APÉNDICE 2
ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

1 Análisis Hidráulico Canal Santa Marta

1.1 Introducción

En el presente capítulo se aborda el estudio hidráulico-fluvial del canal en la zona de proyecto, estudio que tiene por objetivo la determinación de las cotas de eje hidráulico, así como los parámetros destinados a la velocidad del flujo tanto para las situaciones sin y con proyecto para el escenario deseado (caudal) obtenido y acordado con la asociación de canalistas y que en esta oportunidad corresponde a:

- $Q_{diseño}$=112.9 m^3/s

En el presente capítulo, se presentan primero, los antecedentes de ingeniería básica recopilados en terreno (topografía, perfiles transversales) que permitieron elaborar los estudios hidráulicos en cuestión. Posteriormente, a partir de los caudales obtenidos, definidos en el capítulo anterior y antecedentes de ingeniería básica, se efectuó el modelo hidráulico respectivo tanto para las situaciones sin proyecto y con proyecto. Al final del presente apéndice se entregan los resultados tabulados junto con sus láminas respectivas.

1.2 Estudios Básicos.

a) Topografía.

En la zona de estudio se realizó un levantamiento topográfico del sector, incluyendo sus zonas de inundación y que se materializo en 20 perfiles topobatimétricos, los que permitieron un conocimiento del canal en un tramo de 540 metros aproximadamente. Esto permitió generar los antecedentes básicos necesarios para el cálculo de los ejes hidráulicos y sus parámetros asociados.

1.3 Análisis Hidráulico Fluvial.

El análisis hidráulico-fluvial que se presenta a continuación se efectuó mediante modelación hidráulica realizada con el software HEC-RAS Versión 5.0, (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers.

Este programa es el modelo matemático más utilizado en la actualidad para la resolución de regímenes permanentes (variado y uniforme) y permite simular el movimiento estacionario unidimensional (flujo unidireccional) de una corriente de agua. Esta aproximación de flujo unidireccional es válida, puesto que la componente de la velocidad en la dirección del flujo es la componente principal en la totalidad de las corrientes analizadas.

Además, el programa ofrece la posibilidad de analizar distintos tipos de régimen: lento, crítico, rápido y mixto. Para la aplicación del modelo, se hace la suposición de que el lecho es fijo.

El método de cálculo del HEC-RAS está basado en la ecuación de continuidad (conservación de la masa) y en la ecuación de conservación de la energía (unidimensional). No obstante, el método de cálculo requiere admitir la hipótesis de que la pérdida de carga por roce en una sección es la que tendría un flujo uniforme de la misma velocidad y radio hidráulico.

Se consideran en el proceso las pérdidas de carga por fricción (Manning) y pérdidas de carga localizadas por contracción-expansión (coeficiente de pérdidas multiplicado por la variación de la carga de energía cinética entre secciones).

Entre sus principales características técnicas se destacan:

- Realiza el cálculo hidráulico de diversas tipologías estructurales.
- Permite la visualización gráfica de resultados y permite la edición gráfica de secciones transversales.
- Considera secciones variables (no prismáticas)
- Es posible incorporar condiciones de borde y de control arbitrarias, lo cual permite considerar tramos con distintos regímenes de escurrimiento, río y torrente, dentro de la misma red de drenaje.
- Resuelve las confluencias del cauce principal con sus afluentes (nodos) mediante los métodos de la conservación de la energía o del momentum.
- En las secciones transversales se puede definir el cauce principal y sus áreas de inundación considerando rugosidades y, por lo tanto, velocidades diferenciales.
- El modelo incluye también pérdidas por contracciones o expansiones naturales del cauce.
- A pesar de ser unidimensional incorpora los efectos de los meandros del cauce.
- Permite identificar en los perfiles el cauce principal y los secundarios.
- El programa cuenta además con subrutinas gráficas que permiten visualizar en 2 y 3 dimensiones el escurrimiento tanto en el cauce como en las obras.
- Para el caso de los puentes, el cálculo se realiza por diferentes métodos (Energía, Momentum, Ecuación de Yarnell, etc.) de acuerdo a la clase de flujo (A, B, o C) y la selección del usuario; el resultado adoptado puede ser el de un método específico elegido por el usuario, o el más desfavorable si así se selecciona.
- Cabe señalar que, de acuerdo con las recomendaciones señaladas en el HEC-RAS Hydraulic Reference Manual, en su sub-acápite denominado Parallel Bridges (dentro del capítulo 5), dada

la condición de puentes paralelos cercanos para la doble calzada, la situación de ambos puede modelarse como la de un sólo puente.

Los datos básicos de partida requeridos para la modelización con HEC-RAS son de dos tipos: datos geométricos y datos de flujo estacionario.

Los datos de entrada utilizados en la modelación se presentan a continuación.

- Geometría de las secciones transversales del cauce que definan los cambios representativos del mismo en el tramo analizado.
- Distancia entre secciones o perfiles transversales del cauce utilizados en el estudio (longitud de los tramos: cauce, margen izquierda y margen derecha).
- Caudal de diseño: Se utilizó el caudal acordado de 112.9 m3/s.
- Condiciones de contorno: Para aguas arriba y abajo, se establece condición de altura normal con pendiente media igual a la del cauce.
- Rugosidad del cauce y de las márgenes (valores del coeficiente de rugosidad n de Manning).
- Coeficientes de pérdidas de carga por expansión y contracción.

a) Coeficiente de Rugosidad.

Para estimar los coeficientes de rugosidad del cauce en el tramo de estudio se empleó el método de Cowan, según lo recomendado por el Manual de Carreteras, Volumen 3, sección 3.707.104.

El método de Cowan permite determinar el coeficiente de Manning de acuerdo a las condiciones del lecho, según su material, irregularidades, vegetación, meandros, etc. El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$n = m \cdot (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \quad (ec.3.707.104.1 \ \ Manual \ \ de \ \ Carreteras)$$

Donde:

n0: Rugosidad base para un canal recto, uniforme, prismático y con rugosidad homogénea.
n1: Rugosidad adicional debida a irregularidades superficiales del perímetro mojado a lo largo del tramo en estudio.
n2: Rugosidad adicional equivalente debida a variación de forma y de dimensiones de las secciones a lo largo del tramo en estudio.
n3: Rugosidad adicional equivalente debida a obstrucciones existentes en el cauce
n4: Rugosidad adicional equivalente debida a la presencia de vegetación
m: Factor de corrección para incorporar el efecto de sinuosidad del cauce o presencia de meandros

Los valores adoptados como coeficientes de Manning para el cauce y zonas de inundación se muestran en la Tabla N°3-2, los cuales fueron obtenidos de la Tabla N°3.707.104.1.B del Manual de Carreteras, según las características observadas en terreno.

Tabla N°3-1
Coeficiente de Manning según Método de Cowan

CONDICIONES DEL CANAL		VALOR	
Material del Lecho	Tierra	n_0	0,020
	Roca Cortada		0,025
	Grava Fina		0,024
	Grava Gruesa		0,028
Grado de Irregularidad Perímetro Mojado	Despreciable	n_1	0,000
	Leve		0,005
	Moderado		0,010
	Alto		0,020
Variaciones de las Secciones	Graduales	n_2	0,000
	Alternándose Ocasionalmente		0,005
	Alternándose Frecuentemente		0,010 – 0,015
Efecto Relativo de las Obstrucciones	Despreciable	n_3	0,000
	Leve		0,010 – 0,015
	Apreciable		0,020 – 0,030
	Alto		0,040 – 0,060
Densidad de Vegetación	Baja	n_4	0,005 – 0,010
	Media		0,010 – 0,025
	Alta		0,025 – 0,050
	Muy Alta		0,050 – 0,100
Sinuosidad y Frecuencia de Meandros	Leve	m	1,000
	Apreciable		1,150
	Alto		1,300

Fuente: Tabla N°3.707.104.1. B Manual de Carreteras, Volumen 3.

Tabla Nº 3-2
Coeficientes de Rugosidad Adoptados por Método de Cowan

Estero	n_0	n_1	n_2	n_3	n_4	m	**n adoptado**
Canal Santa Marta	0,020	0,005	0,000	0,020	0,005	1,000	0,050

Fuente: Elaboración Propia

b) Otros Parámetros Modelo HEC.

Para modelación:

- Condiciones de Borde: Altura normal con pendiente

- Canal: 0,00838.

- Coeficiente Resistencia de Pila Método Momentum: 1,33
- Coeficiente Forma de Pila Método Yarnell: 1,25
- Coeficientes de Contracción y Expansión en Vecindad Puente existente: 0,3 y 0,5 respectivamente.

c) Cálculos y Resultados

Las salidas del modelo numérico se presentan en forma de tablas y gráficos que incluyen toda la información hidráulica de modo que facilite su revisión y comprensión.

Al final del presente apéndice, se entregan en detalle los resultados obtenidos del cálculo del eje hidráulico de la zona en estudio. Los resultados se presentan para el caudal de diseño y para las situaciones sin y con proyecto. Además, en el Apéndice 3 se entregan los archivos digitales del modelo HEC-RAS.

En las siguientes ilustraciones es posible observar los ejes hidráulicos para el caudal analizado en vista longitudinal, tanto para la situación sin proyecto, como para la situación con proyecto.

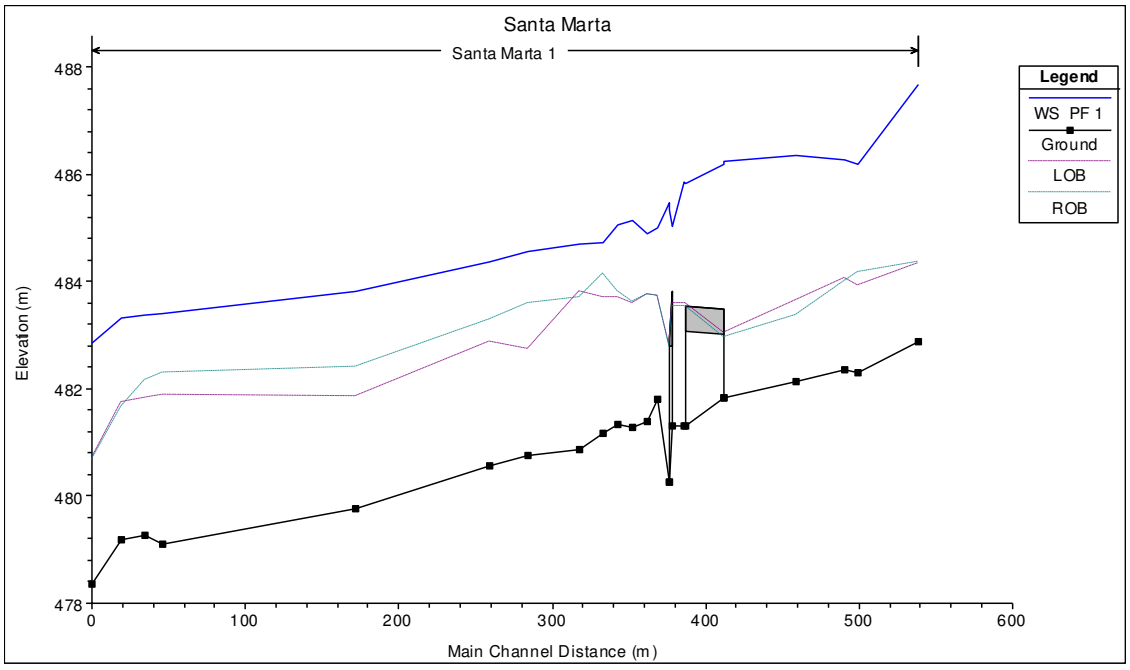


Figura 3-1: Perfil Longitudinal Eje Hidráulico - Situación Sin Proyecto

Fuente: Elaboración Propia

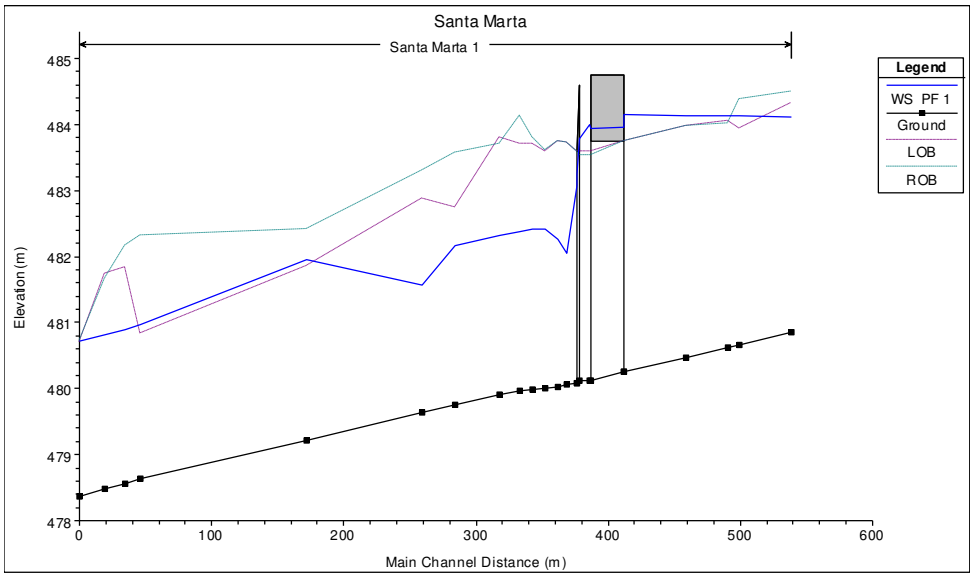


Figura 3-2: Perfil Longitudinal Eje Hidráulico - Situación Con Proyecto

Fuente: Elaboración Propia

De igual manera se presentan a continuación en las siguientes figuras, una vista isométrica del canal Santa Marta para las situaciones sin y con proyecto

