



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS NUMÉRICO Y EN  
MODELO FÍSICO DEL  
COMPORTAMIENTO DEL  
SISTEMA DE DESCARGA DEL  
TÚNEL EMISOR ORIENTE**

**T E S I S  
PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
P R E S E N T A  
ING. EDUARDO AARÓN FUENTES SILVA**

DIRECTOR DE TESIS: DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ



MÉXICO, D.F

2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO**

Presidente: Dr. Domínguez Mora Ramón  
Secretario: Dr. Fuentes Mariles Oscar  
Vocal: Dr. Gracia Sánchez Jesús  
1er. Suplente: Dr. Carmona Paredes Rafael Bernardo  
2do. Suplente: M.I. Franco Víctor

Programa de maestría y doctorado en ingeniería

Facultad de Ingeniería

Tutor de tesis

Dr. Gracia Sánchez Jesús

---

## **AGRADECIMIENTOS**

**A mis padres, Angélica María Silva Bejero y Armando Fuentes Martínez**

**A mis hermanos, Miranda Angélica Fuentes Silva y Armando Fuentes Silva**

**A María Isabel Escalante Corona y Marlen Jiménez Labana**

**Al Instituto de Ingeniería, UNAM**

**A mis familiares y amigos**

# Índice

**Resumen**

**Introducción**

<b>1. Aspectos generales del sistema de drenaje del valle de México</b>	<b>1</b>
<b>2. Túnel Emisor Central (TEC)</b>	<b>4</b>
2.1 Descripción general de la obra derivadora del TEC	
<b>3. Río El Salto</b>	<b>8</b>
<b>4. Túnel Emisor Oriente (TEO)</b>	<b>10</b>
4.1 Descripción general del TEO	
<b>5. Modelo físico del TEO</b>	<b>13</b>
5.1 Obra de derivación del TEO (1ª versión)	
5.1.1 Descripción general de cada uno de los elementos que componen la obra de derivación del TEO (1ª versión)	
5.2 Descripción general de cada uno de los elementos que componen la obra de derivación del TEO (2ª versión)	
<b>6. HEC-RAS</b>	<b>20</b>
6.1 Descripción general de HEC-RAS	
<b>7. Ecuaciones fundamentales para el cálculo de perfiles hidráulicos</b>	<b>22</b>
7.1 Cálculo del flujo uniforme	
7.2 Cálculo de las condiciones críticas	
7.3 Cálculo del perfil del flujo en canales	
7.4 Método directo por pasos	

<b>8. Simulación del río El Salto y del TEO con ayuda del software HEC-RAS</b>	<b>31</b>
8.1    Primera simulación gasto de 80 m <sup>3</sup> /s (gasto del río El Salto)	
8.2    Segunda simulación gasto de 250 m <sup>3</sup> /s (gasto del río El Salto mas el gasto del TEO)	
<b>9. Resultados del análisis numérico y en modelo físico para las obras     derivadoras del TEC Y TEO</b>	<b>41</b>
9.1    Comparación de los resultados numéricos y en modelo físico del TEC	
9.1.1  Perfil sobre el canal principal del TEC (calculado y medido)	
9.1.2  Curva gastos-elevaciones del vertedor del TEC	
9.2    Resultado numéricos del TEO (1 <sup>a</sup> versión)	
9.3    Comparación de los resultados numéricos y en modelo físico del TEO (2 <sup>a</sup> versión)	
9.3.1  Curva gastos-elevaciones del vertedor del TEO (2 <sup>a</sup> versión)	
9.3.2  Problemas presentes en la obra derivadora del TEO (2 <sup>a</sup> versión)	
<b>10. Conclusiones</b>	<b>60</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>63</b>
<b>Apéndice A  Secciones transversales del río El Salto</b>	<b>65</b>
<b>Apéndice B  Resultados de la modelación en HEC-RAS sobre el río             El Salto, para 80 y 250 m<sup>3</sup>/s</b>	<b>72</b>
<b>Apéndice C  Funcionamiento del vertedor y tanque amortiguador del TEC</b>	<b>81</b>
<b>Apéndice D  Funcionamiento del vertedor, tanque amortiguador y             conexión a la obra del TEC para la 1<sup>a</sup> y 2<sup>a</sup> versión del TEO</b>	<b>87</b>

## **Resumen**

Debido a que la capacidad de drenaje del valle de México se ha disminuido, se plantea la construcción de un nuevo emisor, el cual servirá como una salida adicional. Dicha obra llevará por nombre Túnel Emisor Oriente (TEO). Este túnel permitirá conducir hasta un gasto de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La CONAGUA solicitó al Instituto de Ingeniería UNAM, la construcción de un modelo físico para poder estudiar el comportamiento hidráulico de la obra derivadora del TEO, este modelo fue diseñado para un gasto de  $170 \text{ m}^3/\text{s}$  (cabe mencionar que este gasto es mayor al esperado de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Dentro del instituto se modelaron dos posibles soluciones, ambas tienen un vertedor tipo Creager, la diferencia radica en que uno es recto mientras que el otro es curvo.

Después de observar y de haber realizado una serie de mediciones, se concluyó que la primera versión (vertedor recto), es la que tiene un mejor funcionamiento hidráulico, además de que su construcción es menos complicada.

## **Abstract**

Due to the fact that the drainage capacity of the Valley of Mexico has declined, the city plans the construction of a new stormwater drainage system, which will provide an additional drainage outlet. This structure will be called Túnel Emisor Oriente (TEO). This tunnel will allow discharging until of  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ .

CONAGUA requested to the Engineering Institute of UNAM, the construction of a physical model in order to study the hydraulic behavior of the TEO's outlet structure, this model was designed for a discharge of  $170 \text{ m}^3/\text{s}$  (It is necessary to mention that this discharge is bigger to the expected one of  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ). The institute proposed two possible solutions. Both have a Creager spillway; the difference is that one is straight while the other one is curved.

The tests performed allow concluding than the first version (straight spillway) shows a better hydraulic behavior, besides its construction is less complicated.

## **Introducción**

La capacidad de desalojo de la zona urbana de la ciudad de México ha disminuido de manera considerable a través del tiempo, principalmente por la pérdida de pendiente del Gran Canal y la pérdida de capacidad de conducción del Túnel Emisor Central (TEC). En el año de 2007 se aprobó la construcción del Túnel Emisor Oriente (TEO), con lo cual se planea completar el control del problema de drenaje de la zona urbana

El TEO tendrá, durante avenidas, una capacidad de descarga de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  (el gasto máximo utilizado para el modelo físico fue de  $170 \text{ m}^3/\text{s}$ ). En estiaje se considera que el gasto podrá alcanzar hasta  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , los cuales podrán ser derivados hacia una planta de tratamiento de agua residual en Atotonilco, Hidalgo. La descarga en avenidas, se realizará mediante un vertedor de descarga lateral hacia el río El Salto, cerca del actual portal de salida del TEC.

En este trabajo se presenta el análisis numérico y en modelo físico de las dos ubicaciones diferentes del vertedor de excedencias del Túnel Emisor Oriente (TEO) y dos geometrías distintas de conexión al sistema de alcantarillas. En ambos casos se ha propuesto la instalación de compuertas para controlar el gasto proveniente del TEO y/o del TEC hacia la

Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR). Es recomendable que las compuertas actuales se conservaran, para facilitar, como método alternativo, la operación simultánea de las descargas de ambos emisores.

Como se mencionó en el párrafo anterior se analizan dos alternativas del vertedor de excedencias, la primera se trata de un vertedor lateral recto, que descarga a un tanque amortiguador y luego conduce por un canal corto el agua hacia el río El Salto. Se encontró que esta versión funciona bien, pues la descarga esta bien controlada, el tanque amortiguador disipa una cantidad adecuada de energía y la conducción hacia el río es satisfactoria. El gasto de diseño del vertedor fue de  $170 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En la segunda alternativa se propuso también un vertedor lateral, pero con cresta curva (similar a la del TEC) que descarga a un tanque amortiguador y cuya descarga lateral conduce el agua al río El Salto. El vertedor como tal funcionó bien, lo cual era de esperarse ya que fue una reproducción del vertedor existente para el TEC; sin embargo, su descarga, en la conexión al río, no fue tan satisfactoria porque originó una socavación intensa. Esto probablemente podría evitarse realizando el revestimiento del río en dicha zona, lo cual implica una cantidad importante de obra. Además debe resolverse el problema constructivo y de estabilidad de la pared del vertedor lateral que, si bien en el modelo físico pudo construirse sin ningún problema, para el prototipo se estima que es una pared muy esbelta que requerirá de un apuntalamiento, con lo cual posiblemente se invadirá de manera importante el cauce del río El Salto.

En la primera versión de la conexión, que correspondía al del vertedor recto del TEO, se observó un mal funcionamiento de la conducción porque el flujo del TEO baja con gran velocidad por un cimacio y como no existe tanque amortiguador, el flujo va por el canal curvo, con grandes oscilaciones de la superficie libre del agua, hasta llegar a la obra de toma del TEC. Se probó en el modelo la existencia de un tanque amortiguador al pie del cimacio, pero dada la curvatura del canal, no se obtuvieron buenos resultados. El gasto de diseño empleado fue de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La segunda versión del canal de conexión fue la correspondiente a la segunda versión del vertedor de excedencias (el curvo). En este caso se probó otra curvatura del canal con la posibilidad de alojar un tanque amortiguador en un tramo recto. Esta segunda versión funcionó mejor que en el caso anterior y si bien comparado con el anterior no se compone totalmente el flujo respecto a las oscilaciones, hay una sensible mejora en su funcionamiento.

## **1. Aspectos generales del sistema de drenaje del valle de México<sup>1</sup>**

La zona metropolitana del valle de México se encuentra situada sobre una cuenca cerrada, la cual formaba un sistema lacustre integrado por cinco grandes lagos: Texcoco, Xaltocan, Zumpango, Xochimilco y Chalco.

En época de lluvias, estos lagos se convertían en uno con una superficie de dos mil kilómetros cuadrados y con ello, venían las inundaciones periódicas que desde la fundación de Tenochtitlan han enfrentado sus habitantes (Fig. 1.1).

---

<sup>1</sup> Si se desea profundizar más en este tema, se recomienda al lector consultar la Tesis de licenciatura del autor de este trabajo.



Fig. 1.1 Valle de México

Con estos problemas ha surgido la necesidad de construir importantes obras de drenaje para el control y desalojo de las aguas residuales y pluviales del valle de México, como son por ejemplo:

- El Albarradón de Nezahualcóyotl (1449)
- El Tajo de Nochistongo (1789)
- El Gran Canal del Desagüe (1900)
- Drenaje Profundo (1975)

En el año de 1975 la población era de 10 millones de habitantes y el Emisor del Poniente que descarga por el río Cuautitlán y el Tajo de Nochistongo y el Emisor Central como columna vertebral del Sistema de Drenaje Profundo, podían desalojar hasta 280 m<sup>3</sup>/s.

En la actualidad, cuando la población prácticamente se ha duplicado, dicha capacidad se ha reducido y por este motivo es necesario: rehabilitar y mantener las obras existentes así como realizar nuevas obras; es por eso que en esta tesis, se plantea y analiza una solución, la cual consiste en construir un nuevo emisor que llevará por nombre Túnel Emisor Oriente (TEO). Esta obra permitirá un mayor desalojo de agua ayudando a prevenir posibles inundaciones en el valle de México.

## **2. Túnel Emisor Central**

### **2.1 Descripción general de la obra derivadora del TEC**

La obra derivadora del Túnel Emisor Central (Fig. 2.1.1), se inicia en el km. 49+742.348 del Emisor central y está ubicada aproximadamente 6 km. a la derecha de la autopista México-Querétaro a la altura de Tepeji del Río, cerca de la margen derecha de la presa Requena.

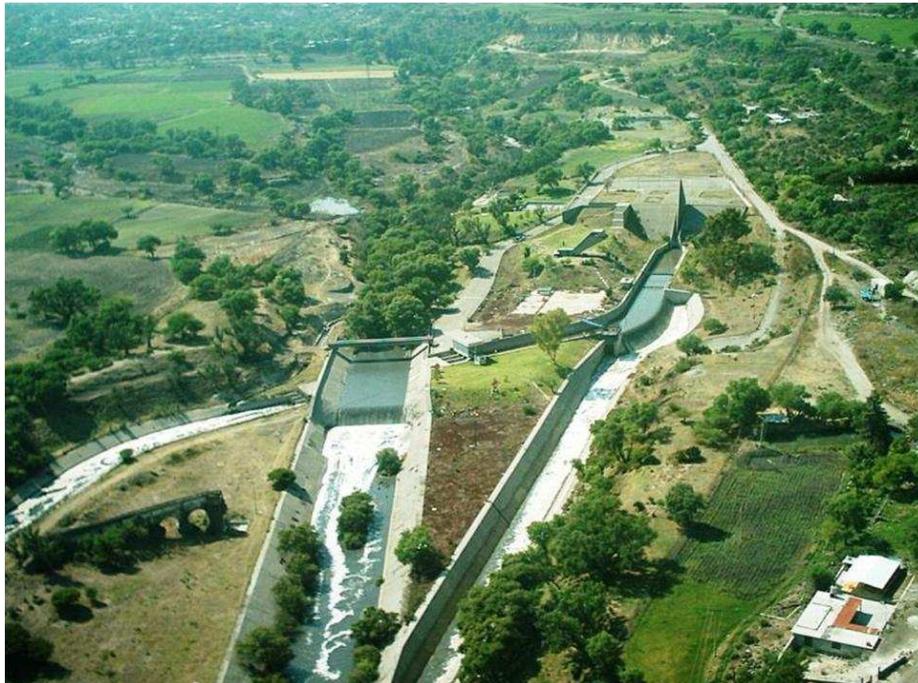


Fig. 2.1.1 Obra derivadora del Túnel Emisor Central

La derivación está compuesta por las obras siguientes:

- a) Portal de salida (Fig. 2.1.2)
- b) Canal principal (Fig. 2.1.3)
- c) Desarenador (Fig. 2.1.4)
- d) Vertedor de excedencias (Fig. 2.1.5)
- e) Canal de toma en curva (Fig. 2.1.6)
- f) Estructura de control (Fig. 2.1.7)
- g) Túnel alcantarilla bajo el río el Salto (Fig. 2.1.8)
- h) Rectificación del río el Salto (Fig.2.1.9)



Fig. 2.1.2 Portal de salida



Fig. 2.1.3 Canal principal



Fig. 2.1.4 Desarenador



Fig. 2.1.5 Vertedor de excedencias



Fig. 2.1.6 Canal de toma en curva



Fig. 2.1.7 Estructura de control



Fig. 2.1.8 Túnel alcantarilla bajo el río El Salto



Fig. 2.1.9 Rectificación del río El Salto

Se denomina portal de salida a la transición de túnel a canal rectangular y tiene una longitud de 13.8 m. A partir de esta zona se inicia el canal principal, el cual es de sección rectangular con 11.5 m. de ancho, altura libre variable de 8.24 a 8.88 m. y pendiente de 0.008.

Inmediatamente después del canal principal se inicia el vertedor de excedencias, el cual se localiza en la margen izquierda y tiene perfil Creager. En el extremo aguas abajo del vertedor, se localiza un muro de concreto con dos aberturas, en las cuales se instalaron dos compuertas deslizantes de fierro fundido de 1.53 m. de ancho y 1.83 m. de altura, las cuales permiten hacer la limpieza del canal principal.

El vertedor de excedencias divide la estructura en dos canales, uno llamado de descarga de 242 m. de longitud, sección trapecial de 6.53 m. de plantilla, taludes 0.8:1 y a nivel, y el otro canal de toma, que tiene un ancho variable de 11.5 a 10 m., altura libre de 7.5 m., longitud en tangente de 55 m. y también a nivel. Entre el canal principal y el de toma, existe un desnivel de 1.7 m.

El canal de toma cruza por abajo del río El Salto, mediante un túnel alcantarilla de 10 m. de ancho dividido en tres cajones por medio de muros de concreto. Antes de cada cajón se instaló una compuerta radial de 3 x 6 x 6 m. (tipo CM-C-70), operada eléctricamente desde el puente de maniobras, para manejar gastos requeridos en el distrito de riego 03. Al final de este túnel alcantarilla, existe una zona de transición de 30 m. de longitud con objeto de pasar de sección rectangular a canal trapecial; este canal tiene 3 m. de ancho de plantilla, taludes 1.5:1 y pendiente de 0.002.

### **3. Río El Salto**

Actualmente el Túnel Emisor Central descarga ha este río ya sea por su obra derivadora hasta la presa Requena o por el canal El Salto-Tlamaco que posteriormente va al río Tula y a la presa Endó, dicho canal satisface las demandas del Distrito de Riego Número 3. El río El Salto es un afluente del Tula y éste a su vez del Moctezuma, y el Moctezuma del Pánuco el cuál descarga en el Golfo de México.

El río El Salto se encuentra rectificado desde aproximadamente la alcantarilla del Túnel Emisor Central hasta la confluencia con el canal de descarga del mismo, por medio de un canal de concreto de sección trapezoidal de 20 m de ancho, taludes 1.5:1 y pendiente de 0.0083, además se ha construido un cimacio al pie del cual se localiza un tanque amortiguador. Desde este punto hasta la zona de confluencia con la obra derivadora del TEC, continúa este canal con la geometría antes descrita, modificando su pendiente a 0.0033. (Fig. 3.1)

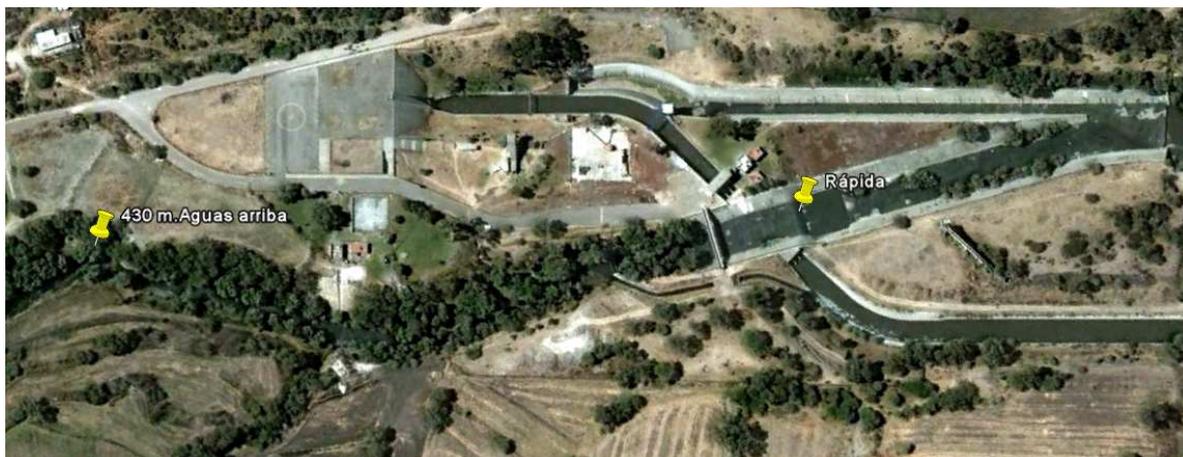


Fig. 3.1 Río El Salto

La zona de confluencia del río El Salto y el canal de descarga, se ha protegido por medio de un revestimiento de concreto, formando una transición gradual hasta su unión con la sección rectificada del río Tula. (Fig. 3.2)



Fig. 3.2 Zona de confluencia

En este trabajo se pretende realizar un análisis del funcionamiento actual de este río en la zona donde descarga el TEC y donde descargaría el TEO, así como de las afectaciones que tendrían las aguas provenientes del TEC y del TEO. Este análisis se realizará con ayuda de software HEC-RAS, el estudio comprende 430 m. los cuales son medidos desde el inicio de la rápida (tanque amortiguador) ubicada sobre el mismo río hacia aguas arriba.

#### **4. Túnel Emisor Oriente**

##### **4.1 Descripción general del TEO**

El Túnel Emisor Oriente permitirá contar con una salida complementaria y alterna al Túnel Emisor Central y así reducir el riesgo de inundaciones en la ciudad de México y a su zona conurbada, dando seguridad a 20 millones de habitantes. En temporada de lluvias funcionará de manera simultánea con el actual drenaje profundo y, en épocas de secas, lo hará alternadamente para facilitar su mantenimiento.

