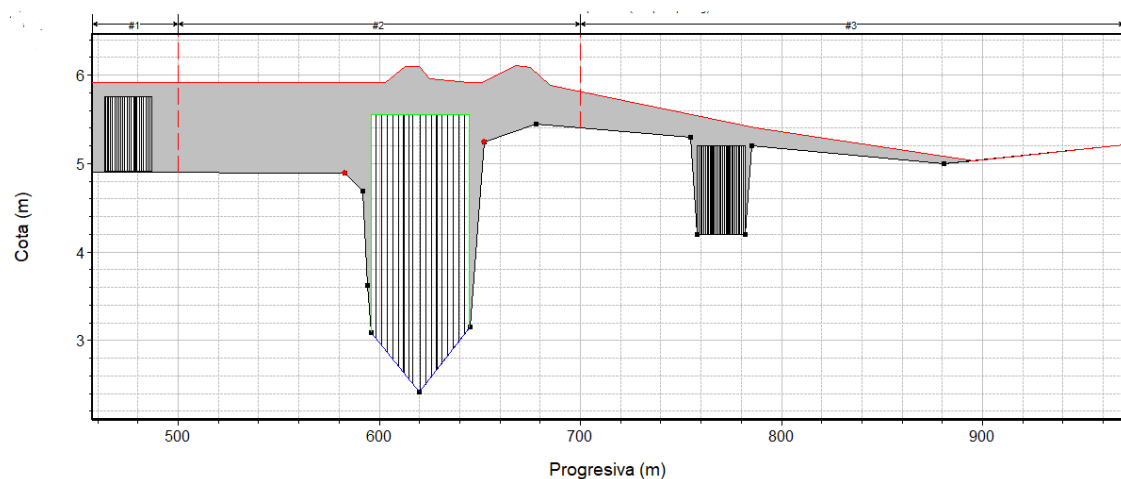


Figura 4-5: Geometría ingresada al modelo del grupo de alcantarillas de Av. Italia y Berro, determinada en base al relevamiento en campo.

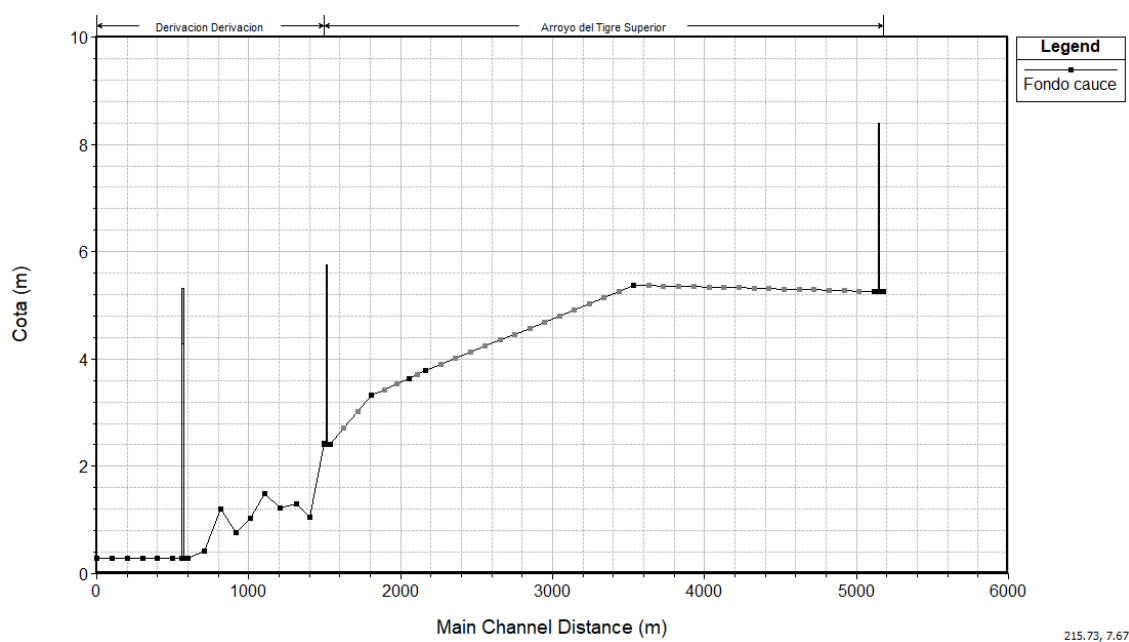


Figura 4-6: Perfil longitudinal del cauce ingresado al modelo, abarcando el cauce principal hasta la bifurcación y el canal de derivación.



Figura 4-7: Esquema en planta de la geometría del modelo, según se ingresó a HEC-RAS.

4.4 CALIBRACIÓN DEL MODELO

4.4.1 Evento de calibración

Como se mencionara anteriormente, se utiliza únicamente un evento, del cual se tiene registro fotográfico, para calibrar el modelo. Este evento corresponde a la crecida ocurrida en diciembre de 2018. Comparando dicho registro con los puntos relevados mediante GPS diferencial se determinan aproximadamente las cotas máximas de inundación para las secciones transversales que abarcan la zona visible de la fotografía de referencia (presentada en la Figura 4-3). Estas cotas se muestran en la Tabla 4-1 a continuación.

La nomenclatura de las secciones transversales se puede ver en la Figura 4-8. Las mismas se ubican aguas arriba de Av. Italia y Berro y se numeran desde aguas abajo hacia aguas arriba.

Tabla 4-1: Cotas máximas de inundación de referencia para el evento de calibración.