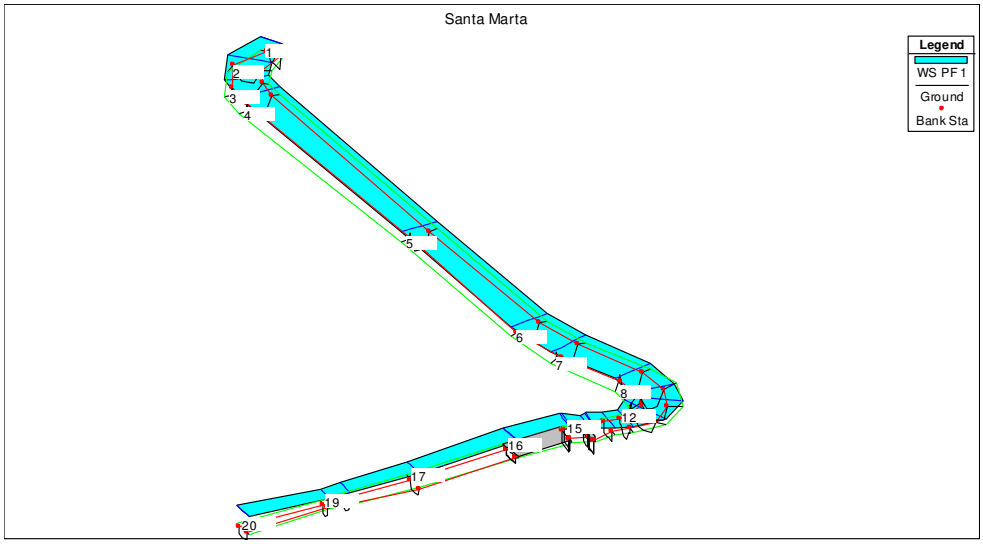


Figura 3-3: Vista Isométrica - Situación Sin Proyecto

Fuente: Elaboración Propia

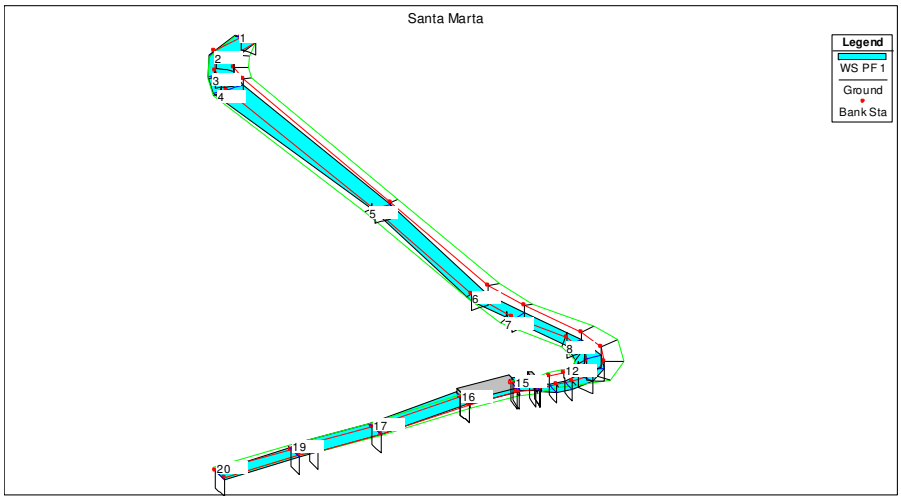


Figura 3-4: Vista Isométrica - Situación Con Proyecto
Fuente: Elaboración Propia

2 Hidrodinámica y Balance de Masas

2.1 Introducción

El PAS 155 requiere un estudio de hidrodinámica que incluya la caracterización de los principales flujos de agua involucrados en el diseño de la obra y su relación con los flujos existentes en el emplazamiento. Además, requiere que el estudio de balance de aguas debe incluir un balance completo de aguas respecto de todas las obras involucradas (captación, aducción, utilización, tratamientos, descargas, etc.).

Los flujos actuales, indican que el canal Santa Marta, viene desde el sur hacia el norte donde una vez atravesado la carretera como la vía férrea el canal gira hacia el poniente, paralelo a la vía ferroviaria, hasta, el pk 13.80 donde gira de nuevo hacia el norte, y recibe la descarga de un derivado del canal El Bosque. En la siguiente figura se presenta la forma y los sentidos de escurrimiento de los flujos para la situación actual



Figura N° 3-1: Balance de caudales – Situación Actual
Fuente: Elaboración Propia

Para la situación futura, la construcción del puente menor y la nueva canalización, permitirán los respectivos flujos del canal Santa Marta, mantener su actual escurrimiento de oriente hacia el poniente, no afectando el funcionamiento de éste, permitiendo portear el mismo caudal que ahora conduce. En la siguiente figura se presenta la forma y los sentidos de escurrimiento de los flujos para la situación futura

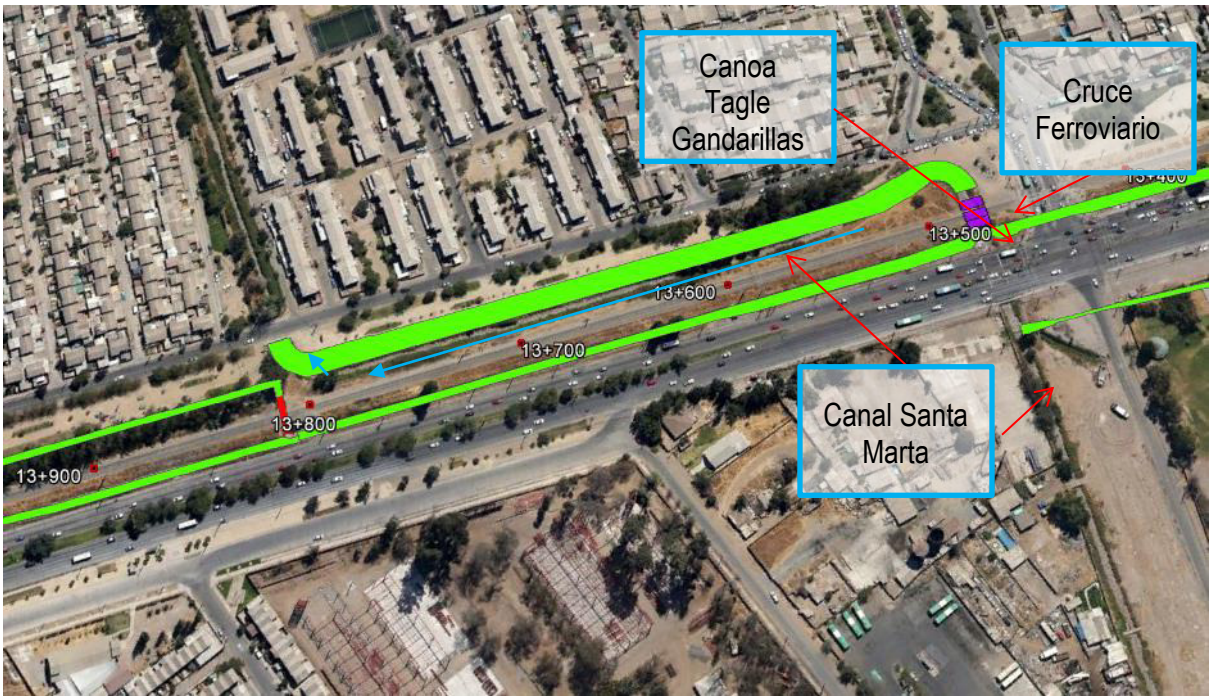


Figura N° 3-2: Balance de caudales – Situación Futura
Fuente: Elaboración Propia

Respaldo de Modelaciones

Canal Santa Marta - Sin Proyecto

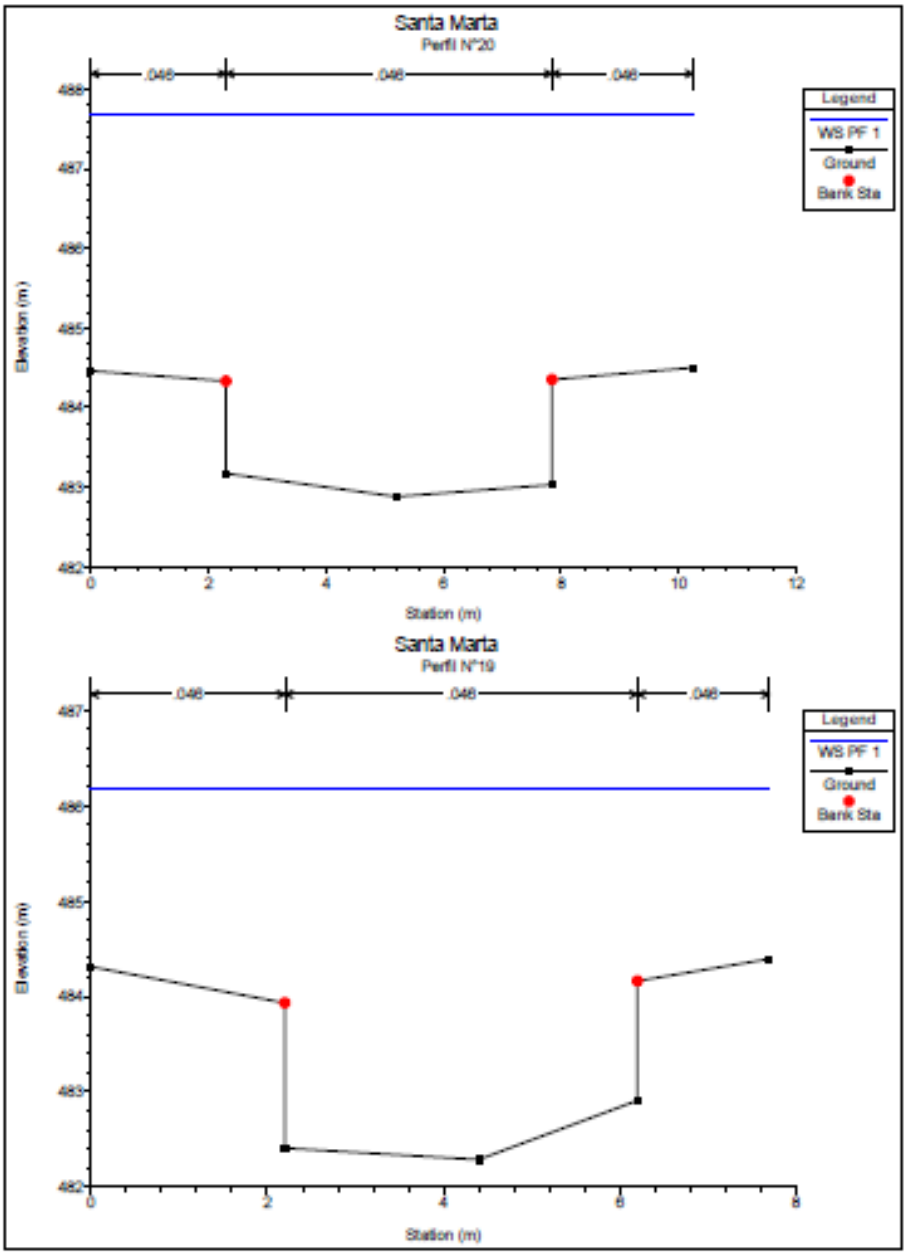
Perfil	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude
20	112.90	482.88	487.68	486.04	488.13	3.25	41.40	10.25	0.48
19	112.90	482.29	486.18	486.18	487.67	5.85	22.24	7.70	0.97
18	112.90	482.35	486.26	485.82	487.24	4.72	27.64	9.10	0.78
17	112.90	482.12	486.34	485.14	486.86	3.37	38.30	11.00	0.54
16	112.90	481.82	486.25	484.61	486.63	2.95	44.83	11.70	0.45
15.5	Puente Menor								
15	112.90	481.30	485.86	484.38	486.24	2.93	43.73	12.00	0.44
14.5	Canoa								
14	112.90	480.27	485.46	483.59	485.74	2.54	50.50	12.90	0.36
13	112.90	481.80	484.99	484.54	485.66	3.78	32.81	13.30	0.68
12	112.90	481.39	484.87	484.58	485.58	3.92	32.27	14.80	0.72
11	112.90	481.29	485.14	484.01	485.40	2.37	54.30	22.20	0.43
10	112.90	481.32	485.06	484.10	485.36	2.66	50.87	22.65	0.47
9	112.90	481.17	484.72	484.14	485.28	3.47	36.53	19.06	0.67
8	112.90	480.86	484.71	483.91	485.14	3.01	41.82	18.14	0.55
7	112.90	480.75	484.56	483.82	484.94	2.98	45.06	19.65	0.53
6	112.90	480.55	484.35	483.70	484.80	3.09	40.73	17.50	0.58
5	112.90	479.75	483.82	483.10	484.27	3.25	41.28	16.70	0.56
4	112.90	479.09	483.40	482.03	483.67	2.47	51.96	18.55	0.43
3	112.90	479.27	483.36	482.03	483.63	2.41	52.06	18.00	0.43
2	112.90	479.18	483.33	482.00	483.59	2.35	53.92	18.50	0.40
1	112.90	478.37	482.84	482.03	483.47	3.75	34.31	11.07	0.62