Esta obra de ingeniería iniciará en la lumbrera 2 del Túnel Interceptor Río de los Remedios, en los límites del Distrito Federal y el Estado de México, hasta su salida en el río El Salto, estado de Hidalgo, teniendo así una longitud aproximada de 62 km.

El TEO estará compuesto por 24 lumbreras con profundidades que van desde los 23 m. hasta 145 m., este túnel permitirá conducir  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  (el gasto utilizado dentro del Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México; y en esta tesis, es de  $170 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Para construir este túnel se utilizarán seis escudos excavadores con las siguientes características por escudo: longitud de 95 m., diámetro del disco cortador de 8.7 m. y un peso de 108 ton., que acoplado al equipo motriz tiene un peso de 600 ton (Fig. 4.1.1). Estos escudos conforme avanzan, van colocando dovelas al interior del túnel formando los anillos, los cuales son parte importante para esta obra. Estas dovelas están diseñadas para resistir las distintas cargas del suelo, el equipo excavador tiene la capacidad de colocar en promedio 13 anillos por día.

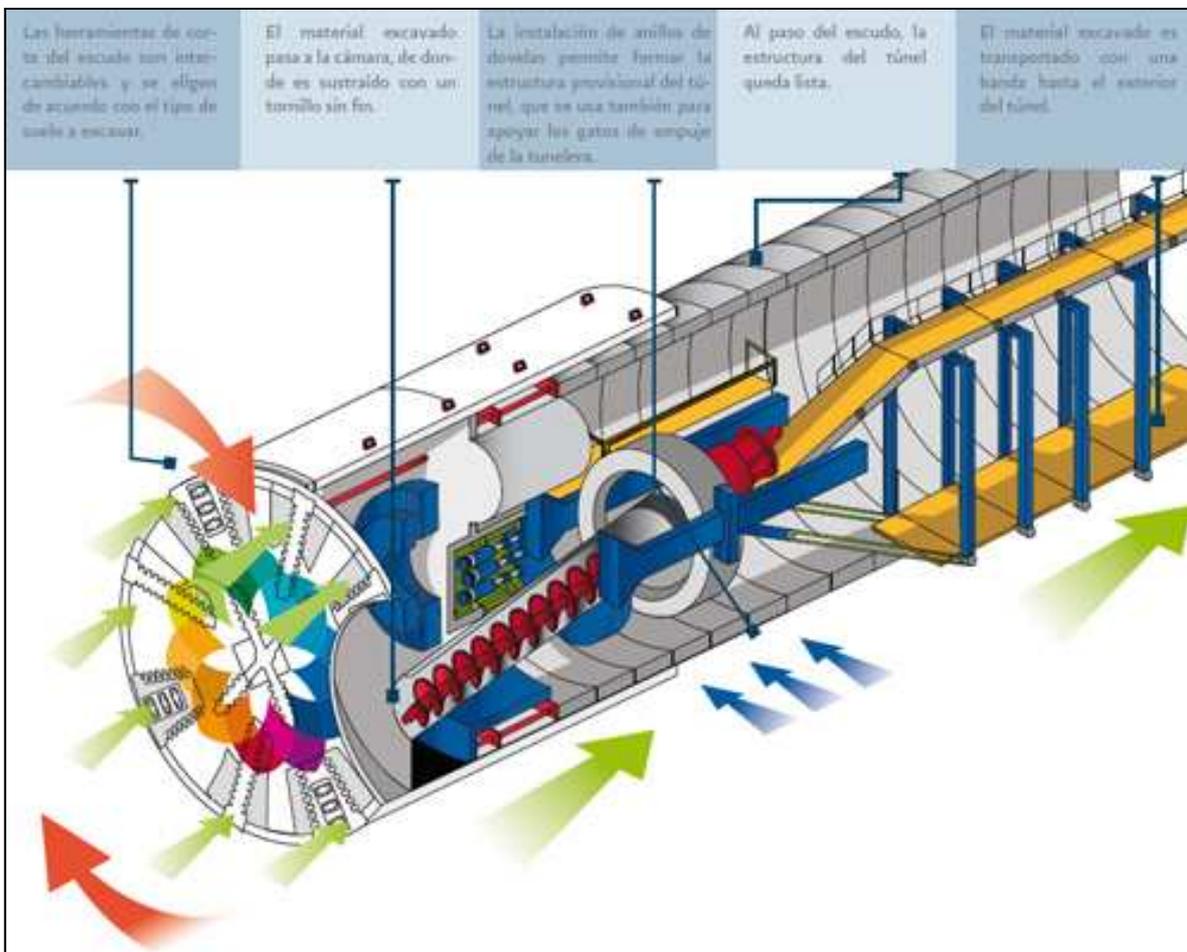


Fig. 4.1.1 Escudo excavador

Cada anillo consta de siete dovelas que en total pesan 35 toneladas, al día se fabrican 26 anillos completos en cada una de las plantas, las cuales fueron montadas exclusivamente para fabricar las estructuras de concreto para el túnel. Tres plantas productoras de dovelas se encargan de fabricar los 42,000 anillos de concreto que revestirán el TEO.

Para comprobar que el concreto utilizado en las dovelas cumpla con los requerimientos necesarios para esta obra, se realizan una serie de pruebas, la primera prueba se le aplica cuando sale del curado de vapor, la siguiente es a los tres días, otra a los siete y la última a los 28 días de que se terminó de fabricar. Por lo regular, a los tres días la dovela ya alcanzó la resistencia máxima que es de 350 kilogramos por centímetro cuadrado. Cuando ya se cubrió todo el protocolo de pruebas, la dovela ya está lista para ser transportada a alguna de las lumbreras del Túnel Emisor Oriente.

## 5. Modelo físico del TEO

### 5.1 Obra de derivación del TEO (1ª versión)

La derivación está compuesta por las obras siguientes (ver Fig. 5.1.1):

- a) Portal de salida
- b) Canal principal
- c) Desarenador
- d) Vertedor de excedencias
- e) Túnel alcantarilla bajo el río El Salto (se utilizará el mismo del TEC)
- f) Encauzamiento río El Salto
- g) Mejoramiento de zonas adyacentes a canales y estructuras para vigilancia.

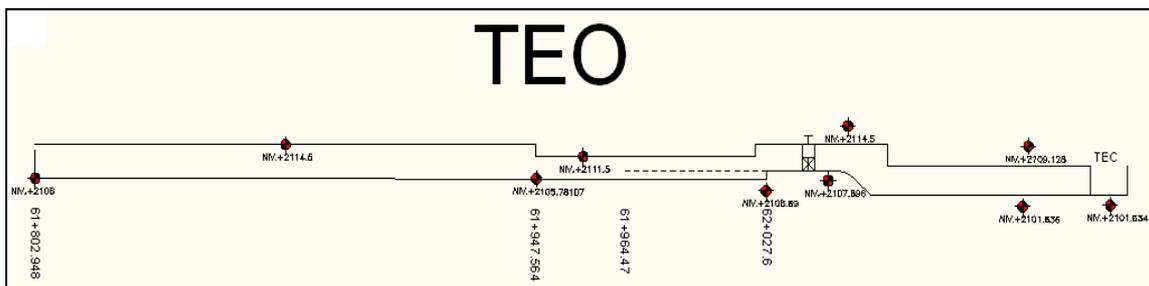


Fig. 5.1.1 Obra de derivación del Túnel Emisor Oriente

En el portal de salida existe una transición de túnel a canal rectangular con una longitud de 15 m. A partir de esta zona se inicia el canal principal, el cual es de sección rectangular con 12 m. de ancho y pendiente de 0.0015139.

Inmediatamente después del canal principal se inicia el vertedor de excedencias que se localiza en la margen derecha del canal y tiene perfil Creager este vertedor se unirá al Río El Salto (ver Fig. 5.1.2).



Fig. 5.1.2 Detalle del vertedor de excedencias del TEO

En el extremo aguas abajo donde el canal rectangular entra en curva se localiza un muro de concreto con dos aberturas, en el cual se podrán colocar dos compuertas deslizantes de fierro fundido que permitirá hacer la limpieza del canal principal.

El canal principal del Túnel Emisor Oriente se une a la obra derivadora del Túnel Emisor Central, esta unión esta regulada por un conjunto de compuertas radiales de 3 x 6 x 6 m. (tipo CM-C-70), operada eléctricamente desde el puente de maniobras, para manejar gastos requeridos en el distrito de riego 03. Entre el canal principal del TEO y el canal que se unirá al TEC, existe un desnivel de 2 m, el cual permitirá desarenar el canal principal del TEO.

### **5.1.1 Descripción General de Cada uno de los Elementos que Componen la Obra de Derivación del TEO (1ª Versión).**

#### Portal de salida

- El portal de salida está sobre el Cad. 61+802.948 (el cual corresponde al trazo del TEO desde la lumbrera 0).
- El Túnel Emisor Oriente tiene un diámetro interior de 7 m.
- La plantilla del portal de salida del TEO se encuentra en el nivel 2106 msnm
- El túnel pasa a un canal de sección rectangular con ancho de plantilla de 12 m., esta transición tiene una longitud de 15 m.

#### Vertedor

- Perfil Creager
- El vertedor inicia en el Cad. 61+947.56
- Nivel de plantilla 2105.781 msnm
- Nivel de cresta 2111.5 msnm
- Longitud de cresta 60 m (recta)
- Cuenta con un tanque amortiguador de 15 m.

### Desarenador

- Cad. 62+027.6
- Nivel de plantilla 2105.66 msnm
- Dos aberturas en las que se podrá instalar dos compuertas deslizantes de fierro fundido de 1.53 m de ancho y 1.83 m de altura, las que permiten hacer la limpieza del canal principal.

### Canal de unión del TEO y el TEC

- Su inicio se encuentra en el nivel 2107.66 msnm
- Cuenta con una rápida inmediatamente después de las compuertas radiales para poder llegar al mismo nivel 2101.634 msnm, que tiene la obra de toma del TEC.
- Después de la rápida el canal se mantiene horizontal hasta unirse con la obra de toma del TEC.



Fig. 5.1.1.1 Planta de la primera versión del TEO

## **5.2 Descripción General de Cada uno de los Elementos que Componen la Obra de Derivación del TEO (2ª Versión).**

De acuerdo con la propuesta del personal de la CONAGUA, se modeló una segunda alternativa del vertedor de excedencias.

### Portal de salida

- El portal de salida está sobre el cad. 61+802.948 (el cual corresponde al trazo del TEO desde la lumbrera 0).
- El Túnel Emisor Oriente tiene un diámetro interior de 7 m.
- La plantilla del portal de salida del TEO se encuentra en el nivel 2106 msnm
- El túnel pasa a un canal de sección rectangular con ancho de plantilla de 11 m., esta transición tiene una longitud de 15 m.

### Vertedor

- Perfil Creager
- El vertedor inicia en el cad. 61+991.948
- Nivel de cresta 2111 msnm
- Longitud de cresta 50 m (curvo)
- Cuenta con un tanque amortiguador.



Fig. 5.2 Vertedor

#### Canal de unión del TEO y el TEC

- Su inicio se encuentra en el nivel 2107.28 msnm
- Cuenta con una rápida inmediatamente después de las compuertas radiales para poder llegar al mismo nivel 2101.634 msnm que tiene la obra de toma del TEC.
- Después de la rápida el canal cuenta con un tanque amortiguador

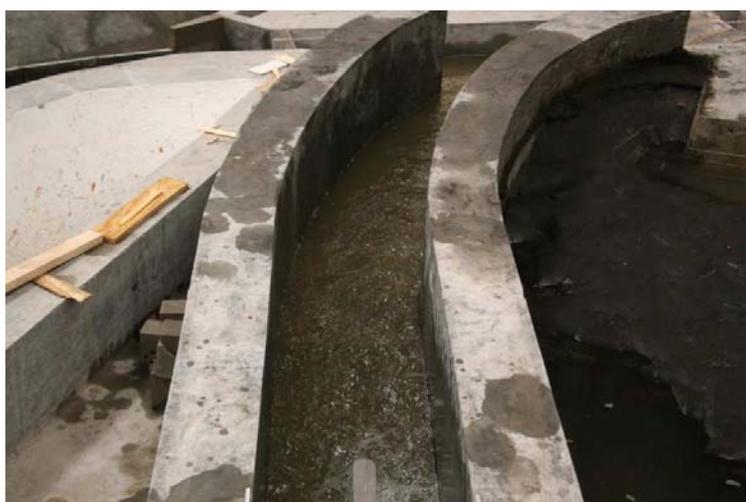


Fig. 5.3 Canal de unión del TEO y el TEC

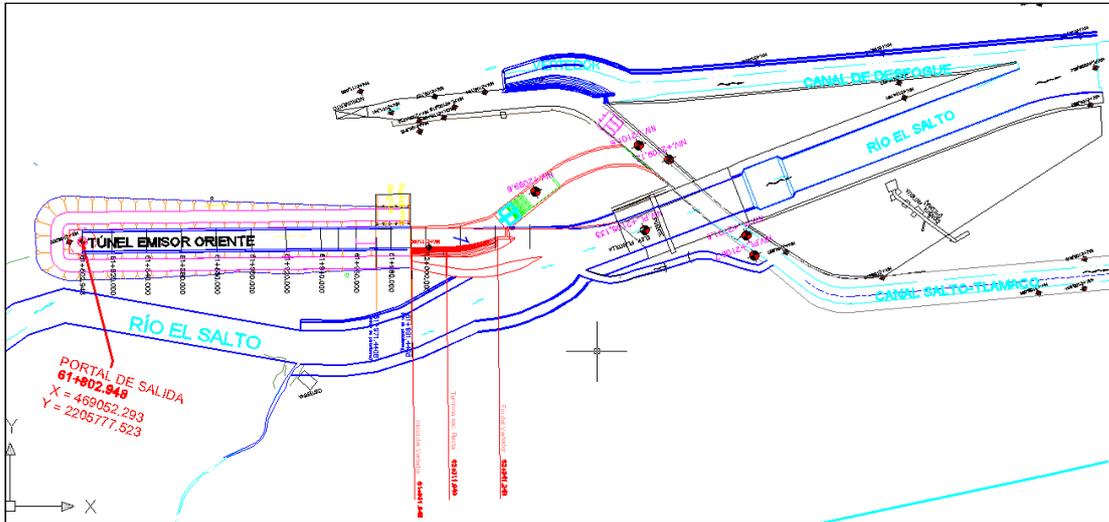


Figura 5.4 Obra de Derivación del Túnel Emisor Oriente (2ª Versión)



Fig. 5.5 Modelo de la obra de derivación del Túnel Emisor Oriente

## **6. HEC-RAS**

### **6.1 Descripción General del programa HEC-RAS**

El Centro de Ingeniería Hidrológica (HEC) en California, desarrolló el Sistema de Análisis de Río (RAS) para ayudar a los ingenieros hidráulicos en el análisis de canales de flujo y determinación de llanura de inundación. Incluye numerosas funciones de entrada de datos, análisis de componentes hidráulicos, almacenamiento de datos y capacidades de gestión y capacidades de gráficos e informes.

HEC-RAS es un programa de computadora que modela el sistema hidráulico de flujo de agua a través de los ríos naturales y canales. El flujo es unidimensional por lo que no hay modelado directo del efecto hidráulico de sección en forma de cruz, cambios, curvas, y otros aspectos de dos y tres dimensiones del flujo. El programa fue desarrollado por el Departamento de Defensa de EE.UU. El programa fue lanzado en 1995.

El procedimiento básico de cálculo de HEC-RAS para el flujo constante se basa en la solución de la ecuación de la energía. Las pérdidas de energía son evaluadas por la fricción y la contracción/expansión. La ecuación de momento se utiliza en situaciones donde rápidamente el perfil del agua varía. Estas situaciones incluyen saltos hidráulicos, sistema hidráulico de los puentes, y la evaluación de los perfiles en las confluencias del río. Para el flujo inestable, HEC-RAS utiliza la ecuación dinámica de Saint-Venant mediante un método de diferencias finitas.

HEC-RAS es capaz de modelar flujo subcrítico, supercrítico, y de flujo mixto, régimen de flujo tomando los efectos de puentes, alcantarillas, vertederos, y las estructuras.

## **7. Ecuaciones fundamentales para el cálculo de perfiles hidráulicos**

### **7.1 Cálculo del flujo uniforme**

Se considera que el flujo uniforme tiene las características principales siguientes:

- 1) La profundidad, el área mojada, la velocidad y el caudal en cada sección del canal son constantes
- 2) La línea de energía, la superficie del agua y el fondo del canal son paralelos; es decir, sus pendientes son todas iguales, o  $S_E = S_w = S_0 = S$  (Fig. 7.1.1)

$S_E$  es la pendiente de la línea de energía

$S_w$  es la pendiente de la superficie libre

$S_0$  es la pendiente del fondo

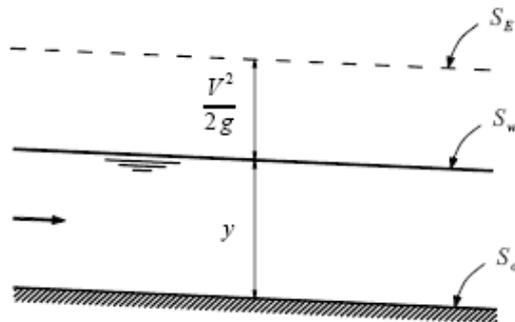


Fig. 7.1.1 Movimiento uniforme en un canal

En la práctica es muy difícil encontrar un movimiento que sea estrictamente uniforme. En muchos casos el flujo en canales y ríos se considera, desde el punto de vista del ingeniero, uniforme.

En el cálculo del flujo uniforme intervienen seis variables:

- a) Gasto
- b) Velocidad
- c) Tirante
- d) Coeficiente de Manning
- e) Pendiente
- f) Geometría de la sección

Son dos ecuaciones con las que se puede realizar el cálculo:

- 1) Ecuación de continuidad entre dos secciones

2) Ecuación de Manning para la fricción

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Sustituyendo la ecuación de Manning para la fricción en la de continuidad se puede expresar al gasto como:

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

o de la manera siguiente

$$AR_h^{2/3} = \frac{nQ}{\sqrt{S}}$$

donde

A      área hidráulica en m<sup>2</sup>

V      velocidad en m/s<sup>2</sup>

n      rugosidad en s/m<sup>1/3</sup>

R<sub>h</sub>    radio hidráulico en m

S      pendiente

Q      gasto en m<sup>3</sup>/S

Así el término de la derecha de la ecuación anterior depende de  $n$ ,  $Q$  y  $S$ , pero el de la izquierda únicamente de la geometría de la sección, con esto se puede hacer notar que para una condición de  $n$ ,  $Q$  y  $S$  hay un tirante único “ $y$ ”, llamado “tirante normal” que se establece para flujo uniforme.

## 7.2 Cálculo de las condiciones críticas

El estado crítico del flujo a través de una sección de canal se caracteriza por varias condiciones entre las más importantes se encuentran:

- a) La energía específica es mínima para un caudal determinado
- b) El caudal es máximo para una determinada energía específica
- c) La fuerza específica es mínima para un caudal determinado
- d) La carga de velocidad es igual a la mitad de la profundidad hidráulica en un canal de baja pendiente
- e) El número de Froude es igual a la unidad
- f) La velocidad es igual a la celeridad de pequeñas ondas gravitacionales en aguas poco profundas causadas por perturbaciones locales.

El problema más común consiste en determinar el tirante crítico que corresponde a la energía específica mínima cuando se conoce las dimensiones de la sección y el gasto. Las condiciones en que se desarrolla el régimen crítico en un canal deben satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Q^2}{g \cos \theta / \alpha} = \frac{A_c^3}{T_c}$$

$$E_c = \left( y_c + \frac{1}{2} \frac{A_c}{T_c} \right) \cos \theta$$

donde

$T_c$  es el ancho de superficie libre de la sección

Para las secciones más comunes en canales artificiales se han desarrollado ecuaciones más sencillas, o bien diagramas que permiten la solución directa. A continuación solo se hará mención de las ecuaciones para secciones rectangulares y trapeciales.

a) Sección rectangular

$$\frac{Q}{\sqrt{g'}} = \frac{b^{2/3} y_c^{3/2}}{b^{1/2}}$$

donde

$$g' = g \cos \theta / \alpha$$

haciendo  $q = Q/b$  (gasto unitario), el tirante crítico es

$$y_c = \left( \frac{q^2}{g'} \right)$$

Permitiendo su cálculo directo.

b) Sección trapecial

Para tener un procedimiento de cálculo, se puede utilizar la ecuación siguiente:

$$\frac{Q^2}{g' b^2} = \frac{(b + ky_c)^3 y_c^3}{b^2 (b + 2ky_c)} = \frac{[1 + (ky_c/b)]^3 y_c^3}{1 + 2(ky_c/b)}$$

o bien

$$y_c = \left( \frac{Q^2}{g' b^2} \right)^{1/3} \left[ \frac{[1 + 2(ky_c/b)]^{1/3}}{1 + (ky_c/b)} \right]$$

donde

$y_c$  tirante crítico en m

$g$  aceleración de gravedad en  $m/s^2$

$b$  ancho de canal en m

$k$  talud

### 7.3 Cálculo del Perfil del Flujo en Canales

El cálculo del flujo gradualmente variado involucra en esencia la solución de la ecuación dinámica del flujo gradualmente variado, para conocer la variación del tirante a lo largo de un canal, donde se conoce la pendiente, el coeficiente de Manning y el caudal que conduce. En el caso general, el canal puede o no ser prismático y tener o no una rugosidad uniforme en toda su longitud.

