



2012

PROYECTO HIDROELÉCTRICO REVENTAZÓN: ESTUDIOS AMBIENTALES ADICIONALES PARTE B: ESTUDIO DE CALIDAD DEL AGUA



CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	DESCRIPCIÓN DEL EMBALSE REVENTAZÓN	2
1.2	ESTUDIOS PREVIOS	2
2.	INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LOS MODELOS	3
2.1	DATOS ESPACIALES	3
2.1.1	DATOS BATIMÉTRICOS Y DATOS DE LA LONGITUD DEL LITORAL; GEOMETRÍA DEL MODELO	3
2.1.2	ESTRUCTURAS.....	6
2.2	DATOS DE TIEMPO VARIABLE	6
2.2.1	VALORES DE AFLUENTES Y EFLUENTES	6
2.2.2	DATOS METEOROLÓGICOS.....	7
2.2.3	TEMPERATURA DE LOS AFLUENTES	7
2.3	DATOS DE CALIDAD DEL AGUA.....	7
3.	APLICACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO Y RESULTADOS	9
3.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO.....	9
3.2	ESCENARIOS MODELADOS.....	9
3.3	CONFIGURACIÓN DEL MODELO	10
3.4	RESULTADOS HIDRODINÁMICOS Y DE TEMPERATURA DEL MODELO	10
3.5	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE	12
4.	APLICACIÓN DEL MODELO DE EUTROFIZACIÓN Y RESULTADOS.....	15
4.1	DESCRIPCIÓN DEL MODELO BATHTUB	15
4.2	ESTADO TRÓFICO	15
4.3	DATOS DE ENTRADA PARA BATHTUB.....	16
4.4	RESULTADOS DEL MODELO BATHTUB.....	16
4.5	PROPORCIÓN DE NITRÓGENO A FÓSFORO	18
5.	CONCLUSIONES.....	19
5.1	RESULTADOS DEL MODELO	19
5.2	EVALUACIÓN DEL IMPACTO	20
5.3	MEDIDAS POSIBLES DE MITIGACIÓN	21
6.	LITERATURA CITADA	23
7.	GLOSARIO	25

8. FIGURAS.....	27
-----------------	----

LISTA DE TABLAS

TABLA 1-1 CARACTERÍSTICAS VOLUMÉTRICAS DE LA PRESA Y EL EMBALSE REVENTAZÓN.....	2
TABLA 2-1 TABLA DE ELEVACIÓN, ÁREA Y VOLUMEN DERIVADA DE LA GEOMETRÍA DEL MODELO.....	5
TABLA 2-2 CONCENTRACIONES DE CALIDAD DEL AGUA EN LOS AFLUENTES USADAS EN EL MODELO BATHTUB.....	8
TABLA 3-1 RESULTADOS MODELADOS HIDRODINÁMICOS Y DE TEMPERATURA DEL AGUA ANUALES PROMEDIO	12
TABLA 3-2 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CALIDAD DEL AGUA MODELADOS EN EL EMBALSE REVENTAZÓN	13
TABLA 4-1 RESULTADOS DEL MODELO BATHTUB	18
TABLA 4-2 ÍNDICES DE NIVEL TRÓFICO.....	18

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Datos de las curva de nivel en AutoCAD sobrepuestos en una imagen satelital del embalse Reventazón.	4
Figura 8.1 Contornos batimétricos sobrepuestos en Google-Earth	27
Figura 8.2 CE-QUAL-W2 Red del modelo	28
Figura 8.3 Área y volúmen observados y modelados vs Elevación.....	29
Figura 8.4 Embalse Reventazón planos de la estructura de Toma de Aguas*.....	30
Figura 8.5 Embalse Reventazón plano de la descarga de fondo*.....	31
Figura 8.6 Embalse Reventazón plano del vertedero*	32
Figura 8.7 Afluentes y efluentes modelados del embalse Reventazón	32
Figura 8.8 Elevaciones de superficie del agua modeladas para una descarga mínima de 40 m ³ /s.....	33
Figura 8.9 Temperaturas del agua modeladas del afluente (Tin) y efluente (Tout), con una descarga mínima de 40 m ³ /s.....	34
Figura 8.10 Temperaturas promedio mensuales modeladas de afluentes y efluentes.....	35
Figura 8.11 Elevaciones mensuales promedio modeladas de superficie del agua y termoclina cerca de la cortina	36
Figura 8.12 Perfiles típicos de temperatura del agua cerca de la cortina: 30 de enero del 2005, 27 de mayo del 2005, 17 de septiembre del 2005	37
Figura 8.13 Perfiles típicos de temperatura del agua cerca de la cortina: 27 de enero del 2006, 25 de mayo del 2006, 15 de septiembre del 2006	38

1. INTRODUCCIÓN

En este reporte se describe el uso de modelos para evaluar los posibles impactos ambientales generados por la operación del embalse Reventazón. Estos impactos son:

1. Cambios en la temperatura del agua tanto en el en el embalse como directamente aguas abajo de la presa.
2. La posible eutrofización del embalse.

El primer modelo es un cálculo longitudinal-vertical hidrodinámico y de temperatura, el cual fue usado para simular cambios estacionales de temperatura en el embalse y aguas abajo de la presa. Estas temperaturas se compararon con temperaturas del agua observadas en el río Reventazón para evaluar los impactos generados antes y después del inicio de operaciones del embalse. El segundo modelo funciona en estado estacionario (steady-state) considerando el embalse como un compartimiento individual y utiliza información disponible de nutrientes para calcular el estado trófico del embalse después de su llenado. Este modelo proporciona los valores del índice numérico de estado trófico de Carlson (TSI), el cual sirve como indicador de productividad biológica y por lo tanto estima el estado trófico del embalse después de su llenado.

Cuerpos de agua profundos, como el propuesto para el proyecto hidroeléctrico Reventazón (P.H) puede estratificarse formando una capa de más caliente en la parte superior (epilimnio) y otra más fría en la parte profunda (hipolimnio) de la columna de agua. El hipolimnio puede llegar a estar aislado de los efectos producidos por la radiación solar y re-aireación del agua en la superficie, lo cual podría acumular bajas temperaturas y bajas concentraciones de oxígeno disuelto (OD) en el agua. Una descarga de aguas profundas de la hidroeléctrica pasaría consecutivamente aguas abajo en donde comunidades biológicas aclimatadas a temperaturas más calientes y niveles más altos de OD podrían ser impactados.

El modelo hidrodinámico seleccionado para evaluar los impactos del P.H. Reventazón en el agua del embalse Reventazón es un modelo de calidad del agua creado por los ingenieros del cuerpo del ejército de los Estados Unidos de Norteamérica (U.S. Army Corps of Engineers) para embalses, CE-QUAL-W2. Este es un modelo que varía con el tiempo y considera los gradientes longitudinales y verticales. El modelo fue usado para simular operaciones en el embalse Reventazón para un período de tres años para calcular la estratificación del embalse y la temperatura del agua de las descargas. Debido a que el modelo varía con el tiempo y lugar, este requiere utilizar una batimetría del embalse detallada e información de las dimensiones y localización de las estructuras de descarga, así como información por día o por hora de los caudales de entrada y de salida del embalse, temperatura de los afluentes, e información meteorológica la cual fue proporcionada por el cliente.

Una característica de los embalses es su capacidad para almacenar nutrientes; el incremento de nutrientes podría aumentar la productividad biológica a un nivel que podría interferir con los propósitos para los cuales el embalse fue planeado. El modelo seleccionado para examinar la posibilidad de eutrofización del embalse fue BATHTUB. BATHTUB es también un producto de los ingenieros del cuerpo

del ejército de los Estados Unidos de Norteamérica (U.S. Army Corps of Engineers) y aplica algoritmos empíricos para hacer a grandes rasgos predicciones de fósforo total, nitrógeno total, clorofila a y transparencia (disco Secchi) del embalse utilizando datos observados de calidad del agua del río.

Cada uno de estos modelos y los resultados de sus aplicaciones se discuten más detalladamente respectivamente en las secciones 3 y 4. Los conjuntos de datos requeridos para las aplicaciones del modelo se describen en la sección 2.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL EMBALSE REVENTAZÓN

Actualmente el embalse Reventazón se encuentra en construcción y se extiende en medio del río Reventazón a una latitud norte de 10° 4.5' y longitud oeste de 83° 34.6'. El embalse se localiza aproximadamente 38 Km aguas abajo del embalse la Angostura, el sitio de otro proyecto hidroeléctrico aguas arriba. Existen varios proyectos hidroeléctricos en la cuenca del río Reventazón, aguas arriba del sitio en donde se encuentra el P.H. Reventazón.

Tabla 1-1 Características volumétricas de la presa y el embalse Reventazón

Características	Valor
Caudal promedio a largo plazo	151 m ³ /s
Nivel normal máximo de operación	265 m
Nivel normal mínimo de operación	245 m
Salto bruto	133 m
Volumen del embalse	296.7 millones de m ³
Superficie del embalse	6.9 Km ²
Profundidad promedio (volumen/área)	43 m

1.2 ESTUDIOS PREVIOS

Se realizaron estudios ambientales para el río Reventazón como parte de un extenso grupo de estudios de factibilidad para el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), los cuales también incluían análisis sociales, económicos y de ingeniería. Los estudios ambientales de factibilidad y los estudios de impacto han sido revisados para obtener fuentes de información adicional para la aplicación del modelo y para la consistencia de los resultados presentados en este documento. Los documentos fueron provistos por ICE en un DVD titulado "Reventazón Proyecto Hidroeléctrico, Consultoría Estudios Adicionales BID, Julio 2011, ICE".

2. INFORMACIÓN REQUERIDA PARA LOS MODELOS

La aplicación de CE-QUAL-W2 requiere dos tipos de datos:

1. Datos espaciales, principalmente la orilla del embalse y la batimetría, pero también la ubicación, elevaciones y configuración de las estructuras.
2. Datos estacionales, esto es, datos de condición frontera que varían con el tiempo los cuales consisten de caudales de entrada y de temperatura, descargas, y parámetros meteorológicos. Todos los modelos determinísticos, incluyendo CE-QUAL-W2, requieren de datos ininterrumpidos de condición frontera que varíen con el tiempo. No pueden existir intervalos grandes en el grupo de datos y todos los datos requeridos deben estar disponibles por el lapso del período de simulación.

Para ingresar datos en CE-QUAL-W2, los datos espaciales se codifican principalmente en dos archivos de entrada, los archivos de control y los archivos de batimetría. Los datos estacionales se codifican en muchos archivos, cada archivo representa una serie de condiciones frontera que varían con el tiempo, por ejemplo, los datos meteorológicos para el intercambio de calor en la superficie y los cálculos para la resistencia del viento, o los caudales de entrada para un tributario. Cada registro en los archivos de condición frontera es asignado un día juliano (un registro de tiempo que indica los días desde el inicio de un año de referencia). La serie de archivos de entrada y el archivo ejecutable de CE-QUAL-W2 que conforman la aplicación del modelo se explican en la Sección 3.

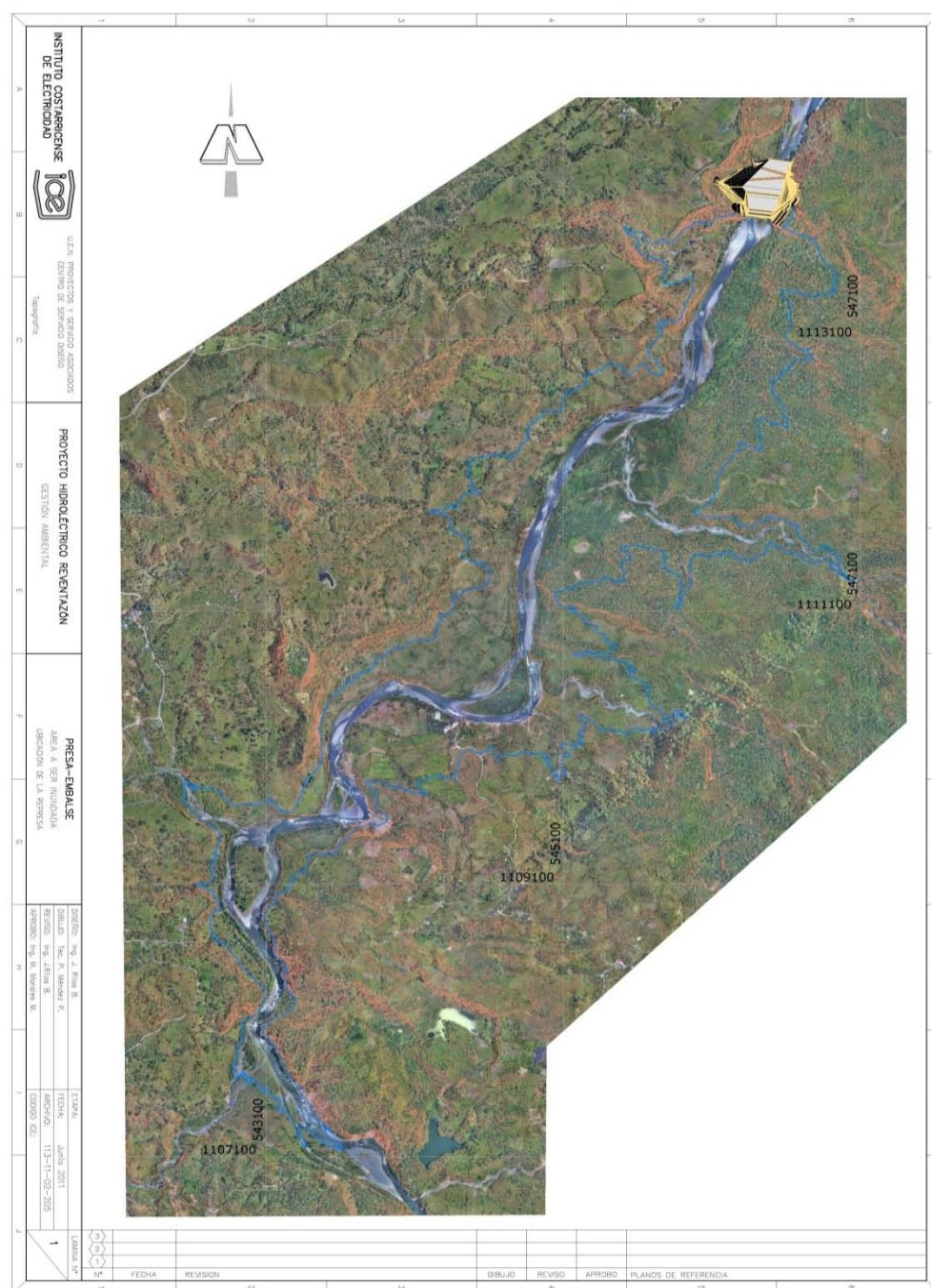
El ingreso de datos en BATHTUB es más sencillo. El embalse es representado por un compartimiento individual, completamente mezclado el cual incluye el volumen de todo el embalse. Debido a que BATHTUB fue desarrollado para simulaciones de estado estacionario (steady-state), los datos que cambian con el tiempo se colapsan en un valor único para los caudales de entrada, generalmente el caudal promedio anual. Sin embargo, ya que el modelo calcula la calidad del agua, éste también requiere de cargas de nutrientes (fósforo y nitrógeno) y de otros parámetros que representen la calidad cinética del agua. Estos datos se explican en la aplicación del modelo BATHTUB Sección 4. Las siguientes secciones describen la información que es común para ambos modelos.