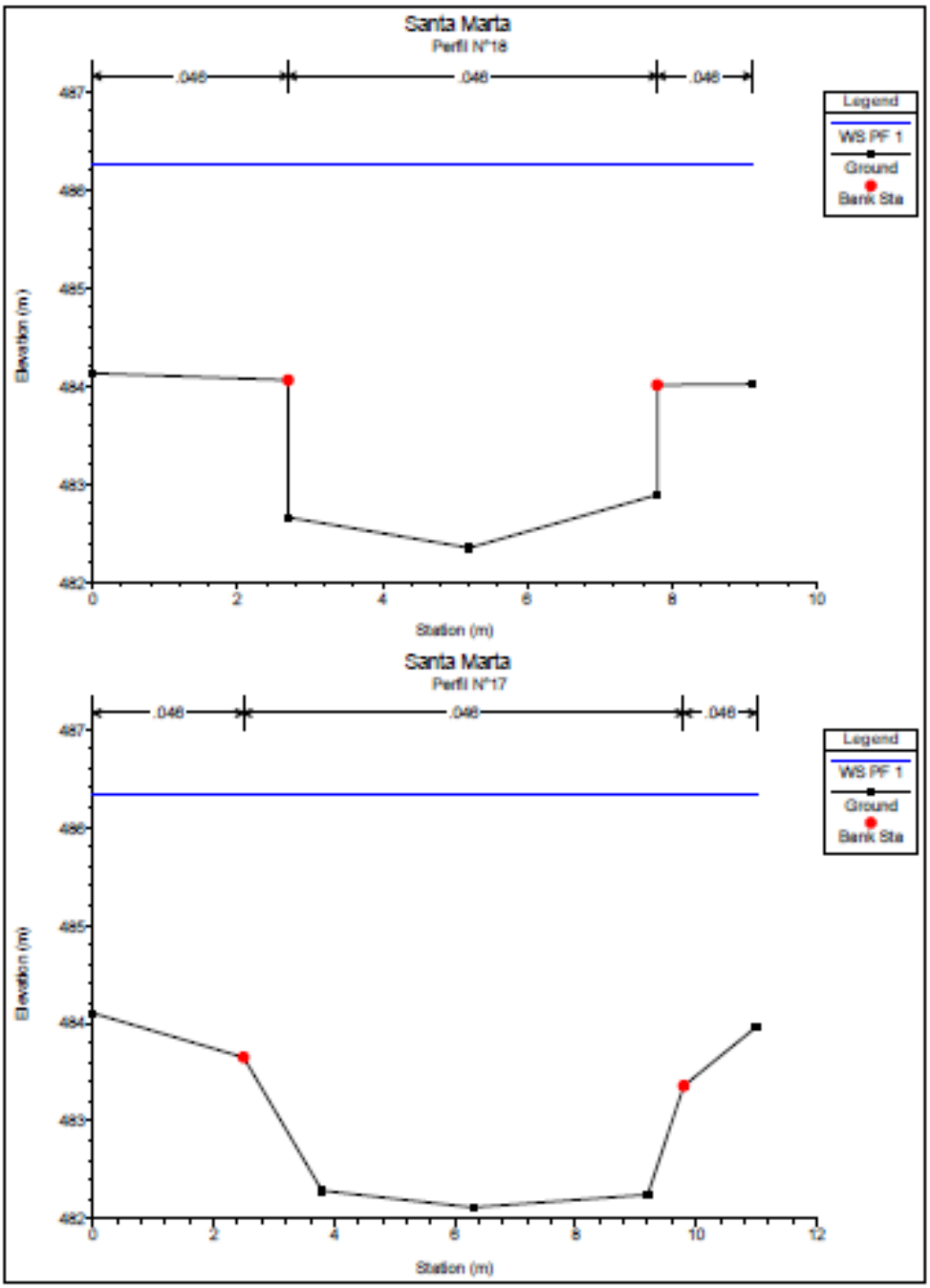
Canal Santa Marta – Con Proyecto

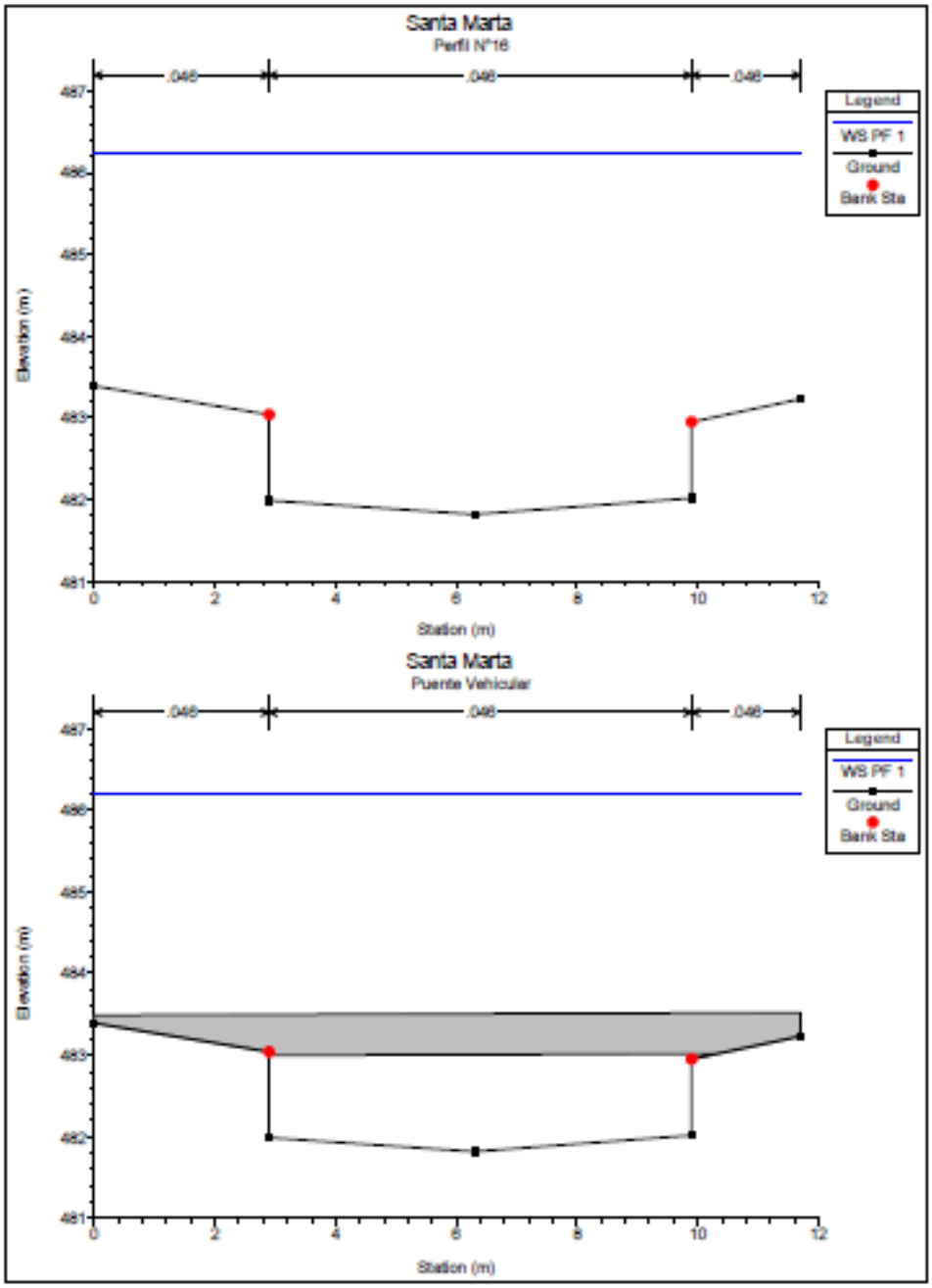
Perfil	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude
20	112.90	480.85	484.11	483.59	485.08	4.35	25.94	7.95	0.77
19	112.90	480.66	484.13	483.59	484.97	4.06	27.89	9.16	0.70
18	112.90	480.62	484.13	483.59	484.95	4.02	28.17	10.57	0.69
17	112.90	480.47	484.13	483.59	484.89	3.85	29.60	11.00	0.64
16	112.90	480.25	484.14	482.97	484.80	3.60	33.33	11.70	0.58
15.5	Puente Menor								
15	112.90	480.13	484.01	482.86	484.66	3.61	33.46	12.00	0.59
14.5	Canoa								
14	112.90	480.09	483.06	483.06	484.56	5.42	20.82	7.00	1.00
13	112.90	480.06	482.05	482.72	484.44	6.85	16.49	8.30	1.55
12	112.90	480.02	482.25	482.76	484.29	6.32	17.87	8.00	1.35
11	112.90	480.01	482.43	482.73	484.17	5.84	19.32	8.00	1.20
10	112.90	479.98	482.42	482.72	484.13	5.79	19.52	8.28	1.18
9	112.90	479.97	482.38	482.71	484.13	5.87	19.25	8.13	1.21
8	112.90	479.90	482.32	482.62	484.05	5.83	19.36	8.00	1.20
7	112.90	479.75	482.17	482.47	483.90	5.83	19.36	8.00	1.20
6	112.90	479.64	481.56	482.16	483.73	6.52	17.32	9.00	1.50
5	112.90	479.22	481.95	481.95	483.31	5.17	21.87	8.97	1.00
4	112.90	478.63	480.96	481.43	482.79	6.01	20.02	13.67	1.26
3	112.90	478.56	480.89	481.32	482.73	6.02	19.55	10.34	1.26
2	112.90	478.48	480.82	481.26	482.65	6.01	18.96	9.58	1.31
1	112.90	478.37	480.71	481.16	482.56	6.02	19.02	11.07	1.26