Sección	Cota máxima de inundación (m desde 0 oficial)
ST 3	5,48
ST 4	5,65
ST 5	5,58

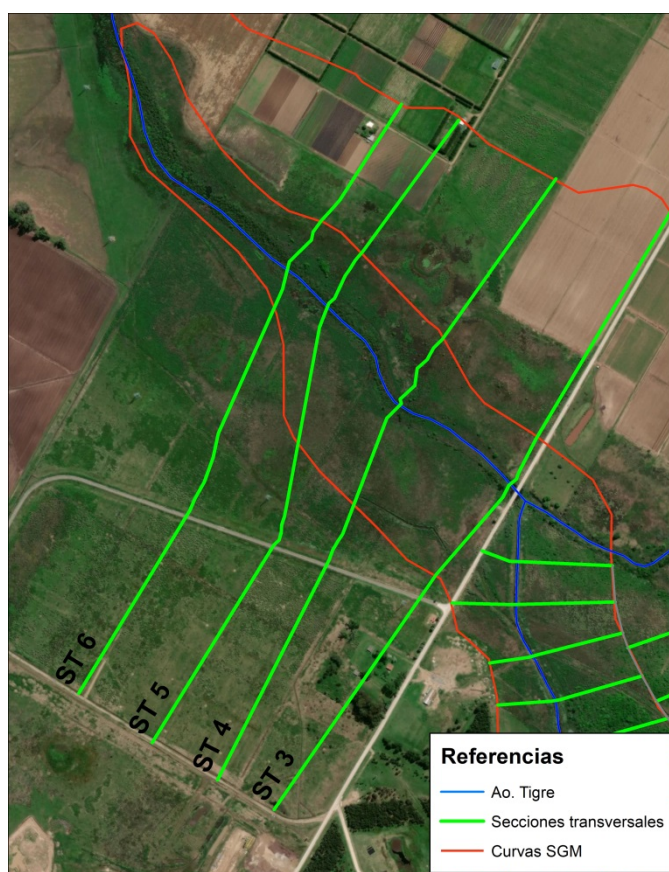


Figura 4-8: Nomenclatura de secciones transversales en zona de estudio.

4.4.2 Coeficiente de rugosidad de Manning

El parámetro de calibración que utilizado para el ajuste de los niveles es el número de Manning, el cual representa los efectos que la rugosidad del fondo y las paredes del cauce tienen sobre el flujo. Se utilizan imágenes satelitales actuales del tramo en estudio para identificar zonas con diferentes condiciones de rugosidad, tanto del cauce como de las márgenes. Luego se fijan valores iniciales del número de Manning para cada una de estas zonas, de acuerdo a los valores que se sugieren en Chow (1994). Los mismos se muestran en la Tabla 4-2.

La Zona 1 se corresponde al tramo inicial del modelo, y abarca hasta la mitad de la zona de estudio. La Zona 2 abarca el resto de la zona de estudio y los tramos superior y medio de los dos brazos bifurcados. La Zona 3 corresponde al tramo final rectificado de la derivación, mientras que la Zona 4 refiere a la desembocadura del cauce natural.

El proceso de calibración consiste en partir de estos valores, extraídos de bibliografía, y variarlos proporcionalmente hasta que las cotas de inundación máxima del evento de calibración se asemejen a las registradas.

Tabla 4-2: Coeficientes de rugosidad de Manning iniciales.

Zona	Descripción	Manning cauce	Manning planicie
1	Vegetación en el cauce y monte en las márgenes.	0,05	0,1
2	Algo de vegetación en el cauce. Arbustos y algunos árboles en las márgenes	0,035	0,07
3	Cauce rectificado y mantenido, con taludes de enrocado. Márgenes despejadas.	0,025	0,03
4	Cauce con fondo y taludes de arena, con juncos y vegetación, Márgenes con pastizal y arbustos.	0,035	0,05

4.4.3 Condiciones de borde

Como condiciones de borde se ingresan caudales en la sección de aguas arriba del modelo, y niveles en las secciones de aguas abajo respectivas de cada rama de la bifurcación. En todos los casos se ingresa la misma condición de borde en ambas ramas, por considerarse que los efectos del Río de la Plata en la desembocadura son los mismos en ambos casos.

El hidrograma de caudal del evento de calibración se estima utilizando el método del NRCS (que se describe en el apartado sobre la modelación hidrológica) utilizando registros pluviométricos diarios de INUMET en el pluviómetro con registros más cercano a la cuenca (pluviómetro Prado, ubicado en Montevideo) en lugar de la tormenta de diseño. Esto da como resultado el hidrograma que se presenta en la Figura 4-9. Se utiliza un coeficiente de corrección al ingresar el hidrograma para compensar el efecto de la laminación que ocurre desde la primera sección del modelo hasta la zona de estudio.

En las fotografías aéreas, se observa que no ocurrió el ingreso del Río de la Plata al cauce durante el evento de calibración. Por el contrario se observa como es el arroyo del Tigre el que incursiona significativamente en el estuario. Esto se puede ver en la foto de la Figura 4-10.

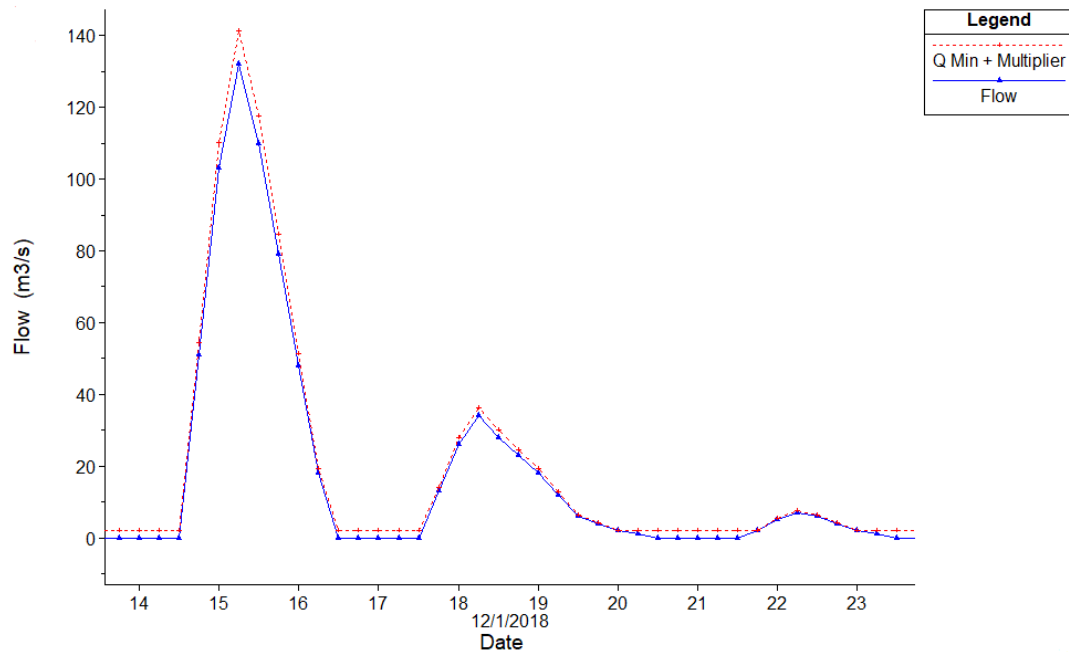


Figura 4-9 : Hidrograma de caudal ingresado como condición de borde al modelo para el evento de calibración.