Para calcular el perfil del flujo en un canal, existe una variedad de técnicas, cada una adecuada al caso particular que se trate:

- Método de integración gráfica
- Método de integración directa
- Método por pasos

En esta tesis sólo se maneja el método directo por pasos.

#### **7.4 Método directo por pasos**

En general, un método de paso se caracteriza por dividir el canal en tramos cortos y llevar a cabo los cálculos paso a paso desde un extremo del tramo hasta el otro (el inicio del cálculo dependerá del régimen), procurando que la distancia entre cada tramo sea pequeña<sup>2</sup>.

En la figura 7.4.1 se muestra el tramo de un canal prismático con rugosidad uniforme, limitado por las secciones 1 y 2 separadas por una distancia  $\Delta x$ .

---

<sup>2</sup> Un criterio es considerar que la velocidad entre las dos secciones no difiera en más de 20%

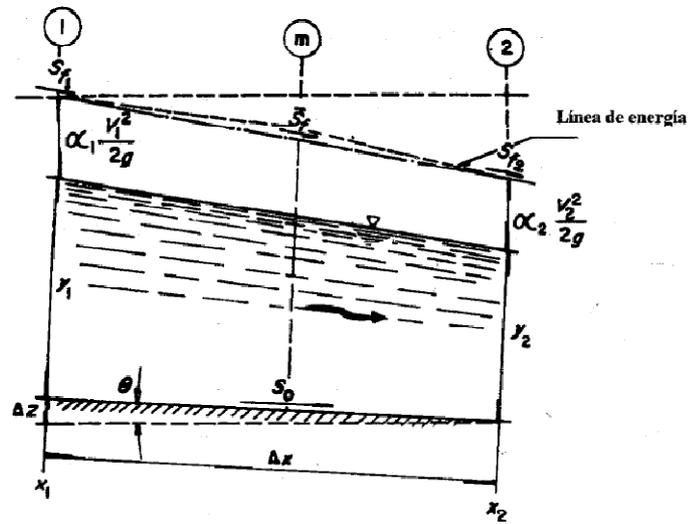


Fig. 7.4.1 Tramo de un canal prismático

Aplicando la ecuación dinámica entre ambas secciones en términos de incrementos finitos, resulta:

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{V^2}{2g} + y \right) = S_0 - S_f$$

donde

valor medio del número de Froude en las secciones

pendiente media de fricción del tramo.

si se sustituye

entonces

$$\frac{d}{dx} \left( \frac{V^2}{2g} + y \right) = S_0 - S_f$$

(7.4.1)

La pendiente de fricción en cada sección se calcula mediante la ecuación de Manning:

$$S_{f1} = \left[ \frac{V_1 n}{R_{h1}^{2/3}} \right]^2$$

$$S_{f2} = \left[ \frac{V_2 n}{R_{h2}^{2/3}} \right]^2$$

Conocido el tipo de perfil y la dirección en que se efectúa el cálculo, se conocen las características hidráulicas en alguna de las dos secciones (en la sección 1 si es en la dirección del flujo, o en la 2 si es en la dirección opuesta). A partir de una sección de control de tirante conocido, se calcula un tirante en la sección próxima, y con la ecuación 7.4.1 se calcula la distancia que los separa, con esto se conoce la localización del tirante que se estimó, el cual ahora pasa a ser el tirante conocido.

## **8. Simulación del río El Salto y del TEO con ayuda del software HEC-RAS**

En este capítulo se realizarán simulaciones para los gastos siguientes:

- 80 m<sup>3</sup>/s Esta condición corresponde al gasto máximo sobre el río (Dato proporcionado por CONAGUA).
- 250 m<sup>3</sup>/s Esta condición corresponde al gasto máximo que se presentaría en el río, siendo la suma del gasto proveniente del TEO (170 m<sup>3</sup>/s) y la que fluye sobre el río El Salto (80 m<sup>3</sup>/s).

Para realizar cualquier simulación en HEC-RAS es necesario contar con las secciones transversales de la zona de estudio, en este caso del río El Salto (Apéndice A). Una vez procesados los datos de las secciones transversales del río El Salto, se introducen al HEC-RAS.

Para realizar este análisis, se cuenta con las características siguientes:

- Se utilizaron 23 secciones transversales (Fig. 8.1)
- Sección de control (tirante crítico) presente en la rápida del tanque amortiguador (Fig. 8.2)
- 430 m. de estudio o simulación (Fig. 8.3)
- El gasto para cada condición de estudio (80 y 250 m<sup>3</sup>/s)

- Las rugosidades consideradas fueron para la parte rectificada de  $0.017 \text{ s/m}^{1/3}$ , mientras que en el resto del río es de  $0.030 \text{ s/m}^{1/3}$

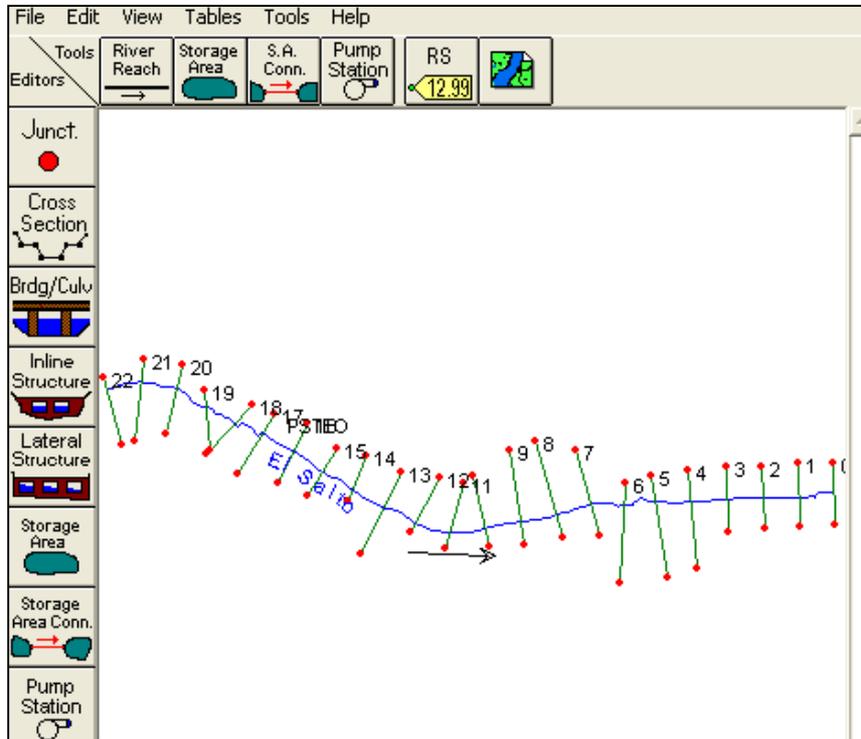


Figura 8.1 Secciones transversales sobre el río El Salto

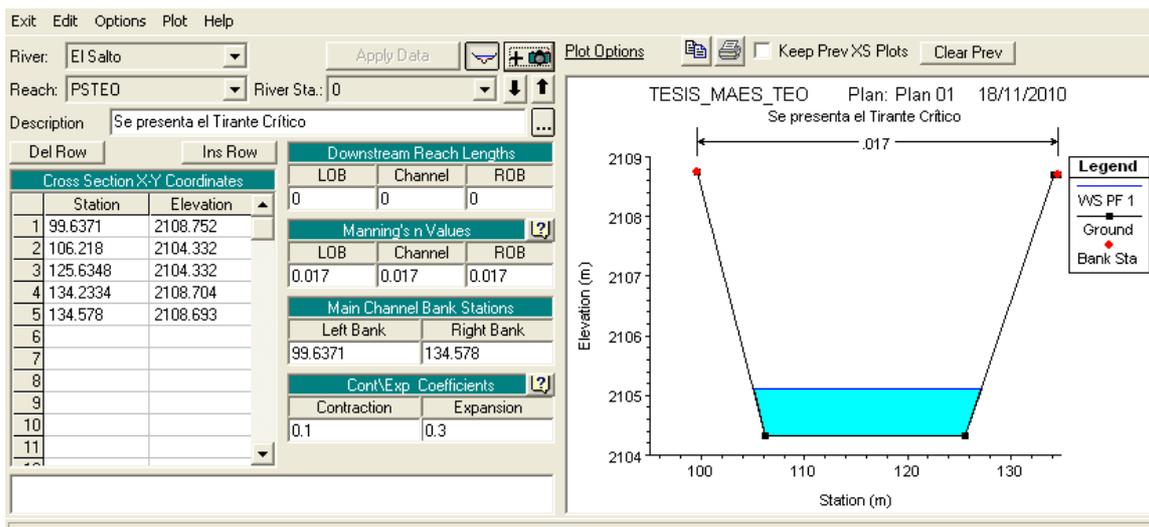


Fig. 8.2 Sección de control (Se presenta el tirante crítico)

Análisis numérico y en modelo físico del comportamiento  
del sistema de descarga del Túnel Emisor Oriente  
**Simulación del río El Salto y del TEO con ayuda del software HEC-RAS**

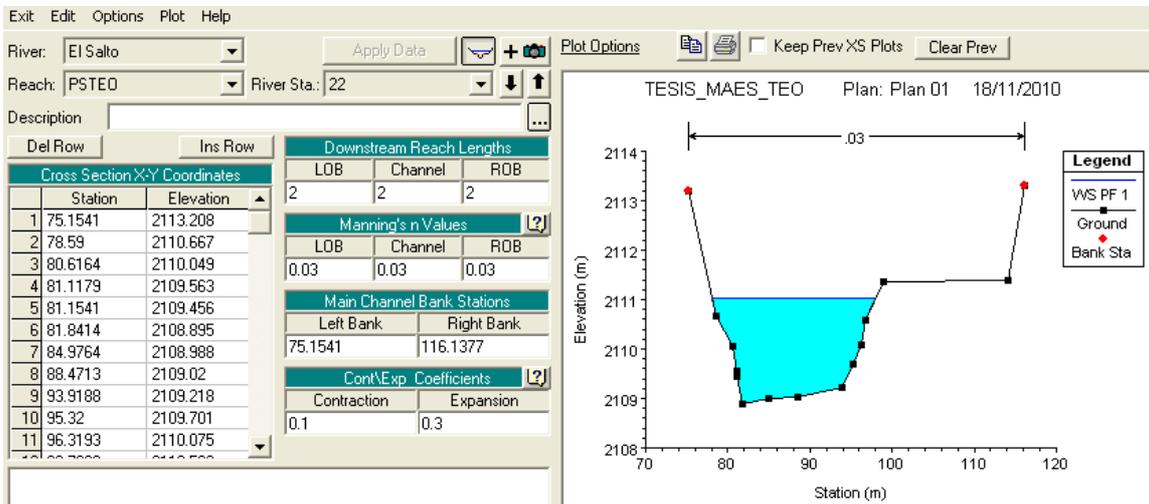


Fig. 8.3 Última sección después de 430 m.

A continuación se muestra el perfil del terreno una vez que se han interpolado las 23 secciones transversales del río (Fig. 8.4).

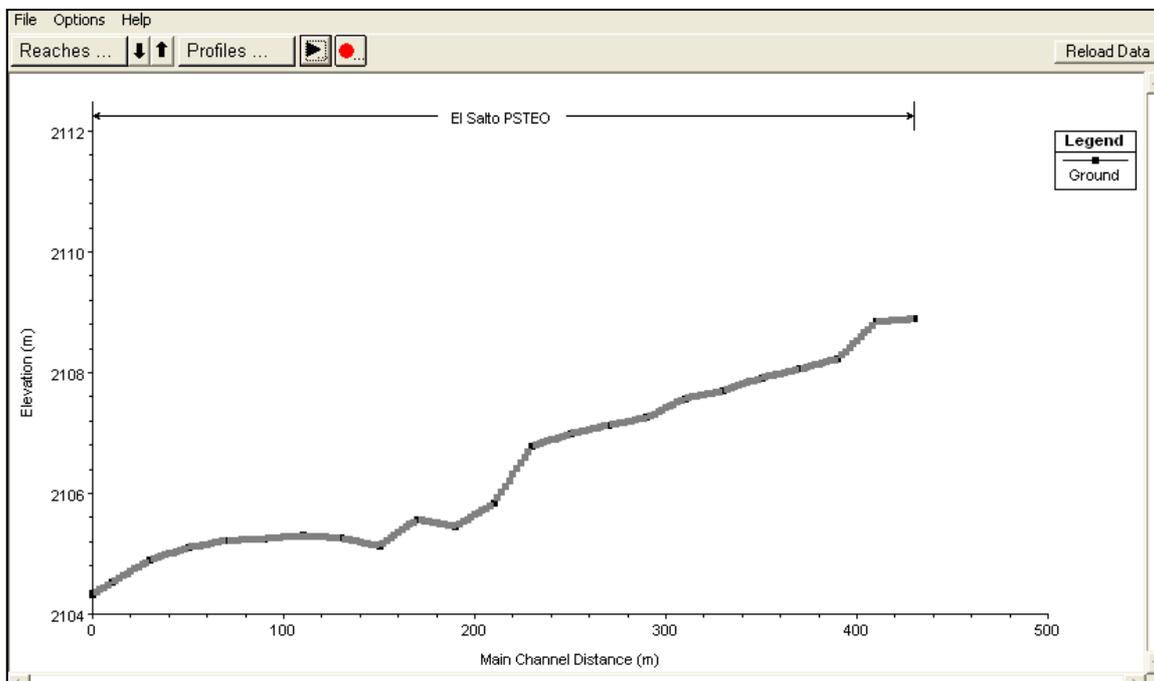
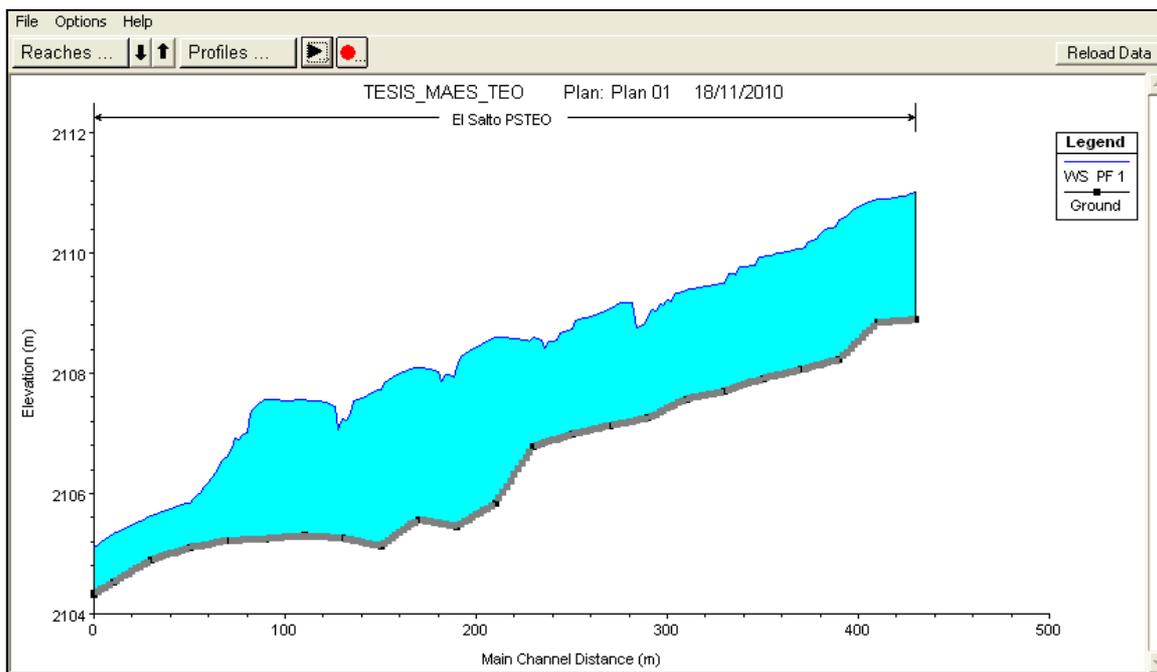


Fig. 8.4 Perfil del terreno

### 8.1 Primera simulación gasto de 80 m<sup>3</sup>/s (gasto del río El Salto)

En las imágenes siguientes se puede observar el perfil del agua una vez que se ha realizado la simulación con las características antes mencionadas, cabe mencionar que esta simulación es solo para el gasto de 80 m<sup>3</sup>/s.



Perfil del río El Salto con 80 m<sup>3</sup>/s

En las siguientes imágenes se puede observar la configuración del río El Salto una vez que se han introducido las secciones y realizado la simulación para un gasto de 80 m<sup>3</sup>/s en el programa HEC-RAS, cabe mencionar que la dirección del flujo es de izquierda a derecha.