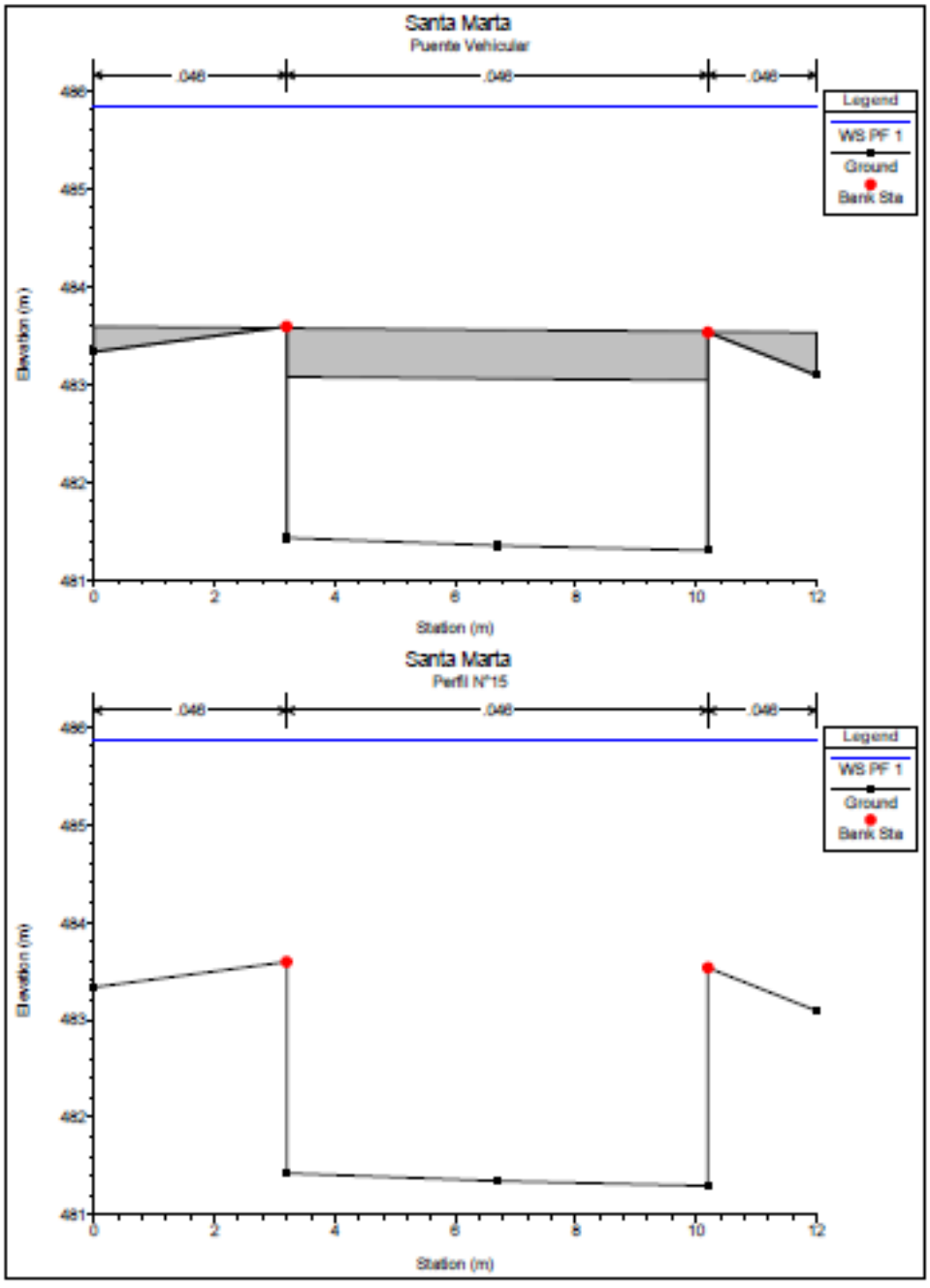
Perfiles Transversales

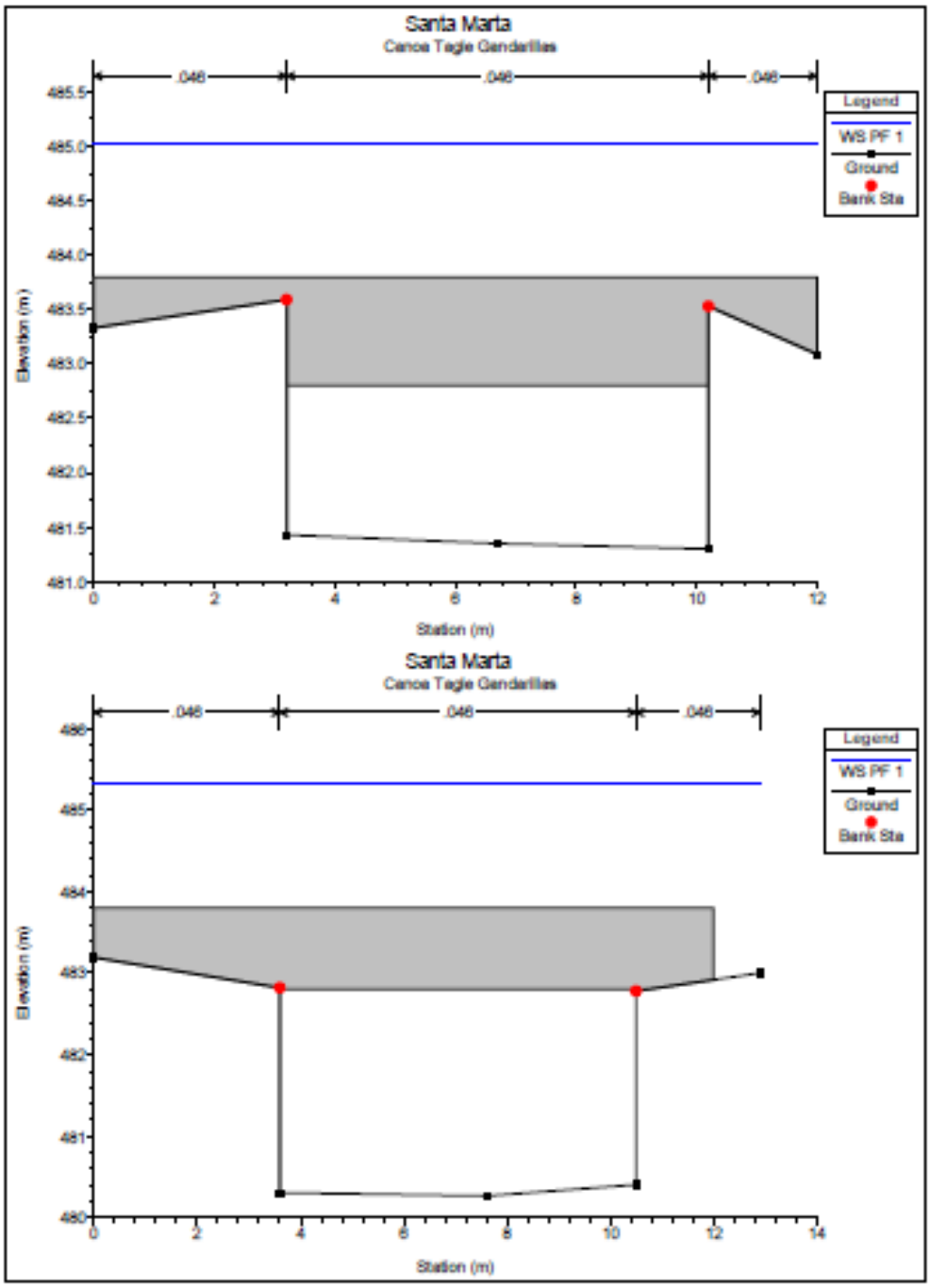
Situación Sin Proyecto

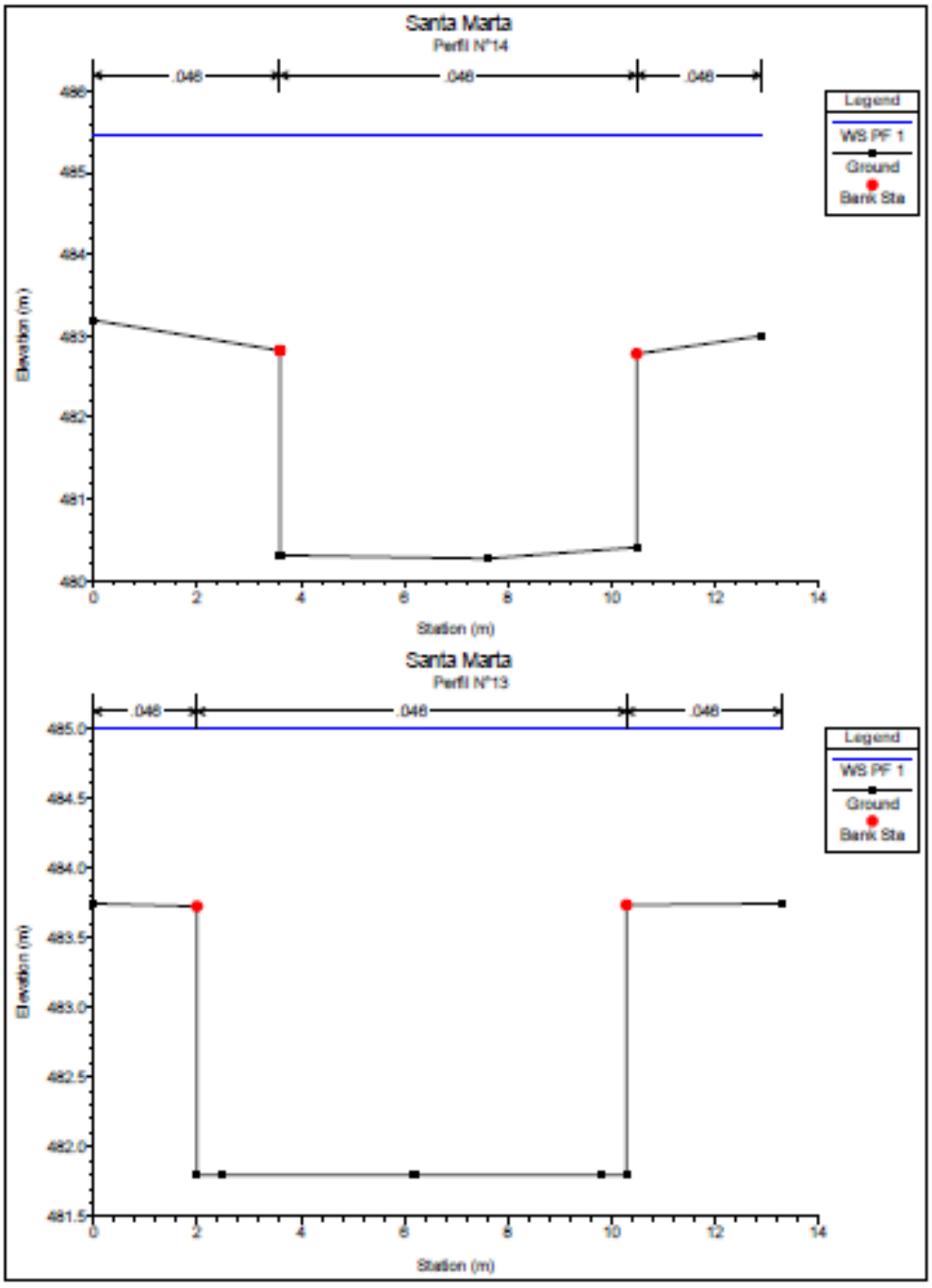


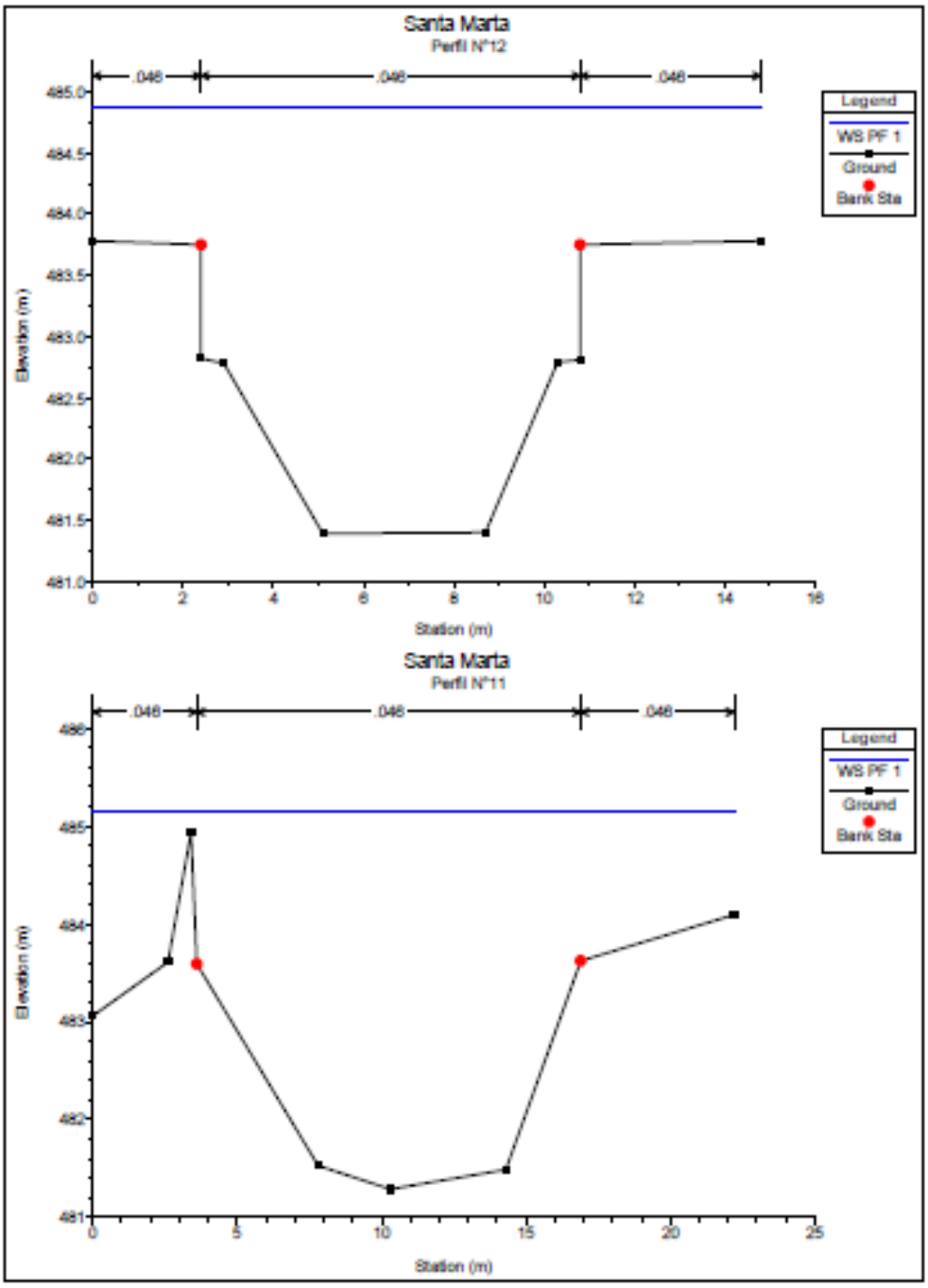

Santa Marta
Perfil N°18
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°17
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

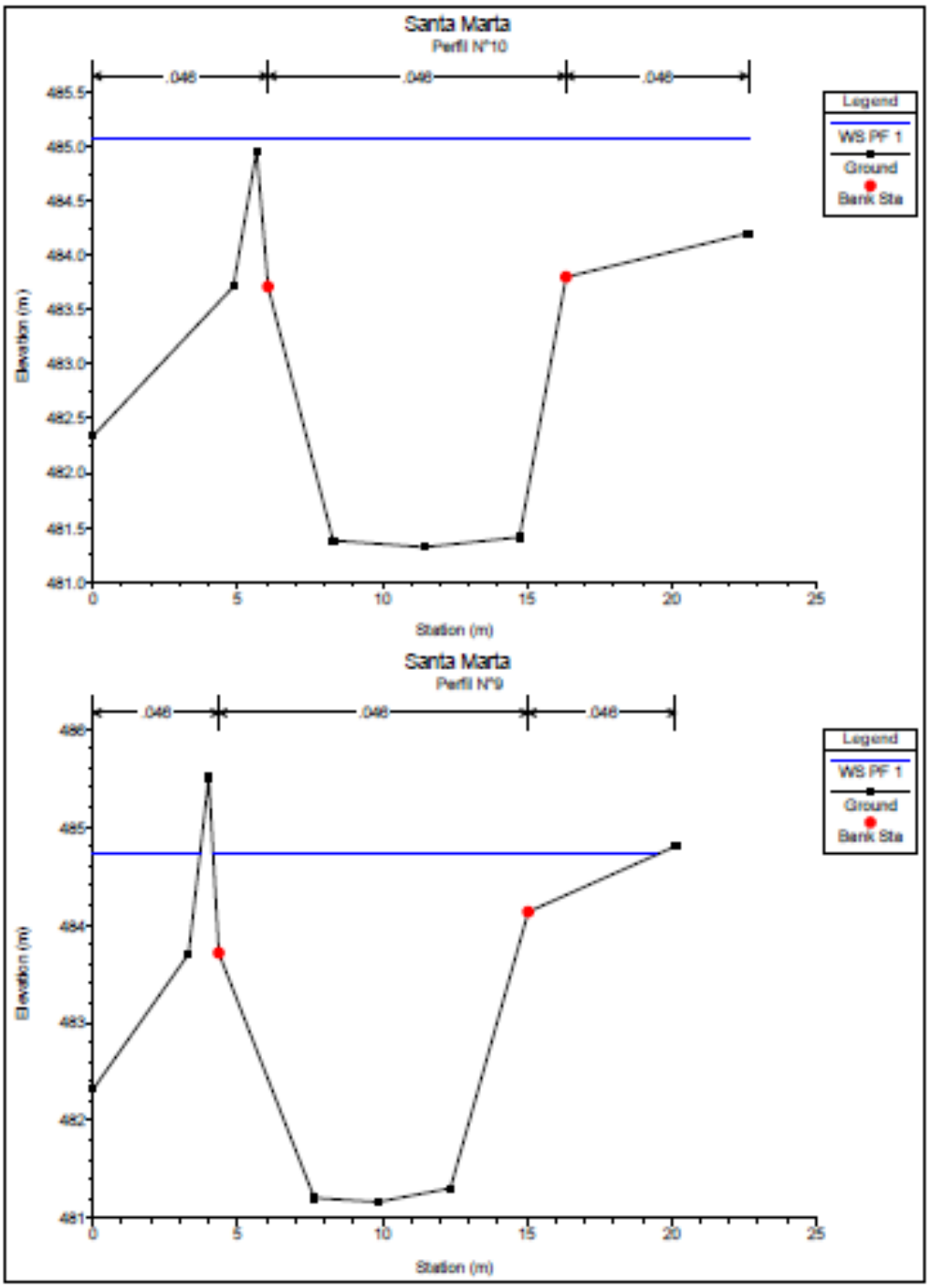

Santa Marta
Perfil N°16
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Puente Vehicular
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

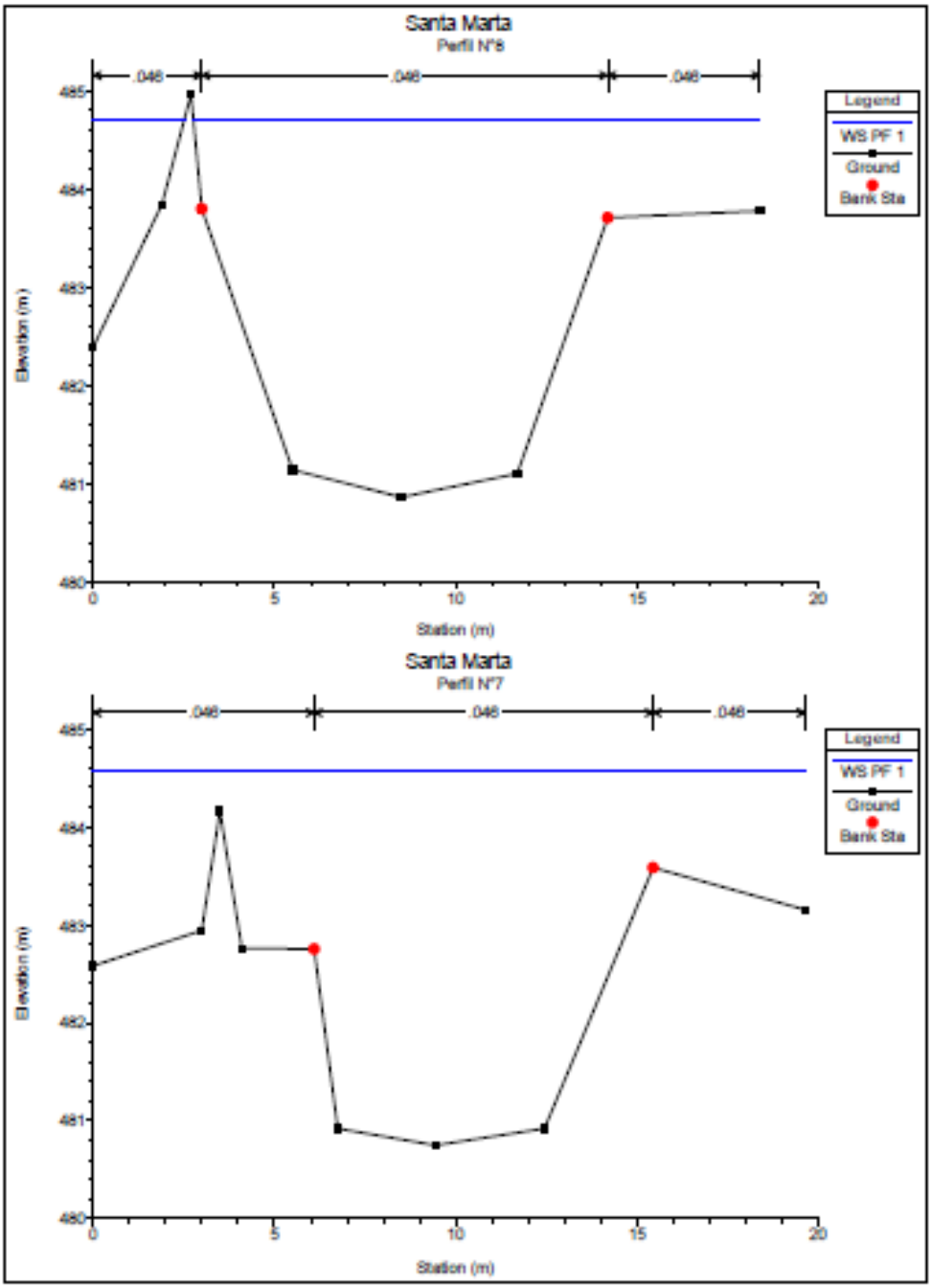

Santa Marta
Puente Vehicular
.046
.046
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°15
.046
.046
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