2.1 DATOS ESPACIALES

2.1.1 DATOS BATIMÉTRICOS Y DATOS DE LA LONGITUD DEL LITORAL; GEOMETRÍA DEL MODELO

Los datos batimétricos que se utilizan para desarrollar la geometría de CE-QUAL-W2 fueron obtenidos del archivo de AutoCAD “embalse y presa.dwg” usando el programa de Aquaveo Watershed Modeling System (WMS). El archivo con los datos de AutoCAD se abrió en ArcMap y se convirtió a un archivo shape (shapefile) para su observación. La figura 2.1 muestra los datos de contorno de AutoCAD sobrepuestos en una imagen satelital del lugar. La línea azul indica el contorno de 265 m correspondiente a la elevación máxima del diseño del embalse. La figura 8.2 muestra la geometría del modelo CE-QUAL-W2 generada a partir de los datos batimétricos.

Figura 2.1 Datos de las curva de nivel en AutoCAD sobrepuestos en una imagen satelital del embalse Reventazón.



El área y el volumen de la geometría del modelo fueron comparados al área y a las curvas de capacidad de almacenamiento diseñadas (Reservoir Storage Curves.xls). Debido a que la resolución vertical en la geometría del modelo está limitada a 5 m, aunque es aceptable para los cálculos hidrodinámicos y de temperatura, habrá algunas diferencias con las curvas, como se muestra en la Figura 8.3. En general la concordancia es buena. La Tabla 2-1 muestra el área y el volumen y la elevación calculadas de la geometría del modelo.

Tabla 2-1 Tabla de Elevación, Área y Volumen derivada de la Geometría del Modelo.

Elevación (m)	Área (10 ⁶ m ²)	Volumen (10 ⁶ m ³)	Celdas Activas	Profundidad Promedio (m)	Ancho Promedio (m)
265.0	6.9	296.7	1070.0	42.9	857.0
260.0	6.4	262.8	985.0	41.2	790.0
255.0	5.9	231.5	905.0	39.1	733.1
250.0	5.4	202.5	830.0	37.3	673.4
245.0	4.9	175.9	760.0	35.6	612.4
240.0	4.5	151.8	691.0	33.7	558.4
235.0	4.1	129.8	626.0	31.5	511.0
230.0	3.7	109.6	561.0	29.4	461.2
225.0	3.3	91.5	501.0	27.5	411.7
220.0	2.9	75.3	441.0	25.9	361.0
215.0	2.5	61.3	386.0	24.4	310.8
210.0	2.2	49.2	334.0	22.2	274.3
205.0	1.9	38.4	284.0	20.3	234.4
200.0	1.6	29.3	239.0	18.2	199.4
195.0	1.3	21.6	194.0	16.1	166.5
190.0	1.0	15.2	154.0	14.5	129.6
185.0	0.8	10.3	119.0	12.7	100.3
180.0	0.6	6.5	89.0	10.4	77.0
175.0	0.4	3.6	64.0	8.2	54.7
170.0	0.2	1.6	43.0	6.8	30.0
165.0	0.1	0.6	23.0	4.7	17.0
160.0	0.0	0.1	11.0	4.3	3.4
155.0	0.0	0.0	6.0	5.0	0.9
150.0	0.0	0.0	1.0	1.0	0.6

2.1.2 ESTRUCTURAS

Es importante tener la extensión vertical y las dimensiones de las estructuras de la presa indicadas en la geometría del modelo a las elevaciones correspondientes. El plano ACAD: H8827002 (lam 11.19 Toma de aguas.pdf) muestra la distribución general del túnel de toma de aguas y la toma de la descarga de fondo. Los planos se muestran en la Figura 8.4 y la Figura 8.5. Estas dos estructuras de descarga se encuentran localizadas a las elevaciones de 195.0 m y 236.0 m.

El vertedero de excedencias, mostrado en el esquema ACAD:H8833002 (lam 11.15-vertedero2.pdf) también se incluye en el modelo. La cresta del vertedero está a una elevación de 249.5 m con las compuertas abiertas y a 265 m con las compuertas cerradas. El esquema fue extraído del formato CAD y se muestra en la Figura 8.6.

2.2 DATOS DE TIEMPO VARIABLE

Los procesos más importantes para determinar la temperatura en el Embalse Reventazón y directamente aguas debajo de la presa son las temperaturas de los afluentes del embalse, los valores de los afluentes y efluentes, el volumen de almacenamiento, y el intercambio de calor con la atmósfera en la superficie de agua del embalse. Existe información disponible para modelar estos procesos. Este grupo de datos consiste en parámetros meteorológicos, valores de los afluentes y efluentes, y temperaturas de los afluentes para el Río Reventazón. Los datos meteorológicos fueron usados en el modelo para estimar el intercambio de calor en la superficie, un componente importante del balance de energía. Los valores de afluentes y efluentes son provistos y utilizados en el modelo para evaluación.

Para las simulaciones del modelo donde el tiempo varía, la disponibilidad de datos generalmente determina el período de simulación del modelo. Es importante tener un grupo de datos lo más completo posible. Las siguientes secciones explican los períodos de tiempo para los cuales cada tipo de datos están disponibles. El período de simulación del modelo CE-QUAL-W2 fue elegido basado en los períodos de datos que coinciden con la información disponible. Para simulaciones de estado estacionario (BATHTUB) parámetros de entrada, promedio, máximo, y/o mínimos pueden ser aplicados para representar condiciones típicas o críticas.

2.2.1 VALORES DE AFLUENTES Y EFLUENTES

Los valores a largo plazo de afluentes y efluentes para el Río Reventazón en el lugar del proyecto fueron provistos por ICE. Los datos diarios promedio de los afluentes son de la estación hidrométrica 730912 en Pascua. Los datos de los afluentes están disponibles para el modelo de 3 años para el período del 2004 al 2006. Los datos de los afluentes están basados en un valor mínimo de la descarga ecológica ($15 \text{ m}^3/\text{s}$) más la descarga de la turbina (producción de energía) que varía de 25 a $240 \text{ m}^3/\text{s}$. Para este análisis, el efluente total mínimo es de $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.2.2 DATOS METEOROLÓGICOS

Los datos meteorológicos que fueron usados para el modelo se obtuvieron de las estaciones La Florida (73128) y Puerto Limón (787670). Estas son las estaciones meteorológicas más cercanas que tienen datos por hora disponibles.

En conjunto, el grupo de datos combinados de La Florida y el Puerto Limón contienen datos por hora de temperatura del aire, bulbo húmedo, temperatura del punto de rocío, y nubosidad. Los datos están disponibles en intervalos por hora y diarios. Las velocidades del aire y las direcciones del aire también están disponibles por hora. Los datos meteorológicos abarcan el período de tiempo de Enero 2004 a Enero 2007 usado en este análisis. Debido a que la estación La Florida es más cercana al embalse, se les dio preferencia a los datos provenientes de esta estación. Los datos de Puerto Limón fueron usados para la nubosidad, ya que estos no estaban incluidos en los datos de La Florida. En los casos donde algunos datos faltaban (por ejemplo, 2 semanas en Abril 2005) los datos del mismo mes de un año anterior (Abril 2004) se usaron para sustituirlos.

Además, el ingreso de datos para el modelo BATHTUB requiere precipitación anual promedio (3.85 m) y evaporación (1.23 m). Estos datos se obtuvieron de las estaciones Siquirres (75002) y Sauce (73096). Aunque la estación Siquirres no es parte de la cuenta Reventazón; es una buena representación de las condiciones meteorológicas del embalse. Estos valores promedio de precipitación y evaporación se obtuvieron del Informe de factibilidad PH Reventazón preparado por BID para el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE).

2.2.3 TEMPERATURA DE LOS AFLUENTES

Los datos de temperatura del agua en los afluentes en el Río Reventazón se encuentran disponibles. La estación Sitio La Presa incluye los datos de temperatura mensuales de los afluentes para el período modelado (enero 2004 a diciembre 2006) y más datos, de enero 2007 a noviembre 2007.

2.3 DATOS DE CALIDAD DEL AGUA

Los datos de calidad de agua consisten en análisis químicos de muestras de agua en el Río Reventazón que fueron tomadas de la estación Sitio La Presa, 2004-2006, y otros valores que fueron encontrados en estudios de factibilidad anteriores. El modelo BATHTUB, a diferencia de CE-QUAL-W2 es un modelo de estado estacionario (steady-state model). Por lo tanto el modelo BATHTUB requiere de condiciones a largo plazo y promedio. Las mediciones promedio hechas del 2004 al 2006 (Tabla 2-2) son las que fueron utilizadas en el modelo BATHTUB. Estos valores se encontraban dentro del rango establecido por estudios de factibilidad anteriores, los cuales también se muestran en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Concentraciones de calidad del agua en los afluentes usadas en el modelo BATHTUB

Sitio	PO4 como p	P Total	NO ₃ -NO ₂ como N	N Total como N	Sólidos Suspendidos	Sólidos Disueltos Totales
Sitio La Presa	62 ppb	124 ppb	380 ppb	760 ppb	545 mg/l	126 mg/l
Epupa 1995	10-500 ppb	70-500 ppb	NA	< 500 ppb	5.6–605 mg/l	NA
Cunha and Calijuri 2011	NA	5-334 ppb	NA	23-11,559 ppb	NA	NA

3. APLICACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO Y RESULTADOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El embalse Reventazón tiene una geometría característica que permite usar un tipo de modelo que considera los gradientes longitudinales y verticales de calidad de agua que generalmente se encuentran en embalses largos y estrechos. El modelo que se eligió para esta aplicación fue CE-QUAL-W2, el modelo estándar bidimensional de calidad de agua para embalses hidroeléctricos y tramos de río del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica (U.S. Army Corps of Engineers). CE-QUAL-W2 (Corps of Engineers, Water Quality model for Waterbodies of 2-dimensions) es un modelo hidrodinámico longitudinal-vertical y de transporte diseñado para simulaciones de largo plazo y con variables de tiempo de calidad de agua para ríos, lagos, embalses y estuarios.

El marco especial en el que se basa el modelo es una red que consiste de segmentos en dimensión longitudinal y de capas en dimensión vertical. La longitud de los segmentos se da generalmente en incrementos de 0.5 km, el ancho se da en incrementos de 0.1 a 1.9 km, y el grosor de las capas en incrementos de 5m. Debido a que CE-QUAL-W2 es un modelo promediado lateralmente, la dimensión lateral se representa con anchos para cada una de las celdas, en donde las celdas se definen en la intersección de los segmentos y las capas. Los flujos, la temperatura, y las concentraciones de calidad de agua son lateralmente uniformes. La ubicación, dimensiones y configuración de los tributarios, descargas, descargas hidroeléctricas, y vertederos son registradas en esta red. Las fuentes de información para el grupo de datos espaciales requeridos se explican en la sección 2.1.

CE-QUAL-W2 es un modelo determinístico, es decir, el modelo utiliza grupos de datos de funciones de fuerza para avanzar el modelo de las condiciones iniciales dadas a lo largo del tiempo. Las funciones de fuerza más comunes consisten en flujos de entrada, temperaturas, y componentes de calidad de agua; flujos de salida; y datos meteorológicos. El período de tiempo típico para la simulación de un embalse hidroeléctrico es de uno o más años para que, por ejemplo, una simulación que usa datos de funciones de fuerza de 1996 sea interpretada como si se mostrara una representación por hora de los flujos de entrada, temperaturas, y concentraciones de calidad de agua en el embalse, si el embalse hubiera sido construido y comenzado operaciones en 1996. Las fuentes de información para los datos de funciones de fuerza se mencionan en la Sección 2.2.

