

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra con
orientación en Geociencias Ambientales**

**Dinámica de la estratificación térmica en el embalse de la
Presa Valle de Bravo, medición y simulación numérica**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Humberto Francisco Alonso Peinado

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por

Humberto Francisco Alonso Peinado

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. María Isabel Ramírez Aguilar
Directora de Tesis

Dra. Bertha Eugenia Lavaniegos Espejo

Dr. Thomas Gunter Kretschmar



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Humberto Francisco Alonso Peinado ©2016

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis.

Resumen de la tesis que presenta **Humberto Francisco Alonso Peinado** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Dinámica de la estratificación en el embalse de la presa Valle de Bravo, medición y simulación numérica

Resumen aprobado por:

Dra. María Isabel Ramírez Aguilar
Directora de Tesis

La presa Valle de Bravo es un lago tropical que se localiza en el Estado de México a 1770 msnmm. El embalse se comporta como un cuerpo de agua cálido monolítico que permanece estratificado térmicamente durante el verano. Con el fin de determinar la dinámica de la estratificación térmica en el embalse de la presa, se realizaron mediciones de la distribución espacial de temperatura utilizando un perfilador CTD en una campaña de mediciones (23-24 de Julio del 2015). La variación temporal de temperatura se obtuvo de un arreglo de termistores instalado en una boya que se localiza junto a pared de la presa. Se adaptó el modelo hidrodinámico tridimensional *Estuary and Lake Computer Model* (ELCOM), para simular la estratificación térmica en el embalse de la presa, el modelo fue forzado con datos meteorológicos medidos por una estación meteorológica instalada en la boya. El modelo fue validado espacio-temporalmente comparando los resultados con las mediciones. Las mediciones muestran que el embalse estuvo estratificado en tres capas (epilimnio, metalimnio e hipolimnio), inducido por el calentamiento de la superficie y la mezcla turbulenta debido al esfuerzo del viento. Cuando el viento sopla con dirección hacia noreste, la profundidad del epilimnio a lo largo del eje principal se inclina con menor profundidad en el extremo oeste y aumenta hacia el extremo este. La distribución de temperatura calculada por el modelo muestra un comportamiento térmico similar a las mediciones. Sin embargo la temperatura simulada en la columna de agua fue 0.5°C menor que las observaciones y la termoclina estuvo 1.5 m sobre las mediciones. Las diferencias entre el modelo y las observaciones pudieran explicarse asumiendo que las mediciones de la velocidad del viento fueron subestimadas por la estación meteorológica debido a su posición en relación con la cortina de la presa. Por otro lado la radiación de onda larga fue estimada a partir de las condiciones atmosféricas por falta de mediciones disponibles. En los resultados del modelo se observó la dinámica de la onda interna descrita anteriormente por Okely *et al.* (2010).

Palabras clave: Valle de Bravo, estratificación térmica, metalimnio, ELCOM, modelación hidrodinámica, onda interna.

Abstract of the thesis presented by **Humberto Francisco Alonso Peinado** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Science with orientation in Environmental Geoscience.

The dynamics of the thermal stratification of the reservoir Valle de Bravo, by measurements and numerical simulation

Abstract approved by:

Dra. María Isabel Ramírez Aguilar
Thesis Director

Valle de Bravo is a tropical reservoir, located in Mexico State at 1770 amsl. The reservoir behaves as a warm monomictic water body, and remains stratified during summer. In order to determine the dynamic of the thermal stratification in Valle de Bravo reservoir, was measured the temperature distribution with a CTD profiler in an intensive field campaign (23-24 July 2015), the temporal variation of temperature were obtained from a thermistor chain installed in a buoy next to the dam wall. A three dimensional hydrodynamic model Estuary and Lake Computer Model (ELCOM) was adapted, to simulate the thermally stratification in the reservoir, the model was forced with meteorological data measured by a weather station mounted on the top of the buoy. The model was validated comparing the results with the measurements. The observations shows that the reservoir was thermally stratified in three layers (epilimnion, metalimnion and hypolimnion), induced by the heating of the surface due to solar radiation and the mixing due to the wind stress. The depth of epilimnion presented a tilt along the main axis of the reservoir induced by the wind stress on the surface, when the wind blows to the northeast. The results obtained by the model shows that the thermally stratified behavior was similar than the measurements. However the water column temperature simulated was 0.5 °C less than the observations and the metalimnion were 1.5 m above the measurements. The difference between the model and the observation can be explained assuming that the wind velocity measurements were subestimated by the weather station due to its position related to the dam wall, on that date. Another source of error can be that the long wave radiation was estimated from the atmospheric condition, since there were not measurements available. In the results of the model were observed the dynamic of the internal wave described earlier by Okely et al. (2010).