Figura 4-10: Condición del Río de la Plata observada durante el evento de calibración.

Es por esto que se decide utilizar como condición de borde aguas abajo el tirante normal, por considerarse una condición más exigente desde el punto de vista de los niveles, y así ubicarse del lado de la seguridad. Además, no se cuenta con el registro de niveles en el Río de la Plata para esas fechas.

No obstante, luego de llevada a cabo la calibración, se realizan corridas de verificación repitiendo la simulación, pero fijando el tirante del Río de la Plata en sus valores correspondientes a 2, 5, 10, 50 y 100 años de período de retorno. Las cotas máximas de inundación de estas simulaciones en la zona de estudio, aguas arriba de Av. Italia y Berro, no muestran diferencias significativas con la realizada con tirante normal en la condición de borde. Por lo tanto se descarta que el remanso del Río de la Plata pudiera afectar significativamente las cotas de inundación durante el evento de diciembre de 2018, y se consideran válidos los resultados de calibración obtenidos.

4.4.4 Resultados

Los valores del número de Manning de bibliografía ingresados inicialmente con las condiciones de borde que se describen antes dieron como resultado cotas de inundación muy próximas a las de referencia. Estas se muestran comparativamente en la Tabla 4-3.

A su vez, se observa que la mancha de inundación en la zona de estudio abarca un área similar a la que se aprecia en las fotografías de referencia. Esta se puede ver en la Figura 4-11. Por lo tanto, se da por válido el proceso de calibración y manteniendo los coeficientes de Manning iniciales, extraídos de bibliografía para realizar simulaciones en etapas posteriores.

Tabla 4-3: Resultados de la calibración.

Sección	Cota máxima inundación (m oficial)	Cota máxima modelo (m oficial)
ST 3	5,48	5,44
ST 4	5,65	5,52
ST 5	5,58	5,6

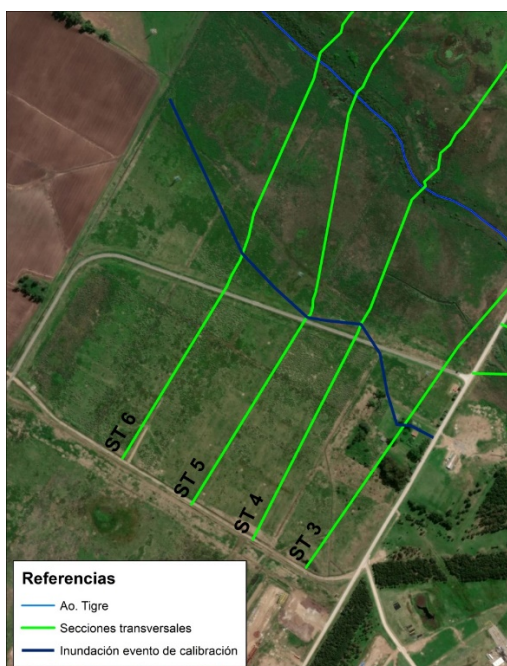


Figura 4-11: Curva de inundación para el evento de calibración.

4.5 SIMULACIÓN DE EVENTOS EXTREMOS

Se utiliza el modelo calibrado para simular eventos de inundación extremos con diferente recurrencia y evaluar sus efectos sobre el predio en estudio. Para esto, se ingresan como condición de borde de aguas arriba los hidrogramas con período de retorno: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años, resultantes de la modelación hidrológica.

A su vez, ante la posibilidad de ocurrencia de eventos extremos de nivel en el Río de la Plata, en conjunto con crecidas en el arroyo del Tigre, las condiciones de borde de aguas abajo establecidas son niveles correspondientes a de período de retorno 2, 5, 10, 50 y 100, las cuales se obtienen del análisis de extremos de la serie de niveles en el puerto de Montevideo. A su vez también se realizan corridas ingresando tirante normal en la desembocadura, con fines comparativos, para evaluar el posible efecto del remanso del Río de la Plata en la zona de estudio. En total se realizan 36 simulaciones, combinando los distintos escenarios mencionados.

Una vez que se realizan las simulaciones, se comparan los resultados, y se observan diferencias mínimas entre los niveles alcanzados en la zona de estudio, aguas arriba de Av. Italia y Berro, para eventos con igual recurrencia en las precipitaciones pero diferentes condiciones de borde aguas abajo. En el peor de los casos, correspondiente al evento de precipitación de 100 años de período de retorno, estas diferencias llegan a los 10 cm entre corridas con tirante normal y con nivel de período de retorno 100 años en el Río de la Plata, lo cual se encuentra comprendido dentro del error de los resultados del estudio. A modo de ejemplo, se presenta una imagen en la Figura 4-12 comparando las manchas de inundación en ambos casos, en ella se aprecia lo poco significativas que son las diferencias de nivel mencionadas.

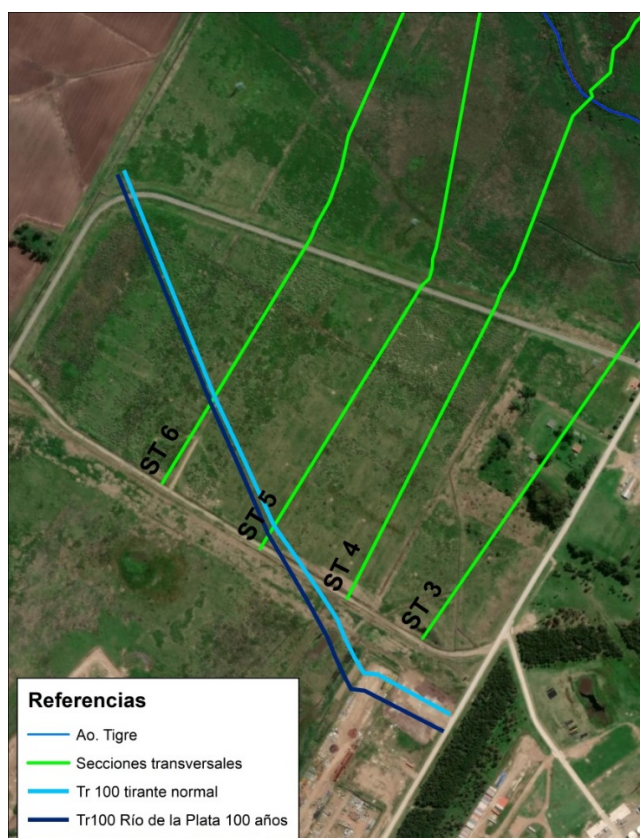


Figura 4-12: Comparación de curvas de inundación para el evento de período de retorno 100 años con condición de borde de tirante normal en la desembocadura, y asignando un nivel en el Río de la Plata correspondiente a período de retorno 100 años.