Análisis numérico y en modelo físico del comportamiento  
del sistema de descarga del Túnel Emisor Oriente  
**Simulación del río El Salto y del TEO con ayuda del software HEC-RAS**

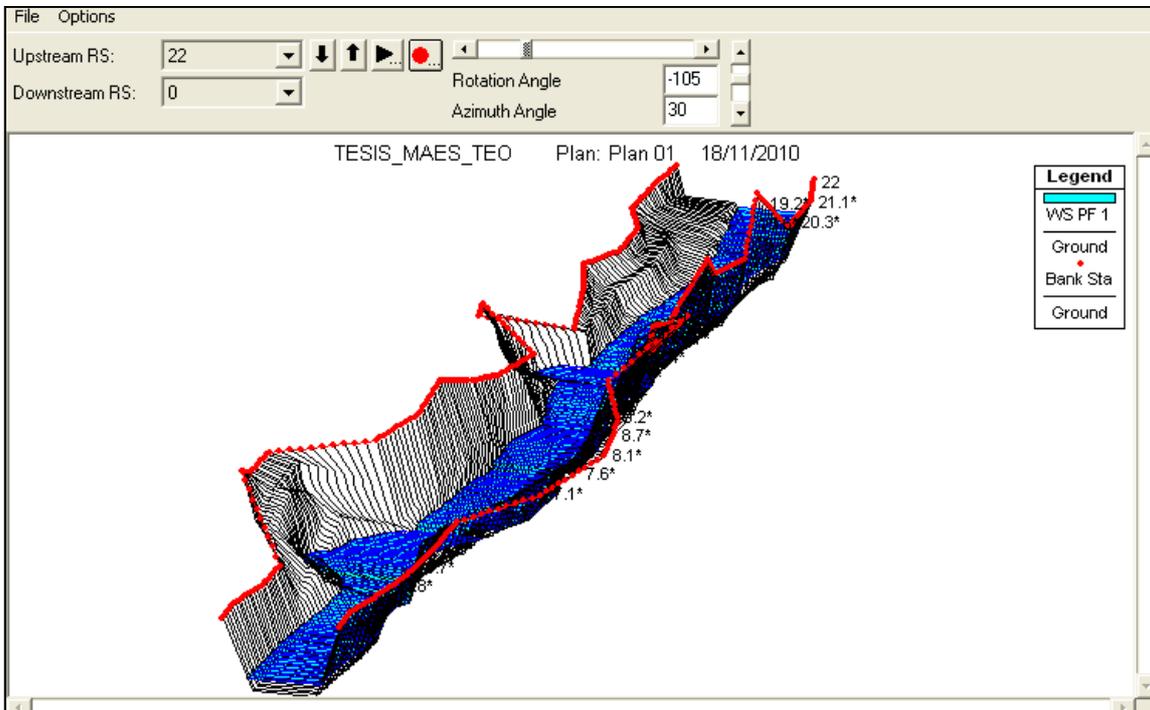


Imagen en 3D del río El Salto para  $80 \text{ m}^3/\text{s}$

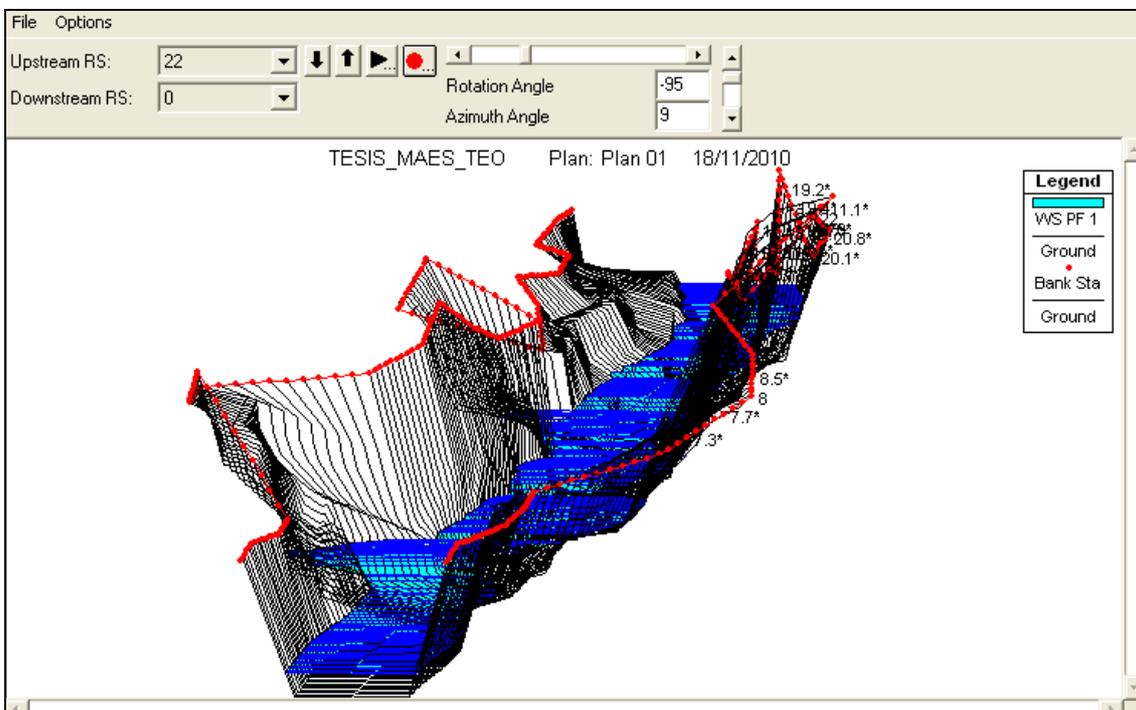
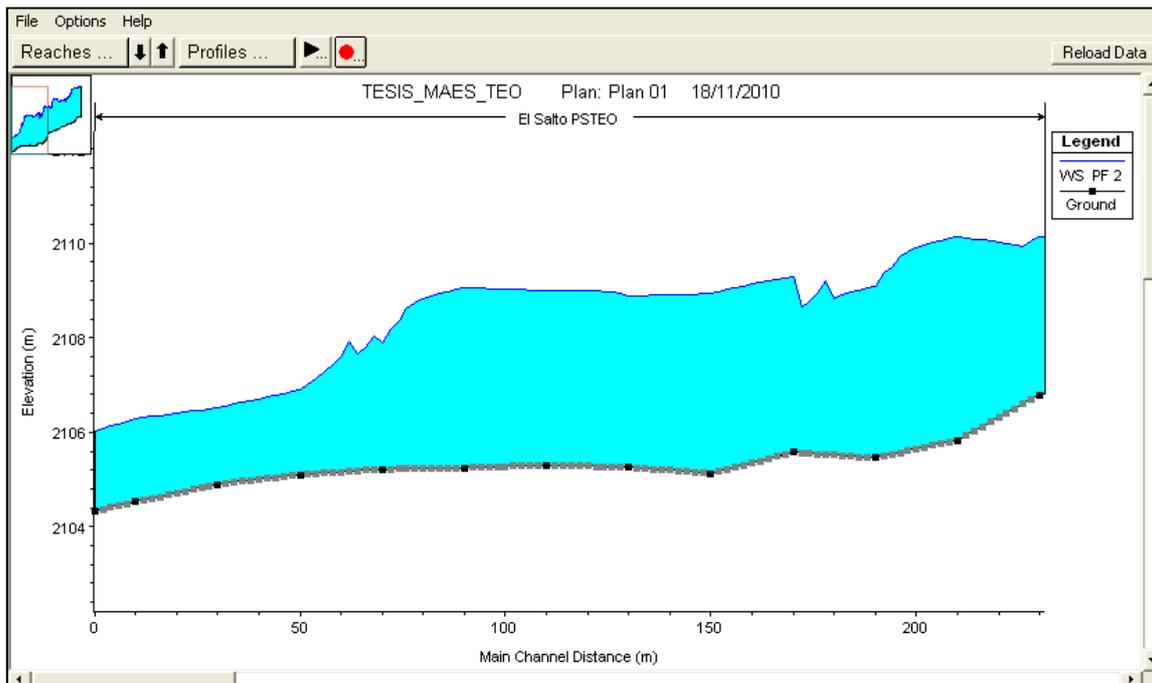


Imagen en 3D del río El Salto  $80 \text{ m}^3/\text{s}$

## 8.2 Segunda simulación gasto de 250 m<sup>3</sup>/s (gasto del río El Salto mas el gasto del TEO)

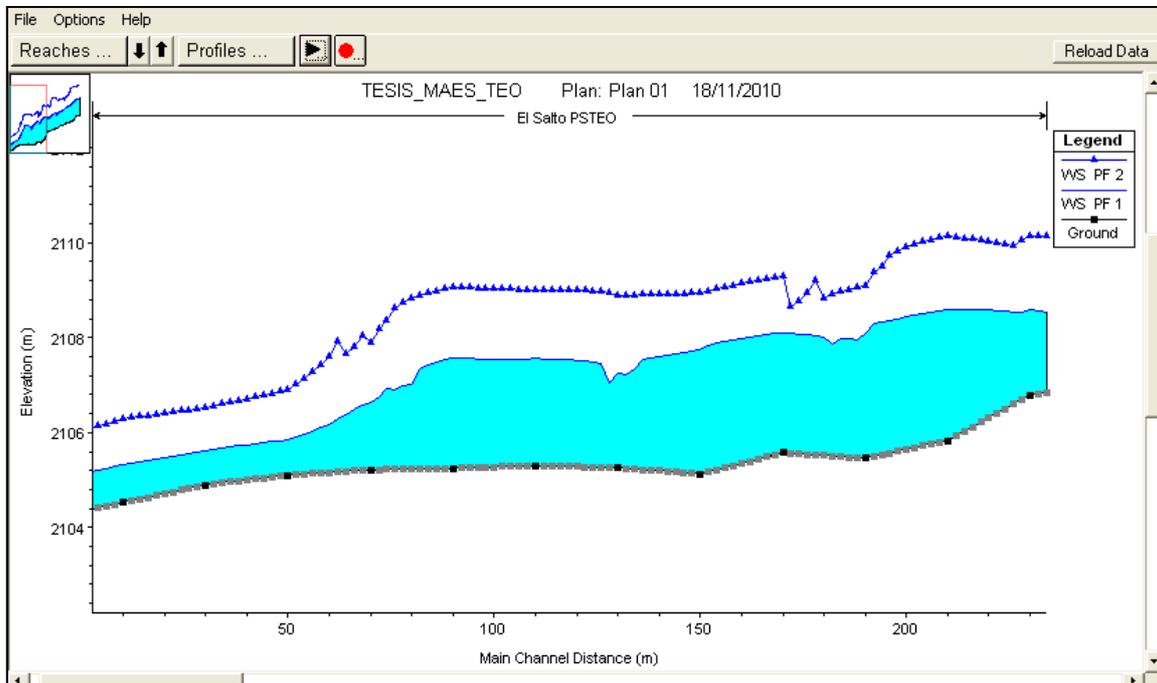
A continuación se presenta los perfiles hidráulicos en el río El Salto con las condiciones más críticas las cuales corresponde al momento en que el TEO deriva 170 m<sup>3</sup>/s y además el río tiene un gasto de 80 m<sup>3</sup>/s., ambos gastos corresponden a los de diseño. Cabe aclarar que después de haber analizado la primera simulación y notar que el perfil del agua podría ser mejorado con una rectificación se procedió en esta segunda simulación a comprobar dicha suposición, dando como resultado un mejor comportamiento del perfil hidráulico.



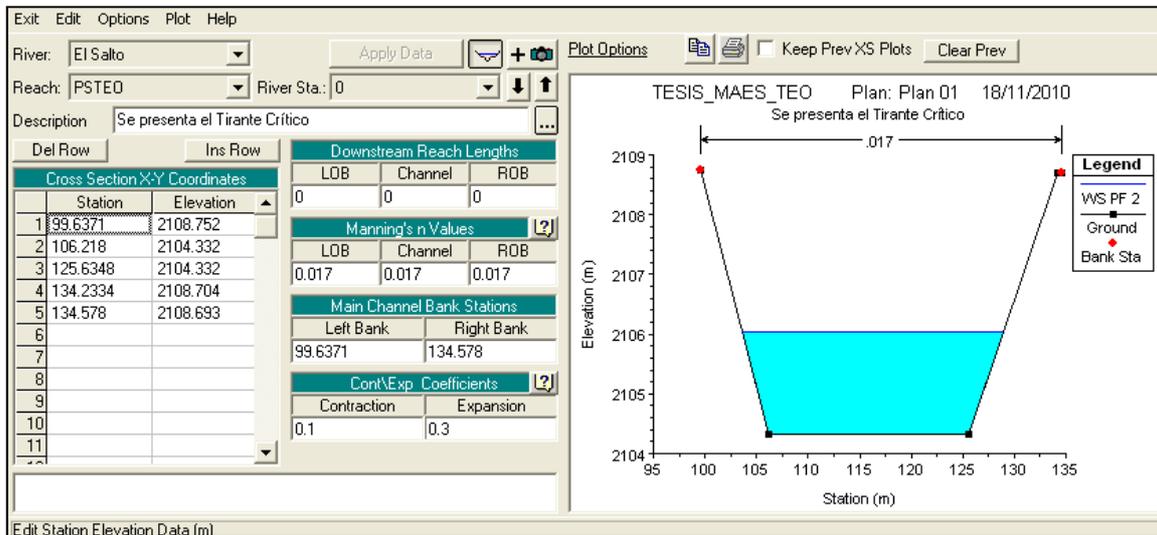
Perfil del río El Salto con 250 m<sup>3</sup>/s (Rectificado)

En la imagen siguiente es aún más claro observar como se mejoro el perfil del agua para los gastos de 80 y 250 m<sup>3</sup>/s, una vez que se ha rectificado el Río (El perfil de 250 m<sup>3</sup>/s corresponde a la línea de color azul).

Análisis numérico y en modelo físico del comportamiento  
del sistema de descarga del Túnel Emisor Oriente  
**Simulación del río El Salto y del TEO con ayuda del software HEC-RAS**

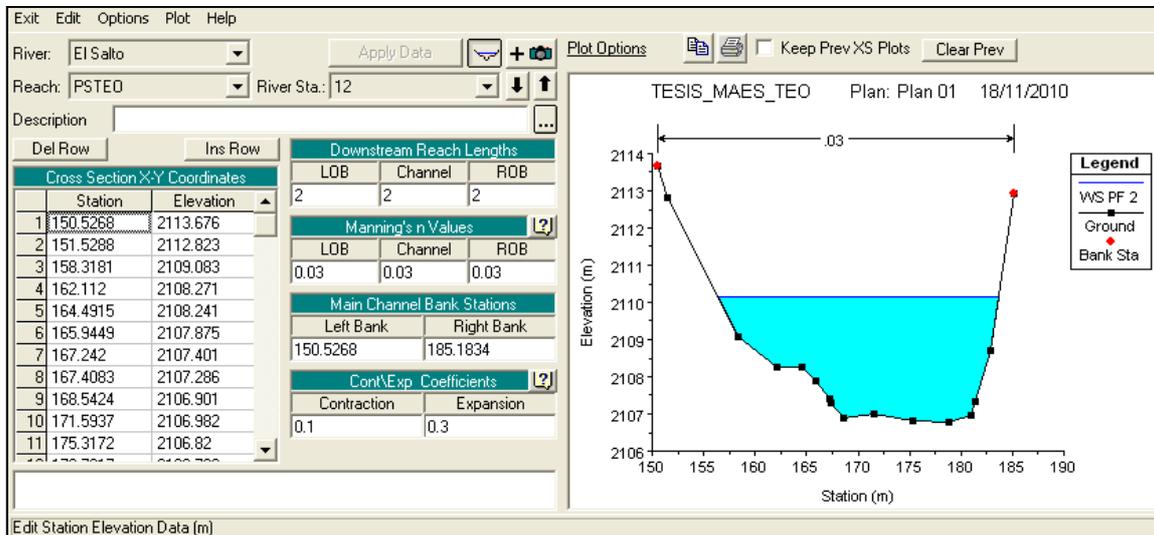


Perfil del río El Salto con 80, 250 m<sup>3</sup>/s (Rectificado)



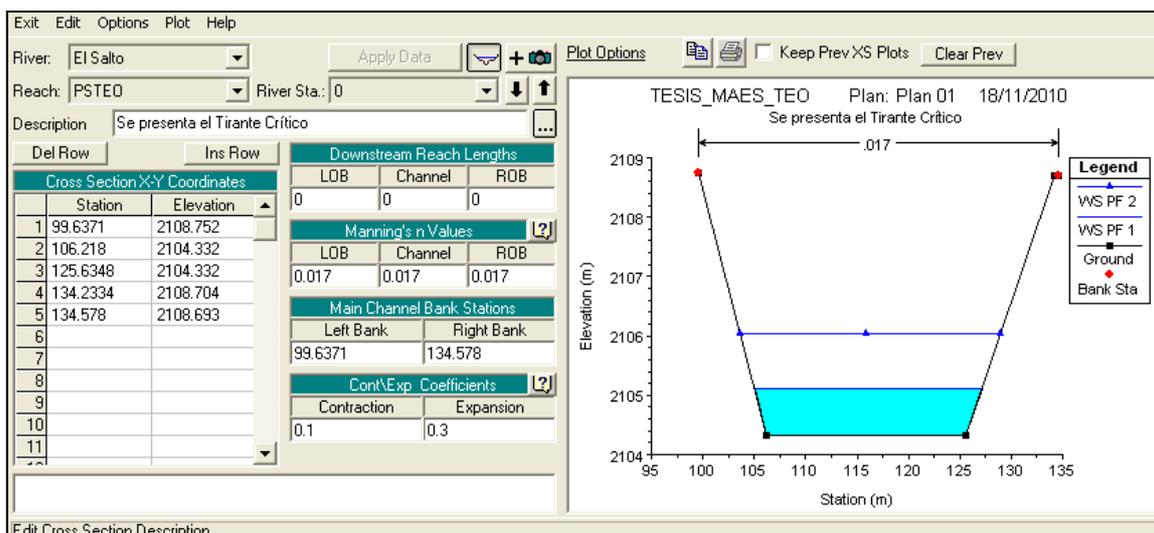
Sección de control para 250 m<sup>3</sup>/s (rectificado)

Análisis numérico y en modelo físico del comportamiento  
del sistema de descarga del Túnel Emisor Oriente  
**Simulación del río El Salto y del TEO con ayuda del software HEC-RAS**



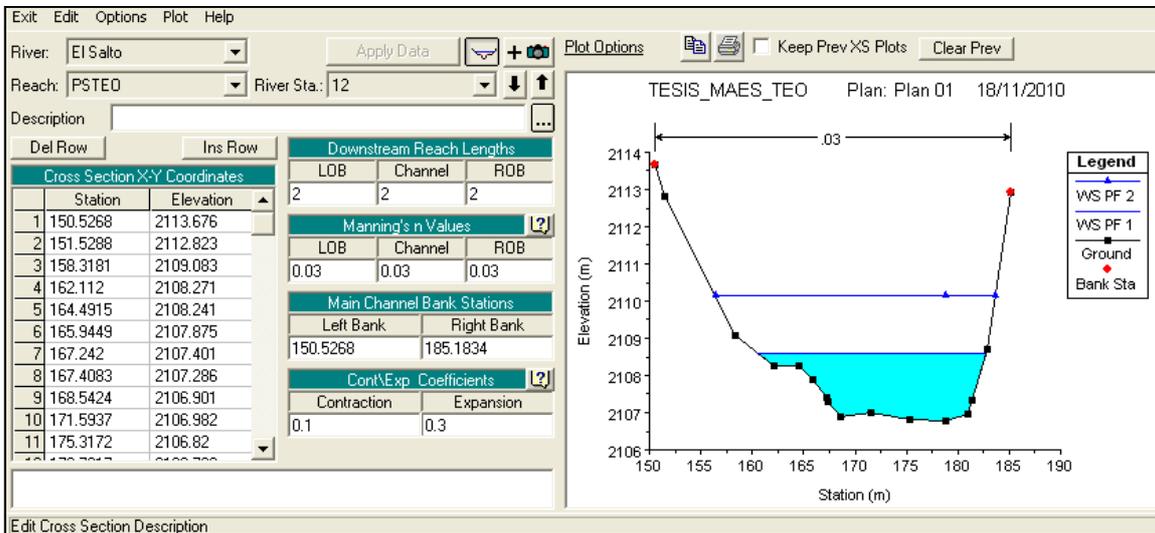
Ultima sección del río aguas arriba para  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  (rectificado). Cabe mencionar que esta última sección corresponde al punto donde se unirá al vertedor del TEO.