Keywords: Valle de Bravo, termal stratification, metalimnion, ELCOM, Hydrodinamic Model, Internal wave

Dedicatoria

*A mis padres y mi hermana por creer en mí y
alentarme a seguir siempre hacia adelante,
A mi hijo Diego por tenerme paciencia y darme su amor
A Beatriz por ayudarme a ser mejor persona*

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE) en especial al posgrado de Ciencias de la Tierra por darme la oportunidad de obtener el grado de Maestro en Ciencias.

Al Consejo de Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado a través de la beca de maestría: 377760.

Al Consejo de Programa de Posgrado de Ciencias de la Tierra, en especial al Dr. Juan García Abdeslem por el apoyo económico otorgado para la realización del estudio y por la beca terminal que me fue autorizada.

A mi directora de tesis la Dra. Isabel Ramírez, por su paciencia, consejos y apoyo para cargar el CTD en la campaña de mediciones.

A mi comité de tesis la Dra. Bertha Eugenia Lavaniegos Espejo y el Dr. Thomas Gunter Kretschmar, por su disponibilidad y apoyo en la realización de mi trabajo de tesis.

A la Subgerencia de Estudios de Calidad del Agua e Impacto Ambiental de la Comisión Nacional del Agua, en especial al Dr. Eric D. Gutiérrez López, por proporcionarnos los datos que hicieron posible la realización de este estudio. También por el apoyo en la logística de la campaña de mediciones que se realizó para el estudio.

Al Dr. Christopher Dallimore por sus consejos para adaptar el modelo ELCOM en Valle de Bravo.

Al Dr. Rubén A. Morales Pérez del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, por los datos e información proporcionada y el apoyo en la logística de la campaña de mediciones.

Al Cap. Mar. Ricardo B. Medrano Reyna de la Capitanía de Puerto de Valle de Bravo por su apoyo en la realización de la campaña de mediciones que se realizó en el embalse de la Presa Valle de Bravo.

Al Ing. Ismael González Madrid jefe de Departamento de Administración del Agua, en las oficinas auxiliares del Organismo de Cuenca Península de Baja California de la Comisión Nacional del Agua. Por facilitar los datos

Al Servicio Meteorológico Nacional por proporcionar la información de las estaciones meteorológicas cercanas al embalse de Valle de Bravo.

Tabla de contenido

	<i>Página</i>
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas.....	xiv
Capítulo 1 Introducción	
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Justificación.....	5
1.4 Hipótesis.....	5
1.5 Objetivo.....	5
Capítulo 2 Metodología	
2.1 Área de estudio.....	7
2.1.1 Generalidades	7
2.1.2 Monitoreo.....	10
2.1.3 Hidrografía.....	11
2.1.4 Clasificación.....	13
2.1.5 Clima.....	14
2.2 Modelación hidrodinámica.....	14
2.2.1 Implementación del modelo	20
2.2.1.1. Discretización	21

2.2.1.2 Datos de entrada y salida.....	24
2.2.1.3. Parámetros de simulación.....	27
2.3 Validación.....	29
2.3.1 Obtención de datos.....	30
2.3.1.1 Variación vertical de temperatura.....	30
2.3.1.2 Perfiles.....	32
Capítulo 3 Resultados	
3.1 Campaña de mediciones.....	38
3.2 Variación temporal de temperatura.....	46
3.3 Variación espacial.....	49
3.3.1 Temperatura.....	49
3.3.1.1 Datos medidos con el CTD marca Seabird.....	50
3.3.1.2 Datos medidos con el CTD marca CastAway.....	56
3.2.2 Turbidez.....	61
3.2.3 Oxígeno disuelto.....	64
3.2.4 Clorofila-a.....	67
3.4 Resultados ELCOM.....	70
3.4.1 Variación temporal.....	72
3.4.2 Variación espacial.....	75
3.5 Validación	86
3.5.1 Validación temporal.....	86
3.5.2 Validación espacial.....	90
Capítulo 4	
4. Discusiones.....	94
Literatura citada.....	97