Estos resultados, sumados a los obtenidos durante la calibración, llevan a concluir que la influencia del Río de la Plata sobre las inundaciones del predio no es significativa, considerándose como causa principal las crecidas del arroyo del Tigre. Para evaluar los efectos de la inundación en el mismo, se consideran únicamente las corridas con tirante normal en la condición de borde de aguas abajo. Los resultados de estas corridas para las secciones de interés se presentan en la Tabla 4-4. Luego en la Figura 4-13 se muestran las curvas de inundación sobre el predio para las distintas recurrencias. En el ANEXO I se presentan las láminas correspondientes a las líneas de crecida mapeadas sobre relevamiento fotogramétrico y las profundidades estimadas para cada evento considerado. Cabe destacar que el error acumulado entre la modelación hidrodinámica y el modelo de terreno utilizado es de alrededor de 0,5 m, lo que hace que en un terreno tan plano como el que se estudia en este informe, exista un margen de error considerable para la ubicación en planta de las líneas de crecida y profundidad, por lo cual las láminas presentadas en el ANEXO I se deben tomar como indicativas y no como taxativas.

Tabla 4-4: Cotas máximas de inundación según recurrencia en las secciones transversales ubicadas sobre el predio en estudio.

Sección	Calibración	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 25	Tr 50	Tr 100
ST 3	5,44	5,42	5,61	5,86	6,19	6,39	6,51
ST 4	5,53	5,48	5,69	5,92	6,24	6,44	6,56
ST 5	5,6	5,55	5,76	5,98	6,28	6,48	6,61
ST 6	5,67	5,61	5,83	6,03	6,31	6,51	6,64

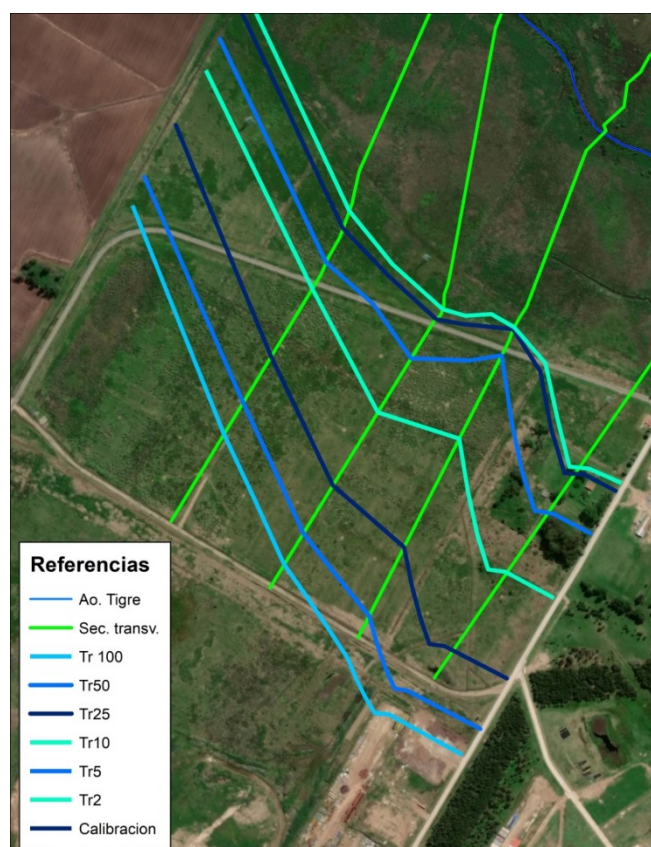


Figura 4-13: Curvas de inundación sobre el predio en estudio para distinta recurrencia.

Se hacen las siguientes observaciones respecto a los resultados:

- La zona más comprometida del predio en cuanto a inundaciones se ubica sobre el Noreste del mismo, pues se trata de su parte más baja.
- El problema de inundación pasa a ser significativo en inundaciones mayores a la de 10 años de período de retorno, ya que, en esos casos, no sólo se ve anegada una gran parte del predio debido a la crecida del arroyo, sino que además se ve comprometido el drenaje del agua que caiga sobre el mismo, por encontrarse sumergidas las canaletas que cumplen esta función. Se profundizará sobre esta problemática en el estudio hidrológico del predio más adelante.
- Se puede ver que los efectos de la crecida de diciembre de 2018 se ubican entre los de los eventos de período de retorno 2 y 5 años.

Cabe mencionar que la calle que rodea al terreno se modela como transparente al flujo, ya que la misma es atravesada por 4 grupos de alcantarillas que permitirían el pasaje hacia el terreno en caso de inundación, aunque la misma no se vea superada. No obstante, es de interés para el problema conocer con qué recurrencia de inunda la misma, ya que eso sería un agravante significativo del problema. Para esto se realiza una comparación de su cota de coronamiento con las cotas de inundación, en cada una de las secciones transversales. Esta se presenta en la Tabla 4-5. Se representan en color los casos en que la misma se ve sobrepasada.

Se observa que existe riesgo de sobrepasamiento únicamente en la zona más baja de la calle, que coincide con el sector más bajo del predio. Los resultados son coherentes con lo observado en la fotografía de la Figura 4-3, donde se observa algo de agua sobre la calle, para el evento, que corresponde a un período de retorno entre 2 y 5 años.

Tabla 4-5: Comparación de cotas de calle con cotas de inundación estimadas.