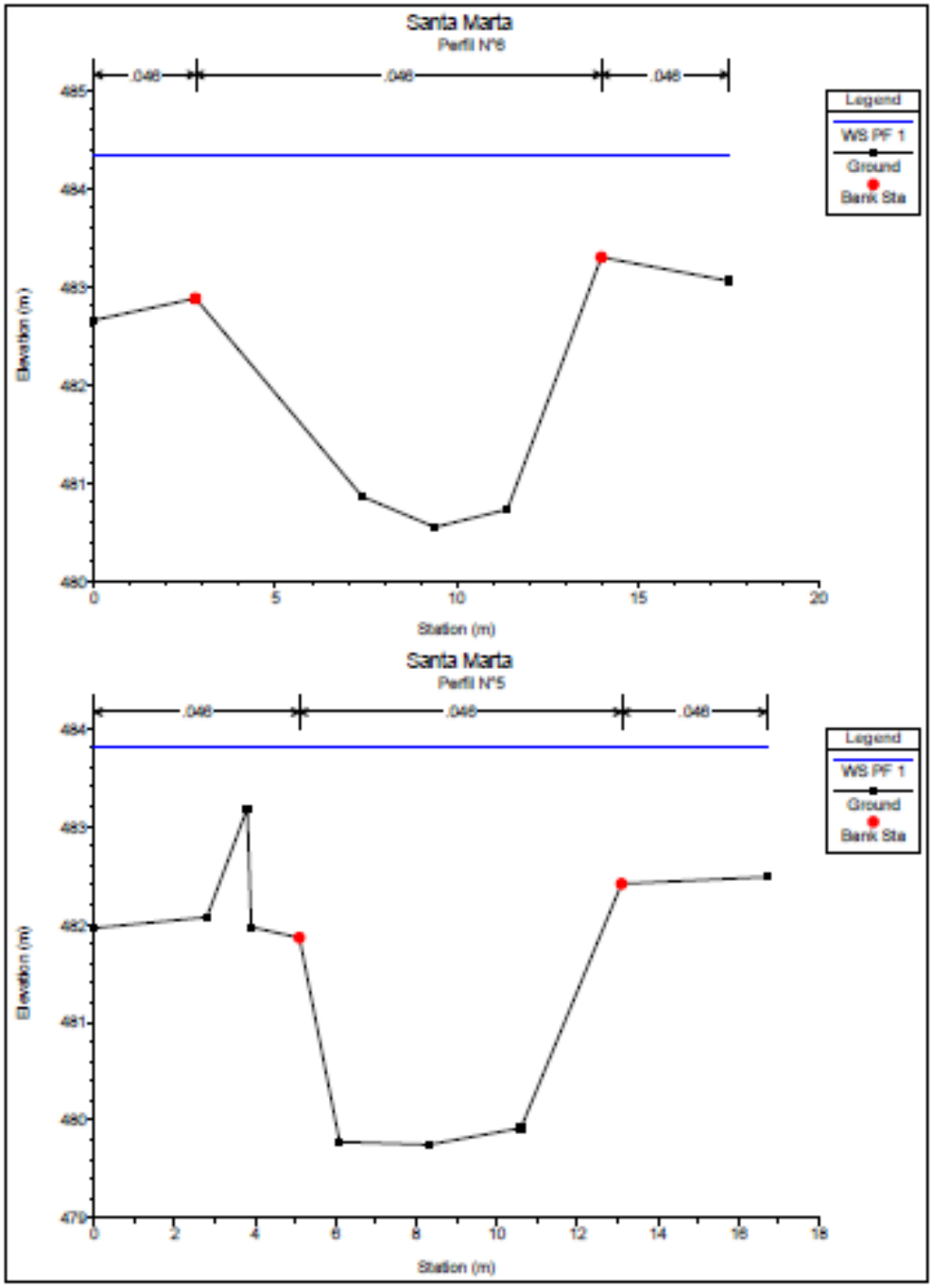

Santa Marta
Canoa Tagle Gandarillas
.046
.046
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Canoa Tagle Gandarillas
.046
.046
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

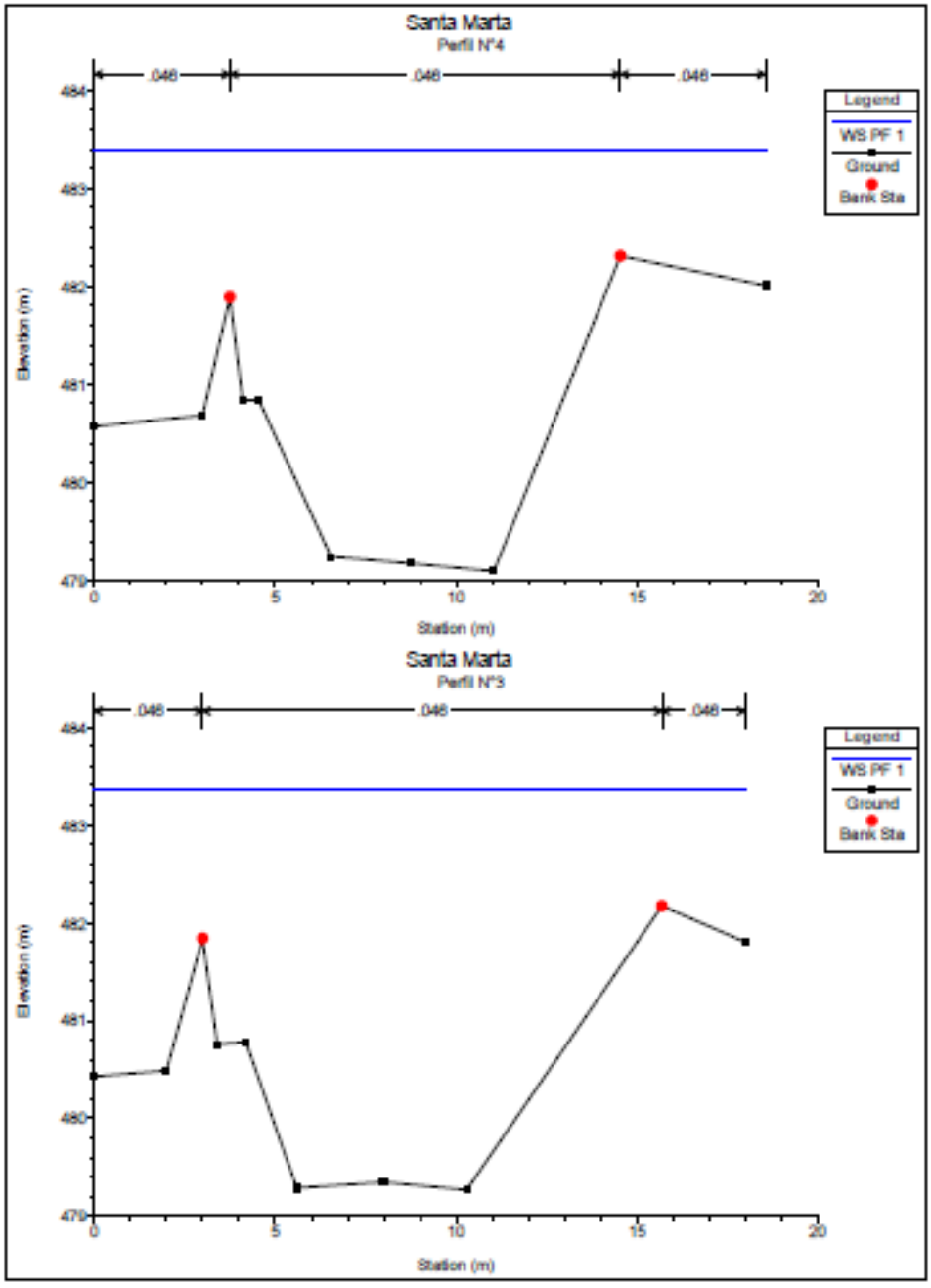

Santa Maria
Perfil N°14
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Maria
Perfil N°13
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

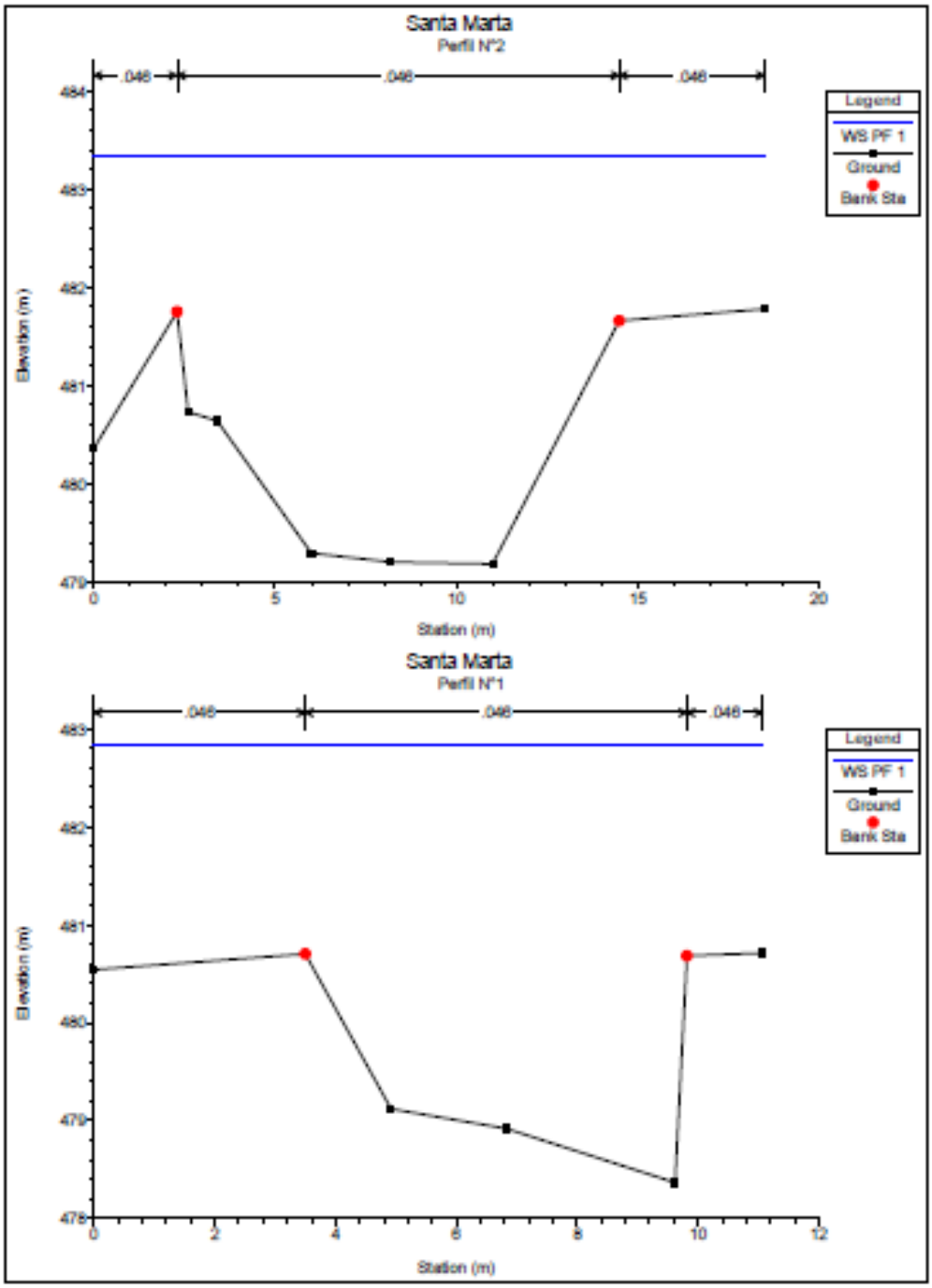

Santa Marta
Perfil N°12
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°11
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)


Santa Marta
Perfil N°10
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°9
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

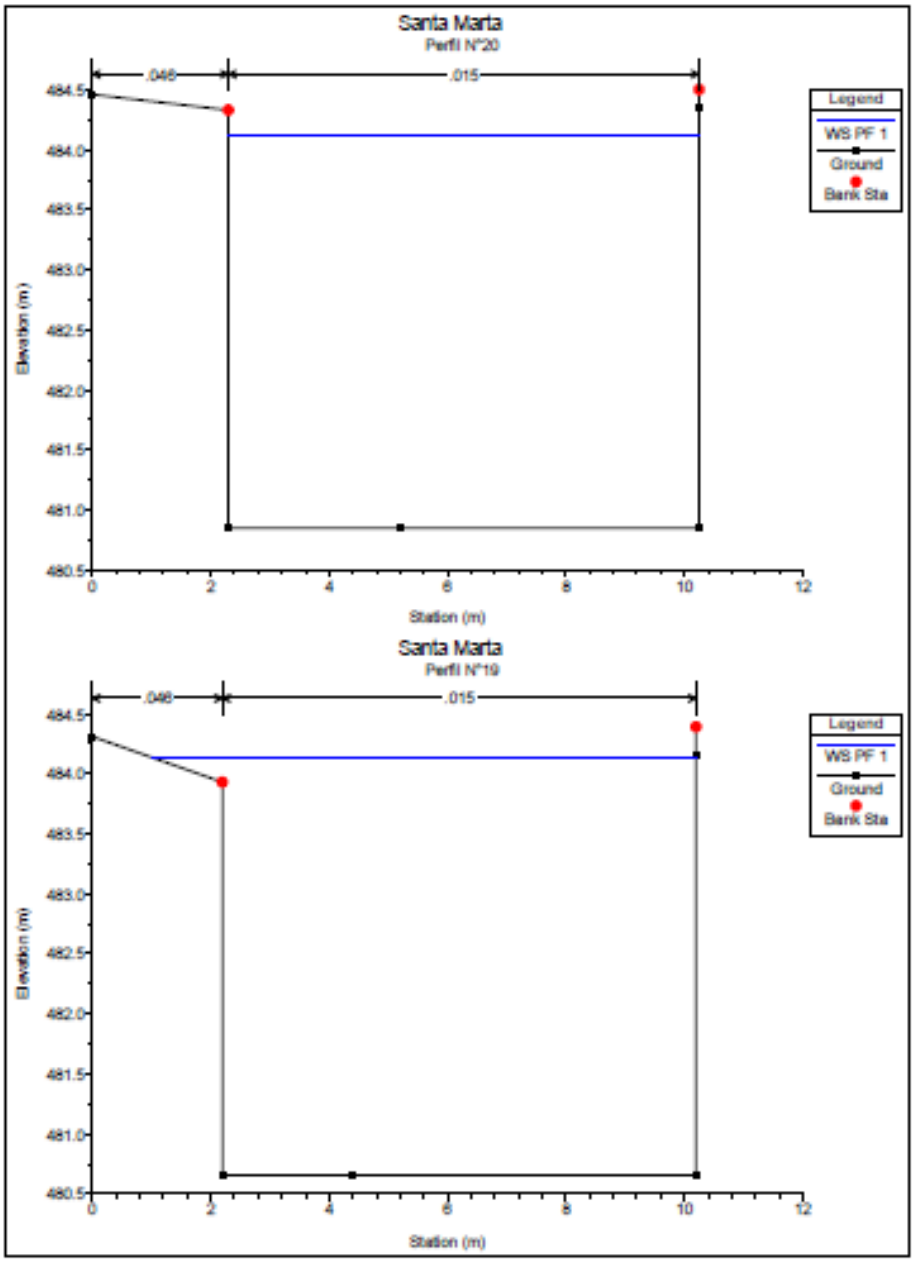

Santa Marta
Perfil N°8
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°7
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