3.2 ESCENARIOS MODELADOS

El período completo de simulación fue de tres años: del 1 de enero del 2004 (día Juliano 1) al 31 de diciembre 2006 (día Juliano 1096). El período de estabilización permite que el modelo evite la influencia de las condiciones iniciales y responda a los afluentes y fuerzas meteorológicas observadas. Un período de estabilización de un año (día Juliano 1 al día 365) es suficiente ya que es mayor que el tiempo de residencia del embalse.

La simulación se inició con una elevación inicial de la superficie del agua de 264.3 m y con una temperatura uniforme en todo el embalse de 21.0 °C. El valor de 21 °C se tomó de la temperatura observada en los afluentes y representa la temperatura mensual más baja (fría). Esta agua que es más fría tiene la mayor densidad comparada a la del afluente del río y por consecuencia se asentará en el fondo del embalse. Esto representa el agua más fría y densa que puede entrar al embalse y que se mantiene en el hipolimnion. Las temperaturas de agua modeladas se generaron para cada celda de la red en incrementos diarios. Esta producción se usó para desarrollar las series de temperaturas de descarga y los perfiles de temperatura verticales en el embalse, mencionados en la Sección 3.3.

3.3 CONFIGURACIÓN DEL MODELO

Como se mencionó en la Sección 2.1, la presa Reventazón tiene dos estructuras de descarga, una localizada a 236 m y la otra a 195 m de elevación. Estas dos estructuras ayudan en el control de la temperatura de descarga extrayendo agua del embalse de dos elevaciones diferentes. La serie de afluentes especifica cuanto flujo va hacia cada estructura de descarga y cuándo es que estas están activas. Este estudio no intenta recomendar como debe manejarse el embalse del P.H. Reventazón.

3.4 RESULTADOS HIDRODINÁMICOS Y DE TEMPERATURA DEL MODELO

El modelo hidrodinámico y de temperatura brinda dos resultados: un balance de agua y el comportamiento térmico. El balance de agua se muestra como elevaciones de la superficie del agua del embalse, y el comportamiento térmico se muestra en las temperaturas del agua en el embalse. Un beneficio adicional del modelo es su habilidad de estimar el oxígeno disuelto (DO) y los sólidos suspendidos totales (TSS), los cuales se incluyen en el resumen de resultados.

La Figura 8.7 muestra los flujos de entrada y salida usados en el modelo por el período de 3 años. La Figura 8.8 muestra la elevación modelada de la superficie del agua en el embalse Reventazón. Los resultados muestran que los datos de los flujos de entrada y salida generan una superficie del agua entre 265.0 m y 244.8 m. Este rango de la superficie del agua corresponde al rango pronosticado por ICE.

La Figura 8.9 muestra las temperaturas en los afluentes del Río Reventazón junto con las temperaturas de descarga modeladas por el período de 3 años del modelo. Las temperaturas mensuales promedio se redujeron del record de 2 años (excluyendo el primer año de estabilización) y se muestran en la Figura 8.10. En esta Figura, la temperatura natural del afluente en el Río Reventazón se graficó para ilustrar el posible impacto de construir el embalse. Este diagrama muestra que el efecto del embalse es el de calentar y reducir las fluctuaciones de temperatura que ocurren en el Río Reventazón, y de modificar el actual ciclo temporal de temperatura. La magnitud de las diferencias de temperaturas varía de +0.22°C a +1.27 °C, y la temperatura natural máxima en abril se retrasa hasta mayo.

Además de los cambios en la temperatura del agua referentes al cambio de tiempo, existen otras variaciones espaciales en la temperatura del embalse, particularmente en dirección vertical. En este análisis la termoclina se define como la ubicación vertical en la columna de agua donde la pendiente de temperatura es más mayor (pendiente de la profundidad Vs temperatura del agua). Este punto es a

menudo considerado como el límite entre el epilimnio y el hipolimnio. La elevación promedio mensual de la termoclina en la el frente de la presa se muestra en la Figura 8.11.

Los perfiles verticales de temperatura en el punto justo aguas arriba de la presa en el embalse para ciertas fechas durante dos años del modelo se muestran en las siguientes Figuras: 2005 (Figura 8.12) y 2006 (Figura 8.13). La estratificación vertical de temperatura temporal para este punto es evidente en estas Figuras. El hipolimnio se mantiene relativamente estable durante el año a una elevación por debajo de 160 m. Por encima de la elevación de 160 m, los cambios en la temperatura del agua y en la estructura se basan en cambios temporales en el intercambio de calor en la superficie, temperaturas de flujos de entrada, cambios en la profundidad del agua, y el funcionamiento de las estructuras de descarga (consumo de energía, vertedero, y flujo ecológico mínimo).

Aguas abajo del embalse, el agua caliente que se descarga en la presa se aproxima a su temperatura natural conforme fluye aguas abajo debido a la retención de calor a lo largo de la interacción entre aire y agua ("intercambio de calor en la superficie). La distancia requerida para volver a la temperatura natural varía con el flujo del río y la cantidad de agua proveniente de los tributarios a lo largo de su trayectoria al mar que puede diluirla. El siguiente análisis no considera los efectos de disolución ya que el tributario más largo, el Río Parismina, se encuentra 38.5 km aguas abajo.

El intercambio de calor y la distancia se pueden determinar enfocándose en la respuesta de temperatura. En este enfoque la tasa de caída (la velocidad a la que el agua se calienta más allá de su temperatura natural y vuelve a sus valores naturales) se calcula usando la tasa de intercambio de calor en la superficie y el área de la superficie del río. La derivación se encuentra en el Apéndice T de Edinger, et al (1974). Para este análisis se escogió un valor nominal para la tasa de intercambio de calor de 40 W/m²/s y un incremento arriba del natural de 1.27°C (promedio mensual en Julio). Cuando el río fluye a 40 m³/s, 50% del exceso de calor se disipa aproximadamente 18 km aguas abajo de la presa. Una distancia de 7.8 km se requiere para disipar 25% del calor a con el mismo flujo en el río.

La distancia para aproximarse a la temperatura ambiente aumenta con el incremento del flujo ya que las altas velocidades disminuyen el tiempo de viaje. Las velocidades de flujo altas incrementan el área de la superficie y por lo tanto el intercambio de calor en la superficie, pero no lo suficiente para compensar los efectos de altas velocidades y tiempo cortos de viaje.

Los valores promedio anuales hidrodinámicos y de temperatura de agua de efluentes/afluentes obtenidos de CE-QUAL-W2 se encuentran resumidos en la Tabla 3.1 Estos resultados sugieren que el embalse Reventazón descargará agua más caliente (0.78°C, +3.5%) con una concentración de oxígeno disuelto menor (-2.77 mg/l, -32.6%). También, se descargarán del embalse concentraciones de sólidos suspendidos más bajas (- 227.8 mg/l, -41.8%). Información respecto al transporte de sedimentos en el Río Reventazón se menciona en un análisis y documento separados.

El agua que se descargue del embalse también se aproximara a su contenido de oxígeno disuelto natural mientras fluya aguas abajo debido a la re-aeración que ocurre en la interface entre aire y agua. La distancia requerida para alcanzar el oxígeno disuelto ambiente varía con las velocidades de flujo del río y

la cantidad de afluente del tributario a lo largo de su trayectoria al mar que puede diluirlo. El siguiente análisis no considera los efectos de disolución ya que el tributario más grande, el Río Parismina, se encuentra 38.5 km aguas abajo.

La tasa de re-aeración y la distancia se pueden calcular usando el coeficiente de transferencia de oxígeno en agua natural, basados en el mezclado interno y la turbulencia. En este enfoque, la tasa de re-aeración se calcula de la velocidad, profundidad, y los coeficientes de transferencia empíricos del río. La derivación se encuentra en Thomann y Mueller (1987). Para este análisis, se usó un valor de OD en el afluente de 8.50 mg/l y de 5.73 mg/l para el efluente. Cuando el río fluye a 20 m³/s, el OD regresa a su nivel natural a aproximadamente 2.8 km aguas abajo del embalse. Con una descarga de 60 m³/s el OD regresa a sus niveles naturales a aproximadamente 6.1 km aguas abajo de la presa.

La distancia para acercarse a los niveles ambiente de OD disminuye cuando se incrementa el flujo debido a que las velocidades más altas disminuyen el tiempo de viaje. Las velocidades de flujo más altas incrementan el área de la superficie y la turbulencia, y por lo tanto la re-aeración, pero esto no es suficiente para compensar los efectos de una velocidad mayor y un tiempo de viaje menor.

Tabla 3-1 Resultados modelados hidrodinámicos y de temperatura del agua anuales promedio

Punto	Sólidos Suspendedos [mg/L]	Oxígeno Disuelto [mg/L]	Temperatura del Agua [°C]
Afluente	544.64	8.50	22.20
Efluente	316.80	5.73	22.98
Diferencia	-227.83	-2.77	0.78
% Diff	-41.8%	-32.6%	3.5%

3.5 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CALIDAD DEL AGUA DEL EMBALSE

Cambios en la calidad de agua del embalse pueden ocurrir debido a los posibles cambios en la temperatura del aire y la precipitación debidos al cambio climático. Esta hipótesis fue evaluada usando un modelo de calidad de agua para el Embalse Reventazón. Basados en los cambios pronosticados en América Central para el año 2050 (IPCC4, 2009) de temperatura de aire y precipitación, los afluentes del Río Reventazón se incrementaron un 5% y se disminuyeron un 15% en todos los flujos observados en Pascua. También las temperaturas de aire se incrementaron 4°C. Estos escenarios se elaboraron para los años 2004, 2005, y 2006. Manteniendo todos los otros factores constantes, los cambios en los afluentes y en la temperatura del aire produjeron cambios en el oxígeno disuelto y en la temperatura del agua. Como se muestra en la Tabla 3-2, los aumentos generaron cambios en la calidad del agua, estos cambios son no-lineales debido a la relación compleja entre flujos, tiempo de retención en el embalse, el crecimiento de algas, fotosíntesis, temperatura del agua, y oxígeno disuelto.

Se simularon cuatro escenarios en donde la temperatura del agua y el oxígeno disuelto de la descarga de la presa se usaron como parámetros de los cambios climáticos. El primer escenario consistió de un incremento del 5% en los flujos y un incremento de 4°C en la temperatura del aire (durante todo el año). Estos cambios ocasionaron un incremento de 0.29°C en la temperatura promedio anual del agua, un incremento de 1.41°C en la máxima, y un incremento de 0.29°C en la mínima. Las mismas condiciones produjeron una disminución de 0.22 mg/l en el oxígeno disuelto promedio y una disminución de 0.25 mg/l en el oxígeno disuelto mínimo que se descarga de la presa. Sin embargo, la concentración de oxígeno disuelto máxima incrementó 0.01 mg/l. El tiempo de retención para esta simulación es de 28.77 días, que es igual al del modelo base.

El segundo escenario incluyó un incremento de 5% en la descarga del embalse adicional al incremento de 5% en el flujo y el incremento de 4°C en la temperatura del aire (durante todo el año). El tiempo de retención calculado es de 27.58 días, 1.19 días más corto que el primer escenario. Esta simulación produjo un incremento de 0.16°C en la temperatura promedio anual del agua, un incremento de 0.60°C en la máxima y un incremento de 0.09°C en la mínima. Estas mismas condiciones causaron un incremento de 0.04 mg/l en el oxígeno disuelto anual promedio, un incremento de 0.02 mg/l en el máximo y un incremento de 0.19 mg/l en el mínimo.

Una disminución de 15% en el flujo y un aumento de 4°C en la temperatura del aire (durante todo el año) produjeron un incremento de 0.33°C en la temperatura promedio anual del agua que se descarga de la presa, y un incremento de 1.22°C en la temperatura máxima. Contrario a los valores promedio anuales y máximos, el valor mínimo disminuyó 0.22°C. La simulación con estas mismas condiciones produjo un incremento de 0.02 mg/l en el oxígeno disuelto promedio anual del agua que se descarga de la presa, un incremento de 0.16 mg/l en el mínimo y una disminución de 0.01 mg/l en el máximo. Estos resultados sugieren que los efectos del cambio climático se pueden observar con mayor facilidad en los valores máximos. También, el tiempo de retención en el embalse para esta simulación es de 33.08 días, 4.31 días más largo que el modelo base.

Finalmente, un incremento de 4°C en la temperatura del aire produce un incremento de 0.18°C en la temperatura del agua promedio anual, un incremento de 0.58°C en la máxima y un incremento de 0.11°C en la mínima. Los valores de oxígeno disuelto disminuyen 0.02 mg/l para el valor promedio pero disminuyen 0.01 mg/l para el valor máximo y 0.17 mg/l para el valor mínimo.

Tabla 3-2 Efectos del cambio climático en la calidad del agua modelados en el embalse Reventazón

Escenario	Temperatura del agua [°C]			Oxígeno disuelto [mg/l]		
	Promedio	Max	Min	Promedio	Max	Min
Sin Cambios, Modelo Base	22.98	24.54	21.80	5.73	8.25	1.42
$Q_{in}=+5\%$, $T_{AIR}=+4\text{ °C}$	23.26	25.95	22.09	5.50	8.26	1.17
Q_{in} & $Q_{out}=+5\%$, $T_{AIR}=+4\text{ °C}$	23.13	25.14	21.89	5.77	8.27	1.61
Q_{in} & $Q_{out}=-15\%$, $T_{AIR}=+4\text{ °C}$	23.31	25.66	21.58	5.75	8.24	1.58
$T_{AIR}=+4\text{ °C}$	23.15	25.12	21.91	5.71	8.26	1.59

4. APLICACIÓN DEL MODELO DE EUTROFIZACIÓN Y RESULTADOS

El modelo BATHTUB fue utilizado para hacer una evaluación de estado estacionario del estatus trófico del Embalse Reventazón. El programa Waterways Experiment Station, un producto del U.S. Army Corps of Engineers, aplica algoritmos empíricos de eutrofización para generar pronósticos de calidad de agua en todo el embalse de fosforo total, nitrógeno total, clorofila a, y transparencia (profundidad del disco Secchi) usando cargas de nutrientes estimadas (Walker, 1985 and 1996).

