

Análisis hidráulico de un tramo de terraplén ferroviario entre Concordia y Chajarí

Ignacio Adolfo Cueto, Santiago Julio Pastine

Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires (UBA), Av. Las Heras 2114, Buenos Aires, Argentina

E-mail: nachoacueto@hotmail.com

RESUMEN

En el presente proyecto se estudia la hidrología de una zona de Entre Ríos, la cual posee una línea ferroviaria que la cruza de sur a norte en el tramo comprendido entre las ciudades Concordia y Chajarí. Los taludes del terraplén de la vía en cuestión acusan, prácticamente desde su inauguración, problemas de estabilidad, contando con numerosos deslizamientos a lo largo de su vida en servicio, mermando la capacidad productiva de la línea en cuestión.

Se revisaron informes de estudios geotécnicos e informes que acusan deslizamientos luego de precipitaciones intensas y que el agua en el terraplén supera la cota de intradós de las alcantarillas instaladas.

El Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la UBA, realizó en el año 2015 una campaña de revisión en la cual se observó que las alcantarillas en cuestión eran escasas y no tenían el mantenimiento adecuado.

El objetivo del presente trabajo es analizar la situación presente de la hidrología de la zona, dividir la cuenca de análisis en subcuencas a partir de la construcción de un modelo digital de elevación del terreno en base a datos del IGN y satelitales, identificar los cursos naturales de agua y los puntos donde deben implantarse alcantarillas debido a la interposición del terraplén ferroviario al curso natural del agua en el terreno, determinar los caudales de diseño mediante la implementación de modelos hidrológicos continuos en base al software HEC-HMS y diseñar las alcantarillas necesarias a través del software HEC-RAS.

Palabras clave: Terraplén ferroviario, hidrología, alcantarillas

INTRODUCCIÓN

Se estudia el problema de estabilidad de taludes de un terraplén en la provincia de Entre Ríos. Específicamente se estudia el tramo comprendido entre las ciudades Concordia y Chajarí.

Se realizó primero una revisión de información histórica del tramo, que comprende informes desde 1978 hasta un estudio de suelos realizado en 2003.

En los informes presentados entre los años 1984 y 1992 se destacan los reiterados deslizamientos en los taludes luego de lluvias, y cómo en ciertas secciones incluso existiendo alcantarillas el caudal que escurre durante las tormentas excede con creces la capacidad de las mismas. Para ciertas condiciones de precipitación se ha registrado que el nivel del agua supera 50cm la cota de intradós de las alcantarillas.

Debido a estos informes y la falta de información sobre la posición, cantidad y geometría de las alcantarillas existentes se decidió realizar un análisis hidrológico básico de la zona de estudio sin tener en cuenta las alcantarillas existentes.

El estudio comprende las siguientes tareas:

1. Identificación de las cuencas hidrográficas.
2. Obtención de las subcuencas hidrográficas a partir de un sistema de información geográfica (GIS).
3. Identificación de los cauces que se interponen al terraplén del ferrocarril, siendo necesaria la colocación de una alcantarilla.
4. Recopilación de datos de precipitación en la zona.
5. Implementación de un modelo hidrológico a partir del software HEC-HMS del U.S. Army Corps of Engineers (Estados Unidos).
6. Determinación de la geometría y cantidad de alcantarillas a partir del software HEC-RAS del U.S. Army Corps of Engineers (Estados Unidos).

OBJETIVOS

El objetivo del presente informe es describir las tareas realizadas e informar la cantidad y geometría de las alcantarillas a disponer a lo largo de la traza del ferrocarril.

El alcance del estudio hidrológico en cuestión es de nivel de anteproyecto. No contará con estudios en campo, sino que se estudiará solamente utilizando la información disponible.

ÁREA DE ESTUDIO

El área en estudio, que puede verse en la Figura 1, comprende la traza ferroviaria del Ferrocarril General Urquiza entre las ciudades Concordia y Chajarí, provincia de Entre Ríos.

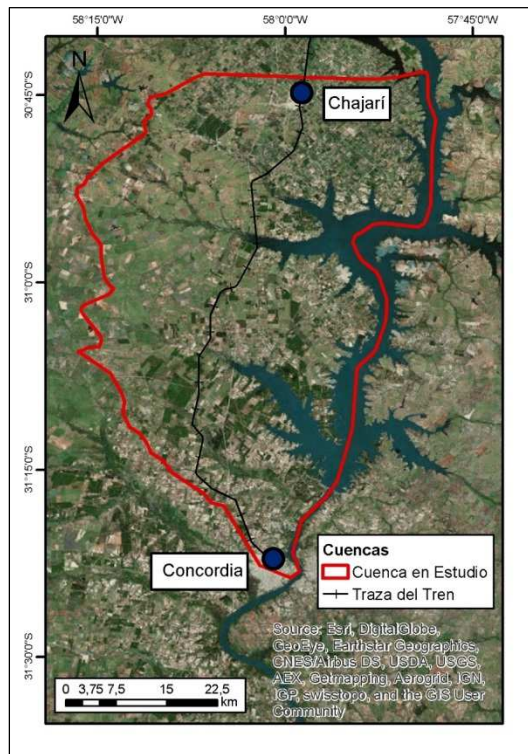


Figura 1. - Área de estudio

MODELO HIDROLÓGICO

Procesamiento hidrológico

El procesamiento hidrológico consiste en la identificación de las cuencas y la subdivisión de las mismas.

Las cuencas se obtuvieron de la página web de la Dirección de Hidráulica de Entre Ríos [1].

Se utilizó para obtener una estimación de la topografía un sistema de información geográfica (GIS) y los modelos digitales de elevación (MDE) de la República Argentina del IGN basados en la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) [2], como se observa en la Figura 2.

Se definió en base a estos MDE la dirección del flujo, donde se da al programa como información base el raster con el que se trabaja y da como resultado de esta etapa un mapa de puntos. Se procede luego a generar un raster de acumulación de flujo, donde el programa en base al mapa de puntos generado en el paso anterior ve qué punto vierte sobre cuál. Una vez logrado esto se puede generar la capa de definición de flujo que da la traza de los cursos de agua en la zona de estudio tal como se ve en la Figura 2.

La capa de información de definición de flujo permite mediante procesamiento del programa definir subcuencas.