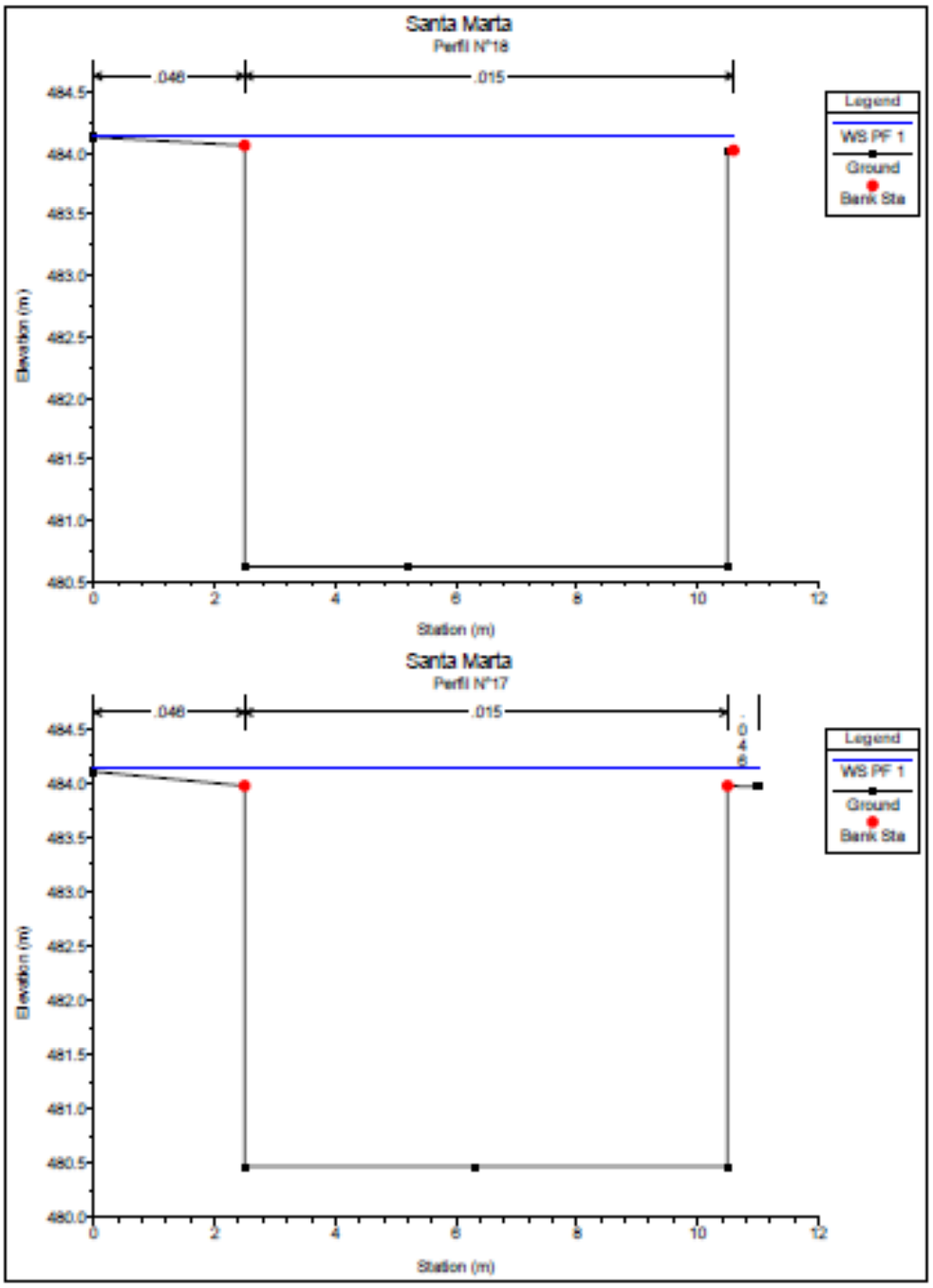

Santa Marta
Perfil N°6
.046
.046
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°5
.046
.046
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

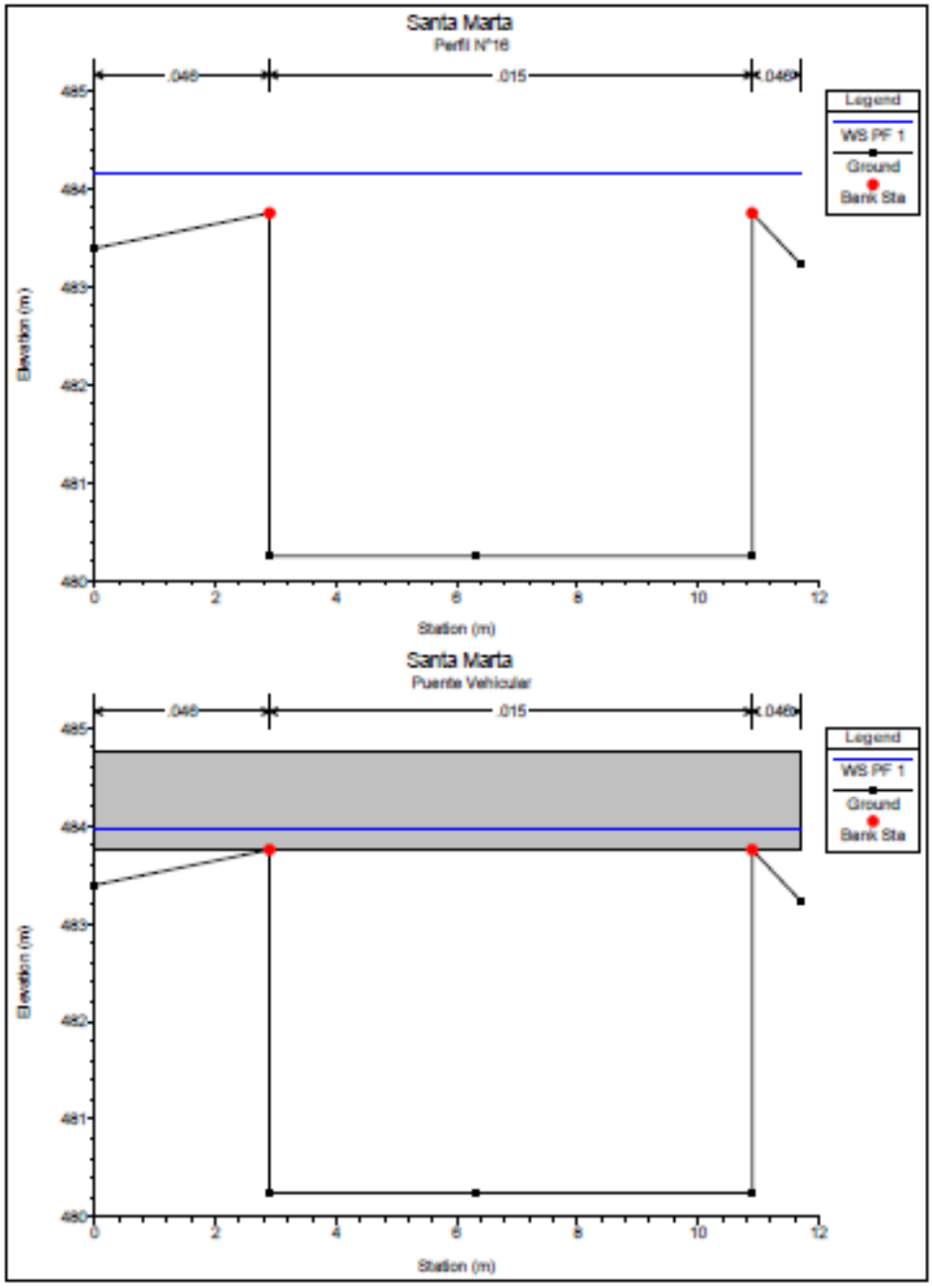

Santa Marta
Perfil N°4
.046
.046
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°3
.046
.046
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

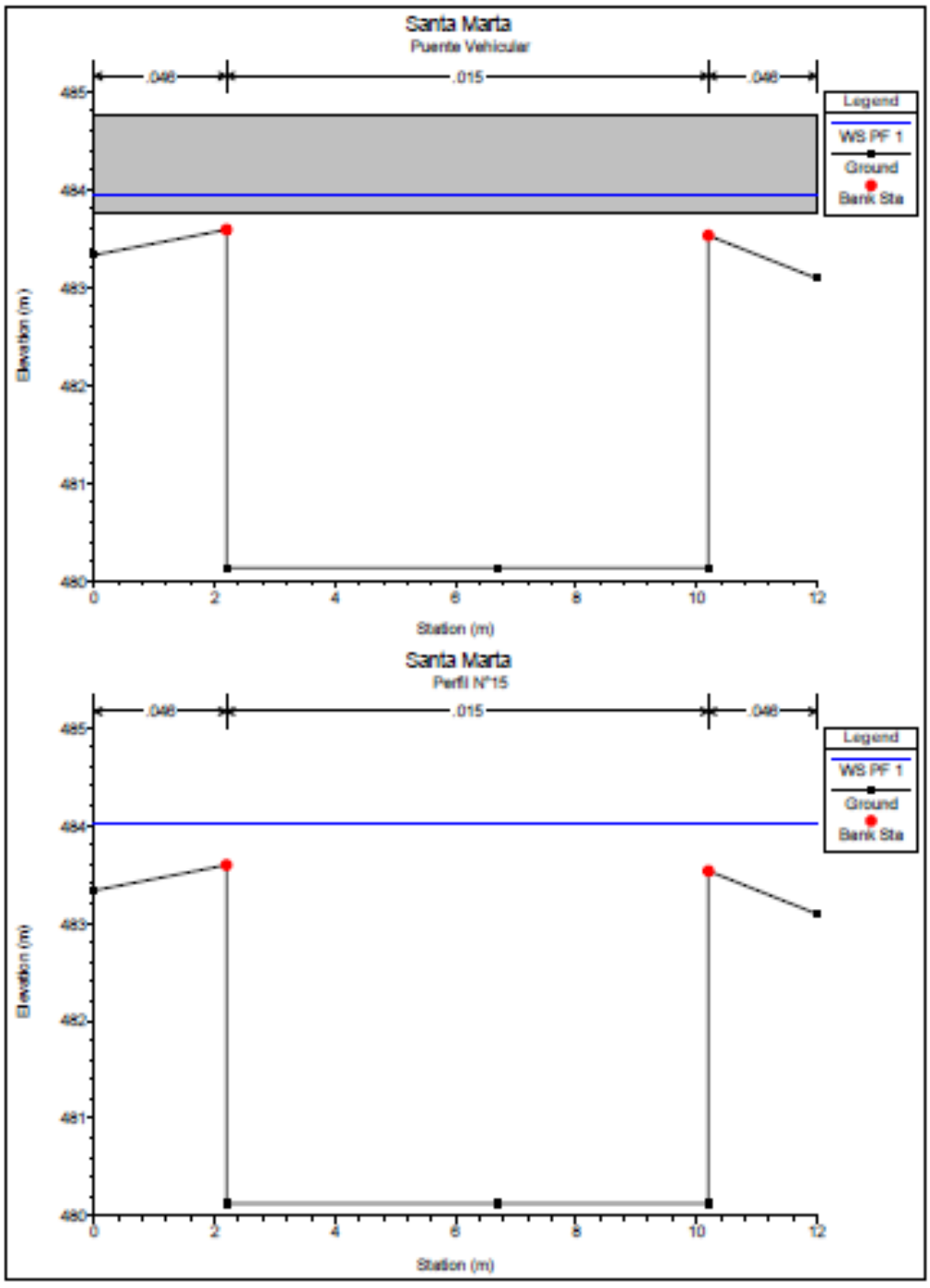

Santa Marta
Perfil N°2
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°1
.048
.048
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