Sección	Calibración	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 25	Tr 50	Tr 100	Cota calle
ST 3	5,44	5,42	5,61	5,86	6,19	6,39	6,51	5,45
ST 4	5,53	5,48	5,69	5,92	6,24	6,44	6,56	6,2
ST 5	5,6	5,55	5,76	5,98	6,28	6,48	6,61	6,78
ST 6	5,67	5,61	5,83	6,03	6,31	6,51	6,64	7,2

5. ESTUDIO DEL PREDIO

Además de realizarse la caracterización hidrológica de la cuenca y de determinarse el riesgo de inundación en el predio por parte del arroyo del Tigre, se lleva a cabo un estudio de menor escala, para evaluar las condiciones actuales de drenaje en el predio ante eventos de precipitación. Esto implica en primer lugar un análisis cualitativo del drenaje, en base a la topografía del terreno, observaciones por medio de imágenes aéreas y satelitales, observaciones in situ y lo constatado durante el estudio del arroyo. Posteriormente se analizan las características del flujo en las zanjas de drenaje mediante una modelación hidrológica y modelo hidrodinámico unidimensional simple del flujo en las mismas. A continuación se detallan los estudios realizados.

5.1 CARACTERIZACIÓN DEL DRENAJE

En los registros fotográficos consultados se observa que el predio es atravesado por cuatro zanjas, excavadas de Sur a Norte, en sentido perpendicular al arroyo. Éstas se extienden incluso desde y hacia los terrenos linderos, atravesando la calle de acceso al parque costero mediante alcantarillas. Las mismas fueron relevadas durante la visita al sitio, constatándose que las 4 son idénticas. Cada una consta de dos tuberías de sección circular de 50 cm de diámetro, aproximadamente 11 m de largo y pendiente de fondo 0,0035 m/m. En la Figura 5-1 se observa una fotografía de una de ellas.

Además de esas zanjas, se observa otra que atraviesa el predio de Oeste a Este, en sentido perpendicular a las anteriores. La Figura 5-2 muestra una imagen satelital del predio, extraída de Google Earth, donde se aprecia todas las zanjas.



Figura 5-1: Alcantarilla que conduce el agua de los canales a través del camino de acceso al parque costero.



Figura 5-2: Imagen satelital del terreno, en la cual se aprecian las zanjas que lo atraviesan.

Dentro de la información proporcionada por UTE se cuenta curvas de nivel, que caracterizan la topografía del predio. A su vez, los vuelos con dron realizados durante la visita al sitio permitieron obtener un modelo digital de terreno del mismo, para luego extraer curvas de nivel. Esto último se muestra en la Figura 5-3 y la Figura 5-4 respectivamente.

Se observa claramente que la parte más alta del predio se ubica sobre su esquina Oeste, mientras que su parte más baja está al Este, en las proximidades del corte entre Av. Italia y Berro y el camino de acceso al parque costero, habiendo un desnivel cercano a los 2,5 m entre ambos extremos. Se observa además un punto alto sobre el que se ubica una antena, en la zona del centro del terreno.

Las características descritas dan a entender que las zanjas cumplen la función de captar el agua que escurre siguiendo la pendiente natural del terreno y derivarla de forma concentrada hacia el arroyo, evitando así que la misma se acumule en la zona más baja, donde se ubican algunas construcciones. Los resultados del estudio de inundación muestran además que la zona baja es la que se ve más afectada por las crecidas del arroyo, complicando más aún el drenaje de ese sector durante eventos conjuntos de precipitación y crecida. En esos casos las zanjas cumplen la función de amortiguar el problema en esa zona, evitando la llegada de una parte del agua. En las imágenes, la zanja que se ve más marcada es la que rodea la zona de viviendas, lo que refuerza la hipótesis de que cumple la función de dilatar el anegamiento de ese sector del terreno.

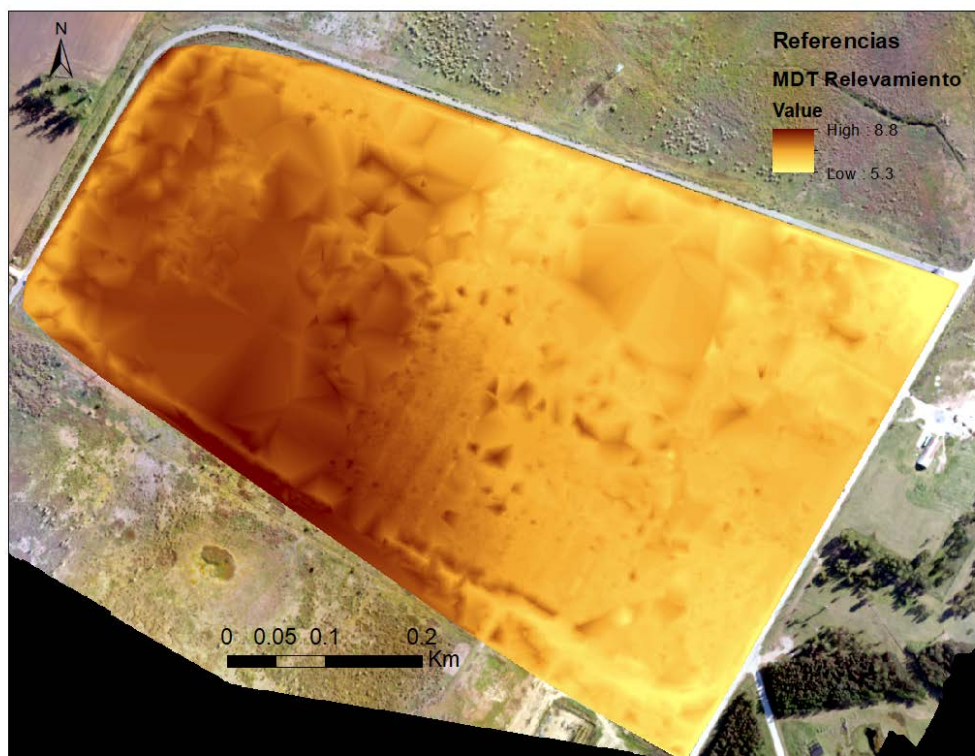


Figura 5-3: Modelo digital de terreno generado a partir del relevamiento con drone.