Con la traza del tren y la división de subcuencas obtenidas, se buscaron aquellas subcuencas cuyo flujo se ve interrumpido por la traza, generando una zona de inundación. En estas zonas se produce acumulación de agua al pie del terraplén o un desvío del cauce (Figura 3), produciéndose agrietamiento y entrada de agua al núcleo del terraplén, aumentando las presiones de poros, disminuyendo la resistencia al corte y consecuentemente, disminuyendo la estabilidad.

Se identificaron 28 puntos de cierre donde se estudió la transformación de precipitación a caudal, que pueden verse en la Figura 2. Estas zonas se estudiaron con el software hidrológico gratuito HEC-HMS.

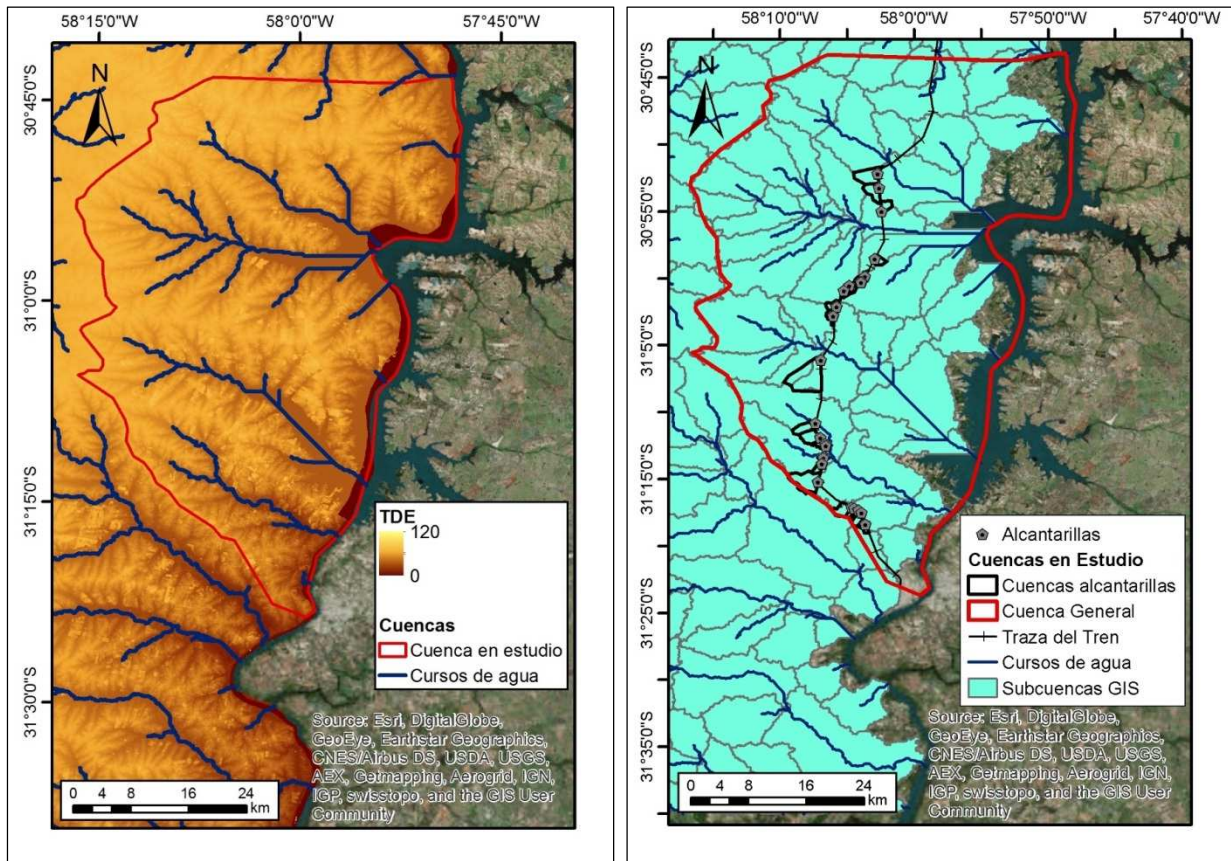


Figura 2. - Raster del IGN (izq.). Subcuencas generadas (der.)



Figura 3. - Sector con acumulación de agua.

Puede verse que una de las subcuencas delimitadas no se corresponde con lo generado por el programa. Esto se debe a que en las imágenes satelitales utilizadas para estudiar el problema y la posición de las alcantarillas se reconoce claramente un curso de agua que el programa no llegó a reconocer, como puede observarse en la Figura 4, con lo cual se adoptó una subcuenca que no está en concordancia con lo sugerido por el software.

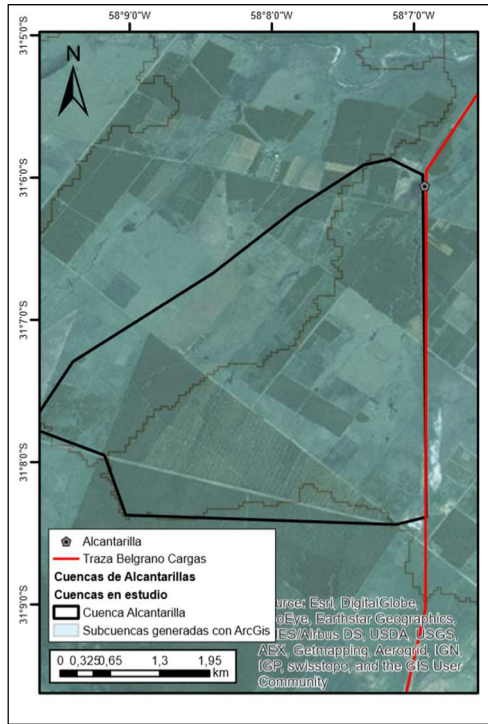


Figura 4. - Detalle de subcuena en la cual no se condice la limitación de subcuencas con lo observable.

Datos de precipitación

Para la determinación de la precipitación de diseño de cada subcuena se utilizaron las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) de Concordia [3], Figura 5.