4.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO BATHTUB

BATHTUB es un modelo que puede usarse para evaluar el estatus trófico de un cuerpo de agua. Como todos los modelos, BATHTUB está basado en diferentes suposiciones. En este caso, BATHTUB es un modelo de un solo segmento y mezclado completo. Los datos de entrada del río y las fuentes de descargas no puntuales que resultan de escorrentía directa hacia el embalse se evalúan como un flujo único con un grupo de concentraciones de nutrientes. El fósforo y el nitrógeno son modelados usando dos variables: fósforo total y orto-fosfato y nitrógeno total e inorgánico. La característica de BATHTUB que incluye cargas internas de fósforo y nitrógeno del sedimento de fondo hasta la columna de agua no se utilizó en este modelo ya que esta información no estaba disponible. Las cargas atmosféricas tampoco fueron consideradas debido a la falta de información. La escala del tiempo del modelo es por año y todos los datos de entrada, cálculos, y resultados se consideran de la misma manera. BATHTUB tiene una estructura más simple a la de otros modelos de eutrofización que tienen capacidades tridimensionales con más variables, datos de entrada más complejos para describir constantes, y cálculos con variantes de tiempo. Sin embargo, BATHTUB es un modelo apropiado para estimar el estado trófico de un embalse cuando no están disponibles grupos de datos más extensos que se requieren para modelos más complejos, que es el caso del Embalse Reventazón.

4.2 ESTADO TRÓFICO

El estado o nivel trófico de un embalse se describe comúnmente utilizando la siguiente clasificación: oligotrófico (claro, baja productividad), meso-trófico (productividad intermedia), eutrófico (rico en nutrientes y productivo en términos de plantas acuáticas y vida animal), e hiper-eutrófico (extrema productividad). Eutrofización es un término complejo que se define como un estado en el que el cuerpo de agua exhibe un crecimiento excesivo de fitoplancton y algas acuáticas con un incremento en la frecuencia no deseable y un florecimiento severo de fitoplancton (Thomann and Mueller, 1987). Clasificar un embalse como eutrófico ha sido científicamente difícil ya que el sistema de clasificación puede ser subjetivo y depende de la perspectiva del observador. Un sistema eutrófico no tiene que estar continuamente saturado con algas, ni ser estéticamente desagradable, ni ser una fuente de olor desagradable. El florecimiento de algas puede ir y venir durante todo el año con diferentes grados de características no deseadas.

Algunos métodos de clasificación han sido publicados en las últimas décadas para ayudar a entender la salud de un cuerpo de agua. Los métodos BATHTUB se basan en el trabajo de Vollenweider (1968 y

1975) que fue uno de los primeros en promover métodos tróficos de cuantificación relacionando el exceso de cargas de fósforo a la profundidad y al tiempo de retención.

4.3 DATOS DE ENTRADA PARA BATHTUB

Los datos de entrada para el modelo incluyendo las dimensiones del embalse, afluentes, tamaño del área de drenaje, evaporación anual y datos de precipitación se obtuvieron de diferentes fuentes las cuales se describen en la Sección 2. Los datos de calidad de agua representan los parámetros de calidad de agua observados en el Río Reventazón en el lugar del proyecto. El enfoque del modelo BATHTUB es el de aplicar condiciones de afluentes promedio anuales para determinar la respuesta promedio anual del lago a esas condiciones y para predecir lo que los parámetros de calidad de agua serán.

4.4 RESULTADOS DEL MODELO BATHTUB

Se ejecutaron dos escenarios usando BATHTUB para simular condiciones de operación altas (265 m) y bajas (245 m). Aparte de estos dos escenarios el fosforo total y el nitrógeno total se variaron con +/- 50% para evaluar la sensibilidad de las cargas de los nutrientes variables.

El parámetro principal de salida que es de interés para el modelo BATHTUB es el Índice del Estado Trófico de Carlson (TSI). Calcular el TSI es un método utilizado para cuantificar el estado trófico del embalse (Carlson, 1977). El TSI provee un relación numérica estándar entre el fosforo total (TSI-P), clorofila a (TSI-clorofila a) (un indicador de la presencia de plancton), y profundidad de disco Secchi (claridad) (TSI-Secchi).

Los valores típicos TSI pueden estar entre 0 y 110, los valores más pequeños representan lagos más claros con menor producción de biomasa y los valores más grandes indican una mayor turbidez y una mayor producción de biomasa.

Los resultados del modelo BATHTUB (ver Tabla 4-1) muestran valores en estado estacionario de TSI-P en un rango eutrófico (50-70, todos los rangos del Carlson, 1977 se muestran en la Tabla 4-2). Este resultado representa cuando el Embalse Reventazón es un embalse maduro, varios años después de que el valle se inunda y las cargas internas de nutrientes alcanzan el equilibrio.

Es probable que el fitoplancton crezca en el nuevo embalse debido a las diferencias que hay entre una corriente en movimiento y un embalse con tiempos de retención más largos y con deposición de sedimentos que permiten la acumulación de nutrientes e incrementa la exposición del fitoplancton a los nutrientes. El modelo BATHTUB pronostica que las concentraciones de clorofila a en el embalse varían de 2.0 µg/L (265 m, 150 m³/s y -50% TP & TN) a 4.8µg/L (245 m, 75 m³/s, y +50% TP & TN) y la profundidad de disco Secchi será de entre 0.9 m y 1.0 m.

Los resultados del modelo para las concentraciones de fosforo y nitrógeno dependen de las concentraciones de nutrientes en el afluente y del tiempo de retención en el embalse. El desfogue

frecuente del embalse limita el crecimiento de fitoplancton (clorofila-a en BATHTUB), ya que no tiene suficiente tiempo para unir o liberar fósforo y nitrógeno en el embalse.

Se realizaron simulaciones de sensibilidad en donde se usaron diversos valores de entrada de fósforo y nitrógeno que varían de +/-50%. Con estas evaluaciones se mantuvo la conclusión de que el embalse es eutrófico. A una elevación de agua de 265 m y un afluente de 150 m³/s, el TSI-P varió de 58.3 a 69.6, que está en el rango eutrófico, TSI-Chl-a varió de 37.4 a 45.4, y el TSI-Secchi fue de 60.7 a 61.5. Los cambios en el flujo y el volumen de almacenamiento tienen efectos menores en los valores de TSI resultantes, mientras que los cambios en las cargas de fósforo tienen un mayor impacto, como se esperaba con este tipo de cálculos. Los resultados de estas evaluaciones muestran que es probable que el Embalse Reventazón caiga en el rango eutrófico basándose en el fósforo total y la profundidad del disco Secchi. El embalse puede ser considerado como meso-trófico basándose en la clorofila-a

Los resultados de este análisis se pueden clasificar en dos tipos de impacto, claridad del embalse y productividad del embalse. En términos de la claridad de embalse (TSI-Secchi), el embalse sería eutrófico. Las profundidades Secchi no se midieron en el monitoreo, pero se midieron los sólidos suspendidos. Estos valores en el río sugieren que la calidad de agua caería en una categoría eutrófica. El embalse tendrá una deposición de muchos de estos sólidos y se reducirán las concentraciones de sólidos suspendidos en el agua que se descargue.

En términos de la productividad, el TSI-P y el TSI-Secchi muestran condiciones eutróficas. Sin embargo, de acuerdo al índice TSI-Chl-a de BATHTUB, la productividad en el embalse y el estatus del embalse, cae en el rango meso trófico. Las concentraciones de Clorofila-a que BATHTUB pronosticó (4.8 ppb) son menores que el rango de concentración para otros lagos y embalses tropicales (11-35 ppm de Reddy 2005 y Umaña-Villalobos 2008) posiblemente porque no todos los valores de entrada para nutrientes estaban disponibles para el Reventazón.

Tabla 4-1 Resultados del modelo BATHTUB

Caso	Carlson TSI-P	Carlson TSI-Chl-a	Carlson TSI-Secchi
High Pool (265 m and 150 m ³ /s)	65.6	43.6	61.3
Middle Pool (245 m and 150 m ³ /s)	67.6	41.7	61.1
Middle Pool (245 m and 75 m ³ /s)	64.8	44.0	61.3
+50% TP (265 m)	69.6	43.9	61.3
-50% TP (265 m)	58.3	42.5	61.2
+50% TN (265 m)	65.6	45.0	61.5
-50% TN (265 m)	65.6	37.7	60.7
+50% TP & +50% TN (265 m)	69.6	45.4	61.5
-50% TP & -50% TN (265 m)	58.3	37.4	60.7
+50% TP (245 m & 75 m ³ /s)	68.7	44.4	61.4
-50% TP (245 m & 75 m ³ /s)	57.6	42.9	61.2
+50% TN (245 m & 75 m ³ /s)	64.8	45.5	61.6
-50% TN (245 m & 75 m ³ /s)	64.8	38.0	60.7
+50% TP & TN (245 m & 75 m ³ /s)	68.7	46.0	61.6
-50% TP & TN (245 m & 75 m ³ /s)	57.6	37.6	60.7

Tabla 4-2 Índices de nivel trófico

TSI	Nivel Trófico
TSI < 40	Oligotrófico
41 < TSI < 50	Meso trófico
51 < TSI < 70	Eutrófico
TSI > 70	Híper-eutrófico

4.5 PROPORCIÓN DE NITRÓGENO A FÓSFORO

Basados en la disponibilidad de datos de calidad de agua (Tabla 2-2), la proporción entre nitrógeno total y el fósforo total en el embalse es de 6.1 (760:124). Cuando esta proporción es menor de 10, se considera que el estado trófico del embalse está limitado por el nitrógeno. Los cálculos en BATHTUB para clorofila-a consideran las concentraciones de fósforo total, nitrógeno total, luz, y tiempo de desfogue, de esta manera los valores de nitrógeno limitante en el embalse son válidos. Otro índice trófico (Florida Department of Environmental Protection, 1996) para embalses con limitante de nitrógeno se puede evaluar, sin embargo, este índice solo utiliza la concentración total de nitrógeno. Al aplicar este índice a las concentraciones observadas de nitrógeno total en el Reventazón +/-50% (380, 760, and 1140 ppb), se generaron valores TSI-N de 36.8, 50.6, and 58.6, respectivamente, clasificando al embalse Reventazón en el rango eutrófico bajo.

5. CONCLUSIONES

5.1 RESULTADOS DEL MODELO

Los resultados del modelo hidrodinámico y de eutrofización se mencionaron individualmente en sus respectivas secciones. Las conclusiones clave de estos dos modelos son:

- La zona de descenso durante el período modelado se mantuvo entre el vertedero (265 m) y 245 m, con base en las series cronológicas que se obtuvieron de afluentes y efluentes.
- La existencia de dos estructuras de descarga a dos niveles diferentes de elevación ayudó al control de las temperaturas de descarga aguas abajo y la profundidad de la termoclina en el embalse y sus operaciones pueden ser optimizados para mitigar los impactos mas.
- El epilimnio se mezcla por temporadas con temperaturas promedio mensuales de entre 23 °C and 29 °C. La ubicación de la termoclina varía entre 200 m y 255 m de elevación, con un promedio de 288 m. El hipolimnio se mantiene relativamente sin mezclar a una temperatura menor de 22.5 °C durante el año, y a una elevación por debajo de los 160 m. El volumen de hipolimnio es muy pequeño (0.1 millones de m³).
- El agua que se descarga del embalse es más caliente que el agua que entra al embalse por 0.78 °C (22.98 °C vs. 22.20 °C) en un promedio anual.
- El agua que se descarga del embalse tiene una diferencia máxima de +1.27 °C (más caliente) en Julio y una diferencia mínima de +0.22°C (más caliente) en Abril, en promedio, para estos dos meses.
- El agua caliente que se descarga del embalse se aproxima a su temperatura natural ambiente mientras fluye aguas abajo, perdiendo la mitad de su exceso de calor (comparado con su temperatura natural) aproximadamente 18.3 km aguas abajo de la presa cuando fluye a 40 m³/s.
- El agua que se descarga del embalse experimenta una disminución promedio de 2.77 mg/l en la concentración de oxígeno disuelto, comparado con su concentración natural de OD de 8.5 mg/l. El agua que se descarga del embalse regresa a su concentración de OD natural mientras fluye aguas abajo, y con reaeración vuelve a su niveles naturales a 3 km de la presa cuando fluye a 20 m³/s y a 6 km de la presa cuando fluye a 60 m³/s.
- En términos de la claridad del embalse (TSI-Secchi), carga de fósforo (TSI-P), y cargas de nitrógeno (TSI-N), el embalse puede ser considerado eutrófico. En términos de producción de algas (TSI-Chl-a), el embalse puede ser considerado mesotrófico, lo cual es inesperado dado que las cargas del embalse consisten de aguas de drenaje domestico no tratadas y de actividades de agricultura.

Basados en los resultados del modelo bidimensional hidrodinámico y de temperatura, se puede llegar a dos conclusiones principales. Primero, habrá una reducción en la variación diaria y semanal de temperatura del agua aguas abajo de la presa. Estas temperaturas pueden ser más controladas con descargas selectivas usando las dos estructuras de descarga. El incremento en la temperatura promedio del agua se disminuye naturalmente aguas abajo de la presa mientras el intercambio de calor con la atmosfera devuelva la temperatura del río a un estado de cuasi-equilibrio. El patrón general de temporada de las temperaturas que existe en el Río Reventazón aguas debajo de la presa no se verá afectado radicalmente por la construcción del embalse.