Lista de figuras

Figura		Página
1	<i>Localización de la presa Valle de Bravo. Se muestra el Eje A que tiene orientación E-W con longitud de 7 km y el Eje B con orientación N-S y longitud de 6 Km.....</i>	8
2	<i>Batimetría de la presa Valle de Bravo.....</i>	9
3	<i>Ubicación de la boya a cargo de CONAGUA.....</i>	10
4	<i>Localización de la presa Valle de Bravo en la Región Hidrológica Rio Balsas.....</i>	12
5	<i>Subcuencas que desembocan al embalse de la presa Valle de Bravo.....</i>	13
6	<i>Esquema de estratificación térmica de la columna de agua en el embalse de la presa Valle de Bravo.....</i>	14
7	<i>Esquemmatización de las etapas de ELCOM.....</i>	20
8	<i>Esquemmatización de la discretización vertical utilizada en la simulación.....</i>	22
9	<i>Esquema de la discretización del embalse de la presa Valle de Bravo.....</i>	23
10	<i>Forzamientos ambientales utilizados en la simulación, en la gráfica de precipitación se muestran los valores proporcionados por CONAGUA (azul) y los valores interpolados para la simulación (negro).....</i>	24
11	<i>Series de tiempo del caudal asignadas a las fronteras abiertas de la discretización....</i>	26
12	<i>Salidas asignadas para la simulación realizada con ELCOM.....</i>	26
13	<i>Variación vertical de temperatura durante los días de campaña (izquierda), perfil de temperatura obtenido a partir del promedio de profundidad de las isotermas (derecha).....</i>	27
14	<i>Condiciones iniciales de temperatura asignadas a todo el dominio de la simulación..</i>	28
15	<i>Embarcación propiedad de Marina, utilizada en la campaña de mediciones en el embalse de la presa Valle de Bravo.....</i>	30
16	<i>Localización de los arreglos de termistores utilizados en la campaña de muestreo....</i>	31
17	<i>Esquema de instalación de los termistores en cada arreglo utilizado durante el 23 y 24 de julio de 2015.....</i>	32
18	<i>Esquema del perfilador CTD marca Seabird.....</i>	34
19	<i>Esquema del perfilador CTD marca CastAway.....</i>	35
20	<i>Condiciones meteorológicas medidas por la estación ubicada en el embalse de la PVB, los días de campaña.....</i>	38

21	<i>Perfiles de temperatura y condiciones meteorológicas medidos en el primer muestreo.....</i>	41
22	<i>Perfiles de temperatura y condiciones meteorológicas medidos en el segundo muestreo.....</i>	42
23	<i>Perfiles de temperatura y condiciones meteorológicas medidos en el tercer muestreo.....</i>	44
24	<i>Perfiles de temperatura y condiciones meteorológicas medidos en el cuarto muestreo.....</i>	45
25	<i>Variación de temperatura ambiental y radiación solar (a), la dirección y velocidad del viento (b) y la distribución vertical de temperatura medida en la zona de la boya (CONAGUA) y en el extremo este del Eje A (HOBOS), las líneas negras representan la isoterma de 22.5 y 19.6 °C, la línea blanca la isoterma de 19.5 °C. Las líneas verticales indican los límites de los muestreos. El recuadro gris en el panel de CONAGUA representa la cobertura de datos medidos por los termistores HOBOS.....</i>	46
26	<i>Variación de temperatura ambiental y radiación solar (a), la dirección y velocidad del viento (b) y distribución vertical de temperatura en el epilimnio (c). Datos medidos por CONAGUA.....</i>	48
27	<i>Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del primer muestreo. Seabird, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).....</i>	52
28	<i>Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del segundo muestreo. Seabird, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).....</i>	53
29	<i>Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del tercer muestreo. Seabird, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).....</i>	54
30	<i>Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del cuarto muestreo. Seabird, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).</i>	55
31	<i>Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del primer muestreo. CastAway, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).....</i>	57

32	<i>Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del segundo muestreo. CastAway, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).</i>	58
33	<i>Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del tercer muestreo. CastAway, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d)</i>	59
34	<i>Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del cuarto muestreo. CastAway, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).</i>	60
35	<i>Secciones transversales de turbidez, obtenidas a partir de las mediciones del primer muestreo.</i>	62
36	<i>Secciones transversales de turbidez, obtenidas a partir de las mediciones del segundo muestreo.</i>	63
37	<i>Secciones transversales de turbidez, obtenidas a partir de las mediciones del tercer muestreo.</i>	63
38	<i>Secciones transversales de turbidez, obtenidas a partir de las mediciones del cuarto muestreo.</i>	64
39	<i>Secciones transversales de oxígeno, obtenidas a partir de las mediciones del primer muestreo.</i>	65
40	<i>Secciones transversales de oxígeno disuelto, obtenidas a partir de las mediciones del segundo muestreo.</i>	66
41	<i>Secciones transversales de oxígeno disuelto, obtenidas a partir de las mediciones del tercer muestreo.</i>	66
42	<i>Secciones transversales de oxígeno disuelto, obtenidas a partir de las mediciones del cuarto muestreo. Los números sobre las secciones indican las posiciones de los lances.</i>	67
43	<i>Secciones transversales de clorofila-a, obtenidas a partir de las mediciones del primer muestreo.</i>	68
44	<i>Secciones transversales de clorofila-a, obtenidas a partir de las mediciones del segundo muestreo.</i>	69
45	<i>Secciones transversales de clorofila-a, obtenidas a partir de las mediciones del tercer muestreo.</i>	69
46	<i>Secciones transversales de clorofila-a, obtenidas a partir de las mediciones del cuarto muestreo.</i>	70