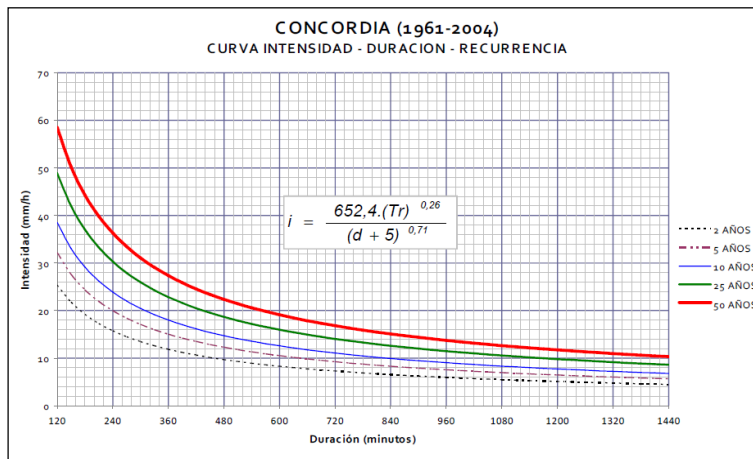


Figura 5. - Curvas IDF correspondientes a la estación de Concordia (fuente: UTN, Facultad Regional Concordia, 2009 [3]).

Donde T_r es el período de retorno y d la duración de la tormenta.

Para el presente trabajo, se utilizaron las curvas correspondientes a una recurrencia de 25 años para el diseño de las alcantarillas y 50 años para verificación.

Tiempo de concentración (t_c) y tiempo de retardo (t_{lag})

Se determinó el tiempo de concentración como la suma del tiempo de traslado sobre diferentes porciones características del recorrido del flujo en la cuenca.

$$T_c = T_{sheet} + T_{shallow}$$

Siendo T_{sheet} es el tiempo de traslado sobre porción de flujo en lámina (en horas) y $T_{shallow}$ el tiempo de traslado sobre segmentos de cauce de bajo tirante (en segundos):

$$T_{sheet} = \frac{0.007 \cdot (N \cdot L)^{0.8}}{(Pd^{0.8} \cdot S^{0.4})}$$

Donde L es la longitud de escurrimiento (pies), P_2 es la precipitación en pulgadas de 2 años de recurrencia y 24hs de duración, S es la pendiente media (adimensional) y N es la rugosidad (adimensional).

$$T_{shallow} = \frac{L}{V}$$

Donde L es la longitud del escurrimiento (metros) y V la velocidad promedio (m/s) estimada a partir de la siguiente expresión, válida para superficies no pavimentadas:

$$V = 4.918 \cdot S^{0.5}$$

El tiempo de retardo se cuantificó como el 60% del tiempo de concentración.

Modelación hidrológica

Se utilizó el software HEC-HMS 4.1 desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers (Estados Unidos). Este software permite simular la escorrentía superficial resultante de una precipitación.

Para la transformación de precipitación a escorrentía superficial se adoptó el método del Número de Curva (CN) y el hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos.

Para la estimación del CN se analizaron los tipos de suelos y uso de los mismos a partir de la información publicada por el INTA [4]. En la Figura 6 (izquierda) se muestran las capas de suelo de los departamentos de Federación y Concordia mientras que en la Figura 6 (derecha) se muestran los usos del suelo. Puede observarse que existen dos zonas bien diferenciadas de uso del suelo. Por ello se adoptaron dos valores de CN recomendados por la bibliografía [5]. Los valores adoptados para cada subcuenca se presentan en la Tabla 1.

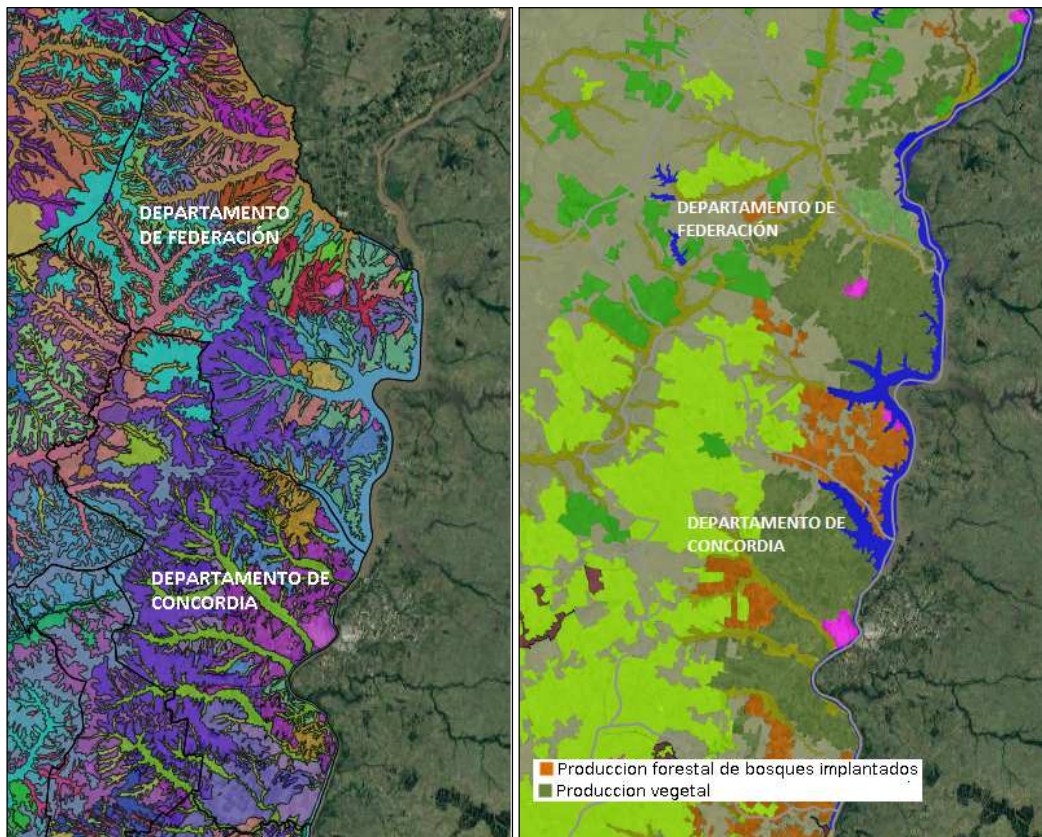


Figura 6. - Capas y usos del suelo.

Tabla 1. - Valores de CN adoptados.