Segundo, la estructura de la temperatura en el embalse mostrará un patrón común en lagos tropicales a una latitud y altitud similar, esto es, una estratificación mínima la mayor parte del año, la diferencia de temperatura entre el hipolimnio y el epilimnio será de 4-9 °C, y un período corto durante Noviembre y Febrero cuando la estratificación es la más baja (Embalse La Angostura, Umaña-Villalobos, 2007). La existencia de una capa hipolimnetica hace más probable las condiciones anóxicas en las partes más profundas del lago. Si el desfogue anual de sedimentos se implementa como una práctica en el Embalse Reventazón, y el embalse se drena cada año, las condiciones anóxicas se pueden evitar y la estructura de las temperaturas que se desarrolla será diferente a la que se pronosticó, dependiendo del tiempo y la extensión del desfogue y las actividades de drenado del embalse.

Basados en el modelo de calidad de agua, la carga estimada de nutrientes en el embalse muy probablemente causara que el Embalse Reventazón sea eutrófico. Sin embargo, hasta que el lago llegue a una madurez y condición estables, es probable que experimente una mayor productividad debido a las descargas de nutrientes de la zona inundada ribereña, que contiene poca vegetación. Una baja concentración de oxígeno disuelto a lo largo del embalse puede ocurrir durante este tiempo. Después de varios años, la descarga de nutrientes proveniente de los desechos de vegetación restantes será desfogada del embalse. En este tiempo, las cargas de fósforo y nitrógeno se estabilizarán y la calidad de agua mejorará. Las concentraciones de oxígeno disuelto en el embalse experimentarán una disminución. Debido a la reaeración en las estructuras de descarga y en el tramo del Río Reventazón aguas abajo, los niveles de oxígeno disuelto se aproximarán relativamente rápido a sus niveles naturales.

5.2 EVALUACIÓN DEL IMPACTO

Los posibles impactos durante la fase de construcción de la presa y el llenado del embalse son inciertos. Este estudio no se enfocó en cuantificar ninguno de los impactos ocasionados por actividades de construcción ni posibles formas para limitar estos impactos.

Para las condiciones después de la construcción, la magnitud máxima de impacto en la temperatura del agua es de +1.27 °C y el impacto promedio anual es de +0.78 °C. El alcance de estos impactos es local, incluyendo el embalse y los tramos de río aguas abajo, variando en distancia desde directamente debajo de la presa hasta el océano, dependiendo del tiempo del año y el flujo en el río. La duración de estos impactos será a largo plazo (por el tiempo de vida de la presa), y cambiarán en intervalos de tiempo durante el año. La posibilidad de que estos impactos ocurran es alta. No existen estándares internacionales para impactos de la temperatura de las descargas de agua. Basados en estos factores, el

impacto térmico se determinó como Menor dependiendo de la adaptación de los receptores sensibles al posible incremento de 1.27 °C.

El impacto natural de convertir un tipo de medio ambiente acuático (lotico) a otro (lentico, embalse) no se evalúa en este reporte. La magnitud de los cambios en los índices de estado trófico son pequeños y su extensión es local (el embalse). La duración de este impacto es a largo plazo (por el tiempo de vida de la presa) con una probabilidad alta de que ocurra. No existen estándares internacionales para los impactos de índices de estado trófico. Basados en estos factores, el impacto se considera menor.

5.3 MEDIDAS POSIBLES DE MITIGACIÓN

Los impactos de la fase de construcción serán temporales y se deberán implementar medidas típicas de mitigación para controlarlos a la mayor extensión posible.

Los impactos después de la construcción del embalse son Menores para índices térmicos y Menores para índices de estado trófico. Estos impactos pueden mitigarse con esfuerzos operacionales. La existencia de dos estructuras de descarga permite mitigar los efectos de la descarga de agua más caliente mezclando el agua de la superficie que es más caliente con el agua del fondo que es más fría para igualar la distribución de temperatura aguas abajo de la presa. Este mezclado también ayudará a mover la termoclina verticalmente, lo cual puede ayudar a incrementar el mezclado en el embalse. El mezclado vertical en el embalse y un desfogue anual de sedimentos también mitigará las posibles condiciones anóxicas en las regiones más profundas del embalse.

En general, los impactos de cambio climático en la calidad de agua del Embalse Reventazón son menores. De acuerdo a los escenarios modelados, la temperatura del agua y la concentración de oxígeno disuelto que se descargan de la presa no son considerablemente afectados por el cambio climático pronosticado para esta área.

6. LITERATURA CITADA

- Carlson, R.E. 1977. "A Trophic State Index for Lakes". *Limnology and Oceanography*. 22:361-369.
- Cole, T.M. and E. M. Buchak, 1995: CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 2.0: Users Manual, Instruction Report EL-95-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS
- Cunha, M. D. G. F. and D. M. do Carmo Calijuri, 2011. Limiting Factors for Phytoplankton Growth in Subtropical Reservoirs: The Effect of Light and Nutrient Availability in Different Longitudinal Compartments. *Lake and Reservoir Management* 27:162-172.
- Edinger, J. E., D. K. Brady and J. C. Geyer. 1974. Heat Exchange and Transport in the Environment. Cooling Water Studies for the Electric Power Research Institute, Research Project RP-49, Report 14. Palo Alto, California. EPRI Publication Number 74 049 00 3. November.
- Florida Department of Environmental Protection, Bureau of Water Resources Protection, Division of Water Facilities. 1996 Water Quality Assessment for the State of Florida, Section 305(b) Main Report, December 1996.
- ICE. Reventazón Proyecto Hidroeléctrico, Consultoría Estudios Adicionales BID, Julio 2011.
- Kuo, J. T., W. S. Lung, C. P. Yang, W. C. Liu, M. D. Yang and T. S. Tang, 2006. Eutrophication modelling of reservoirs in Taiwan. *Environmental Modelling & Software* 21:829-844.
- Liu, W. C., W. B. Chen and N. Kimura, 2009. Impact of Phosphorus Load Reduction on Water Quality in a Stratified Reservoir-Eutrophication Modeling Study. *Environmental monitoring and assessment* 159:393-406.
- Reddy, M. V., 2005. Restoration and management of tropical eutrophic lakes, Science Publishers.
- Talling, Jack F. and J. Lemoalle. 1998. *Ecological Dynamics of Tropical Inland Waters*. Cambridge University Press.
- Thomann, R. V. and J. A. Mueller. 1987. *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper & Row, Publishers, Inc., New York, New York. ISBN 0-06-046677-4.
- Umaña-Villalobos, G., 2008. Limnología Básica del Embalse Angostura, Turrialba, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop* 56:215-220.
- Vollenwieder, R.A. 1968. "The Scientific Basis of Lake and Stream Eutrophication with Particular Reference to Phosphorus and Nitrogen as Eutrophication Factors." Technical Report DAS/DSI/68.27, Organization for Economic Cooperation and Development, Paris.

Vollenwieder, R.A. 1975. "Input-Output Models with Special Reference to Phosphorus Loading Concept in Limnology." Schweiz. Z. Hydrol. 37:53-84

Walker, W. W. 1985. Empirical Methods for Predicting Eutrophication in Impoundments; Report 3, Phase III: Model Refinements. Technical Report E-81-9, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, US.

Walker, W. W. 1996. Simplified Procedures for Eutrophication Assessment and Prediction: User Manual. Instruction Report W-96-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, US.

7. GLOSARIO

Término	Significado
Algoritmos	Procedimientos paso por paso para resolver un problema (matemático)
Anoxia	Región con disminución de oxígeno disuelto, ocurre normalmente en el hipolimnio
Epilimnio	La capa más caliente y superior de un lago ("capa de la superficie")
Eutrófico	Estado trófico de agua rica en nutrientes y de alta productividad en términos de plantas acuáticas y vida animal ("bien alimentado")
GIS	Sistema de Información Geográfica – Mapa electrónico con información asociada a bases de datos.
Híper- eutrófico	Estado trófico de extrema productividad
Hipolimnio	Capa de agua aislada, fría en el fondo del ("capa profunda")
Mesotrófico	Estado trófico intermedio (entre oligotrófico y eutrófico)
Oligotrófico	Estado trófico de agua clara y baja productividad ("alimento insuficiente")
Tiempo de Retención	El tiempo de desfogue de un lago, se calcula dividiendo el volumen entre el afluente anual
Profundidad Secchi	Disco que se coloca en el agua para medir su transparencia (profundidad de visibilidad)
Thalweg	La línea que conecta los puntos más profundos a lo largo del embalse, corresponde a la trayectoria del flujo de densidad a lo largo del fondo del embalse y del paso original del río.
Termoclina	Región de cambio de temperatura rápido que separa el epilimnio del hipolimnio
Estado trófico	Medida general de productividad biológica de un lago
Índice de Estado Trófico (TSI)	Medida cuantitativa de la productividad biológica de un lago