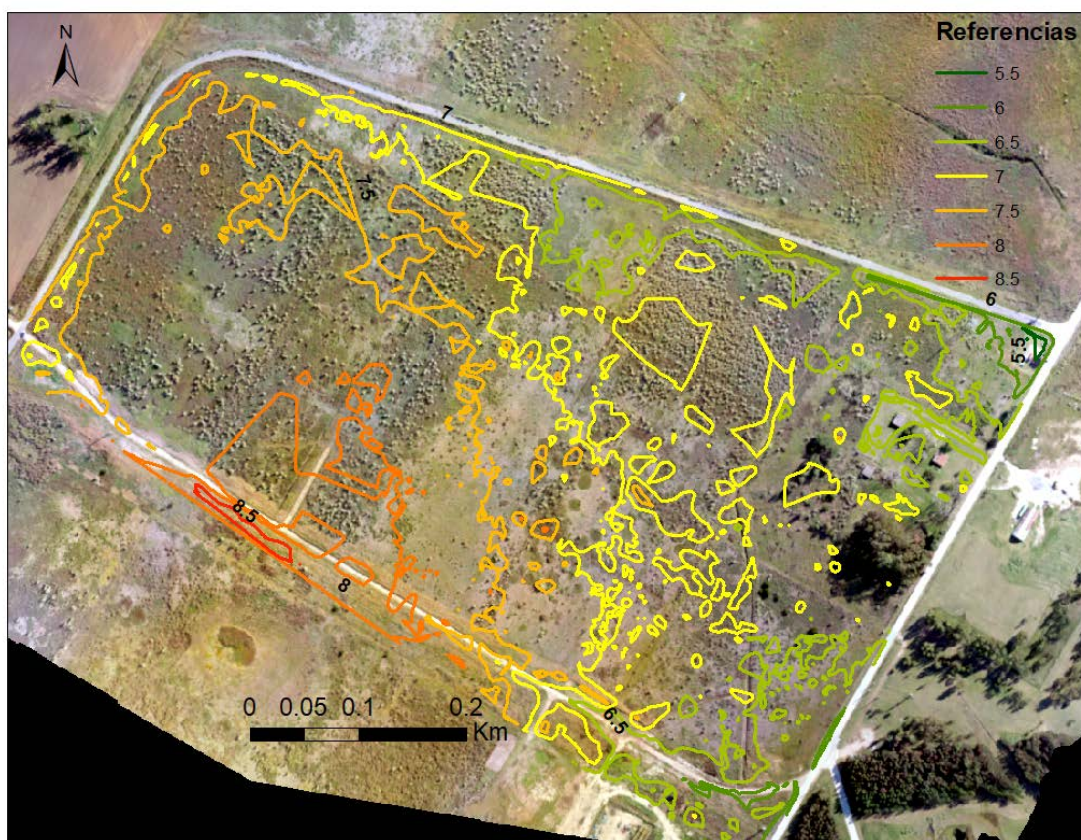


Figura 5-4: Curvas de nivel del predio generadas a partir del MDT.

5.2 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Para el cálculo de los escurrimientos, debido al tamaño y las características del predio, se implementa el método racional. Mediante el mismo se calcula el caudal pico como el producto del área de drenaje, el coeficiente de escorrentía del predio y la intensidad de precipitación del evento de diseño.

Los valores de coeficiente de escorrentía e intensidad están tabulados y dependen de las características del sitio y el periodo de retorno. Este último se fija en 10 años, en base a las recomendaciones para el cálculo de drenajes del manual de Diseño de Sistemas de Aguas Pluviales Urbanas publicado por DINASA. A su vez, se trata del caso más exigente, ya que para eventos de recurrencias menores (mayor período de retorno) el predio es inundado por la crecida del arroyo y el drenaje se ve imposibilitado.

En estas condiciones para un coeficiente de escorrentía de 0,5 (correspondiente a zonas verdes con un aumento en la impermeabilización del 20%), una intensidad de 62 mm/h y para el área del predio de 0,36 km², se obtiene un caudal pico de 3,09 m³/s.

5.3 ESTUDIO DE FLUJO EN ZANJAS

El flujo en las zanjas se modela con un método simplificado que combina la ecuación de fricción de fondo de Manning con las ecuaciones de flujo gradualmente variado, considerándolas rectilíneas y de sección uniforme. Se toma también en consideración el efecto de las alcantarillas de la calle de acceso al parque y su posible remanso.

Los parámetros del problema considerados son: la geometría de la sección transversal de las zanjas; la geometría de las alcantarillas; las pendientes de fondo y los coeficientes de rugosidad de Manning.

Las características de las alcantarillas son las descritas anteriormente, mientras que los canales se consideran trapezoidales, de ancho de fondo 1,2 m, pendiente de los taludes 1.5H:1V, y profundidad 1 m en base a lo observado en campo. La pendiente de fondo de los canales se equipara a la del terreno, distinguiéndose dos tramos: aguas arriba de las alcantarillas las mismas son 0,0025, mientras que aguas abajo el terreno es más empinado, con pendiente de 0,008. En cuanto al coeficiente de Manning, para las alcantarillas se utiliza el valor 0,011, típico para paredes de hormigón, mientras que para las zanjas se observó que actualmente se encuentran cubiertas de vegetación, sin ningún mantenimiento, por lo que se considera un valor de 0,05, de acuerdo a la bibliografía consultada (Chow, 1994).

Como se mencionara, el caudal determinado por el cálculo hidrológico es de 3,09 m³/s, el cual corresponde al flujo generado por toda la cuenca de aporte, que abarca el predio en estudio y parte de los predios linderos. No es esperable que todo ese caudal sea transportado por una sola zanja, sino que el mismo se verá dividido. Al haber 4 zanjas, es esperable que ese caudal se divida de forma aproximadamente equitativa entre las mismas, de acuerdo a la pendiente del terreno y el área de captación de cada una de ellas. No obstante, para estar del lado de la seguridad, se utiliza un tercio del caudal hidrológico como condición de borde de aguas arriba.

En cuanto a la condición de borde de nivel, aguas abajo, se consideran dos escenarios:

- En primer lugar un escenario con tirante normal en el tramo de aguas abajo de la alcantarilla, considerando que no hay una crecida en el arroyo;
- En segundo lugar, se considera una crecida de 10 años de período de retorno en el arroyo, ingresándose aguas abajo el tirante que genera dicha condición. Este tirante es

variable en función de la zanja que se considere, por lo que se considera únicamente el caso más crítico, que es el de la zanja que bordea la zona de construcciones, en donde el tirante es de 38 cm, inmediatamente aguas abajo de la alcantarilla.

Los tirantes y velocidades máximos obtenidos se presentan en la Tabla 5-1 a continuación, mientras que en la Figura 5-5 y la Figura 5-6 se muestran las curvas de remanso para el tramo de aguas arriba de la alcantarilla, comprendido dentro del terreno.