CN	Subcuencas
88	1, 2, 3, 20 21 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28
77	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19

Precipitación sobre la cuenca

Se realizó la distribución temporal de la tormenta de diseño para 25 y 50 años de recurrencia utilizando los hietogramas propuesto por la Dirección Hidráulica de Entre Ríos [3], construidos a partir del estudio estadístico de tormentas de distinta duración. Se cuenta con distintos hietogramas en función de las duraciones de las lluvias, con lo cual se forman 3 grupos de cuencas separándolas en función de su tiempo de concentración, el cual se asignó como duración de la lluvia. Los grupos elegidos son los que se muestran en la Tabla 2 mientras en que la Figura 7 se muestran las tormentas de diseño de cada grupo.

Tabla 2. - Grupos para definir tormentas de diseño.

Grupos	A	B	C
Alcantarilla #	4, 5, 6 y 7, 8, 10, 11, 19, 20, 25, 26, 28	1, 2, 3, 9, 14, 15 y 16, 17 y 18, 22, 23, 24, 27	12 y 13

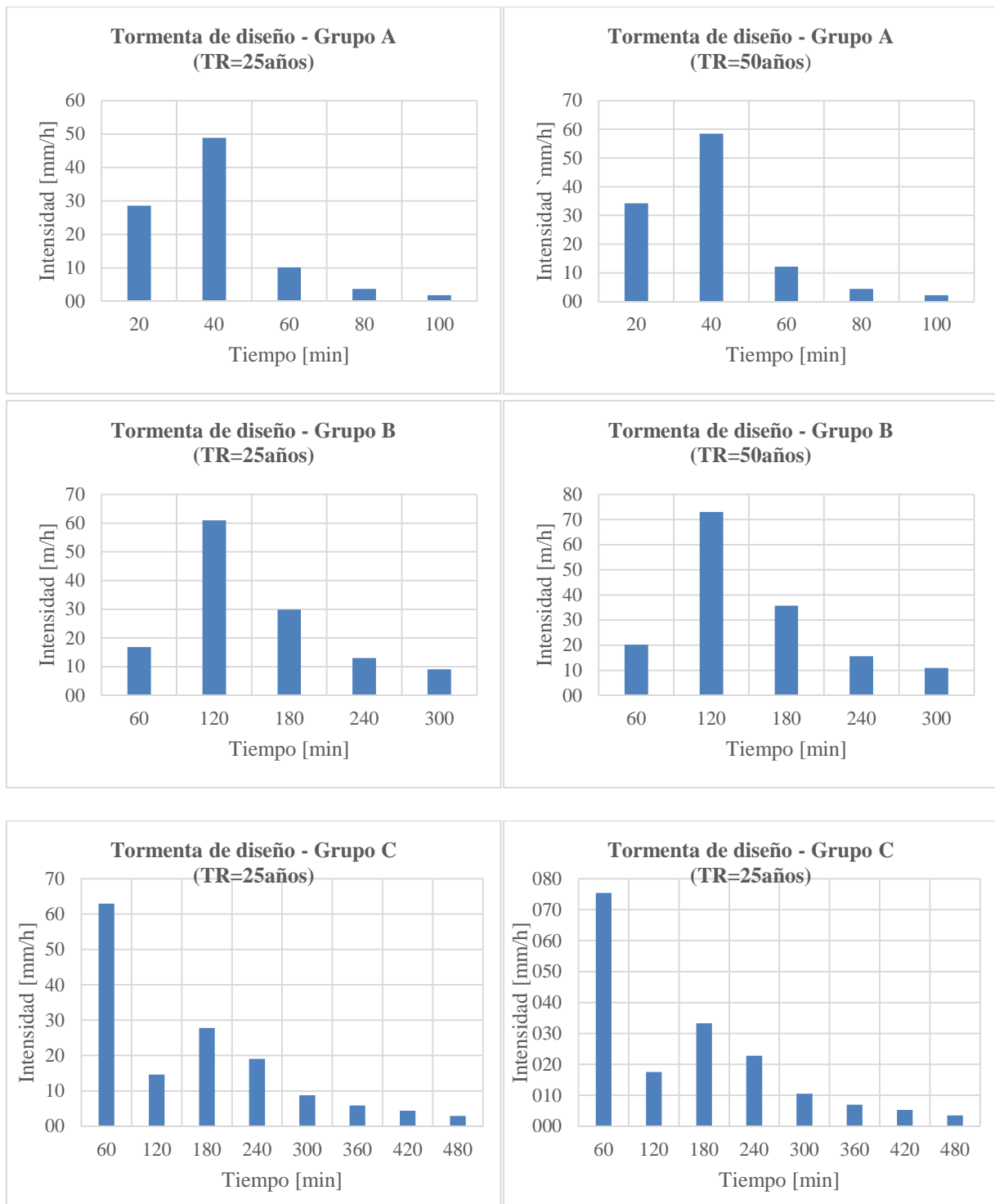


Figura 7. - Tormenta de diseño obtenida por el método de los bloques alternos para un período de recurrencia de 25 años (izq.) y 50 años (der.).

Resultados del modelo hidrológico

Las características de las subcuencas y los caudales obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. - Resultados del modelo hidrológico

Subcuencas	Área (km ²)	L (m)	S (m/m)	tc (min)	t _{lag} (min)	Q ₂₅ (m ³ /s)	Q ₅₀ (m ³ /s)
1	5,32	2880	0,0056	218	131	35,20	44,2
2	3,52	2031,00	0,0069	143	86	29,10	36,6
3	1,66	1964	0,0107	114	68	15,20	19,1
4	1,28	931	0,0064	72	43	11,90	14,3
5	0,37	474	0,0127	29	17	6,20	6,8
6	0,84	840	0,0083	59	35	4,50	5,35
7							
8	0,98	1118	0,0063	87	52	7,90	9,7
9	0,73	1097	0,0036	109	65	4,80	6,3
10	1,37	1470	0,0088	95	57	10,20	12,7
11	1,25	888	0,0090	60	36	13,20	15,7
12	13,77	5000	0,0034	455	273	24,25	26,45
13							
14	2,87	3000	0,0067	208	125	14,00	18,4
15	3,45	2450	0,0082	157	94	9,75	12,9
16							
17	1,27	1785	0,0084	116	70	4,05	5,4
18							
19	0,03	267	0,0037	30	18	0,50	0,5
20	0,32	700	0,0043	67	40	2,45	2,7
21							
22	1,08	1700	0,0088	109	65	10,10	12,7
23	7,38	3670	0,0054	275	165	42,30	53,1
24	2,77	2432	0,0070	168	101	21,20	26,6
25	0,80	1500	0,0093	94	57	9,30	10,7
26	0,72	1441	0,0090	93	56	8,50	9,8
27	1,59	1986	0,0086	127	76	13,90	17,5
28	1,23	1070	0,0047	95	57	14,30	16,5