8. FIGURAS

Figura 8.1 Contornos batimétricos superpuestos en Google-Earth

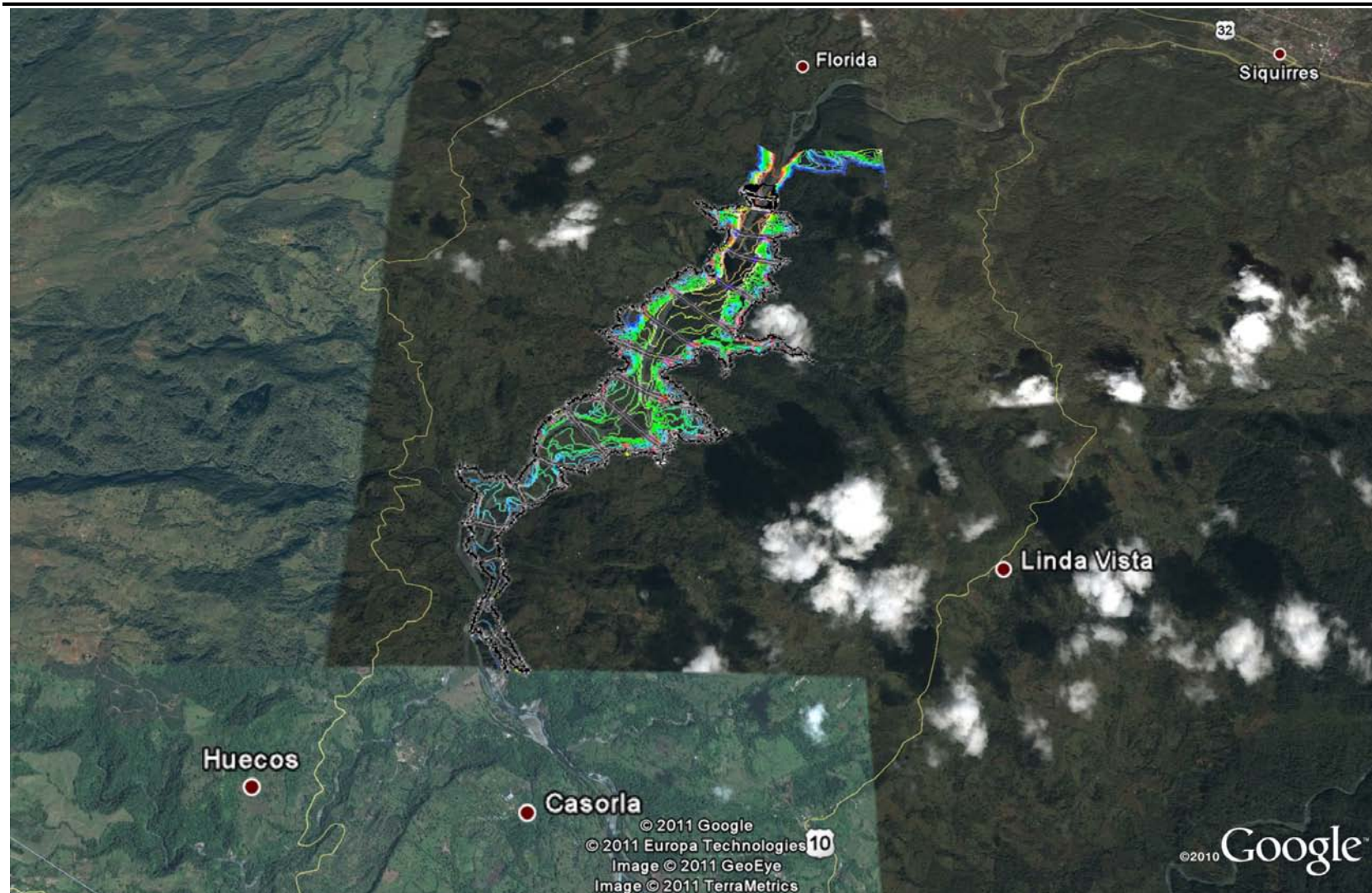


Figura 8.2 CE-QUAL-W2 Red del modelo

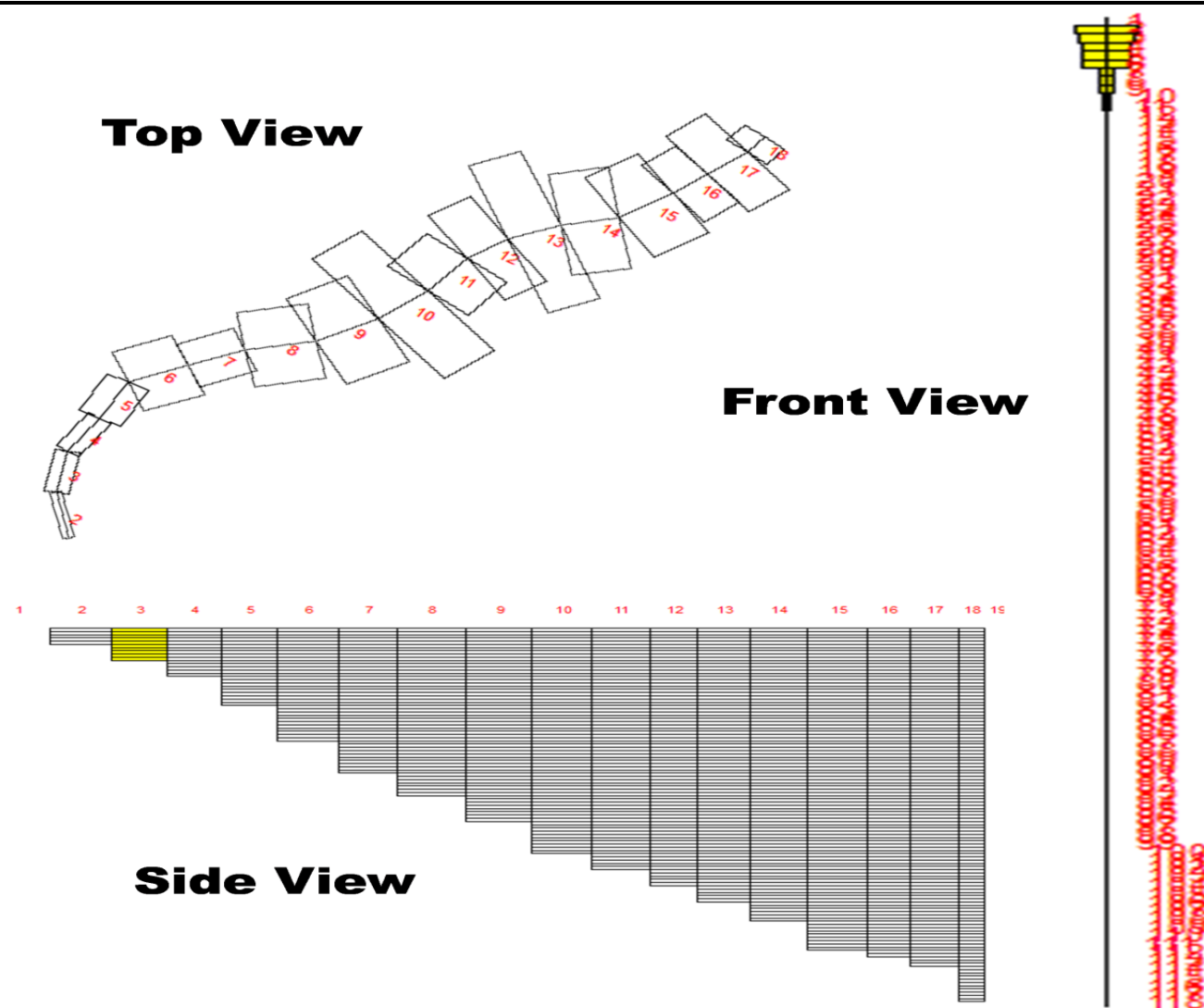


Figura 8.3 Área y volumen observados y modelados vs Elevación

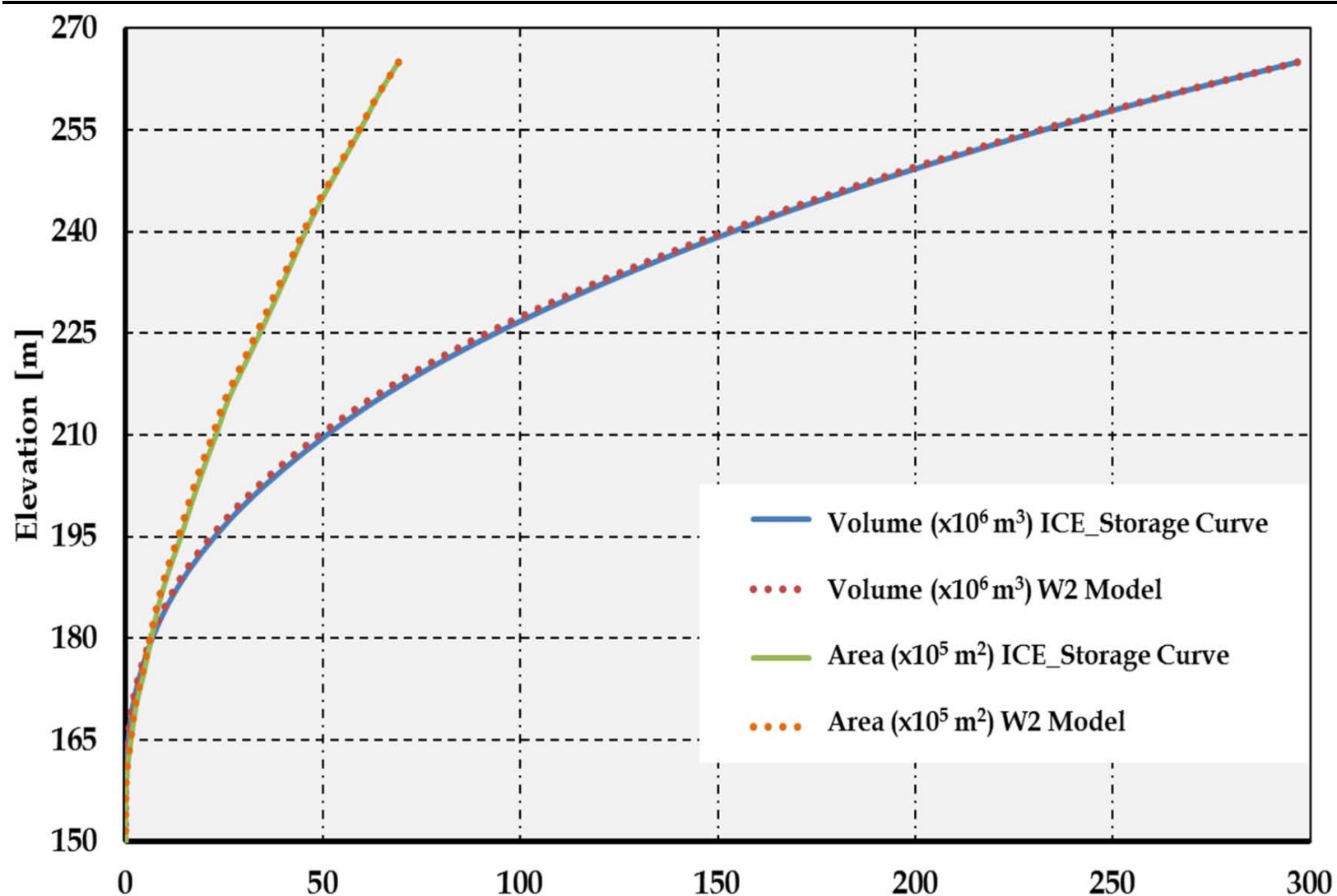
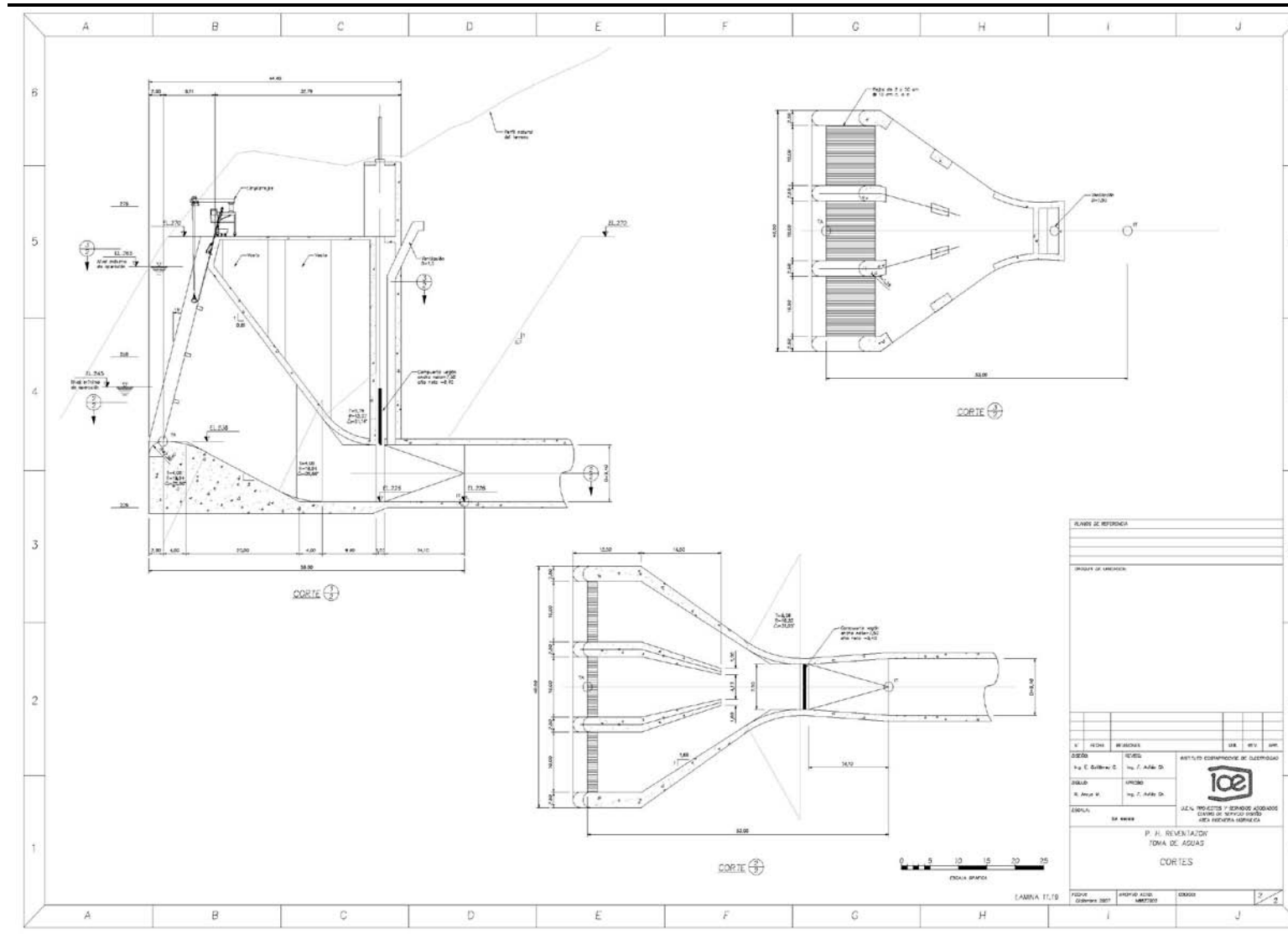
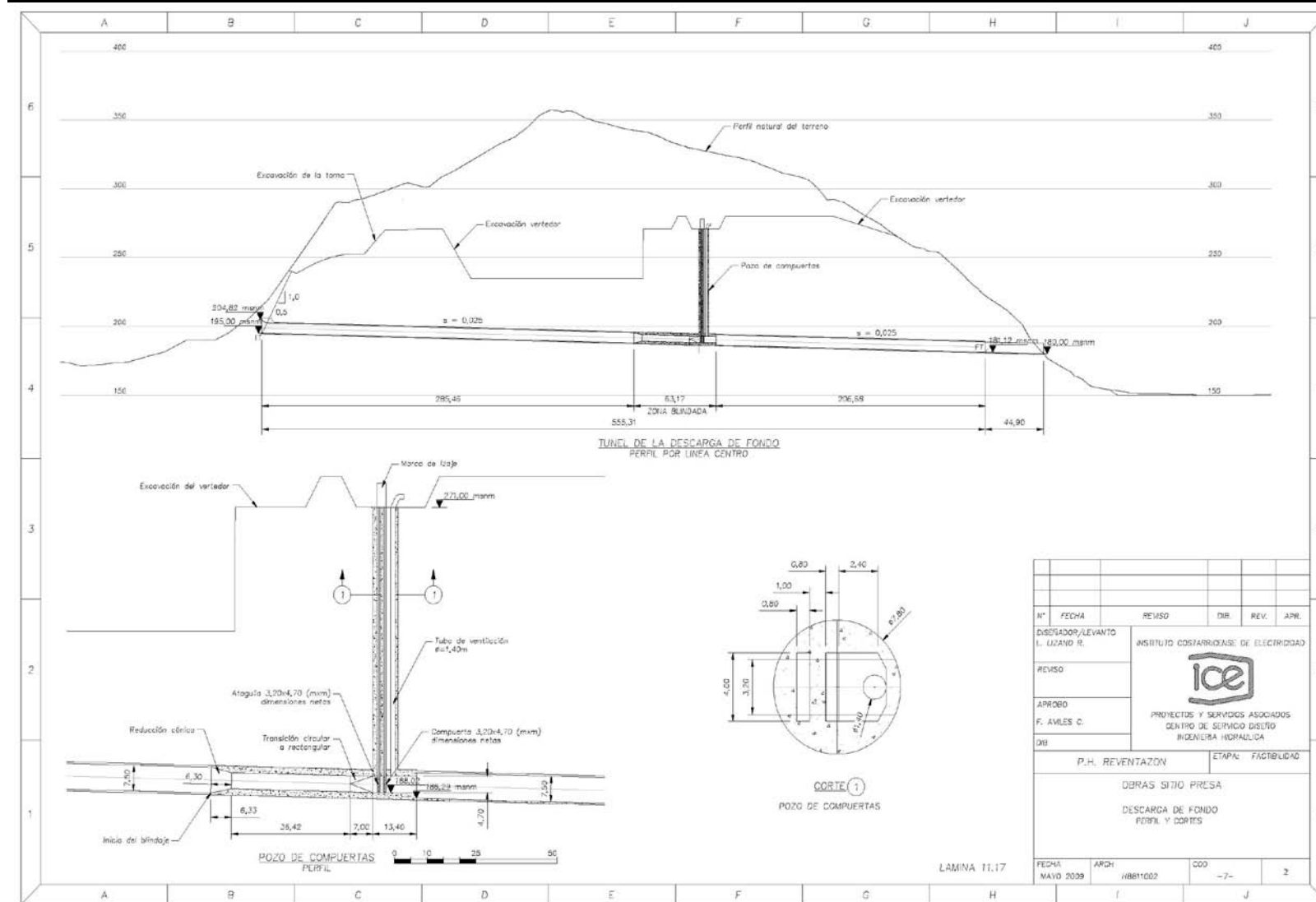