47	<i>Esquema que representa el ascenso del viento por la cortina de la presa Valle de Bravo.....</i>	71
48	<i>Resultados de la variación temporal de temperatura por el modelo, en las celdas localizadas en los arreglos de termistores, boya de CONAGUA y termistores HOBO de CICESE, velocidad y dirección del viento (a), radiación solar y temperatura ambiental (b). Las líneas negras representan las isotermas de 19 y 22 °C. La línea roja representa la velocidad del viento multiplicada por 1.5.....</i>	73
49	<i>Resultados de la variación temporal de temperatura en la capa superficial por el modelo, sobre la isoterma de 22 °C, en las celdas localizadas en los arreglos de termistores, boya de CONAGUA y termistores HOBO de CICESE, velocidad y dirección del viento (a), radiación solar y temperatura ambiental (b).....</i>	74
50	<i>Temperatura y radiación solar (a), Velocidad y dirección del viento (b) y caudales de los ríos y precipitación (c). Las líneas verticales indican los instantes en los que se evalúan los resultados del modelo./.....</i>	75
51	<i>Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 23 de julio del 2015 a las 03:00 h.....</i>	78
52	<i>Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 23 de julio del 2015 a las 07:00 h.....</i>	79
53	<i>Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 23 de julio del 2015 a las 13:00 h.....</i>	79
54	<i>Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 23 de julio del 2015 a las 19:00 h.....</i>	80
55	<i>Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 24 de julio del 2015 a las 03:00 h.....</i>	80
56	<i>Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 24 de julio del 2015 a las 07:00 h.....</i>	81
57	<i>Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 24 de julio del 2015 a las 13:00 h.....</i>	81
58	<i>Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 24 de julio del 2015 a las 19:00 h.....</i>	82
59	<i>Interface de 22 °C y temperatura a 10 m de profundidad, al inicio de la simulación realizada con ELCOM.....</i>	83
60	<i>Interface de 22 °C y temperatura a 10 m de profundidad, el 19 de Julio del 2015 a las 15:30 obtenida con ELCOM.....</i>	84
61	<i>Interface de 22 °C y temperatura a 10 m de profundidad, el 19 de Julio del 2015 a las 21:30 obtenida con ELCOM.....</i>	84
62	<i>Interface de 22 °C y temperatura a 10 m de profundidad, el 20 de Julio del 2015 a las 09:30 obtenida con ELCOM.....</i>	85

63	<i>Interface de 22 °C y temperatura a 10 m de profundidad, el 20 de Julio del 2015 a las 15:30 obtenida con ELCOM.....</i>	85
64	<i>Comparación entre la temperatura medida por los termistores en la boya de CONAGUA y la calculada por el modelo el mismo sitio.</i>	88
65	<i>Comparación de la variación de profundidad de las isotermas.....</i>	89
66	<i>Comparación de la Interface y los datos medidos en el primer muestreo, para la temperatura de 22°C.....</i>	91
67	<i>Comparación de la Interface y los datos medidos en el segundo muestreo, para la temperatura de 22°C.....</i>	92
68	<i>Comparación de la Interface y los datos medidos en el tercer muestreo, para la temperatura de 22°C.....</i>	92
69	<i>Comparación de la Interface y los datos medidos en el cuarto muestreo, para la temperatura de 22°C.....</i>	93

Lista de tablas

Tabla		Página
1	Variables meteorológicas medidas por la estación a cargo de CONAGUA.....	11
2	Subcuencas que desembocan al embalse de la presa Valle de Bravo	12
3	Características de la discretización.....	21
4	Localización de las fronteras abiertas.....	22
5	Gasto en m^3s^{-1} reportado para los monitoreos.....	25
6	Variables medidas con los perfiladores CTD.....	33

Capítulo 1. Introducción

1.1 Generalidades

Los modelos científicos representan fenómenos reales que son difíciles de observar directamente, son utilizados para explicar y predecir el comportamiento de sistemas físicos. En los años recientes el desarrollo en la tecnología computacional ha permitido generar modelos más complejos, disminuir el tiempo de cómputo de las simulaciones y simplificar su implementación, lo que ha permitido un incremento en su uso, (Chau 2016). En las geociencias ambientales los modelos son utilizados para evaluar procesos físicos complejos o de gran escala difíciles de monitorear. En muchas ocasiones la información que se obtiene de las simulaciones es utilizada como base para el manejo y toma de decisión en proyectos públicos.