En las imágenes siguientes se puede observar la comparación de niveles para un gasto de  $80$  y  $250 \text{ m}^3/\text{s}$



Sección de control para  $80$  y  $250 \text{ m}^3/\text{s}$  (Rectificado)

Análisis numérico y en modelo físico del comportamiento  
del sistema de descarga del Túnel Emisor Oriente  
**Simulación del río El Salto y del TEO con ayuda del software HEC-RAS**



Ultima sección del río aguas arriba para 80 y 250 m<sup>3</sup>/s (Rectificado)

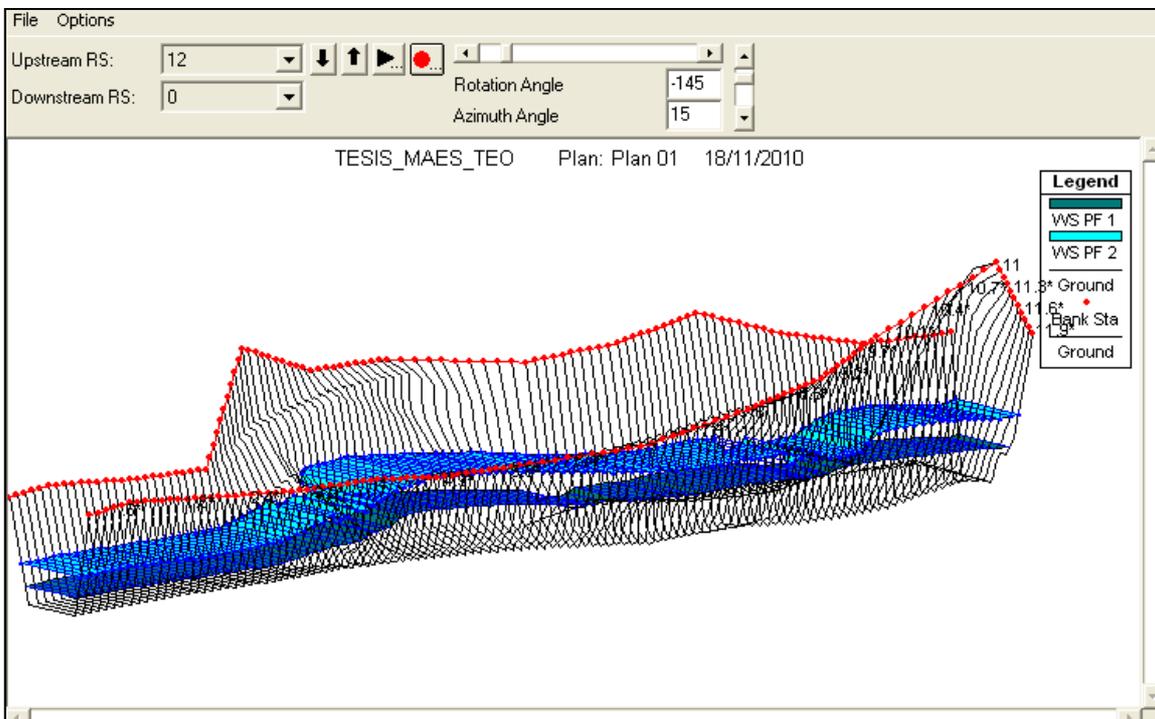


Imagen en 3D del río El Salto para 80 y 250 m<sup>3</sup>/s

Análisis numérico y en modelo físico del comportamiento  
del sistema de descarga del Túnel Emisor Oriente  
**Simulación del río El Salto y del TEO con ayuda del software HEC-RAS**

---

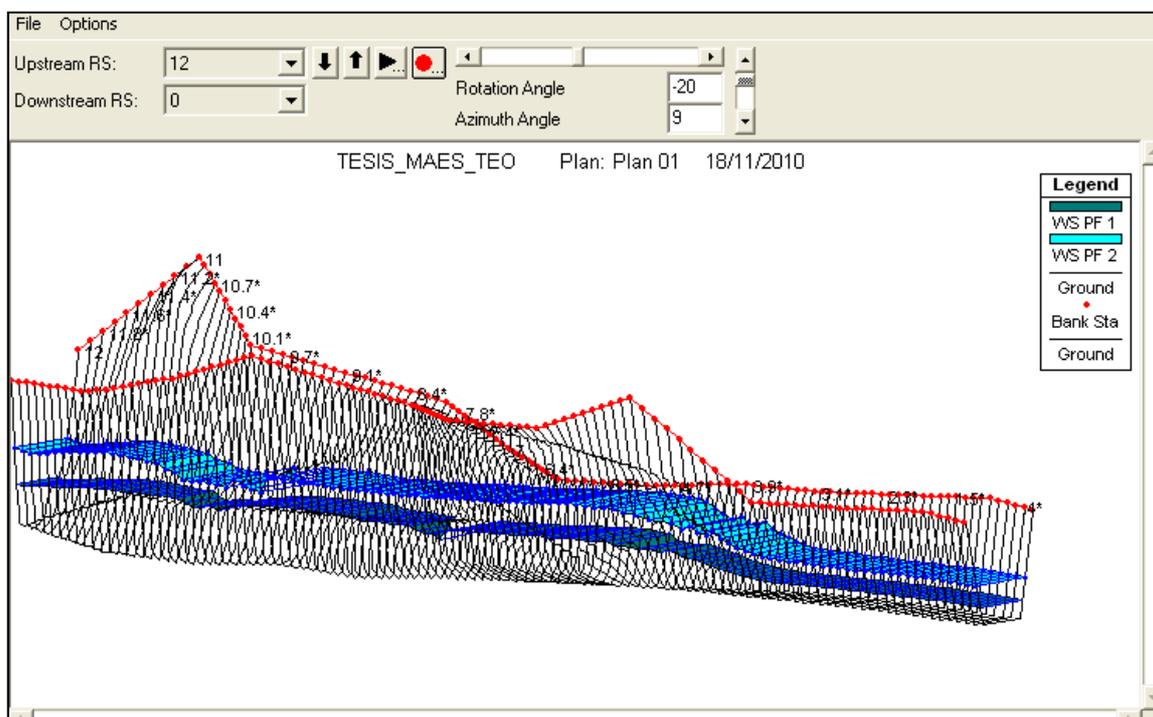


Imagen en 3D del río El Salto para 80 y 250 m<sup>3</sup>/s

Los resultados numéricos de ambas simulaciones se presentan en el Apéndice B.

## **9. Resultados del análisis numérico y en modelo físico para las obras derivadoras del TEC y TEO**

### **9.1 Comparación de los resultados numéricos y en modelo físico del TEC**

En la tabla 9.1.1 se muestran el promedio y la desviación estándar de los datos de tirantes medidos con limnómetro electrónico en el portal de salida del TEC.

Tabla 9.1.1

Prototipo		
Promedio (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
0.93	2106.80	0.07



Fig. 9.1.1



Fig. 9.1.2

En la tabla 9.1.2 se presentan las mediciones en el punto donde termina la transición (longitud aproximada de 13.8 m medidos desde el portal), se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes obtenidos.

Tabla 9.1.2

Prototipo		
Promedio (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
1.14	2107.95	0.06

En la tabla 9.1.3 se presentan las mediciones en el canal principal, a 30 m antes del vertedor, se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos.

Tabla 9.1.3

Prototipo		
Promedio (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
1.35	2107.85	0.03

En la Fig. 9.1.3 se muestran los puntos de medición (las franjas azules) para comparar el perfil del agua calculado con el medido.

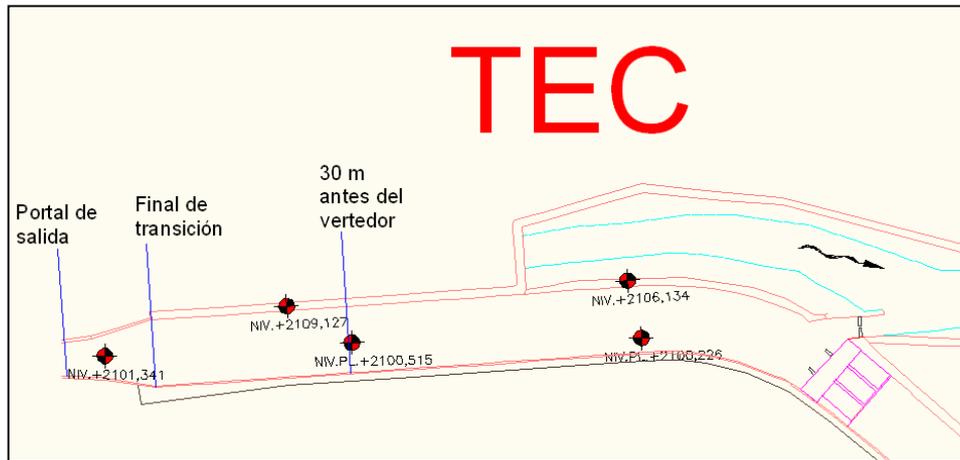


Fig. 9.1.3 Secciones de medición en el modelo del TEC

### 9.1.1 Perfil sobre el Canal Principal del TEC (calculado y medido)

En la tabla 9.1.1.1 y en la Fig. 9.1.1.1 se presentan los resultados del cálculo (método de incrementos finitos de la ref. Sotelo A. G., “Hidráulica de Canales”, Facultad de Ingeniería, México 2002.) y las mediciones en el canal y al inicio del vertedor del TEC.

Tabla 9.1.1.1

Perfil canal principal TEC				
	Portal	Final transición	30 m Antes del vertedor	Vertedor
Calculado	2108.06	2107.92	2107.826	2107.79
Medido	2106.8	2107.95	2107.85	2107.81

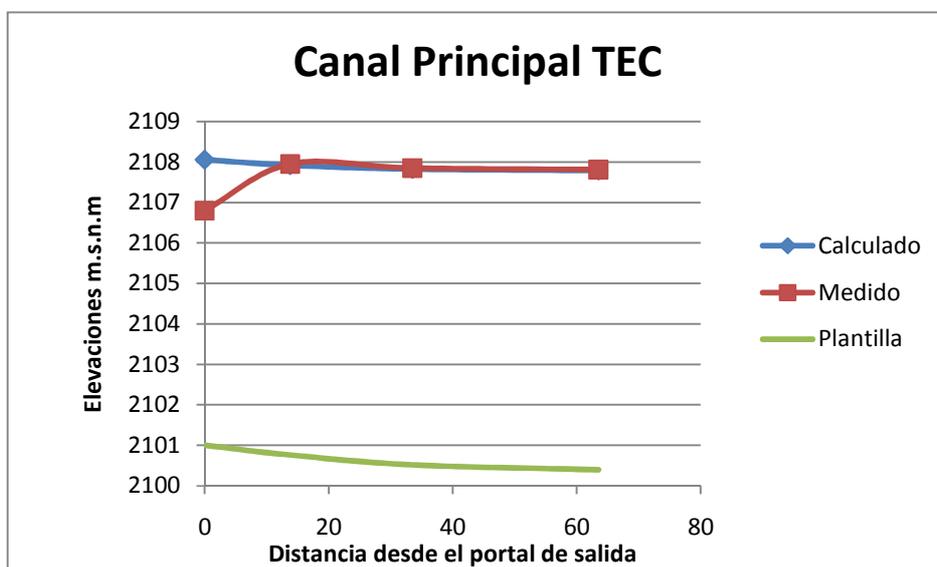


Fig. 9.1.1.1 Perfil comprendido entre el portal y el vertedor

Como se puede observar en la figura anterior, la coincidencia es muy buena, salvo en la entrada que corresponde a la transición; sin embargo, esto no tiene mayor importancia porque depende solamente de la separación y aproximación de las secciones consideradas en la entrada.

### 9.1.2 Curva Gastos-Elevaciones del vertedor del TEC

En la tabla 9.1.2.1 y en la Fig. 9.1.2.1 se muestra la curva gastos-elevaciones del TEC, medidas en el modelo físico. La cresta del vertedor se encuentra en la elevación 2106.13 msnm y tiene una longitud de 50 m.

Tabla 9.1.2.1

Gastos m <sup>3</sup> /s	Elevaciones m.s.n.m
50	2107.27
75	2107.39
150	2107.81

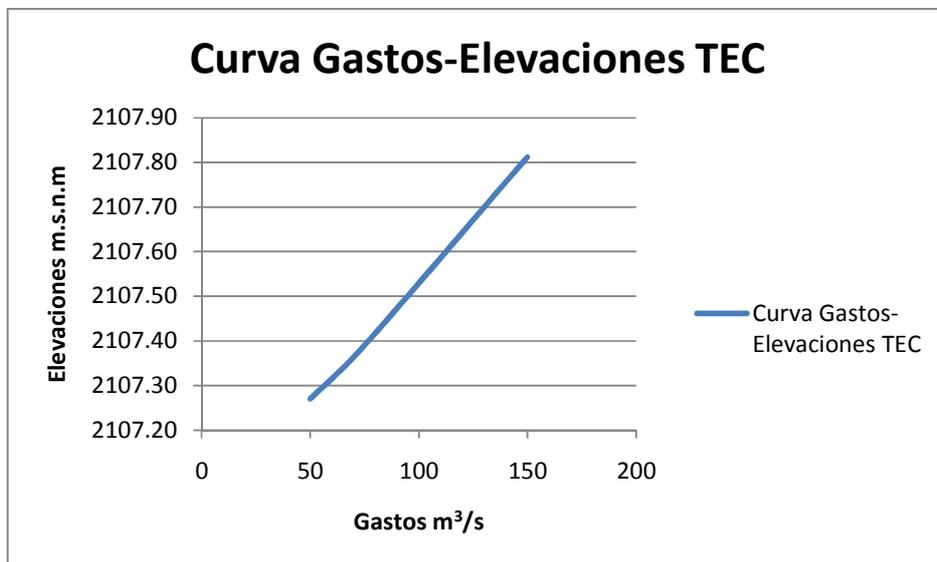


Fig. 9.1.2.1 Curva Gastos-Elevaciones

En el Apéndice C se presenta información adicional y fotografías, que muestran el funcionamiento del vertedor y del tanque amortiguador del TEC.

## 9.2 Resultados numéricos del TEO (1<sup>a</sup> versión)

Existen dos condiciones importantes de diseño que es necesario observar; la primera corresponde al caso de que el tirante sobrepase la clave del túnel y con ello pueda trabajar a

presión la salida, mientras que para el segundo caso, el tirante en el río podría alcanzar un nivel mayor a de la cresta del vertedor y con esto ahogar su descarga.

Para realizar este análisis se considera que el nivel del agua sobre el vertedor es constante. Para obtener la carga sobre la cresta, se utiliza la fórmula general de vertedores:

$$Q = CL_e H^{3/2}$$

donde

- C Coeficiente de descarga, en  $m^{1/2}/s$
- H Carga total sobre la cresta, en m
- $L_e$  Longitud efectiva de cresta, en m
- Q Descarga, en  $m^3/s$

$Q=CL_e H^{3/2}$	
C	1.7
$L_e$	60
Q	170
H	1.4057

Por lo tanto, el tirante será la suma de la carga del vertedor más la diferencia entre la cresta y la plantilla del canal donde inicia el vertedor.

Tirante = 7.05 m.

datos

Nivel de plantilla del portal de salida: 2106 msnm

Nivel de plantilla sobre el TEO donde inicia el vertedor: 2105.781 msnm

Nivel de cresta: 2111.5 msnm

**Resultados del análisis numérico y en modelo físico para las obras derivadoras del TEC y TEO**

$Q_{TEO}$	170	$m^3/s$
b	12	m
n	0.017	$s/m^{1/3}$
$S_0$	0.0015139	

Ahora con este tirante, se realiza el cálculo del perfil hacia aguas arriba con el método directo por pasos, hasta llegar al portal de salida que se encuentra a una distancia de 144.612 m (cabe recordar, que el criterio de incrementos de tirantes es considerar que la velocidad no varíe más de 20% entre cada sección) ver tabla 9.2.1

Tabla 9.2.1 Cálculo del perfil por el método directo por pasos

Y	A	P	$R_h$	V	Fr	Sf	$\Delta Y$	$F_r$ promedio	$S_f$ promedio	$\Delta x$	$\Sigma \Delta x$
7.05	84.6	26.1	3.241	2.009	0.242	0.00024	-	-	-	-	-
7	84	26	3.231	2.024	0.244	0.00025	-0.05	0.2429	0.00025	-37.095	-37.095
6.9	82.8	25.8	3.209	2.053	0.250	0.00026	-0.1	0.2469	0.00025	-74.450	-111.545
6.856	82.272	25.712	3.200	2.066	0.252	0.00026	-0.044	0.2508	0.00026	-32.872	-144.417

Como se puede observar, el tirante en el portal es de 6.85 que corresponde a la cota 2112.85 m.s.n.m, debido a que la clave del túnel está en la 2113 m.s.n.m, se concluye que el túnel no se ahoga (Fig. 9.2.1).

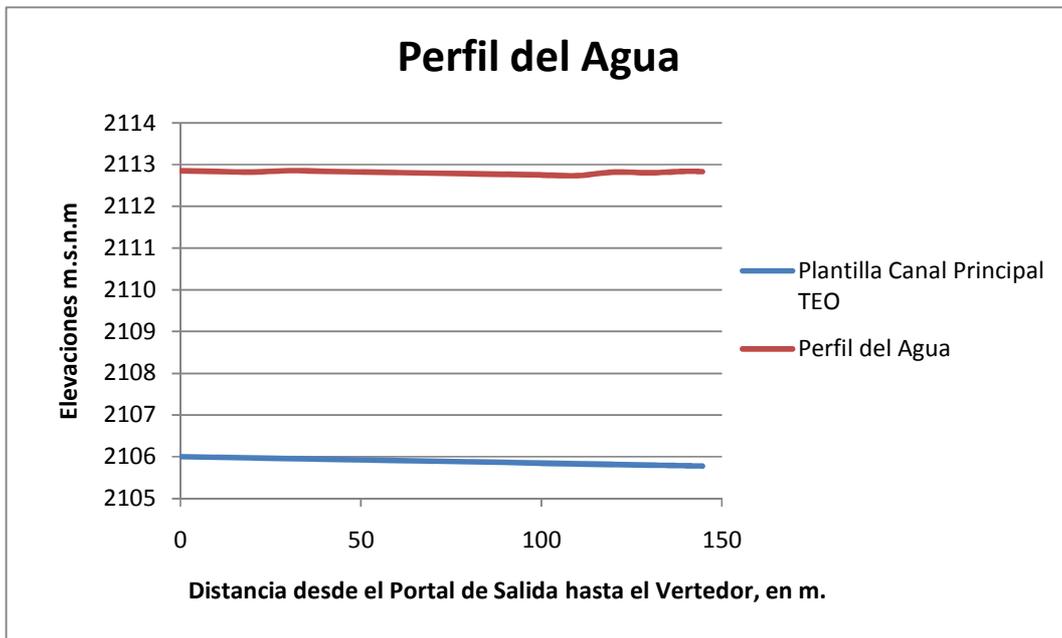


Fig. 9.2.1 Perfil del Agua en el Canal Principal TEO (clave del túnel: 2113 m.s.n.m)

Ahora para verificar que el nivel del agua en el río se encuentre por abajo del nivel del cresta y con ello permita que el vertedor descargue eficientemente, se utilizaron los resultados de la simulación del río con HEC-RAS (Apéndice B).

Como el tirante en el río en el punto donde se une al vertedor sería de 3.35 m, lo que equivale al nivel 2110.14 m.s.n.m, y debido a que la cresta del vertedor es la 2111.5 m.s.n.m existe una diferencia de 1.36 m por tanto el vertedor puede descargar sin problema (Fig. 9.2.2).

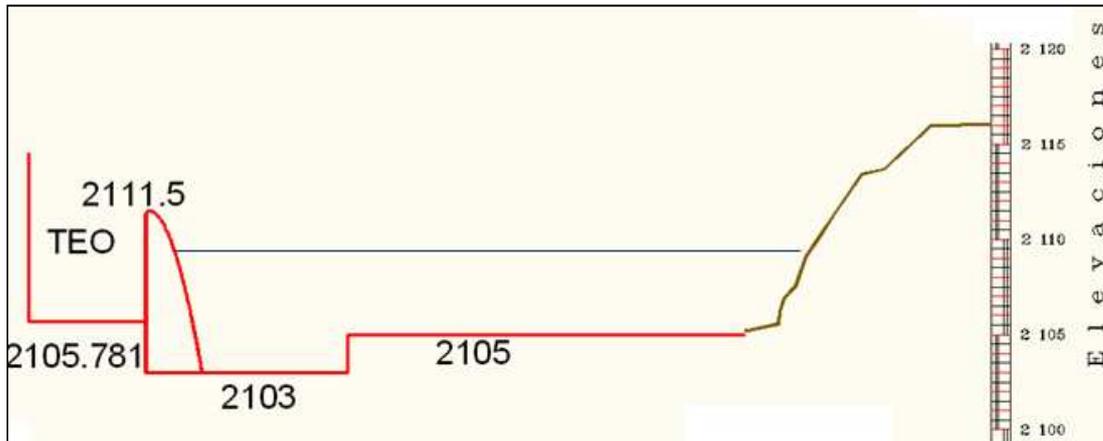


Fig. 9.2.2 Perfil del vertedor

### 9.3 Comparación de los resultados numéricos y en modelo físico del TEO (2ª versión)

A continuación se presentan los resultados de las mediciones sobre el TEO para un gasto de  $170 \text{ m}^3/\text{s}$ . Las fotografías siguientes corresponden al portal de salida (CAD. 61+802.948), en la tabla 9.3.1 se presenta el promedio y la desviación estándar de los datos de los tirantes medidos (Fig. 9.3.1 y Fig. 9.3.2).

Tabla 9.3.1

Prototipo		
Tirante prom. (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
5.49	2111.49	0.08



Fig. 9.3.1



Fig. 9.3.2

Los siguientes datos corresponden al punto donde termina la transición (CAD. 61+817.948), longitud de 15 m medidos desde el portal, se anexan el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos (tabla 9.3.2)

Tabla 9.3.2

Prototipo		
Tirante prom. (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
6.53	2112.51	0.12

Los datos siguientes corresponden al canal principal del TEO (CAD. 61+856.948), se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos (tabla 9.3.3).

Tabla 9.3.3

Prototipo		
Tirante prom. (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
6.81	2112.67	0.05

Los datos siguientes corresponden al canal principal del TEO CAD. 61+901.948, se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos (tabla 9.3.4).

Tabla 9.3.4

Prototipo		
Tirante prom. (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
6.88	2112.73	0.03

Los datos siguientes corresponden al canal principal del TEO CAD. 61+946.948, se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos (Tabla 9.3.5).