Figura 8.4 Embalse Reventazón planos de la estructura de Toma de Aguas*



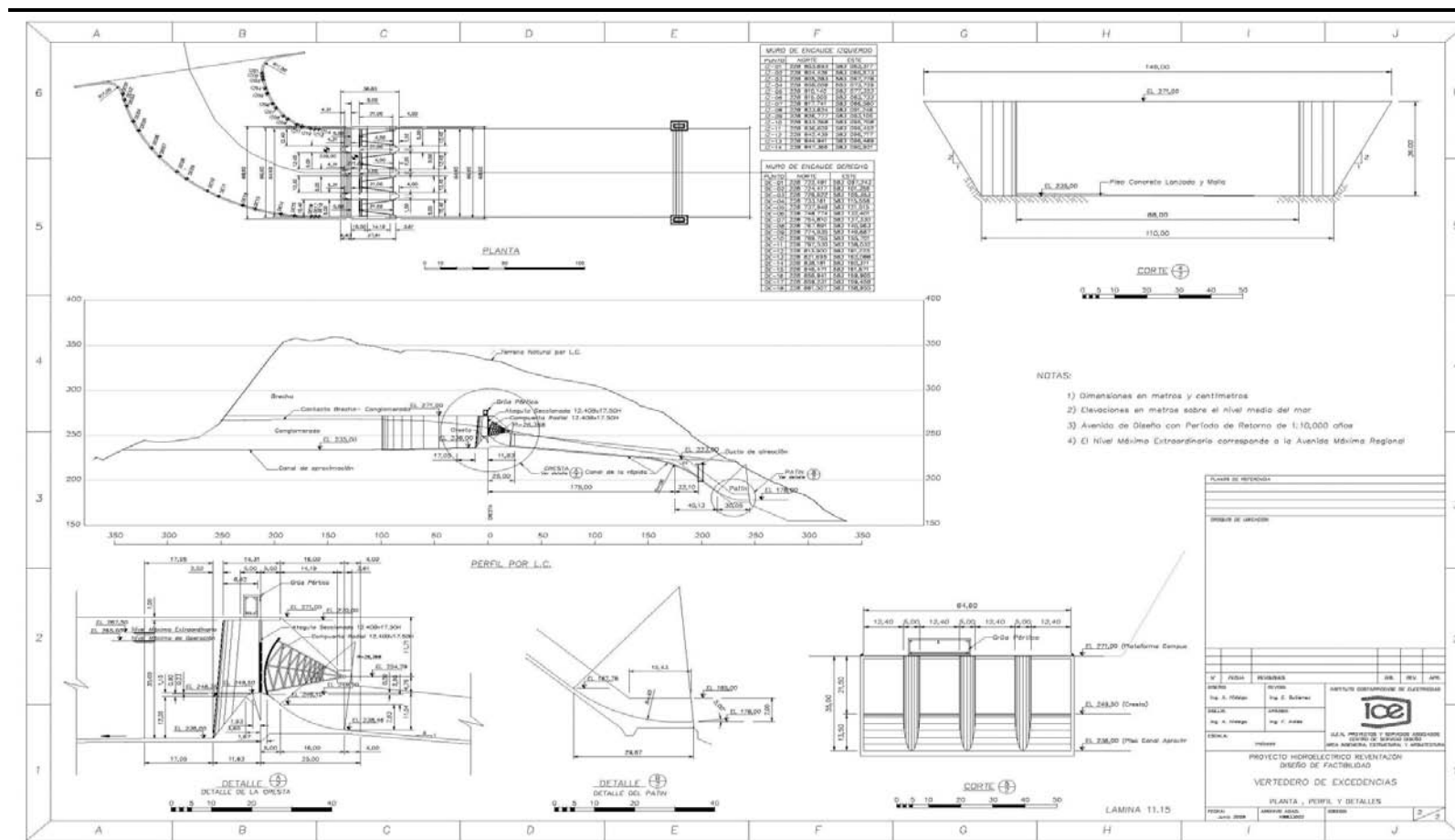
*lam 11.19 Toma de aguas.pdf (ACAD: H8827002)

Figura 8.5 Embalse Reventazón plano de la descarga de fondo*



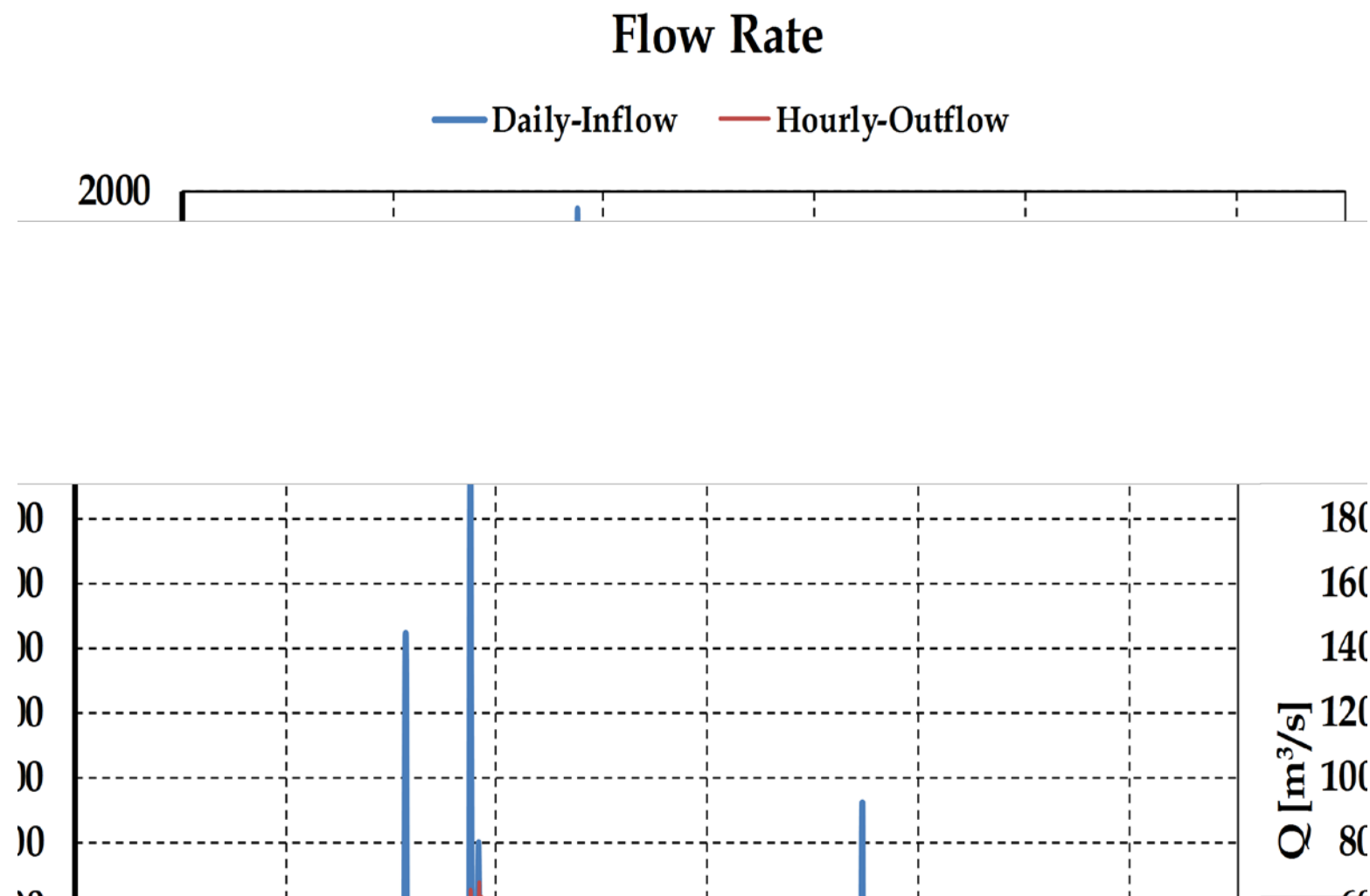
*lam 11.17 Descarga de fondo.pdf (ARCH: H8811002)

Figura 8.6 Embalse Reventazón plano del vertedero*



*lam 11.15 Vertedero2.pdf (ACAD: H8833002)

Figura 8.7 Afluentes y efluentes modelados del embalse Reventazón


 Figura 8.8 Elevaciones de superficie del agua modeladas para una descarga mínima de $40 \text{ m}^3/\text{s}$

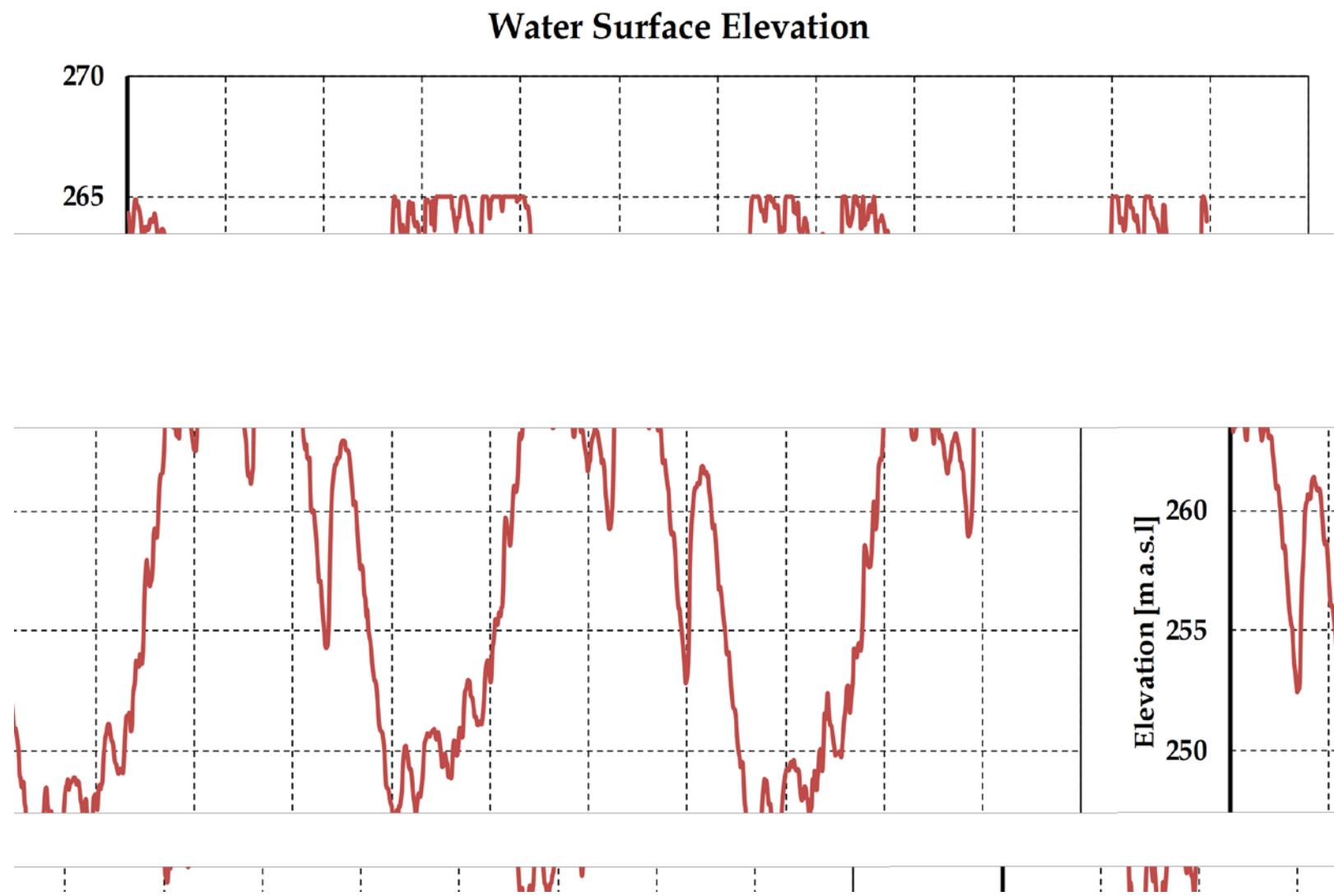


Figura 8.9 Temperaturas del agua modeladas del afluente (T_{in}) y efluente (T_{out}), con una descarga mínima de $40 \text{ m}^3/\text{s}$