Tabla 5-1: Resultados de niveles y velocidades obtenidos.

Condición de borde	Tirante aguas abajo alcantarilla (m)	Tirante aguas arriba alcantarilla (m)	Tirante en terreno (m)	Velocidad máxima (m/s)
Tirante normal	0,56	1,15	0,77	0,57
Crecida Tr 10 años	0,38	1,08	0,77	0,57

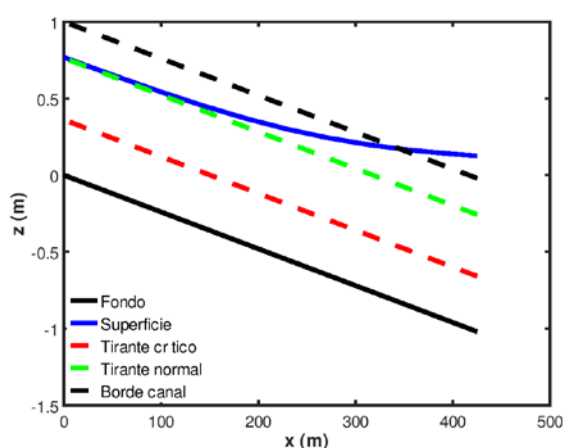


Figura 5-5: Curva de remanso producida con condición de borde de tirante normal aguas abajo.

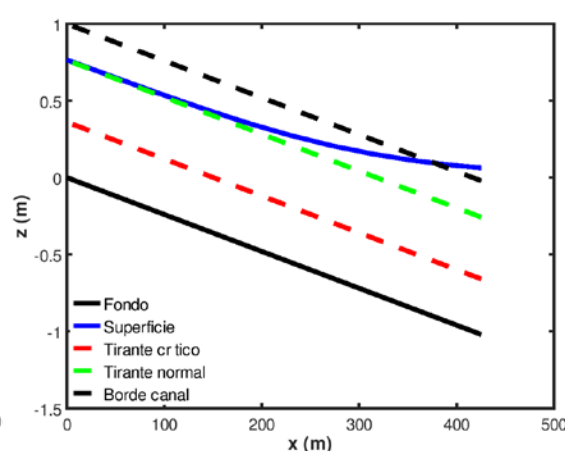


Figura 5-6: Curva de remanso producida con condición de borde aguas abajo correspondiente al tirante producido por crecida de arroyo del Tigre de 10 años de período de retorno.

Se observa que en ambos casos los resultados son similares y los efectos que se producen son idénticos. En primer lugar se produce un remanso aguas arriba de la alcantarilla que no alcanza a sobrepasar la calle (la cual se ubica 1,2 m por encima del zampeado, según el relevamiento realizado) pero que puede producir el desborde del canal localmente, afectando parte del terreno. En la realidad este efecto se puede ver atenuado ya que es posible que parte del agua que se acumule aguas arriba vaya a parar a la zanja que rodea la calle. Luego se observa que hacia aguas arriba el tirante estimado de flujo, tiende al tirante normal, que es cercano a los 80 cm, por lo que no se produciría desborde. A su vez, la velocidad máxima alcanzada no representa un peligro desde el punto de vista de la erosión, ya que, según el manual de DINASA, la velocidad necesaria para producir erosión en cunetas revestidas de pasto es de 1,05 m/s.

Se modela además una situación considerando únicamente un recubrimiento de pasto en los canales, simulando un caso en que los mismos sean bien mantenidos, para evaluar las diferencias con la situación actual. Esto se refleja en el número de Manning seleccionado, que en este caso es de 0,025. En este caso se modela únicamente con tirante normal en la condición de borde, tras constatar que los efectos son similares en las dos situaciones representadas anteriormente. Los resultados se muestran en la Tabla 5-2 y Figura 5-7 a continuación.

Se observa que, en este caso, el efecto de remanso local se mantiene, pero el tirante de flujo disminuye con su consecuente incremento de la velocidad, acercándose a la velocidad límite para los efectos erosivos. Un cambio en el mantenimiento de las zanjas produce un mayor margen de seguridad en cuanto al desborde de las mismas, pero aumentando el riesgo de desencadenar procesos erosivos.

Tabla 5-2: Resultados de simulación considerando mantenimiento de zanjas.

Condición de borde	Tirante aguas abajo alcantarilla (m)	Tirante aguas arriba alcantarilla (m)	Tirante en terreno (m)	Velocidad máxima (m/s)
Tirante normal	0,39	1,08	0,54	0,96

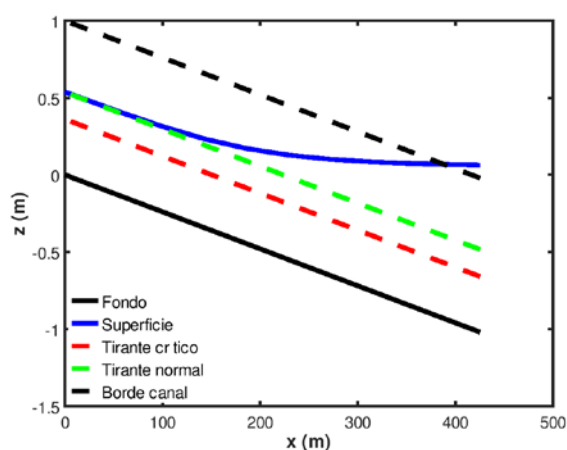


Figura 5-7: Curva de remanso en caso con mantenimiento de zanjas.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los estudios realizados muestran que existe riesgo de inundación sobre una parte importante del predio debido a las crecidas del arroyo del Tigre. La parte más afectada del mismo es su esquina Este, que es también su parte más baja y en donde se ubican algunas edificaciones. El camino de acceso al parque costero corre riesgo de verse sobrepasado ante eventos de crecida mayores a los 2 años de período de retorno en su parte más baja, próxima a su intersección con Av. Italia y Berro.

En cuanto a eventos de mayor magnitud, se constata que para periodos de retorno mayores a 10 años, el predio se ve inundado por el aumento de nivel del arroyo. Esto implica que, para las cotas actuales de terreno, la limitante en esos casos no es el sistema de drenaje del predio, sino la crecida del arroyo.