Tabla 9.3.5

Prototipo		
Tirante prom. (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
6.93	2112.71	0.01



Tabla 9.3.6 Perfil sobre el canal principal del TEO (calculado y medido)

Cadenamiento		Tirantes	
		Calculado	Medido
62+	802.948	2112.61	2111.49
62+	817.948	2112.62	2112.51
62+	856.948	2112.61	2112.67
62+	901.948	2112.60	2112.73
62+	946.948	2112.59	2112.71
62+	991.948	2112.58	2112.42

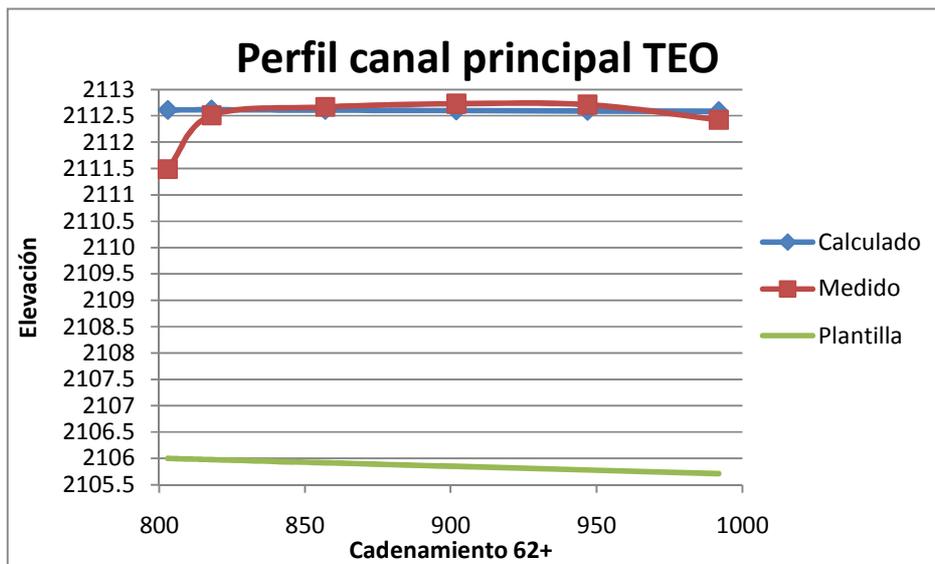


Fig. 9.3.3 Perfil del canal principal del TEO (2ª Versión)

El perfil de la Fig. 9.3.3 es el correspondiente al tramo comprendido, entre el portal y el vertedor (tal como los cadenamientos lo indican).

Como se puede observar en la figura anterior, la coincidencia es muy buena, salvo en la entrada que corresponde a la transición; sin embargo, esto no tiene mayor importancia porque depende solamente de la separación y aproximación de las secciones consideradas en la entrada.

### **9.3.1 Curva Gastos-Elevaciones del vertedor del TEO**

En la tabla 9.3.1.1 y el la Fig. 9.3.1.1 se muestran los resultados de las mediciones de la curva gastos-elevaciones para el vertedor del TEO.

Tabla 9.3.1.1 Curva Gastos- Elevaciones del vertedor del TEO

Gastos	Elevaciones
50	2111.73
81	2111.95
120	2112.22
145	2112.31

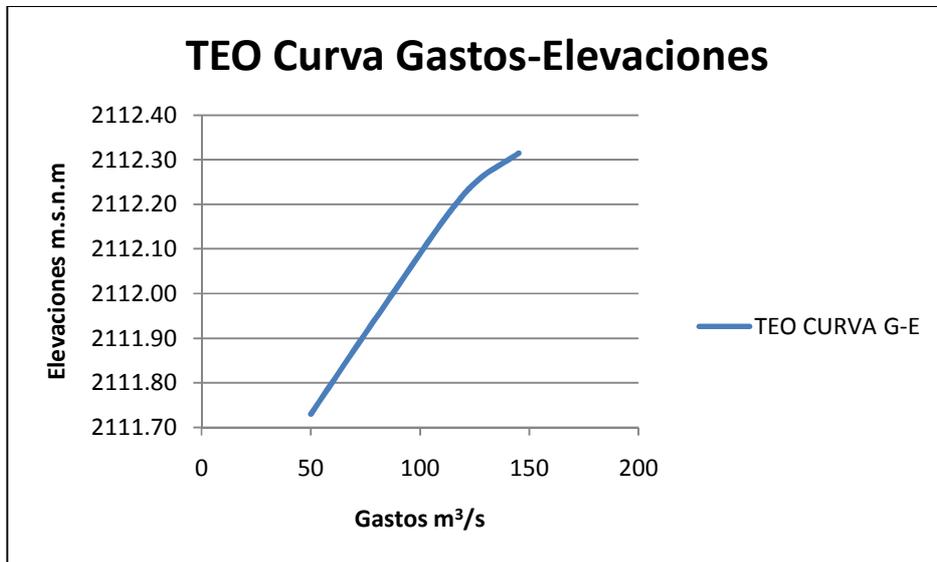


Fig. 9.3.1.1

### 9.3.2 Problemas presentes en la obra derivadora del TEO (2ª versión)

Como ya se había mencionado en esta segunda versión de la obra derivadora del TEO se propuso también un vertedor lateral, pero con cresta curva (similar a la del TEC) como era de esperar su funcionamiento fue bueno, aunque en su descarga origino una socavación muy intensa.

A continuación se muestran las fotografías de la zona de descarga del TEO antes de una prueba (Fig. 9.3.2.1).

Análisis numérico y en modelo físico del comportamiento  
del sistema de descarga del Túnel Emisor Oriente  
**Resultados del análisis numérico y en modelo físico para las obras derivadoras del TEC y TEO**

---



Fig. 9.3.2.1 Configuración inicial antes de las pruebas

La socavación se midió aguas abajo del vertedor del TEO, en los sitios indicados en la foto de la Fig. 9.3.2.2



Fig. 9.3.2.2 Sitios de medición de socavación y configuración final después de una  
descarga de 170 m<sup>3</sup>/s

Sitio 1

Cota inicial	2105.03 msnm
Cota final	2096.93 msnm
Socavación	8.1 m



Fig. 9.3.2.3 Socavación en el sitio 1

Sitio 2

Cota inicial	2104.77 msnm
Cota final	2096.07 msnm
Socavación	8.7 m



Fig. 9.3.2.4 Socavación en el sitio 2

Sitio 3

Cota inicial	2105.22 msnm
Cota final	2101.62 msnm
Socavación	3.6 m



Fig. 9.3.2.5 Socavación en el sitio 3

Sitio 4

Cota inicial	2104.73 msnm
Cota final	2098.58 msnm
Socavación	6.15m



Fig. 9.3.2.5 Socavación en el sitio 4

Como se puede observar, la socavación es superior a los 8.0 m, lo cual pondría en peligro la estructura de descarga.

## **10. Conclusiones**

En esta tesis se concluye que de las pruebas realizadas se recomienda emplear la segunda versión del canal de conexión y combinarla con la primera versión del vertedor probado (el recto). Sería conveniente de todos modos, probar ese nuevo diseño en modelo físico y ajustarlo de ser necesario.

El las figs. 10.1, 10.2 y 10.3 se presentan los planos (planta y perfiles) del posible arreglo final de las obras del portal de salida. En esta versión se respetó la elevación del vertedor lateral recto, se modificó el tanque amortiguador del vertedor recto y en la conexión con las alcantarillas, se modificó el escalón del desarenador, se aumentó la longitud del tanque amortiguador después del cimacio y se modificó la curva de conexión después del tanque. Por supuesto el diseño propuesto es mejorable y además, como se dijo antes, el arreglo final deberá ser probado también en el modelo físico. Se hace notar que para el diseño y construcción final la CONAGUA deberá tomar en cuenta los aspectos de geotécnica, estructuras y métodos de construcción correspondientes.

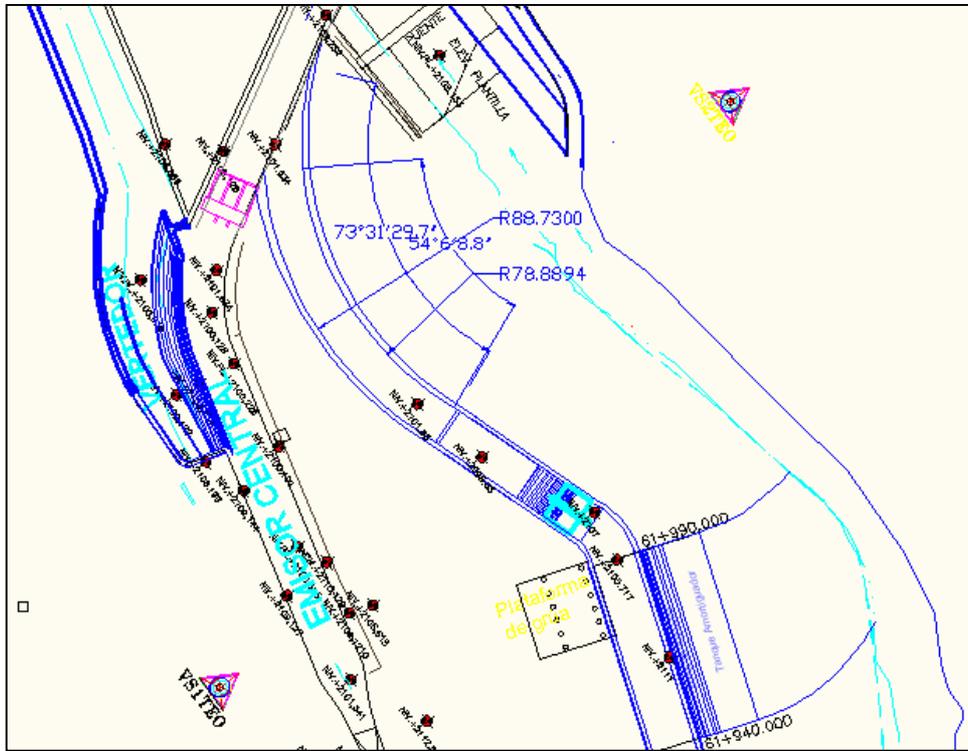


Fig. 10.1 Planta del arreglo propuesto

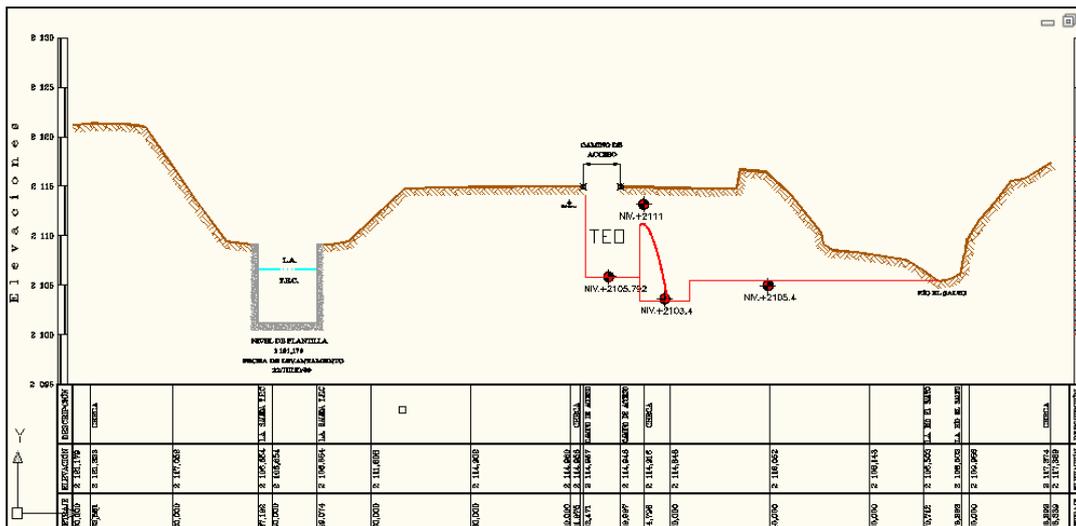


Fig.10.2 Perfil del vertedor

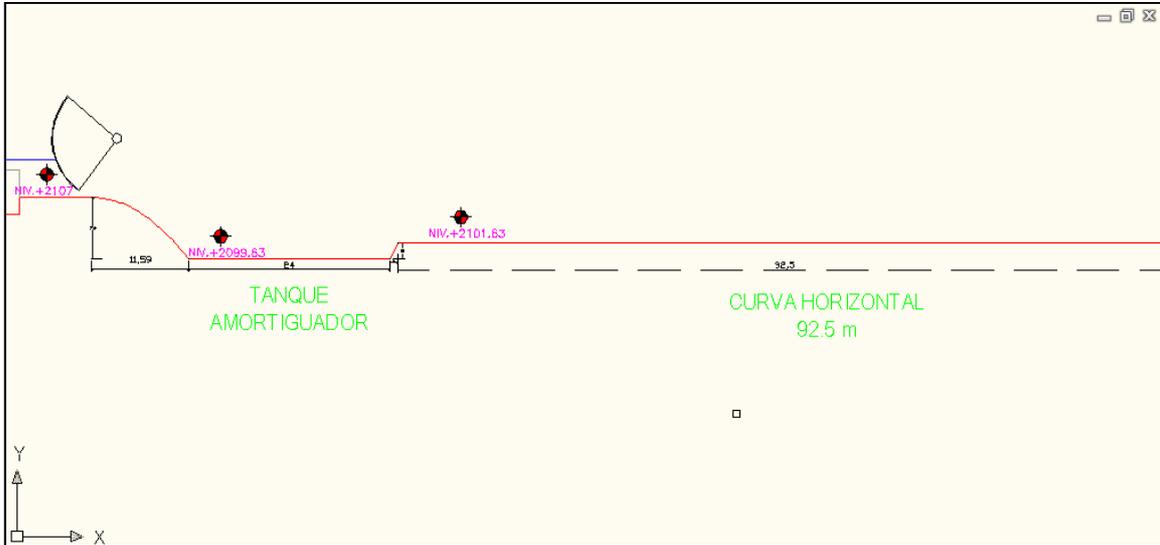


Fig. 10.3 Perfil de la conexión con el acceso a las alcantarillas

## Bibliografía

Arreguín Cortés Felipe I., et al., *“El agua en las grandes ciudades”* Revista Ingeniería Civil, CICM, N° 447 México 2006, p 20-29.

Barrios Sandoval Roberto Carlos, *“El drenaje profundo de la ciudad de México: problemática y alternativas de solución”*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Estudios Superiores Aragón, UNAM, México 2008.

Domínguez Mora Ramón, *“Sistema para el control y drenaje de las avenidas en el área metropolitana del valle de México”*, Instituto de Ingeniería, Serie azul N° 593, México 1997.

Domínguez Mora Ramón, *“El sistema principal de drenaje del área metropolitana del valle de México”*, Instituto de Ingeniería, Serie CI-22, México 2001

Fuentes Silva Eduardo A., *“Estudio del comportamiento hidráulico del vertedor de salida del túnel emisor oriente”*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 2010.

Gardea Villegas Humberto, *“Hidráulica de Canales”*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 1999.

Gracia Sánchez Jesús, *“Obras de excedencias”*, Sección Hidrotecnia, Tema hidráulica, Capítulo 10, Manual de Diseño de Obras Civiles, CFE,II,III, México 1995.

*“La técnica al servicio del desarrollo”* Revista Ingeniería Civil, CICM, N°252, México 1988, p 21-26.

Moreno F. Andrés, *“El sistema de drenaje profundo solución integral a un gran problema”* Revista Ingeniería Civil, CICM, N° 252 México 1988, p 8-11.

Sotelo Ávila Gilberto, *“Hidráulica general”*, Vol. 1 Fundamentos, Limusa, México 1997.

Sotelo Ávila Gilberto, *“Hidráulica de canales”*, Facultad de Ingeniería, UNAM, México 2009.

*“Una tradición centenaria”*, Revista Ingeniería Civil, CICIM, N° 252, México 1988, p 15-20.

*“Urgen obras para el drenaje de la ciudad de México”*, Revista Ingeniería Civil, CICIM, N°460, México 2007, p 20-25.

<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/FT-TEO0609.pdf>

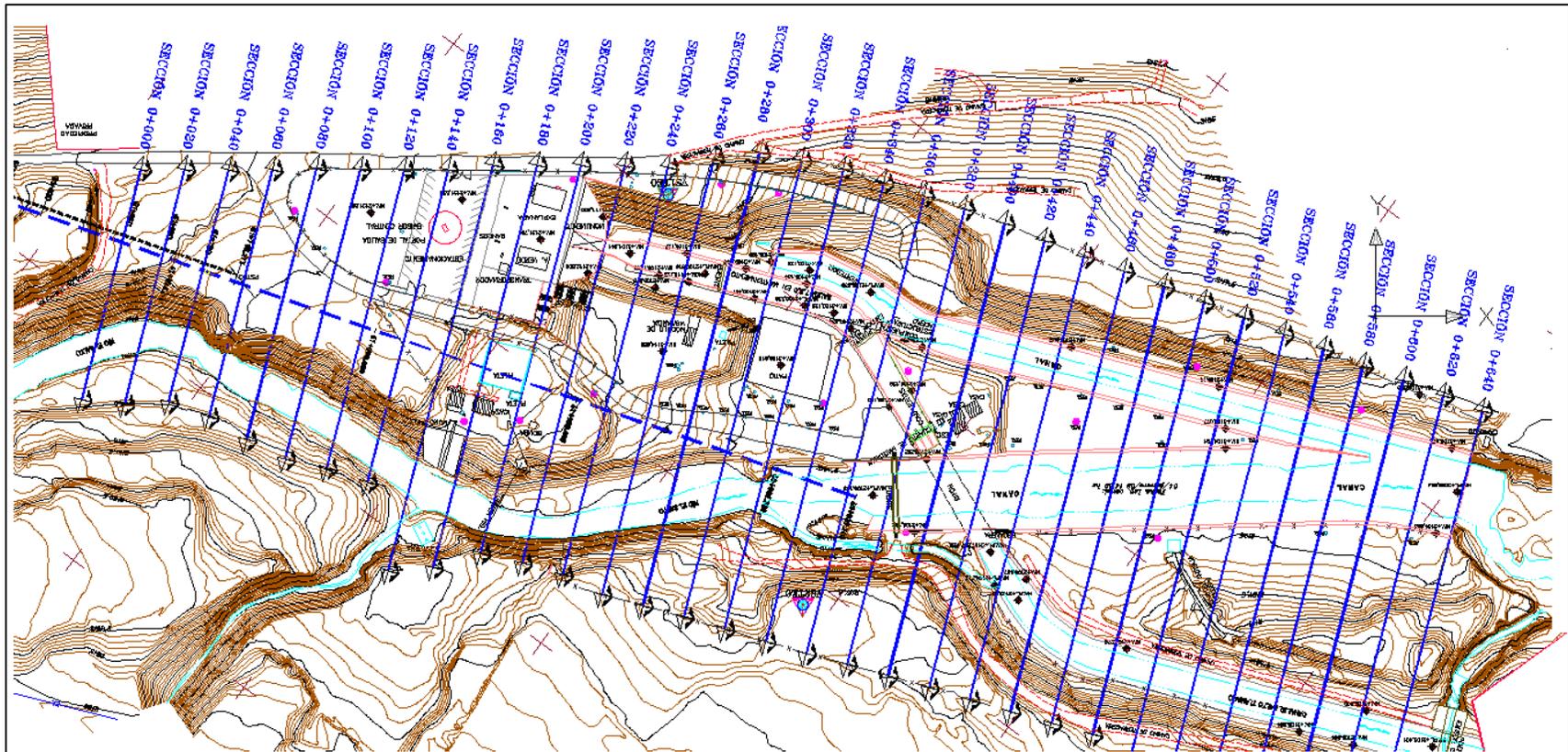
[http://www.paot.org.mx/paot\\_docs/pdf/TunelEmisorOriente.pdf](http://www.paot.org.mx/paot_docs/pdf/TunelEmisorOriente.pdf)