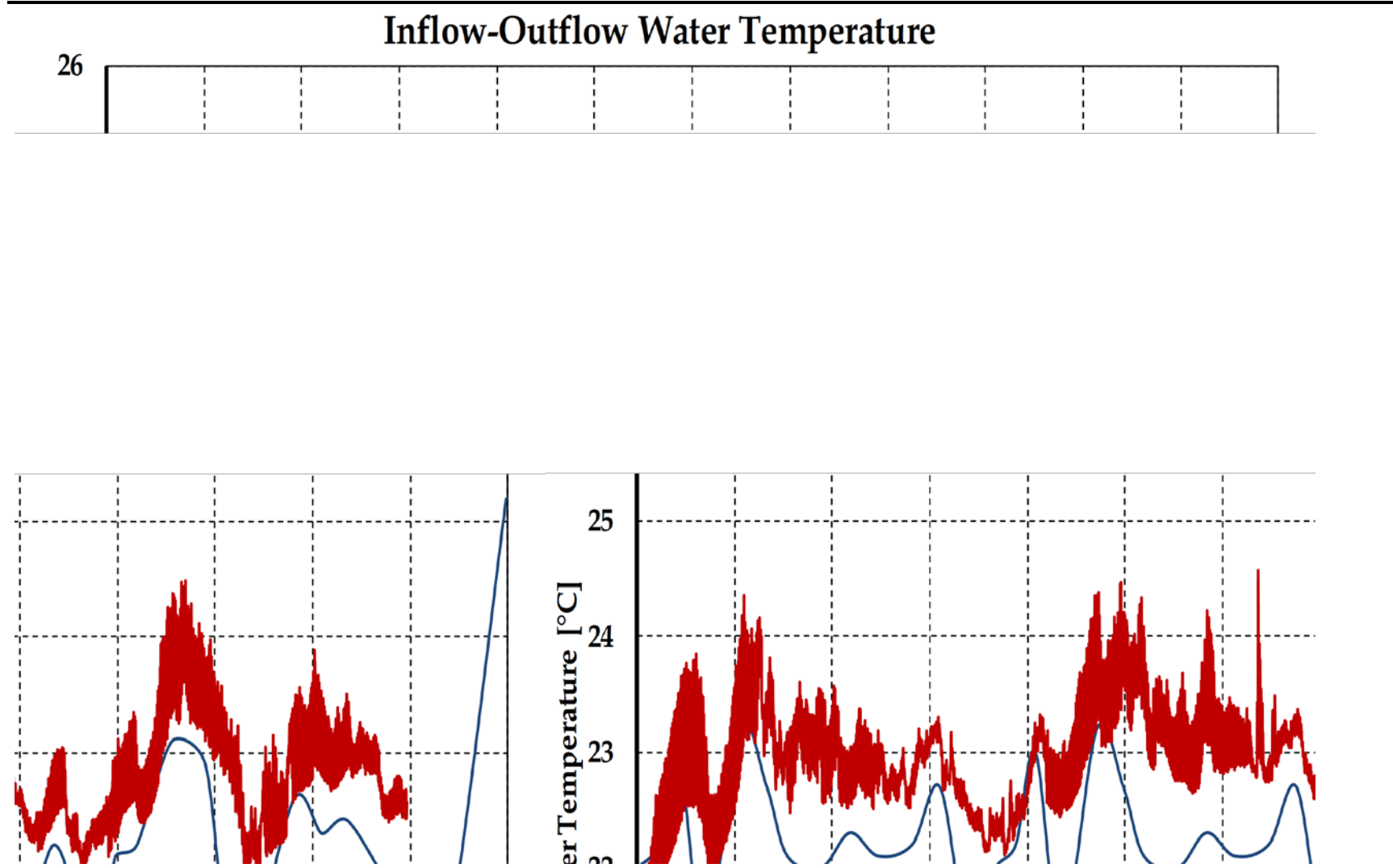


Figura 8.10 Temperaturas promedio mensuales modeladas de afluentes y efluentes

Monthly Inflow-Outflow Water Temperature

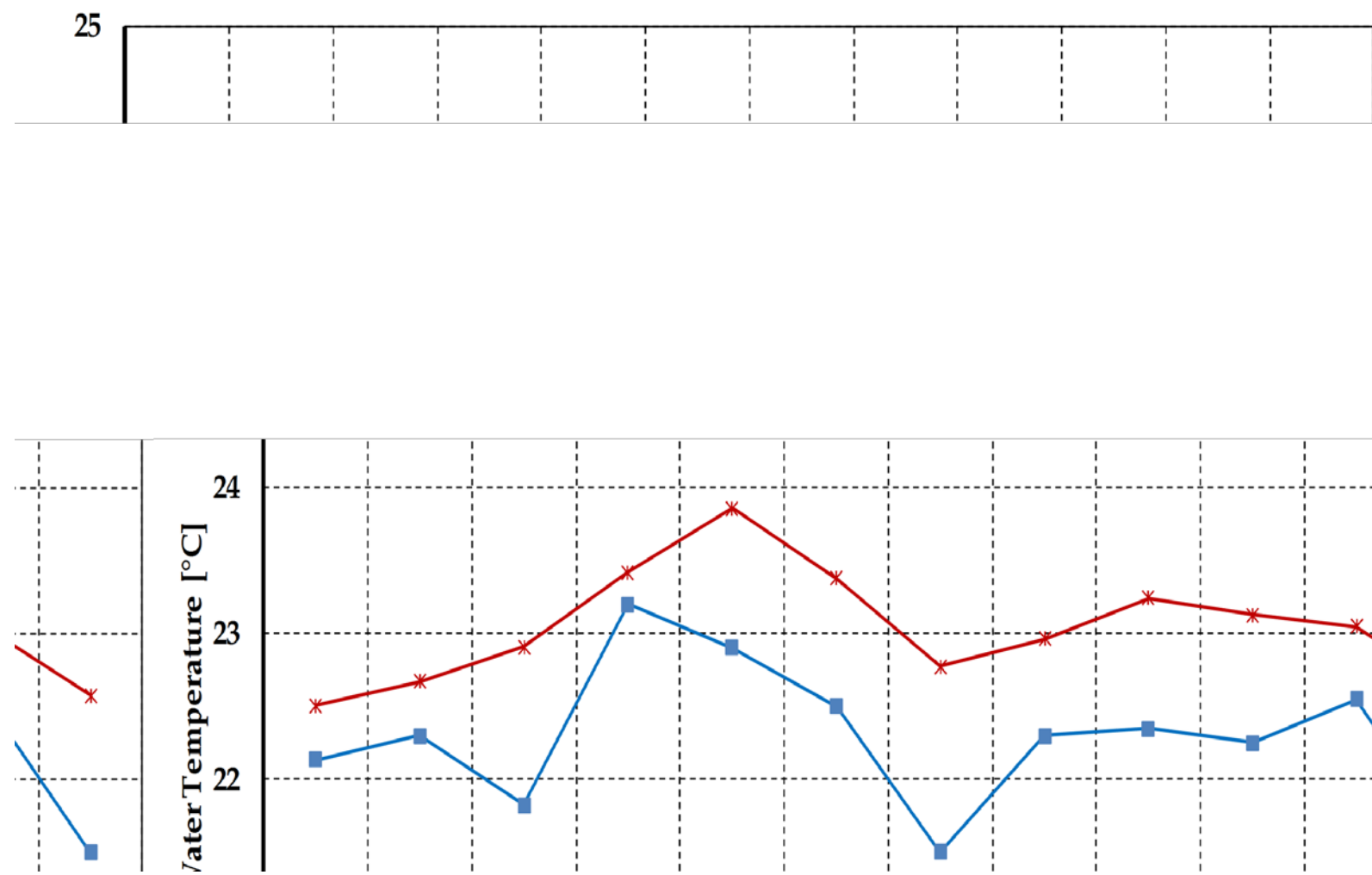


Figura 8.11 Elevaciones mensuales promedio modeladas de superficie del agua y termoclina cerca de la cortina

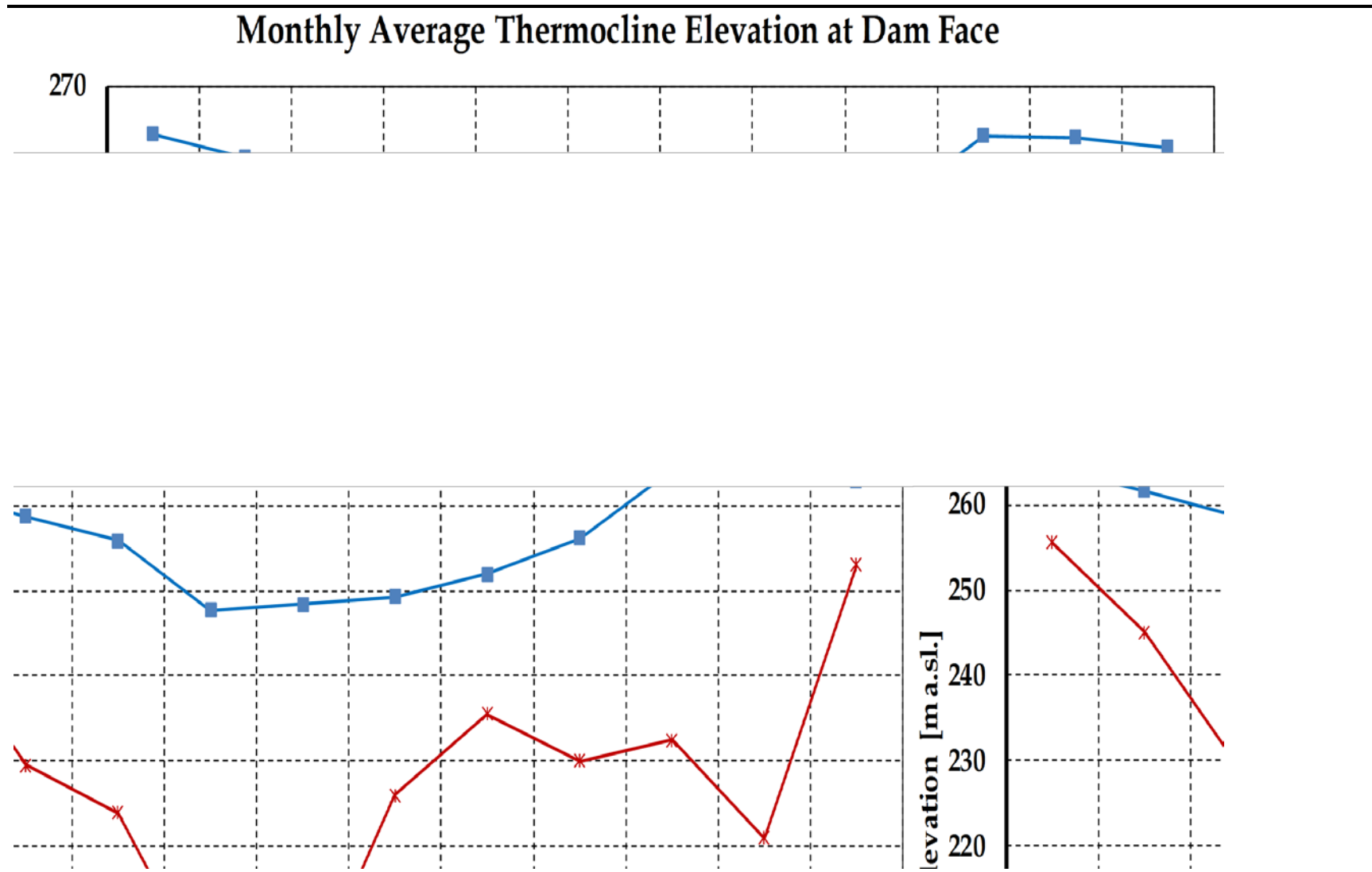


Figura 8.12 Perfiles típicos de temperatura del agua cerca de la cortina: 30 de enero del 2005, 27 de mayo del 2005, 17 de septiembre del 2005

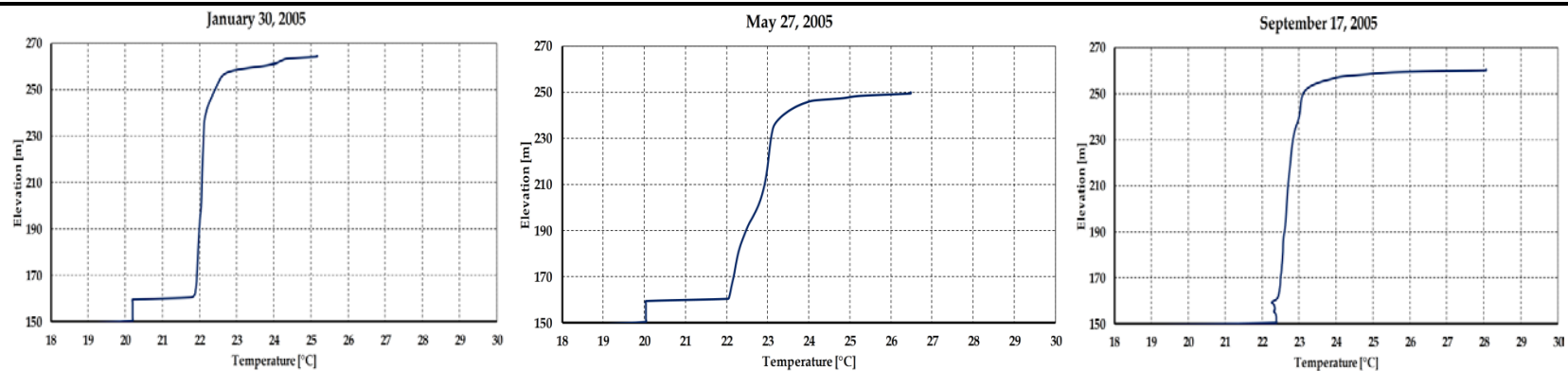


Figura 8.13 Perfiles típicos de temperatura del agua cerca de la cortina: 27 de enero del 2006, 25 de mayo del 2006, 15 de septiembre del 2006