DISEÑO DE ALCANTARILLAS

Se recurrió al software gratuito HEC-RAS 4.1.0 para simular la llegada del caudal a las alcantarillas, la existencia del talud del tren como barrera impermeable y el comportamiento de las alcantarillas frente a caudales de diseño seleccionados. Dada la variación de los caudales en las distintas cuencas en estudio se decidió tomar tres diseños, que puedan resolver todos los escenarios en las distintas subcuencas estudiadas. Se realizó la separación observando los caudales obtenidos en las distintas subcuencas.

Se cargaron los caudales máximos de cada grupo en el HEC-RAS, donde por falta de información más precisa se hizo una aproximación respetando la pendiente media del terreno y reemplazando las secciones naturales por secciones trapezoidales.

Geometría

Se determinó la geometría del canal de aproximación. Para ello se conformaron cuatro secciones.

Sección 1: Localizada aguas abajo de la alcantarilla y lo suficientemente alejada para que el flujo no se vea afectado por la estructura.

Sección 2: Localizada a una corta distancia aguas abajo de la alcantarilla.

Sección 3: Localizada a una corta distancia aguas arriba de la alcantarilla.

Sección 4: Localizada aguas arriba de la alcantarilla y lo suficientemente alejada para que el flujo no se vea afectado por la estructura.

Debido a la falta de información batimétrica de los canales se supuso que las secciones son trapezoidales y que la pendiente longitudinal es igual a la pendiente media de la subcuenca.

Las secciones 1 y 4 tienen un ancho de fondo de 400m, 1m de altura y una pendiente transversal de 300H:1V.

Las secciones 2 y 3 tienen un ancho de fondo de 30m, 3m de altura y una pendiente transversal de 10H:3V.

Definida la geometría se introdujeron las características de las alcantarillas. Para ello se especificaron la distancia de la sección aguas arriba al pie del terraplén, la longitud de las alcantarillas, la altura del terraplén y diámetro, material, cantidad, cota de intradós y posición de alcantarillas.

Debido a la falta de información de la geometría del terraplén en todas las progresivas donde se deben colocar alcantarillas se adoptó un único corte transversal para todos los casos, con una altura de 6m y una base de 24m.

Caudales de diseño

Para el diseño las alcantarillas deben trabajar a superficie libre para el caudal con una recurrencia de 25 años y no debe existir sobrepaso sobre el coronamiento del terraplén para el caudal con una recurrencia de 50.

En la Tabla 4 se observan los caudales de diseño adoptados y las subcuencas pertenecientes a cada grupo.

Tabla 4. - Caudales de diseño adoptados para cada subcuenca.

Grupo	Q₂₅ (m³/s)	Q₅₀ (m³/s)	Subcuencas
1	42,3	53,1	1, 23
2	29,1	36,6	2, 3, 4, 11, 12, 13, 14, 24, 27, 28
3	10,2	12,7	5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 26

Resultados

A continuación, se presentan los resultados del modelo para los tres grupos asignados.

En todos los casos se adoptaron alcantarillas de hormigón armado con una pendiente longitudinal de 0.001 m/m para evitar velocidades excesivas a la salida.

Grupo 1

Se adoptaron 4 alcantarillas de 2.50m. Los resultados para el caudal de 25 años de recurrencia y el caudal de 50 años de recurrencia se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. - Resultados para caudal de diseño (TR=25 años) y caudal de verificación (TR=50 años).

TR (años)	Qdiseño (m ³ /s)	#Alc	Qalc (m ³ /s)	Dadop (m)	Control	Vel.Entrada (m/s)	Vel.Salida (m/s)
25	42.3	4	10.6	2.5	Salida	3.0	3.5
50	53.1	4	13.3	2.5	Salida	3.3	3.8

En la Figura 8 se observan cortes transversales a la entrada y salida de las alcantarillas respectivamente.

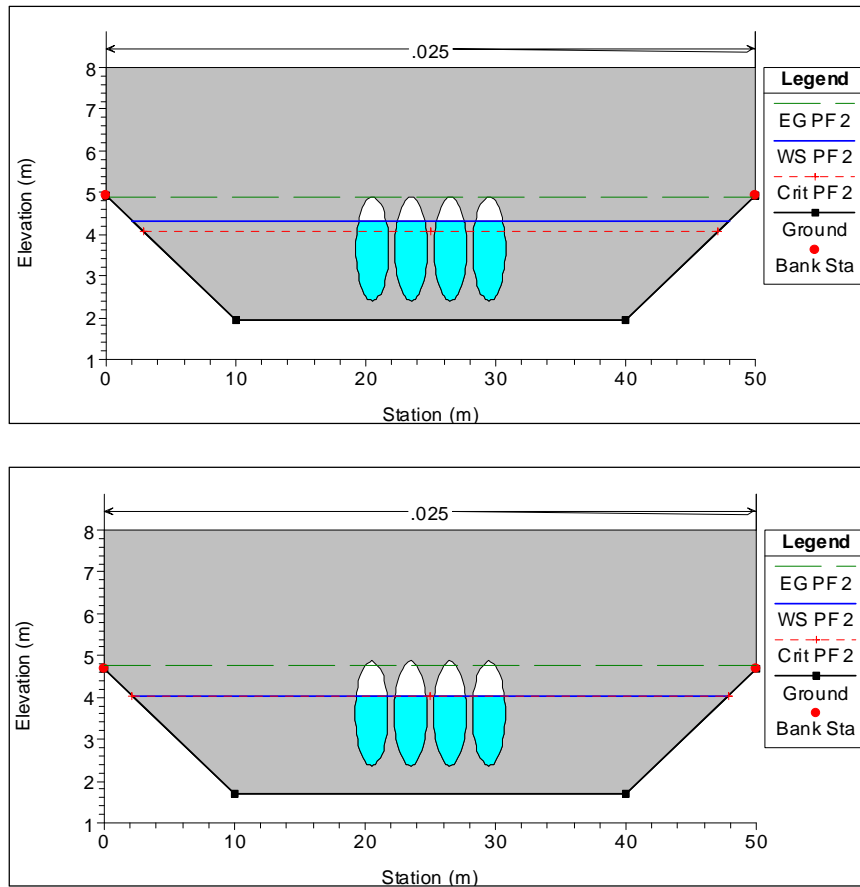


Figura 8. - Sección de alcantarillado visto desde agua arriba (arriba) y desde agua abajo (abajo).