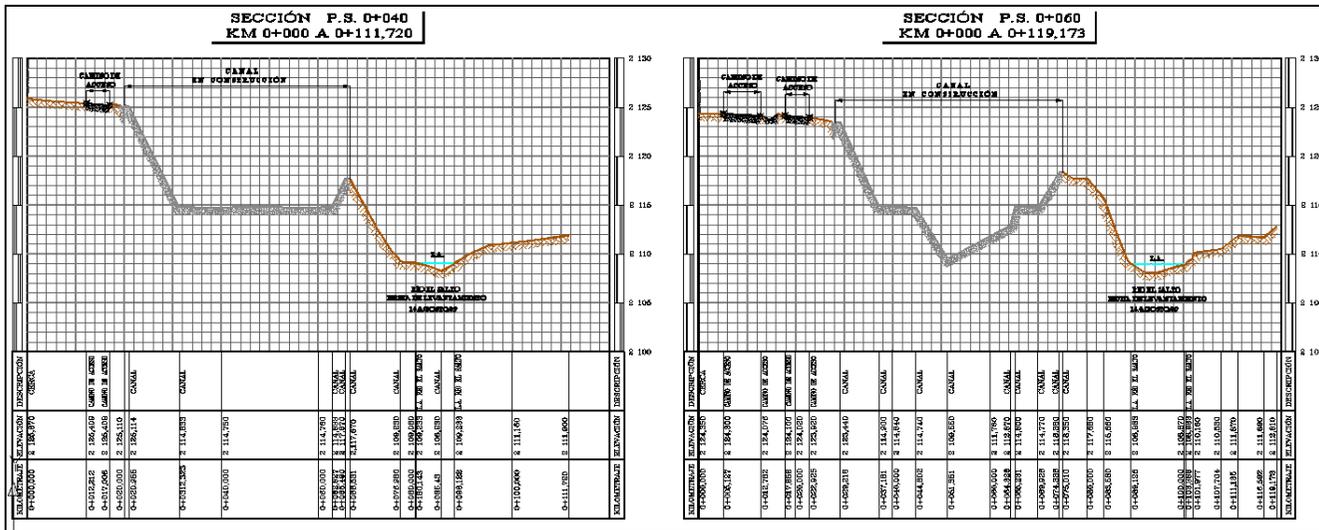
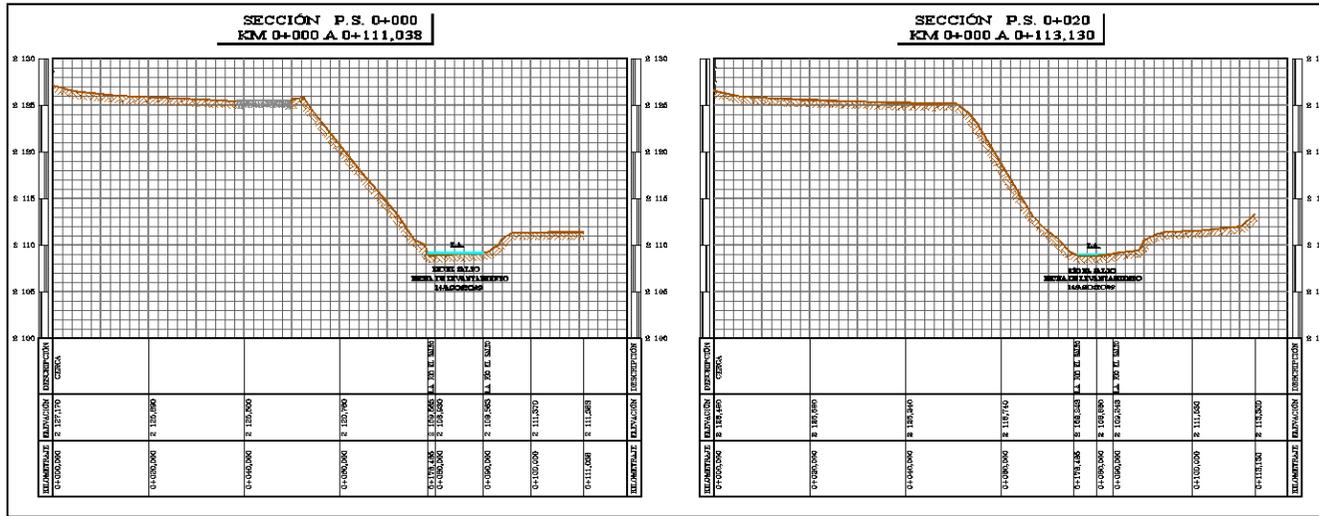
[http://www.presidencia.gob.mx/infografias/2009/junio/040609tunel\\_emisor\\_orient/index.html](http://www.presidencia.gob.mx/infografias/2009/junio/040609tunel_emisor_orient/index.html)

<http://www.revista.unam.mx/vol.1/num2/proyec1/>

## Apéndice A

### Secciones transversales del río El Salto















## Apéndice B

### Resultados de la modelación en HEC-RAS sobre el río El Salto, para 80 y 250 m<sup>3</sup>/s

Reach	Sección	Q Total	Plantilla	Nivel superficie del agua	Velocidad	Área	Perímetro mojado
		(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m)	(m/s)	(m <sup>2</sup> )	(m)
PSTEO	0	80	2104.33	2105.11	4.94	16.19	22.11
PSTEO	0.2	80	2104.37	2105.16	4.91	16.31	22.1
PSTEO	0.4	80	2104.41	2105.2	4.87	16.42	22.1
PSTEO	0.6	80	2104.45	2105.24	4.84	16.54	22.09
PSTEO	0.8	80	2104.48	2105.29	4.8	16.67	22.08
PSTEO	1	80	2104.52	2105.33	4.76	16.81	22.08
PSTEO	1.1	80	2104.56	2105.36	4.76	16.8	22.28
PSTEO	1.2	80	2104.6	2105.39	4.76	16.8	22.48
PSTEO	1.3	80	2104.63	2105.42	4.76	16.81	22.68
PSTEO	1.4	80	2104.67	2105.45	4.76	16.8	22.88
PSTEO	1.5	80	2104.71	2105.48	4.76	16.81	23.08
PSTEO	1.6	80	2104.75	2105.51	4.76	16.8	23.28
PSTEO	1.7	80	2104.79	2105.54	4.76	16.8	23.48
PSTEO	1.8	80	2104.82	2105.57	4.76	16.8	23.68
PSTEO	1.9	80	2104.86	2105.6	4.76	16.8	23.88
PSTEO	2	80	2104.9	2105.63	4.76	16.79	24.09
PSTEO	2.1	80	2104.92	2105.65	4.8	16.68	23.95
PSTEO	2.2	80	2104.94	2105.68	4.77	16.77	23.84
PSTEO	2.3	80	2104.96	2105.7	4.8	16.65	23.71
PSTEO	2.4	80	2104.98	2105.72	4.84	16.54	23.57
PSTEO	2.5	80	2105	2105.74	4.87	16.42	23.44
PSTEO	2.6	80	2105.02	2105.76	4.9	16.31	23.3
PSTEO	2.7	80	2105.04	2105.79	4.89	16.37	23.19
PSTEO	2.8	80	2105.06	2105.81	4.92	16.26	23.06
PSTEO	2.9	80	2105.08	2105.83	4.96	16.14	22.92
PSTEO	3	80	2105.1	2105.85	4.99	16.02	22.78
PSTEO	3.1	80	2105.12	2105.91	4.93	16.21	22
PSTEO	3.2	80	2105.13	2105.97	4.87	16.42	21.25
PSTEO	3.3	80	2105.14	2106.03	4.8	16.65	20.57
PSTEO	3.4	80	2105.15	2106.11	4.73	16.92	19.98
PSTEO	3.5	80	2105.16	2106.18	4.65	17.21	19.52
PSTEO	3.6	80	2105.17	2106.27	4.54	17.64	19.27
PSTEO	3.7	80	2105.18	2106.38	4.38	18.28	19.37
PSTEO	3.8	80	2105.2	2106.48	4.19	19.07	19.96

PSTEO	3.9	80	2105.21	2106.57	4.08	19.58	21.14
PSTEO	4	80	2105.22	2106.63	3.99	20.03	21.25
PSTEO	4.1	80	2105.22	2106.75	3.78	21.17	21.03
PSTEO	4.2	80	2105.22	2106.93	3.38	23.66	21.11
PSTEO	4.3	80	2105.23	2106.89	3.64	21.95	19.82
PSTEO	4.4	80	2105.23	2107	3.41	23.48	20.2
PSTEO	4.5	80	2105.23	2107.02	3.38	23.67	20.47
PSTEO	4.6	80	2105.24	2107.32	2.48	32.29	29.03
PSTEO	4.7	80	2105.24	2107.42	2.13	37.63	28.77
PSTEO	4.8	80	2105.24	2107.49	1.87	42.82	32.3
PSTEO	4.9	80	2105.25	2107.53	1.65	48.37	32.6
PSTEO	5	80	2105.25	2107.56	1.49	53.76	32.41
PSTEO	5.1	80	2105.26	2107.56	1.54	51.8	32.35
PSTEO	5.2	80	2105.26	2107.56	1.6	49.86	32.26
PSTEO	5.3	80	2105.27	2107.55	1.66	48.09	31.07
PSTEO	5.4	80	2105.27	2107.55	1.7	46.99	28.02
PSTEO	5.5	80	2105.28	2107.55	1.73	46.28	27.65
PSTEO	5.6	80	2105.28	2107.55	1.75	45.61	27.58
PSTEO	5.7	80	2105.29	2107.55	1.78	45.06	27.03
PSTEO	5.8	80	2105.29	2107.55	1.79	44.66	26.6
PSTEO	5.9	80	2105.3	2107.55	1.8	44.34	26.48
PSTEO	6	80	2105.3	2107.56	1.82	44.07	26.39
PSTEO	6.1	80	2105.3	2107.55	1.88	42.66	26.28
PSTEO	6.2	80	2105.29	2107.55	1.95	41.12	26.16
PSTEO	6.3	80	2105.29	2107.54	2.03	39.45	26.04
PSTEO	6.4	80	2105.28	2107.53	2.12	37.66	25.91
PSTEO	6.5	80	2105.28	2107.52	2.24	35.7	25.78
PSTEO	6.6	80	2105.28	2107.51	2.38	33.57	25.63
PSTEO	6.7	80	2105.27	2107.48	2.58	31.07	25.45
PSTEO	6.8	80	2105.27	2107.44	2.85	28.06	24.97
PSTEO	6.9	80	2105.26	2107.05	4.16	19.25	15.89
PSTEO	7	80	2105.26	2107.24	3.79	21.1	15.54
PSTEO	7.1	80	2105.25	2107.22	3.91	20.44	15.47
PSTEO	7.2	80	2105.23	2107.34	3.68	21.71	15.8
PSTEO	7.3	80	2105.22	2107.54	3.17	25.21	24.99
PSTEO	7.4	80	2105.21	2107.56	3.19	25.12	25.2
PSTEO	7.5	80	2105.2	2107.59	3.15	25.38	25.55
PSTEO	7.6	80	2105.18	2107.62	3.14	25.44	25.84
PSTEO	7.7	80	2105.17	2107.66	3.09	25.89	26.23
PSTEO	7.8	80	2105.16	2107.68	3.13	25.6	26.48
PSTEO	7.9	80	2105.14	2107.72	3.07	26.1	26.87

PSTEO	8	80	2105.13	2107.74	3.11	25.72	27.12
PSTEO	8.1	80	2105.18	2107.84	2.82	28.33	27.28
PSTEO	8.2	80	2105.22	2107.88	2.73	29.28	27.08
PSTEO	8.3	80	2105.26	2107.92	2.65	30.19	26.8
PSTEO	8.4	80	2105.31	2107.96	2.57	31.07	26.69
PSTEO	8.5	80	2105.35	2107.99	2.52	31.8	26.67
PSTEO	8.6	80	2105.4	2108.02	2.47	32.45	26.7
PSTEO	8.7	80	2105.44	2108.05	2.42	33.06	26.77
PSTEO	8.8	80	2105.48	2108.07	2.38	33.63	26.9
PSTEO	8.9	80	2105.53	2108.08	2.36	33.94	26.92
PSTEO	9	80	2105.57	2108.1	2.34	34.23	26.86
PSTEO	9.1	80	2105.56	2108.09	2.45	32.59	26.23
PSTEO	9.2	80	2105.55	2108.08	2.58	30.99	25.59
PSTEO	9.3	80	2105.54	2108.07	2.72	29.44	24.88
PSTEO	9.4	80	2105.53	2108.04	2.88	27.74	23.93
PSTEO	9.5	80	2105.52	2108.02	3.08	25.98	22.88
PSTEO	9.6	80	2105.5	2107.86	3.7	21.6	20.4
PSTEO	9.7	80	2105.49	2107.99	3.44	23.28	20.72
PSTEO	9.8	80	2105.48	2107.97	3.63	22.02	19.09
PSTEO	9.9	80	2105.47	2107.94	3.85	20.79	17.39
PSTEO	10	80	2105.46	2108.09	3.52	22.73	18.32
PSTEO	10.1	80	2105.5	2108.29	3.03	26.44	20.21
PSTEO	10.2	80	2105.53	2108.33	2.94	27.22	20.41
PSTEO	10.3	80	2105.57	2108.37	2.86	28	20.8
PSTEO	10.4	80	2105.61	2108.4	2.79	28.71	21.28
PSTEO	10.5	80	2105.65	2108.43	2.72	29.41	21.83
PSTEO	10.6	80	2105.68	2108.47	2.65	30.15	22.77
PSTEO	10.7	80	2105.72	2108.5	2.58	30.98	23.73
PSTEO	10.8	80	2105.76	2108.53	2.5	31.94	24.72
PSTEO	10.9	80	2105.8	2108.56	2.43	32.92	25.42
PSTEO	11	80	2105.83	2108.59	2.36	33.85	26.04
PSTEO	11.1	80	2105.93	2108.59	2.41	33.22	25.35
PSTEO	11.2	80	2106.02	2108.59	2.46	32.55	24.65
PSTEO	11.3	80	2106.12	2108.59	2.51	31.83	23.94
PSTEO	11.4	80	2106.22	2108.58	2.58	31.05	23.22
PSTEO	11.5	80	2106.31	2108.58	2.65	30.21	22.51
PSTEO	11.6	80	2106.41	2108.57	2.73	29.3	21.83
PSTEO	11.7	80	2106.5	2108.56	2.82	28.34	21.16
PSTEO	11.8	80	2106.6	2108.54	2.93	27.32	20.43
PSTEO	11.9	80	2106.69	2108.53	3.04	26.28	20.15
PSTEO	12	80	2106.79	2108.61	2.86	27.96	22.16

PSTEO	12.1	80	2106.81	2108.58	3.06	26.15	21.7
PSTEO	12.2	80	2106.83	2108.54	3.28	24.38	19.9
PSTEO	12.3	80	2106.85	2108.43	3.76	21.3	18.82
PSTEO	12.4	80	2106.87	2108.53	3.56	22.5	19.08
PSTEO	12.5	80	2106.89	2108.53	3.66	21.85	18.56
PSTEO	12.6	80	2106.91	2108.55	3.7	21.62	18.61
PSTEO	12.7	80	2106.93	2108.66	3.47	23.05	19
PSTEO	12.8	80	2106.95	2108.7	3.43	23.31	19.17
PSTEO	12.9	80	2106.97	2108.72	3.43	23.32	19.28
PSTEO	13	80	2106.99	2108.74	3.44	23.24	19.39
PSTEO	13.1	80	2107	2108.87	3.12	25.68	20.38
PSTEO	13.2	80	2107.02	2108.89	3.08	26.01	20.95
PSTEO	13.3	80	2107.03	2108.91	3.04	26.29	21.49
PSTEO	13.4	80	2107.05	2108.93	3.01	26.59	22.06
PSTEO	13.5	80	2107.06	2108.95	2.98	26.86	22.64
PSTEO	13.6	80	2107.08	2108.97	2.94	27.19	23.37
PSTEO	13.7	80	2107.09	2108.99	2.9	27.54	24.16
PSTEO	13.8	80	2107.1	2109.01	2.86	28.01	25.08
PSTEO	13.9	80	2107.12	2109.04	2.8	28.61	26.2
PSTEO	14	80	2107.13	2109.08	2.66	30.02	29.75
PSTEO	14.1	80	2107.15	2109.1	2.64	30.34	33.41
PSTEO	14.2	80	2107.16	2109.14	2.53	31.65	34.25
PSTEO	14.3	80	2107.17	2109.16	2.49	32.16	33.18
PSTEO	14.4	80	2107.18	2109.17	2.49	32.17	31.39
PSTEO	14.5	80	2107.19	2109.18	2.52	31.78	29.13
PSTEO	14.6	80	2107.21	2109.18	2.58	31.04	27.01
PSTEO	14.7	80	2107.22	2108.77	3.98	20.12	22.45
PSTEO	14.8	80	2107.23	2108.78	4.01	19.94	20.84
PSTEO	14.9	80	2107.24	2108.82	4	20.02	19.2
PSTEO	15	80	2107.25	2108.92	3.85	20.77	17.52
PSTEO	15.1	80	2107.29	2109.06	3.55	22.52	18.23
PSTEO	15.2	80	2107.32	2109.04	3.75	21.34	18.23
PSTEO	15.3	80	2107.35	2109.14	3.55	22.54	18.77
PSTEO	15.4	80	2107.38	2109.12	3.73	21.45	18.69
PSTEO	15.5	80	2107.41	2109.21	3.58	22.38	19.17
PSTEO	15.6	80	2107.45	2109.21	3.71	21.54	19.1
PSTEO	15.7	80	2107.48	2109.33	3.44	23.28	19.91
PSTEO	15.8	80	2107.51	2109.34	3.5	22.83	20.01
PSTEO	15.9	80	2107.54	2109.36	3.56	22.45	20.15
PSTEO	16	80	2107.57	2109.38	3.6	22.24	20.36
PSTEO	16.1	80	2107.59	2109.39	3.6	22.19	20.46

PSTEO	16.2	80	2107.6	2109.4	3.62	22.12	20.42
PSTEO	16.3	80	2107.61	2109.42	3.63	22.05	20.36
PSTEO	16.4	80	2107.62	2109.43	3.64	21.97	20.27
PSTEO	16.5	80	2107.64	2109.44	3.66	21.88	20.16
PSTEO	16.6	80	2107.65	2109.45	3.67	21.8	19.93
PSTEO	16.7	80	2107.66	2109.47	3.69	21.69	19.66
PSTEO	16.8	80	2107.67	2109.48	3.7	21.6	19.41
PSTEO	16.9	80	2107.69	2109.49	3.72	21.51	19.17
PSTEO	17	80	2107.7	2109.5	3.73	21.43	18.77
PSTEO	17.1	80	2107.72	2109.66	3.39	23.58	20.38
PSTEO	17.2	80	2107.74	2109.65	3.54	22.57	19.75
PSTEO	17.3	80	2107.76	2109.63	3.72	21.49	19.08
PSTEO	17.4	80	2107.79	2109.77	3.41	23.43	20.04
PSTEO	17.5	80	2107.81	2109.77	3.52	22.72	19.53
PSTEO	17.6	80	2107.83	2109.78	3.62	22.08	19.06
PSTEO	17.7	80	2107.85	2109.78	3.71	21.54	18.82
PSTEO	17.8	80	2107.87	2109.8	3.76	21.29	18.76
PSTEO	17.9	80	2107.9	2109.92	3.5	22.87	18.99
PSTEO	18	80	2107.92	2109.94	3.54	22.63	18.6
PSTEO	18.1	80	2107.93	2109.95	3.62	22.11	17.99
PSTEO	18.2	80	2107.95	2109.96	3.67	21.79	17.45
PSTEO	18.3	80	2107.96	2109.98	3.72	21.52	16.92
PSTEO	18.4	80	2107.97	2109.99	3.76	21.28	16.39
PSTEO	18.5	80	2107.99	2110	3.79	21.09	15.72
PSTEO	18.6	80	2108	2110.02	3.82	20.93	15.18
PSTEO	18.7	80	2108.02	2110.03	3.85	20.8	14.87
PSTEO	18.8	80	2108.03	2110.05	3.87	20.69	14.6
PSTEO	18.9	80	2108.05	2110.06	3.89	20.58	14.36
PSTEO	19	80	2108.06	2110.07	3.91	20.47	14.14
PSTEO	19.1	80	2108.08	2110.09	3.94	20.31	14.63
PSTEO	19.2	80	2108.09	2110.19	3.74	21.39	15.25
PSTEO	19.3	80	2108.11	2110.21	3.77	21.2	15.79
PSTEO	19.4	80	2108.13	2110.23	3.81	20.99	16.31
PSTEO	19.5	80	2108.15	2110.32	3.62	22.1	16.97
PSTEO	19.6	80	2108.16	2110.38	3.55	22.53	17.57
PSTEO	19.7	80	2108.18	2110.41	3.53	22.67	17.69
PSTEO	19.8	80	2108.2	2110.42	3.54	22.58	17.82
PSTEO	19.9	80	2108.22	2110.45	3.53	22.68	18.06
PSTEO	20	80	2108.23	2110.55	3.27	24.46	18.7
PSTEO	20.1	80	2108.29	2110.58	3.26	24.56	19.29
PSTEO	20.2	80	2108.35	2110.63	3.16	25.31	19.89