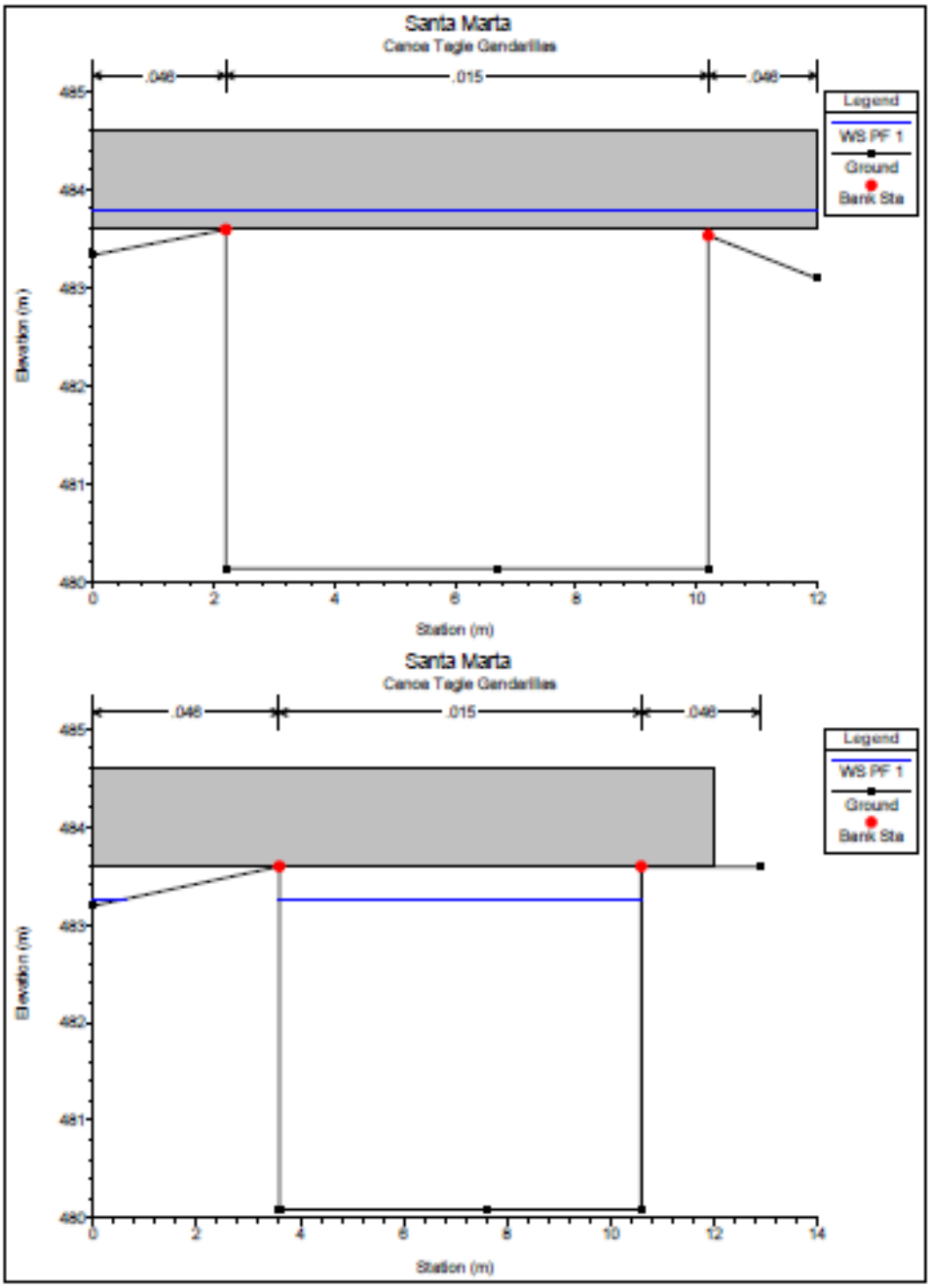
Situación Con Proyecto

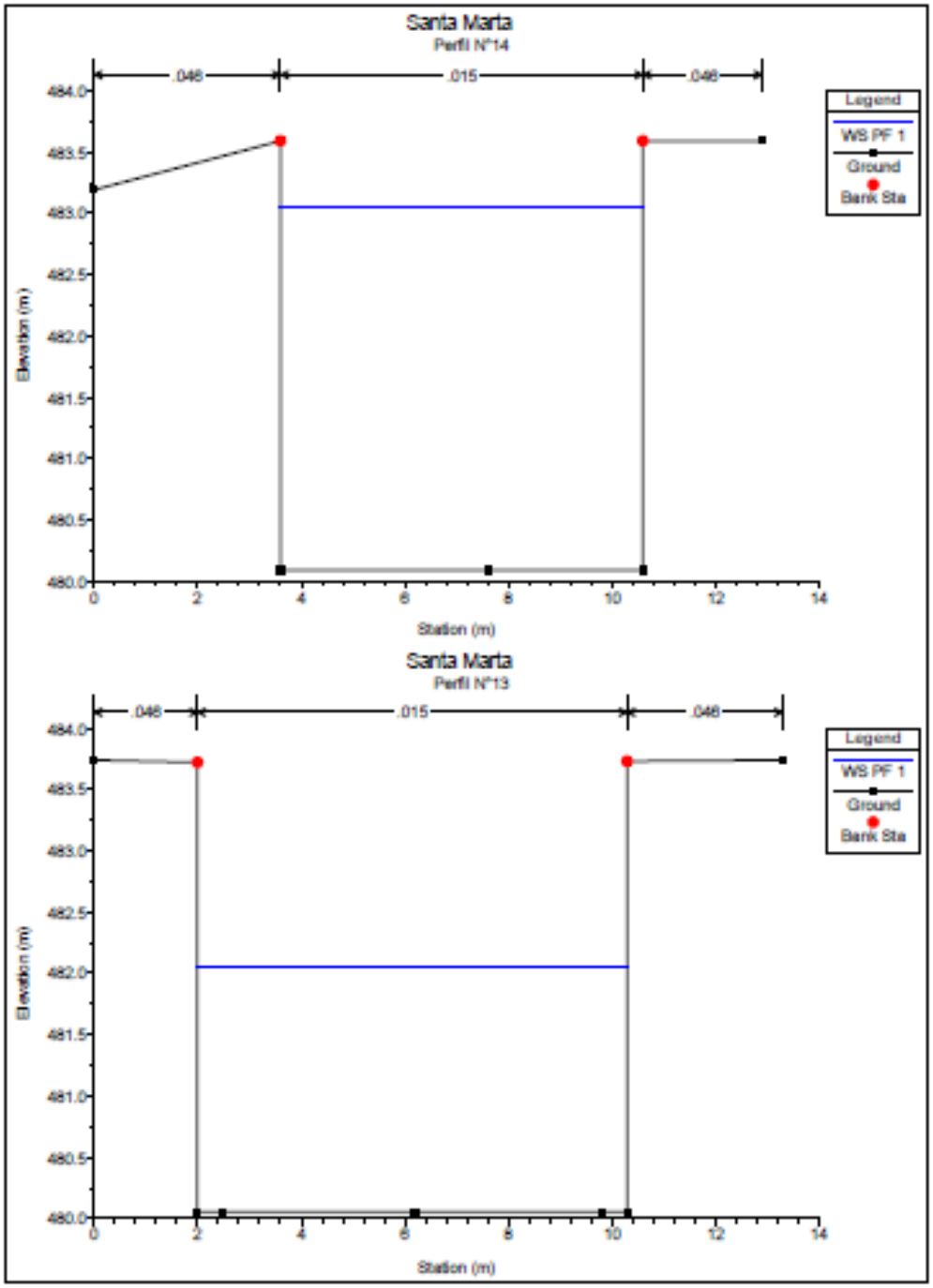


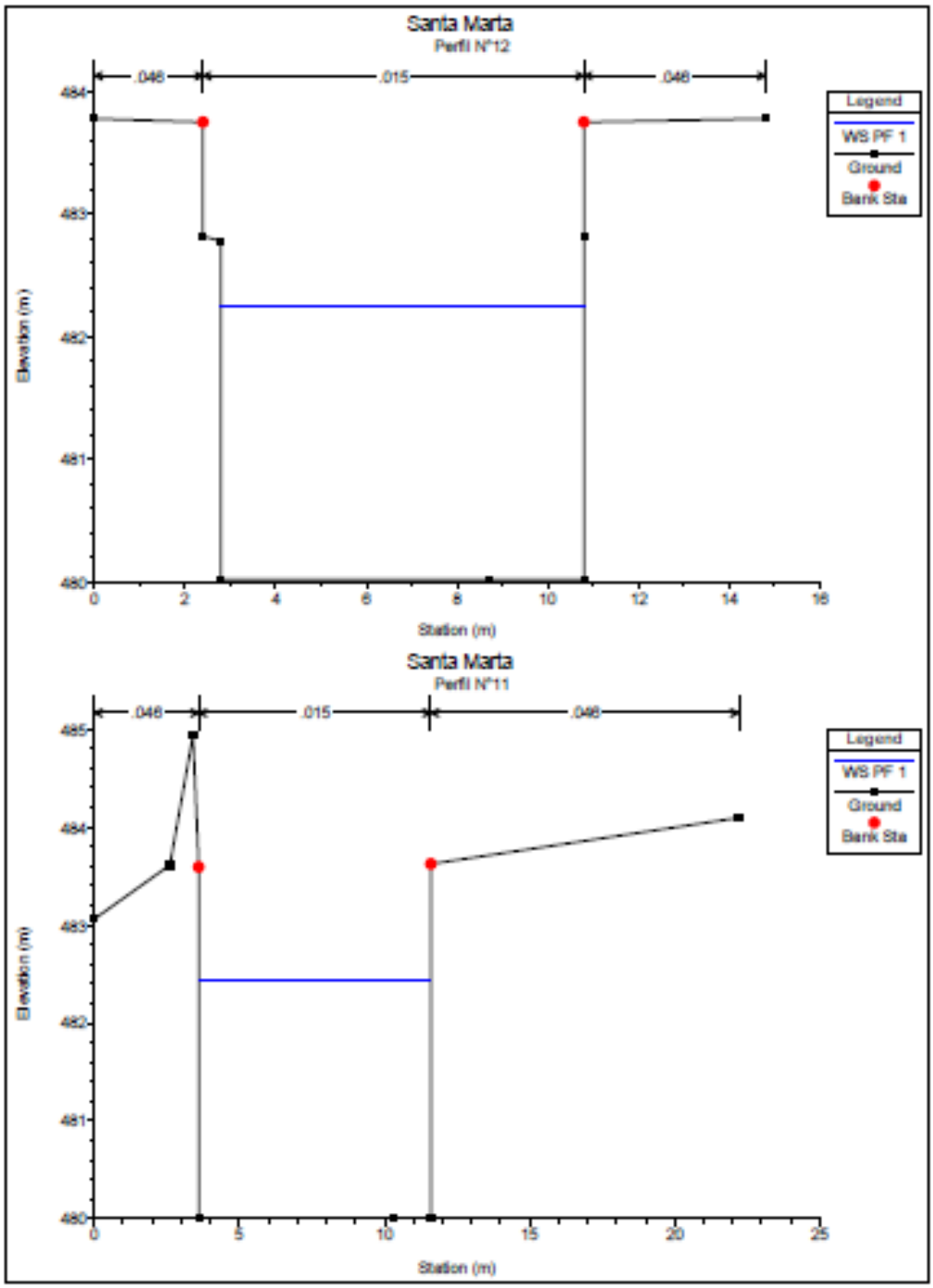

Santa Marta
Perfil N°18
.046
.015
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°17
.046
.015
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

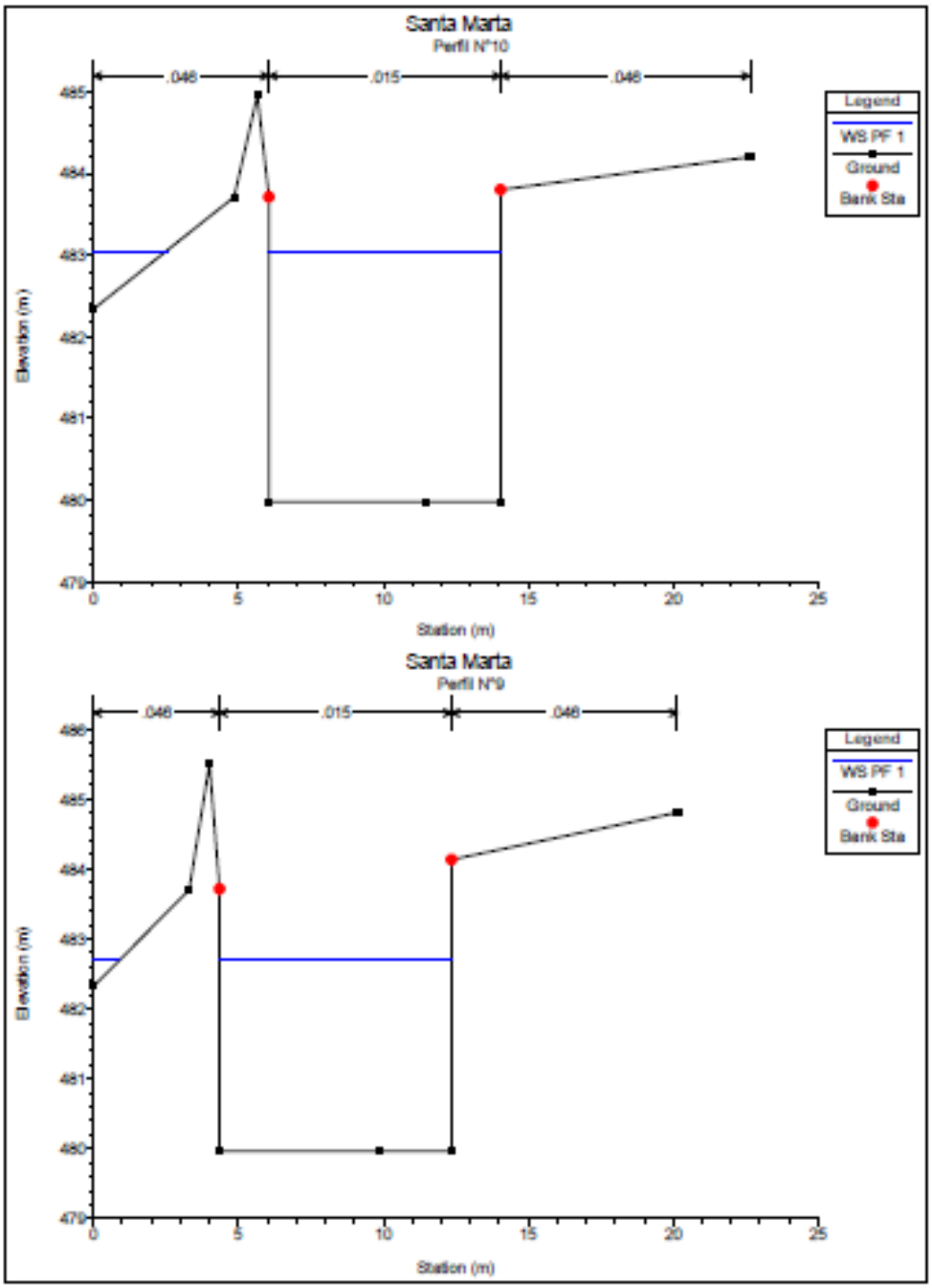

Santa Marta
Perfil N°16
.046
.015
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Puente Vehicular
.046
.015
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