En la Figura 9 se observan los perfiles transversales para los caudales de 25 y 50 años de recurrencia.

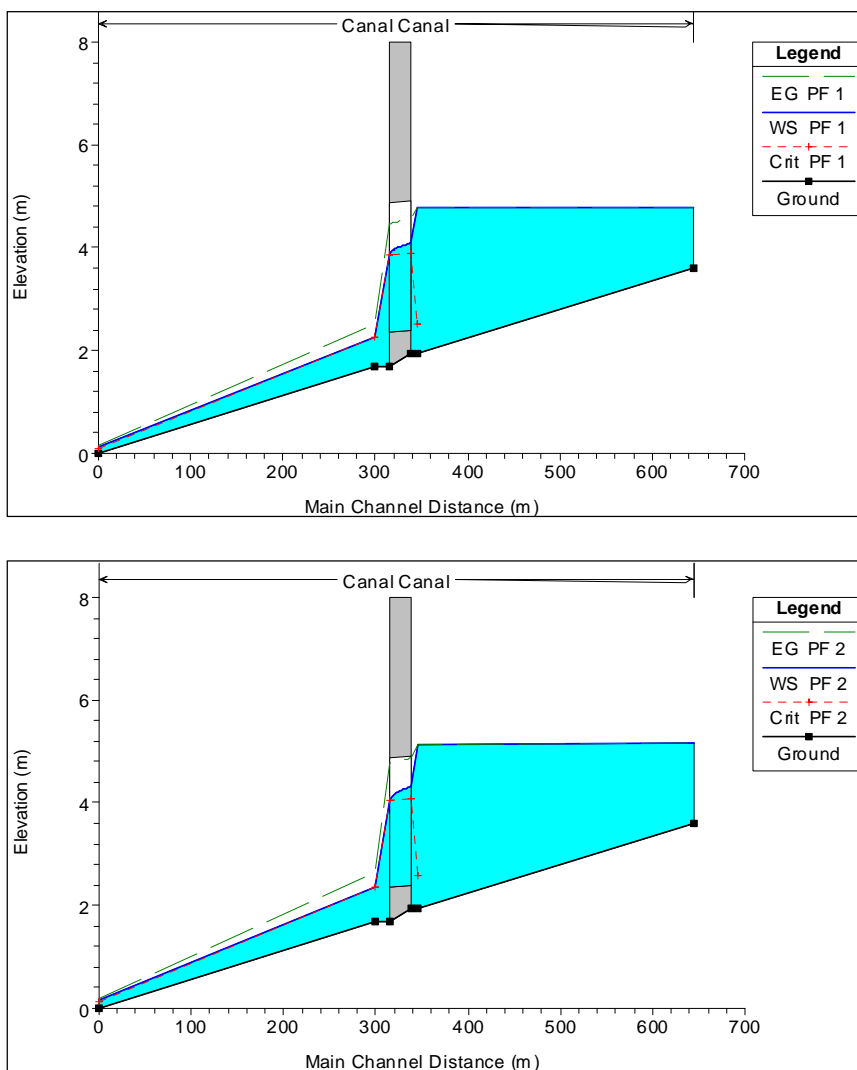


Figura 9. - Corte longitudinal para caudal con período de recurrencia de 25 años (arriba) y 50 años (abajo).

Grupo 2

Se adoptan 4 alcantarillas de 2.00m. Los resultados para el caudal de 25 años de recurrencia y el caudal de 50 años de recurrencia se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. - Resultados para caudal de diseño (TR=25 años) y caudal de verificación (TR=50 años).

TR (años)	Qdiseño (m ³ /s)	#Alc	Qalc (m ³ /s)	Dadop (m)	Control	Vel.Entrada (m/s)	Vel.Salida (m/s)
25	29.1	4	7.3	2.0	Salida	2.8	3.4
50	36.6	4	9.2	2.0	Salida	3.2	3.7

En la Figura 10 se observan cortes transversales a la entrada y salida de las alcantarillas respectivamente.