Las zanjas que atraviesan el predio cumplen la función de evacuar progresivamente el agua pluvial que cae sobre el terreno y su cuenca de aporte, que también incluye parte de los terrenos linderos, hacia el arroyo del Tigre. De esa forma las mismas mitigan la posible anegación de la zona baja, que de otra forma podría verse comprometida. Actualmente esas zanjas son capaces de evacuar la lluvia de eventos de hasta 10 años de período de retorno sin desbordes ni riesgo de erosión, aunque con algún posible remanso local en las alcantarillas del camino de acceso.

Estos factores deben tenerse en cuenta para la instalación del Parque Solar Fotovoltaico en el predio. Si el mismo no se fuera a rellenar, las celdas de generación deberán colocarse a una altura tal que no se vea comprometido su funcionamiento, en función de su ubicación en el predio y del riesgo de inundación que se quiera asumir. En ese sentido, si el área disponible fuera a utilizarse solo parcialmente, se recomienda utilizar la zona alta, ubicada sobre la esquina Oeste, donde riesgo es menor.

Dado que las zanjas del predio cumplen una función significativa para su drenaje, y evitan la afectación de las edificaciones preexistentes, su eliminación debe ser acompañada de medidas alternativas de drenaje, que permitan la correcta evacuación del agua de lluvia. Esas medidas dependen de las obras que se vayan a realizar en el predio y deben tender a conducir el agua hacia el arroyo evitando que se produzcan acumulaciones en zonas bajas.

Si las zanjas fueran anuladas sin realizarse obras alternativas se corre el riesgo producir una acumulación significativa de agua en la esquina Este ante eventos de precipitación, que empeore los efectos de las crecidas del arroyo, o que produzca anegaciones aún en los casos en que el arroyo no crezca. En ese caso, la pendiente natural del terreno, así como las cunetas que lo rodean, conducirían el agua hacia la esquina del camino de acceso y Av. Italia y Berro, en donde hay una alcantarilla pequeña (igual a las que conducen el agua de los canales, con dos unidades de 50 cm de diámetro) que no daría abasto, produciéndose un remanso.

ANEXO I: MAPEO DE LÍNEAS DE CRECIDA Y PROFUNDIDADES ESTIMADAS



Coordenadas WGS84-UTM21S



6156000

541200

6155800

6155600

541000

6155400

6155200

540800

6155600

542000

6155400

6155200

541800

6155000

541600

6154800

6154600

0 50 100 150 200 m

Coordenadas WGS84-UTM21S



Coordenadas WGS84-UTM21S



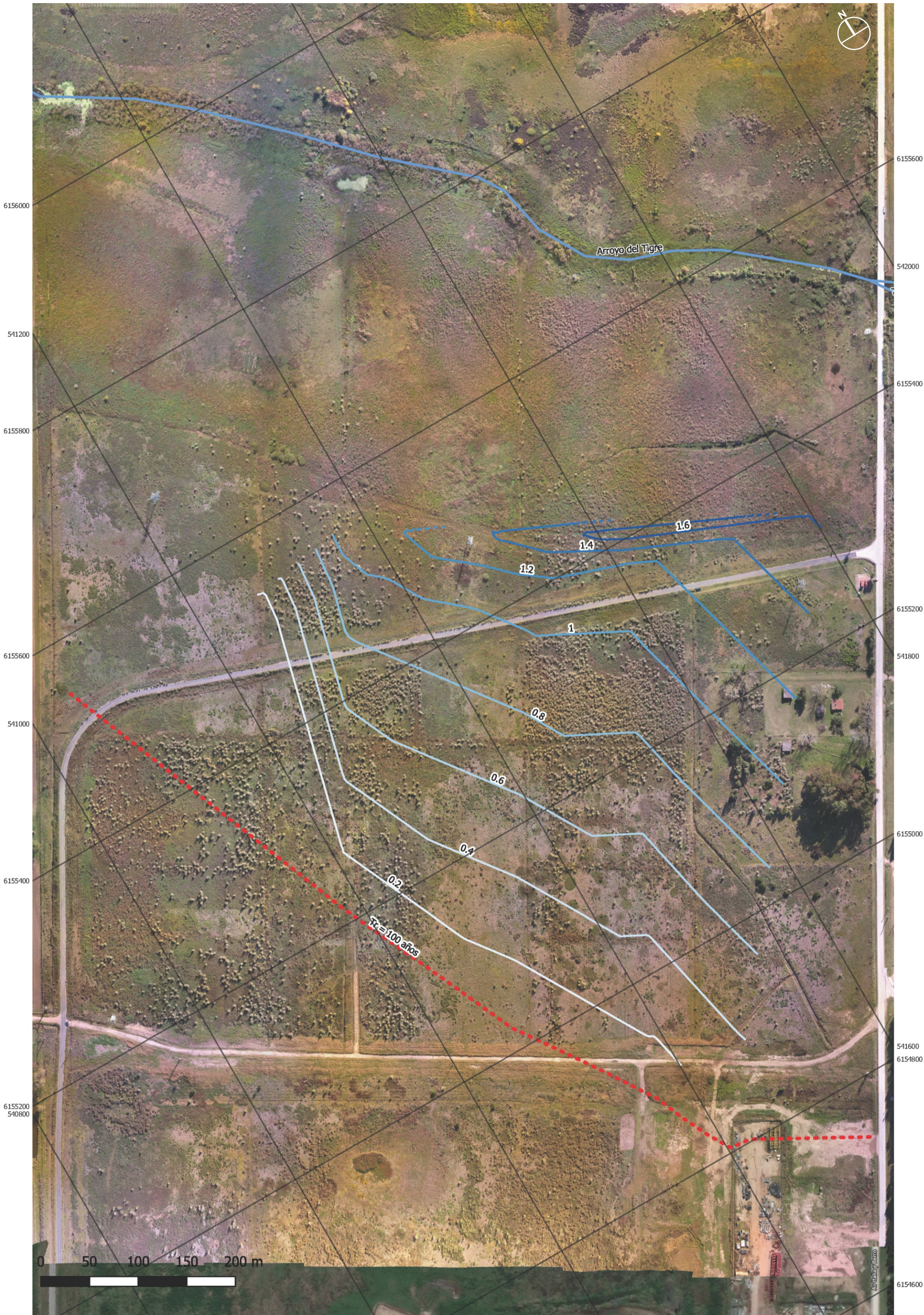
Coordenadas WGS84-UTM21S



Coordenadas WGS84-UTM21S



Coordenadas WGS84-UTM21S



Coordenadas WGS84-UTM21S