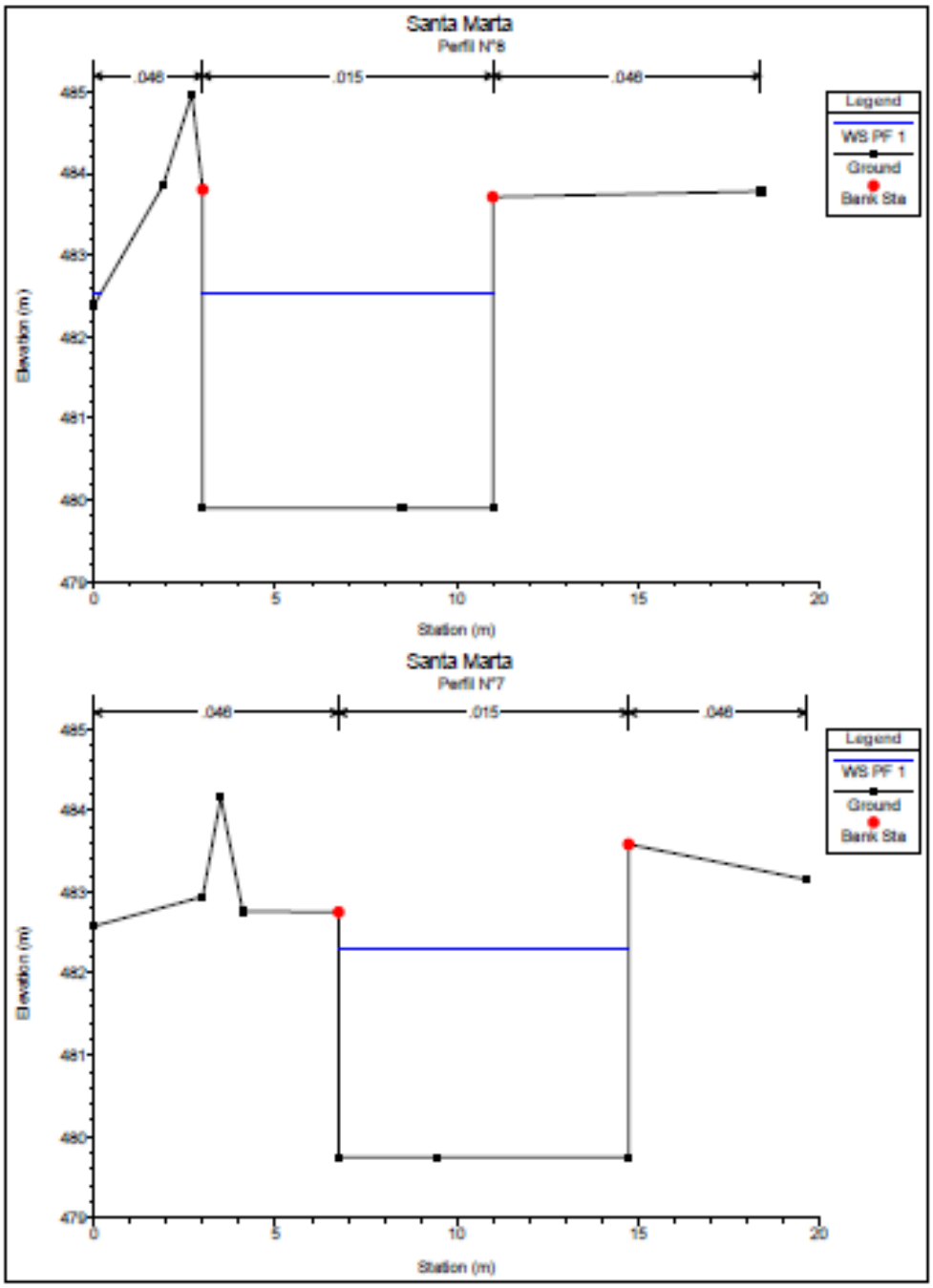

Santa Marta
Puente Vehicular
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°15
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

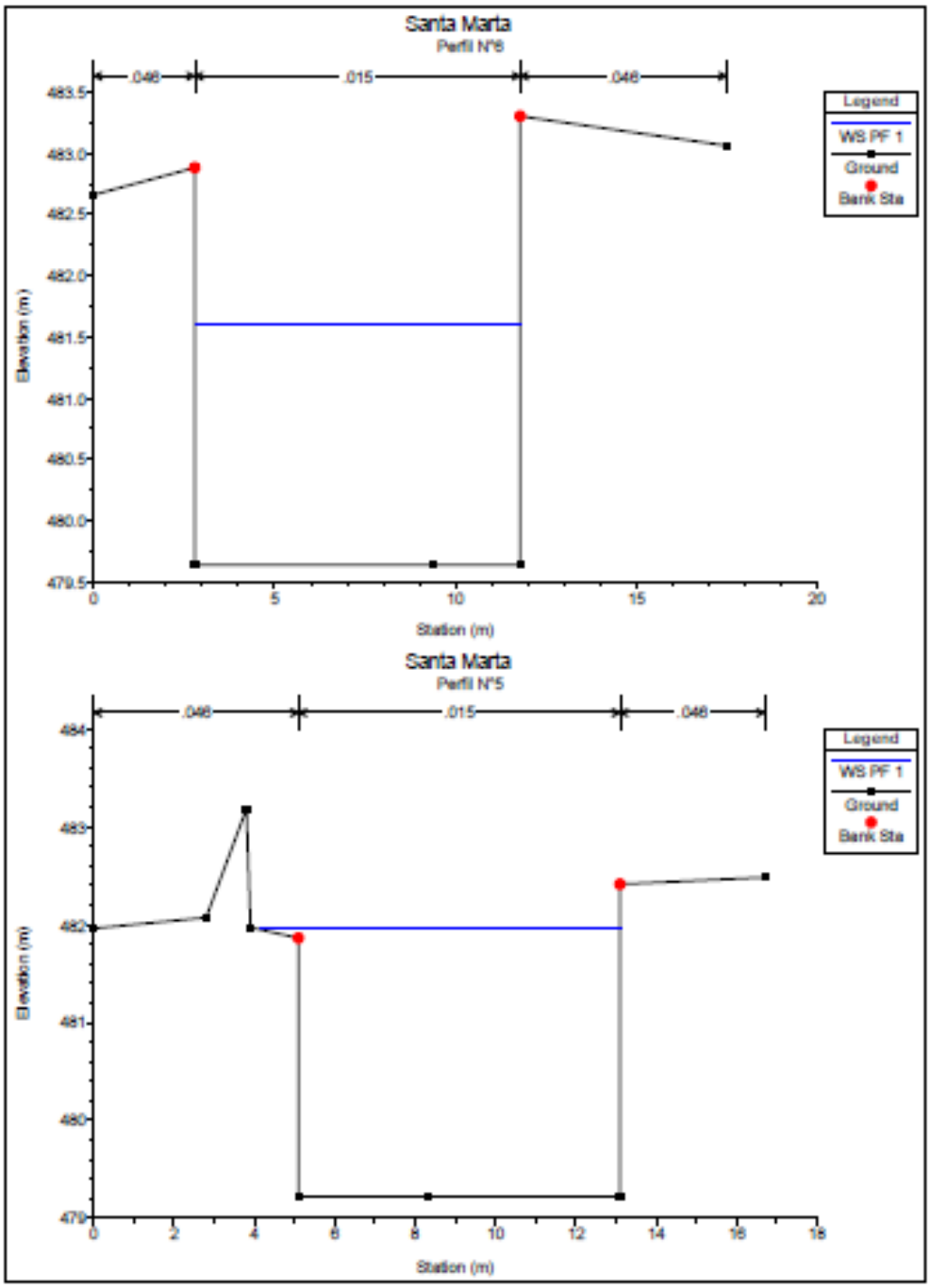

Santa Marta
Canoa Tagle Gandarillas
.046
.015
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Canoa Tagle Gandarillas
.046
.015
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

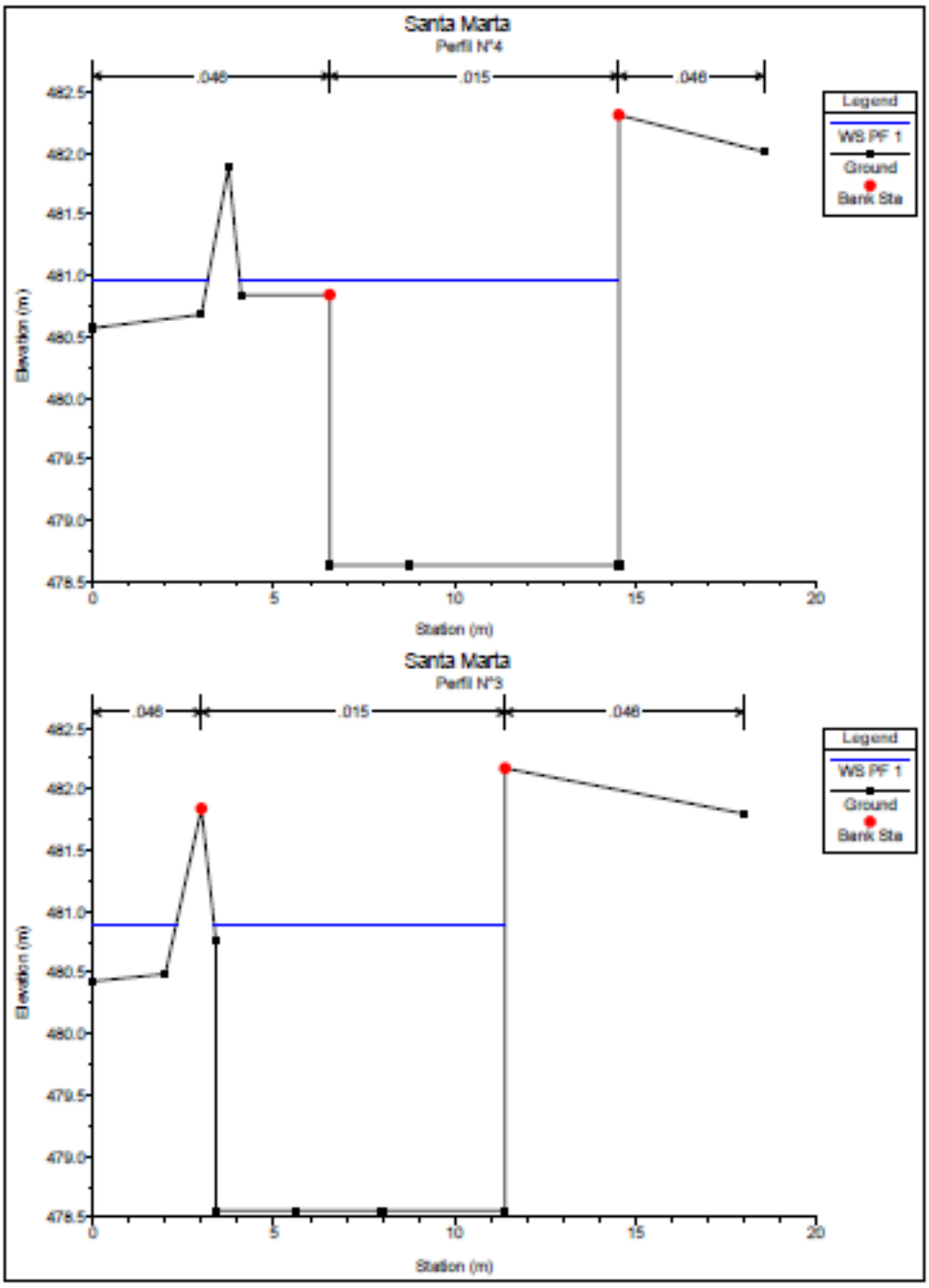

Santa Marta
Perfil N°14
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°13
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)

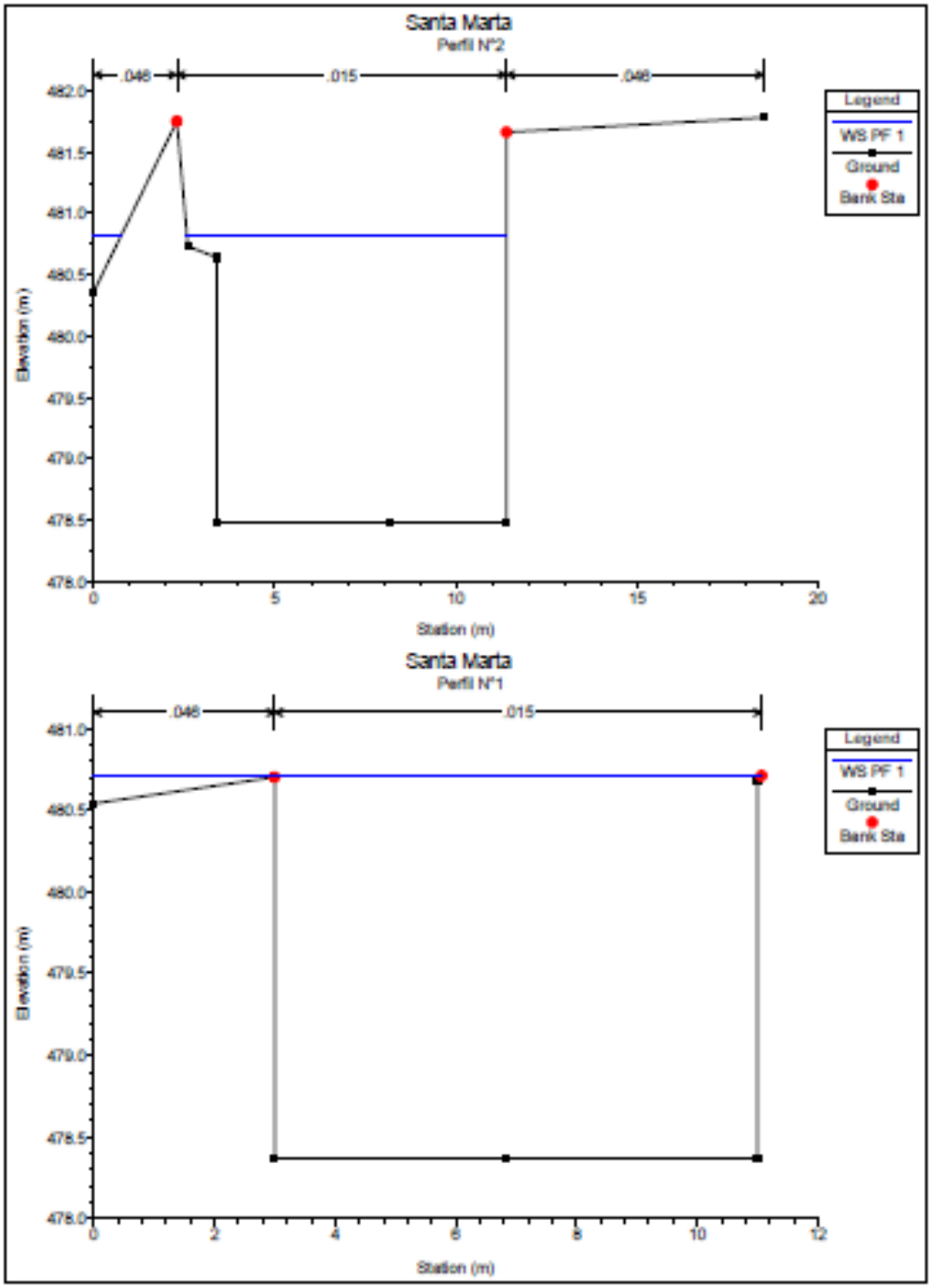

Santa Marta
Perfil N°12
.046
.015
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°11
.046
.015
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)


Santa Marta
Perfil N°10
.046
.015
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°9
.046
.015
.046
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)


Santa Marta
Perfil N°8
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°7
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)


Santa Marta
Perfil N°6
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°5
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)


Santa Marta
Perfil N°4
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°3
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)


Santa Marta
Perfil N°2
.048
.015
.048
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)
Santa Marta
Perfil N°1
.048
.015
Legend
WS PF 1
Ground
Bank Sta
Elevation (m)
Station (m)