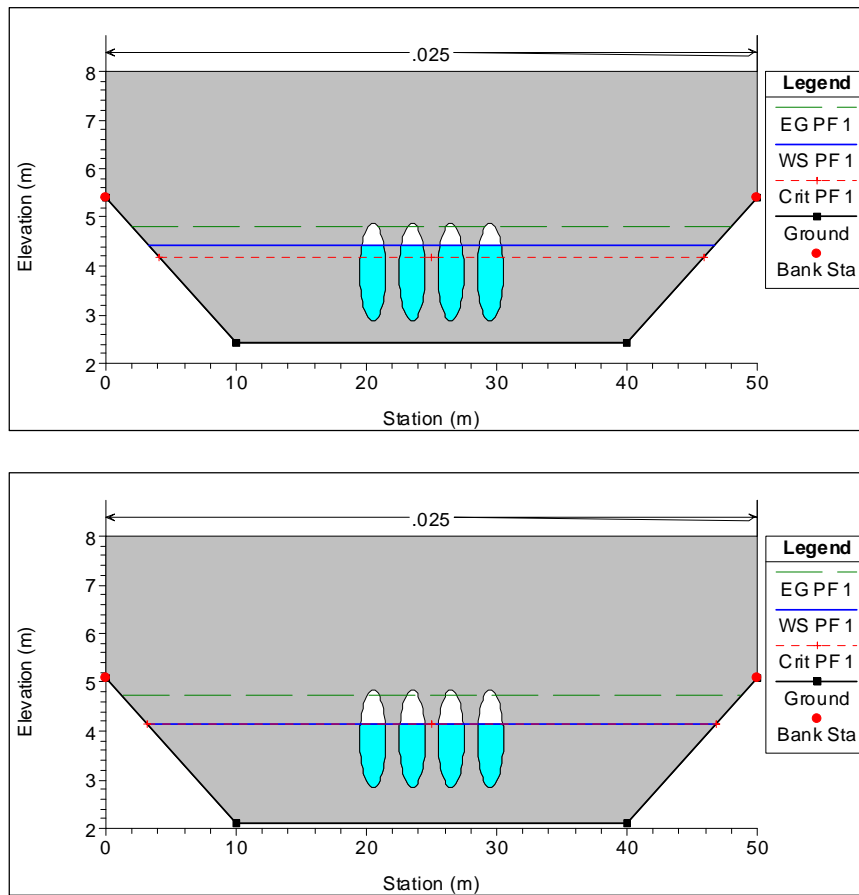
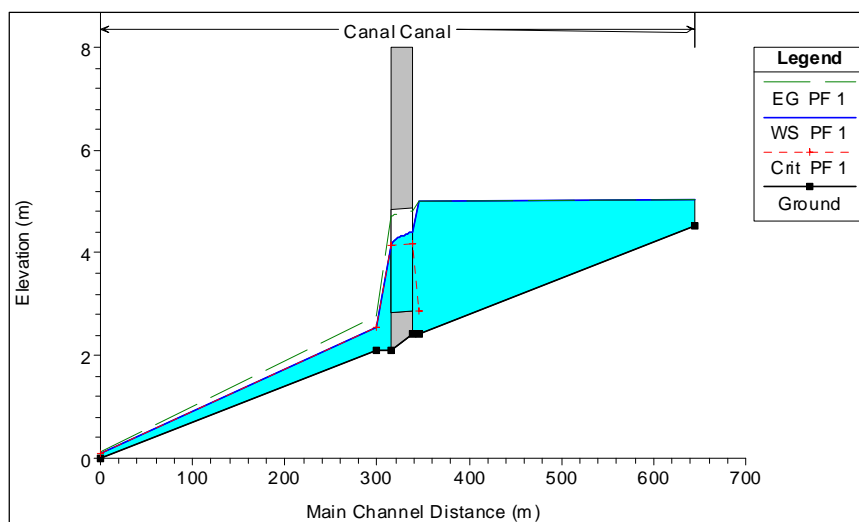


Figura 10. - Sección de alcantarillado visto desde agua arriba (arriba) y desde agua abajo (abajo).

En la Figura 11 se observan los perfiles transversales para los caudales de 25 y 50 años de recurrencia.



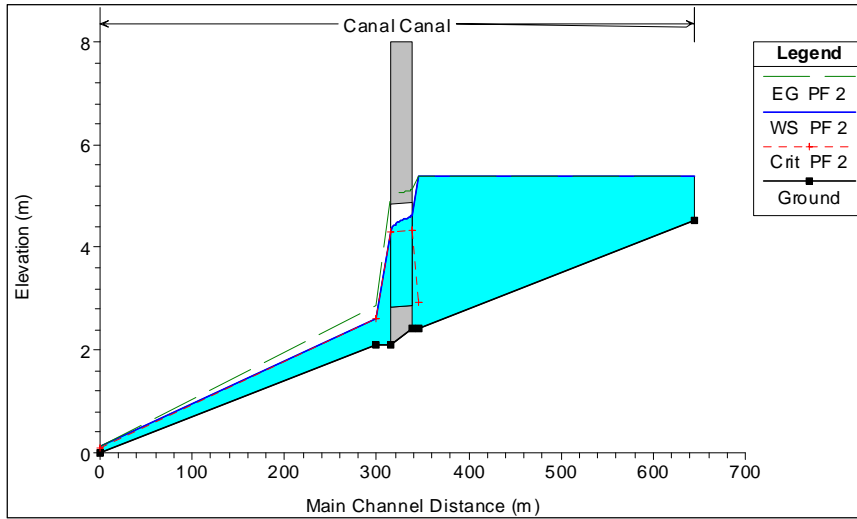


Figura 11. - Corte longitudinal para caudal con período de recurrencia de 25 años (arriba) y 50 años (abajo).

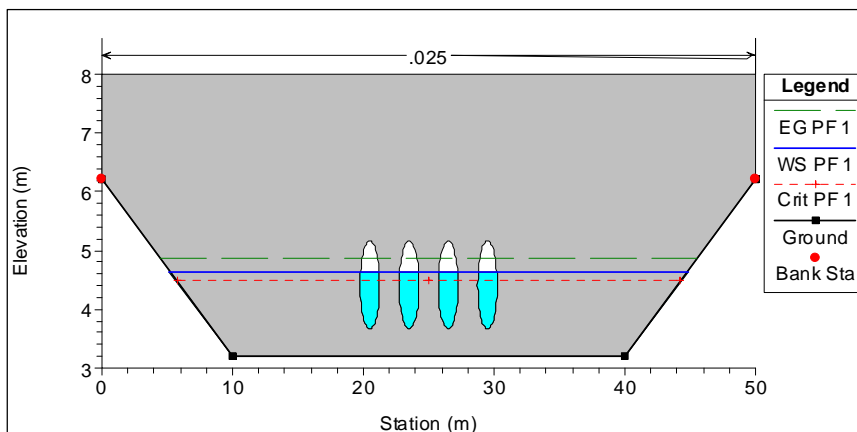
Grupo 3

Se adoptan 4 alcantarillas de 1.50m. Los resultados para el caudal de 25 años de recurrencia y el caudal de 50 años de recurrencia se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. - Resultados para caudal de diseño (TR=25 años) y caudal de verificación (TR=50 años).

TR (años)	Qdiseño (m ³ /s)	#Alc	Qalc (m ³ /s)	Dadop (m)	Control	Vel.Entrada (m/s)	Vel.Salida (m/s)
25	10.2	4	2.6	1.5	Salida	2.0	2.6
50	12.7	4	3.2	1.5	Salida	2.3	2.8

En la Figura 12 se observan cortes transversales a la entrada y salida de las alcantarillas respectivamente.