PSTEO	20.3	80	2108.42	2110.69	3.06	26.17	20.18
PSTEO	20.4	80	2108.48	2110.74	2.96	27.01	20.15
PSTEO	20.5	80	2108.54	2110.76	2.93	27.29	20.31
PSTEO	20.6	80	2108.6	2110.8	2.85	28.07	20.51
PSTEO	20.7	80	2108.66	2110.83	2.81	28.49	20.47
PSTEO	20.8	80	2108.72	2110.85	2.76	28.98	20.37
PSTEO	20.9	80	2108.78	2110.87	2.71	29.5	20.2
PSTEO	21	80	2108.84	2110.9	2.66	30.08	19.94
PSTEO	21.1	80	2108.85	2110.89	2.74	29.23	20.03
PSTEO	21.2	80	2108.85	2110.9	2.79	28.68	20.36
PSTEO	21.3	80	2108.86	2110.9	2.81	28.43	20.7
PSTEO	21.4	80	2108.86	2110.91	2.82	28.4	20.65
PSTEO	21.5	80	2108.87	2110.92	2.8	28.53	20.43
PSTEO	21.6	80	2108.87	2110.94	2.78	28.77	20.27
PSTEO	21.7	80	2108.88	2110.95	2.74	29.15	20.21
PSTEO	21.8	80	2108.89	2110.97	2.7	29.64	20.12
PSTEO	21.9	80	2108.89	2110.99	2.64	30.31	20.01
PSTEO	22	80	2108.9	2111.02	2.58	31.06	19.86

Reach	Sección	Q Total	Plantilla	Nivel superficie del agua	Velocidad	Área	Perímetro mojado
		(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(m)	(m/s)	(m <sup>2</sup> )	(m)
PSTEO	0	250	2104.33	2106.03	6.57	38.02	25.29
PSTEO	0.2	250	2104.37	2106.08	6.53	38.28	25.28
PSTEO	0.4	250	2104.41	2106.13	6.48	38.55	25.26
PSTEO	0.6	250	2104.45	2106.18	6.44	38.83	25.25
PSTEO	0.8	250	2104.48	2106.24	6.39	39.11	25.23
PSTEO	1	250	2104.52	2106.29	6.34	39.42	25.22
PSTEO	1.1	250	2104.56	2106.31	6.34	39.44	25.37
PSTEO	1.2	250	2104.6	2106.33	6.34	39.45	25.53
PSTEO	1.3	250	2104.63	2106.36	6.33	39.47	25.68
PSTEO	1.4	250	2104.67	2106.38	6.33	39.49	25.83
PSTEO	1.5	250	2104.71	2106.4	6.33	39.51	25.99
PSTEO	1.6	250	2104.75	2106.43	6.33	39.52	26.14
PSTEO	1.7	250	2104.79	2106.45	6.32	39.54	26.3
PSTEO	1.8	250	2104.82	2106.48	6.32	39.55	26.45
PSTEO	1.9	250	2104.86	2106.5	6.32	39.56	26.6
PSTEO	2	250	2104.9	2106.53	6.32	39.58	26.76
PSTEO	2.1	250	2104.92	2106.56	6.29	39.76	26.72
PSTEO	2.2	250	2104.94	2106.6	6.26	39.96	26.68
PSTEO	2.3	250	2104.96	2106.63	6.23	40.16	26.64
PSTEO	2.4	250	2104.98	2106.67	6.19	40.37	26.61
PSTEO	2.5	250	2105	2106.71	6.16	40.59	26.58
PSTEO	2.6	250	2105.02	2106.74	6.12	40.82	26.55
PSTEO	2.7	250	2105.04	2106.78	6.09	41.07	26.52
PSTEO	2.8	250	2105.06	2106.82	6.05	41.31	26.5
PSTEO	2.9	250	2105.08	2106.86	6.01	41.58	26.47
PSTEO	3	250	2105.1	2106.9	5.97	41.85	26.45
PSTEO	3.1	250	2105.12	2107.01	5.84	42.84	26.55
PSTEO	3.2	250	2105.13	2107.14	5.63	44.37	26.73
PSTEO	3.3	250	2105.14	2107.29	5.42	46.12	26.91
PSTEO	3.4	250	2105.15	2107.43	5.21	47.98	27.23
PSTEO	3.5	250	2105.16	2107.6	4.94	50.64	27.6
PSTEO	3.6	250	2105.17	2107.91	4.36	57.28	28.74
PSTEO	3.7	250	2105.18	2107.67	5.14	48.63	26.52
PSTEO	3.8	250	2105.2	2107.8	4.94	50.63	26.63
PSTEO	3.9	250	2105.21	2108.04	4.51	55.48	27.17
PSTEO	4	250	2105.22	2107.9	4.99	50.13	26.18
PSTEO	4.1	250	2105.22	2108.17	4.5	55.59	27.25

PSTEO	4.2	250	2105.22	2108.35	4.16	60.03	33.96
PSTEO	4.3	250	2105.23	2108.62	3.56	70.14	37.47
PSTEO	4.4	250	2105.23	2108.75	3.26	76.71	39.32
PSTEO	4.5	250	2105.23	2108.83	3.06	81.83	39.56
PSTEO	4.6	250	2105.24	2108.89	2.89	86.46	39.6
PSTEO	4.7	250	2105.24	2108.94	2.75	90.9	39.45
PSTEO	4.8	250	2105.24	2108.98	2.62	95.28	38.94
PSTEO	4.9	250	2105.25	2109.02	2.5	99.84	36.86
PSTEO	5	250	2105.25	2109.06	2.38	104.83	35.98
PSTEO	5.1	250	2105.26	2109.05	2.43	102.82	36.03
PSTEO	5.2	250	2105.26	2109.05	2.48	100.81	36.29
PSTEO	5.3	250	2105.27	2109.04	2.53	98.82	36.42
PSTEO	5.4	250	2105.27	2109.04	2.58	96.83	36.57
PSTEO	5.5	250	2105.28	2109.03	2.64	94.83	36.57
PSTEO	5.6	250	2105.28	2109.03	2.69	92.83	36.43
PSTEO	5.7	250	2105.29	2109.02	2.75	90.82	36.18
PSTEO	5.8	250	2105.29	2109.01	2.81	88.85	35.74
PSTEO	5.9	250	2105.3	2109.01	2.87	87.03	34.41
PSTEO	6	250	2105.3	2109	2.92	85.76	31.75
PSTEO	6.1	250	2105.3	2109	2.96	84.6	33.46
PSTEO	6.2	250	2105.29	2109	3	83.46	34.36
PSTEO	6.3	250	2105.29	2109	3.04	82.32	34.73
PSTEO	6.4	250	2105.28	2109	3.08	81.11	34.99
PSTEO	6.5	250	2105.28	2108.99	3.14	79.74	34.89
PSTEO	6.6	250	2105.28	2108.99	3.2	78.05	34.62
PSTEO	6.7	250	2105.27	2108.98	3.29	76.07	34.21
PSTEO	6.8	250	2105.27	2108.96	3.39	73.74	33.69
PSTEO	6.9	250	2105.26	2108.93	3.53	70.75	33.03
PSTEO	7	250	2105.26	2108.9	3.72	67.13	32.25
PSTEO	7.1	250	2105.25	2108.9	3.78	66.18	32.07
PSTEO	7.2	250	2105.23	2108.9	3.83	65.29	31.93
PSTEO	7.3	250	2105.22	2108.9	3.88	64.47	31.8
PSTEO	7.4	250	2105.21	2108.9	3.92	63.71	31.65
PSTEO	7.5	250	2105.2	2108.91	3.97	63.02	31.48
PSTEO	7.6	250	2105.18	2108.91	4	62.42	31.25
PSTEO	7.7	250	2105.17	2108.92	4.04	61.9	31.04
PSTEO	7.8	250	2105.16	2108.92	4.07	61.45	30.86
PSTEO	7.9	250	2105.14	2108.93	4.1	61.04	30.75
PSTEO	8	250	2105.13	2108.94	4.12	60.66	30.76
PSTEO	8.1	250	2105.18	2108.98	4.06	61.55	30.76
PSTEO	8.2	250	2105.22	2109.02	4.01	62.39	30.72

PSTEO	8.3	250	2105.26	2109.06	3.96	63.18	30.66
PSTEO	8.4	250	2105.31	2109.1	3.91	63.91	30.57
PSTEO	8.5	250	2105.35	2109.14	3.87	64.64	30.45
PSTEO	8.6	250	2105.4	2109.17	3.83	65.31	30.3
PSTEO	8.7	250	2105.44	2109.21	3.79	65.97	30.09
PSTEO	8.8	250	2105.48	2109.23	3.76	66.48	29.78
PSTEO	8.9	250	2105.53	2109.26	3.73	67.05	29.42
PSTEO	9	250	2105.57	2109.29	3.69	67.67	29.2
PSTEO	9.1	250	2105.56	2108.66	5.21	48.02	27.37
PSTEO	9.2	250	2105.55	2108.77	5.07	49.28	27.05
PSTEO	9.3	250	2105.54	2108.93	4.81	51.95	26.99
PSTEO	9.4	250	2105.53	2109.19	4.34	57.67	31.08
PSTEO	9.5	250	2105.52	2108.82	5.46	45.78	25.97
PSTEO	9.6	250	2105.5	2108.91	5.38	46.51	28.35
PSTEO	9.7	250	2105.49	2108.96	5.34	46.85	29.33
PSTEO	9.8	250	2105.48	2109	5.3	47.16	29.11
PSTEO	9.9	250	2105.47	2109.05	5.27	47.41	28.78
PSTEO	10	250	2105.46	2109.09	5.24	47.73	28.38
PSTEO	10.1	250	2105.5	2109.36	4.79	52.2	28.28
PSTEO	10.2	250	2105.53	2109.51	4.56	54.84	26.43
PSTEO	10.3	250	2105.57	2109.73	4.12	60.69	27.03
PSTEO	10.4	250	2105.61	2109.81	3.93	63.57	27.39
PSTEO	10.5	250	2105.65	2109.91	3.74	66.87	27.86
PSTEO	10.6	250	2105.68	2109.96	3.61	69.28	28.32
PSTEO	10.7	250	2105.72	2110.01	3.5	71.49	28.84
PSTEO	10.8	250	2105.76	2110.06	3.39	73.66	29.39
PSTEO	10.9	250	2105.8	2110.1	3.3	75.72	29.97
PSTEO	11	250	2105.83	2110.13	3.22	77.71	30.57
PSTEO	11.1	250	2105.93	2110.11	3.32	75.41	29.65
PSTEO	11.2	250	2106.02	2110.09	3.42	73.02	28.77
PSTEO	11.3	250	2106.12	2110.07	3.54	70.53	27.98
PSTEO	11.4	250	2106.22	2110.04	3.68	67.96	27.26
PSTEO	11.5	250	2106.31	2110.01	3.82	65.51	26.65
PSTEO	11.6	250	2106.41	2109.98	3.96	63.17	26.24
PSTEO	11.7	250	2106.5	2109.95	4.08	61.25	26.01
PSTEO	11.8	250	2106.6	2109.94	4.15	60.19	26.07
PSTEO	11.9	250	2106.69	2110.04	3.98	62.78	27.26
PSTEO	12	250	2106.79	2110.14	3.75	66.58	27.21

## Apéndice C

### Funcionamiento del vertedor y tanque amortiguador del TEC



Compuertas cerradas, con gasto de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , desalojados por el vertedor lateral.



Compuertas cerradas, con gasto de  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , desalojados por el vertedor lateral.



Portal de salida del TEC con gasto de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ . La descarga del túnel no se ahoga.

**Mediciones en el vertedor del TEC para un gasto de  $150 \text{ m}^3/\text{s}$**

Las fotografías siguientes corresponden al vertedor del TEC, se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes obtenidos con limnómetro.

Prototipo		
Promedio (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
7.59	2107.81	0.01



Los datos siguientes corresponden al tanque amortiguador del TEC en su inicio, se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos, cabe mencionar que estos datos corresponde a una medición perpendicular a la plantilla (no al del talud).

Prototipo		
Promedio (m)	m.s.n.m.	Desv. Est.
3.14	2105.26	0.09

Los datos siguientes corresponde al tanque amortiguador del TEC en un punto medio, se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos; estos datos corresponde a mediciones perpendiculares a la plantilla (no al del talud).

Prototipo		
Promedio (m)	m.s.n.m.	Desv. Est.
3.02	2104.44	0.07

Las fotografías siguientes corresponden al tanque amortiguador del TEC en su tramo final, se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos (medición perpendicular a la plantilla, no al del talud).

Prototipo		
Promedio (m)	m.s.n.m.	Desv. Est.
2.38	2103.01	0.09



Las fotografías siguientes corresponden al tanque amortiguador del TEC en su inicio, se anexa un resumen de los datos medidos; los tirantes medidos sobre el talud.

Tanque Amortiguador TEC (Medido al inicio del tanque y sobre el talud)		
MAX.	MIN.	Tirante más frecuente
2106.86	2105.99	2106.14



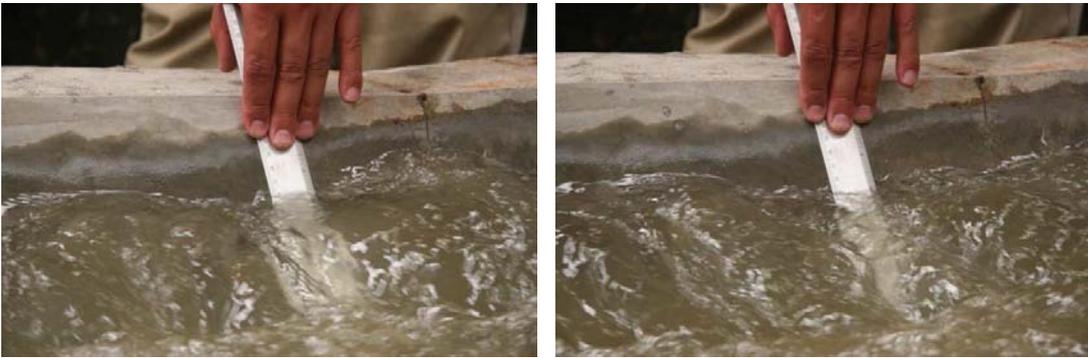
Las fotografías siguientes corresponden al tanque amortiguador del TEC en su punto medio, se anexa un resumen de los datos medidos; los tirantes son medidos sobre el talud.

Tanque Amortiguador TEC (Medido a la mitad del tanque y sobre el talud)		
MAX.	MIN.	Tirante más frecuente
2106.07	2106.07	2106.55



Las fotografías siguientes corresponden al tanque amortiguador del TEC en su punto final, se anexa un resumen de los datos medidos, cabe mencionar que estos datos son medidos sobre el talud.

Tanque Amortiguador TEC (Medido al final del tanque y sobre el talud)		
MAX.	MIN.	Tirante frecuente
2105.97	2105.22	2105.91



## Apéndice D

### Funcionamiento del vertedor, tanque amortiguador y conexión a la obra del TEC para la 1ª y 2ª versión del TEO

#### 1ª Versión



Vista del funcionamiento del vertedor del TEO para un gasto de  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Vista lateral del vertedor TEO para gasto de  $170 \text{ m}^3/\text{s}$



Comportamiento del canal de llegada con  $80 \text{ m}^3/\text{s}$

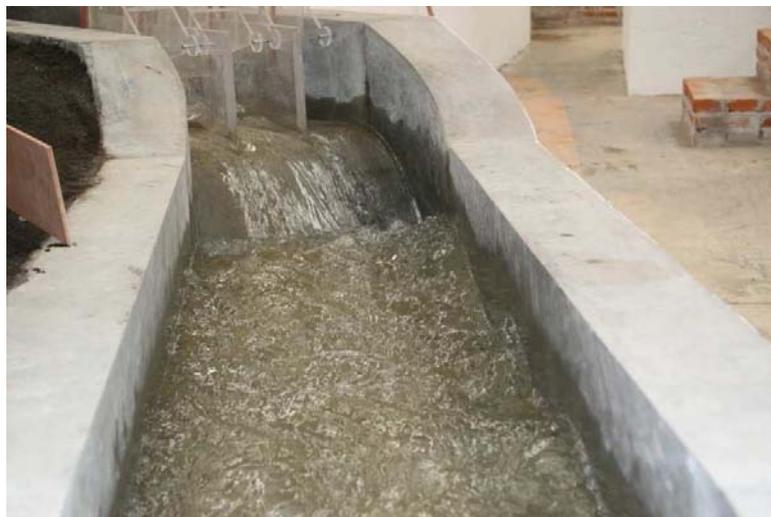


Comportamiento del canal con  $170 \text{ m}^3/\text{s}$

## Pruebas en la confluencia TEC-TEO



Vista del canal de conducción hacia la intersección del TEO con el TEC en dirección al distrito de riego (compuertas totalmente abiertas)



Fluctuaciones del flujo (en la curva) aguas abajo de las compuertas (compuertas abiertas, vista desde aguas abajo hacia aguas arriba)



Intersección de canales del TEC y TEO, en dirección al distrito de riego, con un gasto en TEC de 0 m<sup>3</sup>/s y TEO de 50 m<sup>3</sup>/s. Obsérvese la gran turbulencia del flujo. Las compuertas de entrada al túnel están totalmente abiertas.



Canal de conducción después de compuertas en dirección a la intersección TEC–TEO.

## 2ª versión

### Medición sobre el vertedor

Las fotografías siguientes corresponden al inicio del vertedor (CAD. 61+991.948), se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos.

Prototipo		
Tirante prom. (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
6.71	2112.42	0.02



La fotografía siguiente corresponde al CAD. 62+016.948 (aprox. a la mitad de la longitud del vertedor), se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos.

Prototipo		
Tirante prom. (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
6.87	2112.55	0.01



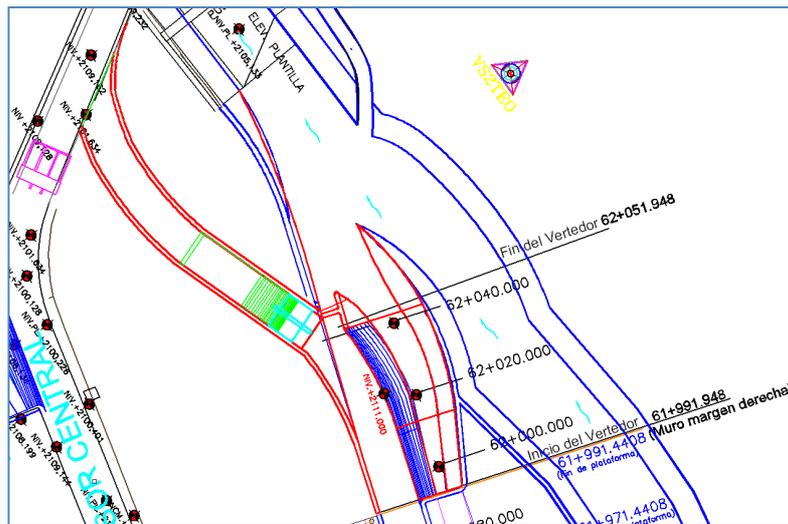
Las fotografías siguientes corresponden al CAD. 62+041.248 (final del vertedor), se anexa el promedio y la desviación estándar de los tirantes medidos.

Prototipo		
Tirante prom. (m)	m.s.n.m	Desv. Est.
6.86	2112.50	0.02



## Mediciones en el tanque amortiguador del canal lateral del TEO

En el interior del tanque se realizaron las siguientes mediciones: tirante promedio, máximo, mínimo y la desviación estándar en tres puntos del tanque (cadenamientos 62+000, 62+020 y 62+040). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla siguiente.



Puntos de medición en el tanque del vertedor lateral del TEO

Cadenamiento	Tirante promedio (m)	Tirante máximo (m)	Tirante mínimo (m)	Desviación estándar (m)
62+000	2.16	2.46	1.83	0.137
62+020	3.01	3.45	2.64	0.163
62+040	3.26	3.6	2.88	0.134



Medición al inicio del tanque del vertedor sobre la plantilla



Medición al final del tanque del vertedor sobre la plantilla

### Alcance máximo sobre el talud

También se realizaron pruebas para conocer el alcance máximo sobre el talud del vertedor en los mismos cadenamientos. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla siguiente.

Cadenamiento	Tirante promedio (m)	Tirante máximo (m)	Tirante mínimo (m)
62+000	4.71	5.46	4.26
62+020	4.86	5.46	4.26
62+040	5.16	6.36	4.71