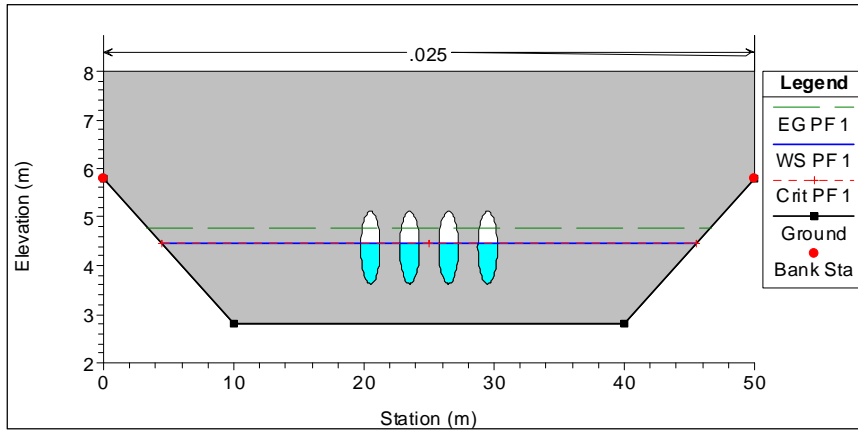


Figura 12. - Sección de alcantarillado visto desde agua arriba (arriba) y desde agua abajo (abajo).

En la Figura 13 se observan los perfiles transversales para los caudales de 25 y 50 años de recurrencia respectivamente.

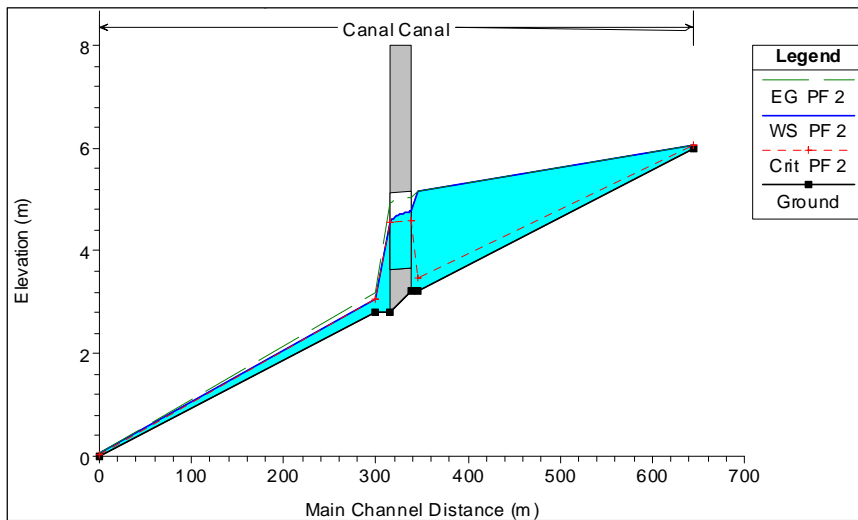
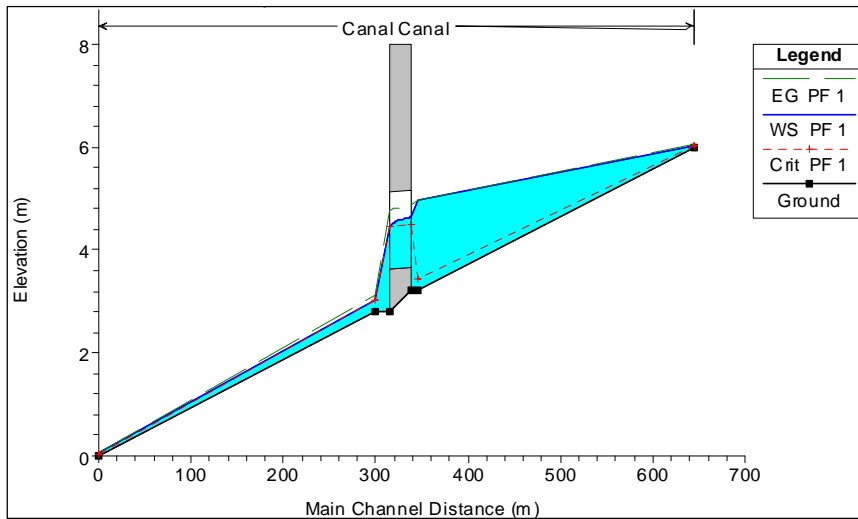


Figura 13. - Corte longitudinal para caudal con período de recurrencia de 25 años (arriba) y 50 años (abajo).

CONCLUSIONES

Actualmente el terraplén ferroviario posee una deficiencia en el sistema de drenaje debido a la insuficiencia de alcantarillas a lo largo de la traza, el subdimensionamiento y falta de mantenimiento sobre las existentes. Los diseños planteados en el presente trabajo permiten el normal escurrimiento de las aguas de lluvia, impidiendo así la acumulación de agua al pie del terraplén y mejorando las condiciones de estabilidad del mismo.

El estudio presentado es una fase de anteproyecto, en una etapa posterior se debería verificar que los diseños propuestos son adecuados utilizando información base más precisa y estudiando específicamente cada subcuenca en lugar de aplicar el criterio aquí expuesto en que se generan 3 grupos de alcantarillas. Los puentes que están sobre los arroyos deberían ser estudiados, ya que en este caso el foco se puso sobre la afectación del terraplén ferroviario.

En este momento se están comenzando a estudiar alternativas de control de erosión, ya que la velocidad en la salida supera la velocidad máxima admisible para este tipo de suelos (1m/s) [6].

REFERENCIAS

- [1] Dirección de hidráulica de Entre Ríos, «<http://www.hidraulica.gob.ar/cuencas.php>,» [En línea].
- [2] Instituto Geográfico Nacional,
«<http://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>,» [En línea].
- [3] U. T. N. Facultad Regional Concordia, Tormentas de diseño para la provincia de Entre Ríos, 2009, pp. 25-26, 35.
- [4] INTA, «<http://geointa.inta.gov.ar/visor/?p=136>,» [En línea].
- [5] Ven Te Chow, D. R. Maidment y L. W. Mays, Hidrología aplicada, McGraw-Hill, 1994, pp. 150-158, 236-237, 477-482.
- [6] California Department of Transportation, «Highway Design Manual,» California, USA, 2014.