Los modelos numéricos tridimensionales enfocados en procesos hidrodinámicos, son un tipo de modelo que permite describir o representar el movimiento de agua en un área determinada y su evolución a través del tiempo. Se basan en el conjunto de ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento de un fluido, las cuales se derivan a partir de las leyes de movimiento de Newton y describen los cambios en el flujo debidos a la acción de una fuerza aplicada al fluido; también toman en cuenta el principio de conservación de masa y energía. Las ecuaciones se resuelven de manera discreta, esto se logra al dividir el dominio en pequeñas secciones mediante el uso de mallas y la definición de capas verticales, basándose en la geometría y batimetría del sitio. Los resultados de las simulaciones pueden incluir información sobre la evolución temporal de la elevación en la superficie, la velocidad de la corriente, la distribución de temperatura y salinidad (Panayotis 2016).

Los modelos hidrodinámicos han sido ampliamente utilizados en lagos y presas con el objetivo de conocer el comportamiento de la estructura térmica. La cual es controlada por la radiación solar incidente, la mezcla debida al viento, la entrada o salida de agua, la batimetría, la latitud y elevación sobre el nivel medio del mar en la que se encuentra. En general, la estratificación térmica afecta significativamente los procesos de mezcla hidrodinámicos, el transporte de contaminantes y la calidad del agua (Lee, et al. 2013).

En las presas al igual que en los lagos, el comportamiento térmico presenta cambios estacionales en la estratificación vertical. Durante la fase de estratificación, la columna de agua se divide en tres capas, el epilimnio, la capa cálida en la superficie relativamente bien mezclada; el metalimnio o termoclina, en

donde la temperatura desciende hacia el fondo; y el hipolimnio, en el fondo donde el agua es fría y con poco movimiento. Los cambios de densidad en el metalimnio generan una barrera física entre la capa de la superficie y la del fondo. Durante este periodo la capa en el fondo es baja en oxígeno pero rica en nutriente, mientras que en la superficie tiende a ser rica en oxígeno disuelto, pero puede empobrecerse en nutrientes, por el consumo por el fitoplancton, que en gran parte se hunde removiendo los nutrientes de esta capa (A. Bocaniov, et al. 2014). En estas zonas, donde la precipitación se concentra en verano, el impacto del aporte de los ríos en la estructura térmica es importante, debido a las corrientes turbulentas que perturban el metalimnio (Lee, et al. 2013). El movimiento inducido por el viento es otro factor importante, que afecta directamente al epilimnio e indirectamente al hipolimnio, el esfuerzo del viento en la superficie induce un flujo de cizalla turbulento en la capa superficial, arrastrando agua del metalimnio a la superficie, ocasionando una acumulación de energía potencial la cual es liberada a través de ondas internas (Shintani, et al. 2013). Las ondas internas, en cuerpos de agua medianos, son un factor importante en la distribución horizontal y vertical de energía y materia (A. Bocaniov, et al. 2014).

Cuando se utilizan modelos para representar procesos físicos, es necesario evaluar los resultados que se obtienen, con el propósito de saber si la adaptación del modelo, al área de estudio y parámetros utilizados, representan el fenómeno de interés de manera adecuada, esto se logra a través de la validación. Para validar un modelo, se comparan los resultados obtenidos de la simulación, con mediciones *in situ* o con experimentos de laboratorio.

El uso de los modelos hidrodinámicos se ha vuelto una importante herramienta que permite conocer y caracterizar estos procesos y sus posibles efectos en los lagos y presas. Uno de estos modelos es *Estuary, and Lake Computer Model* (ELCOM) desarrollado por el Dr. Ben R. Hodges y el Dr. Chris Dallimore en el *Centre for Water Research* (CWR), de la *University of Western Australia* (UWA). El modelo ha sido utilizado para simular patrones de circulación horizontal la laguna Barbamarco (Ramirez and Imberger 2002), en el Lago Kinneret (Laval, et al. 2003), el lago Biwa (Shimizu, Imberger and Kumagai 2007), Maracaibo (Laval, Imberger and Findikakis 2005) y al norte del mar Adriático (Spillman, et al. 2007). En México el modelo ha sido adaptado en la Bahía Zihuatanejo, la Bahía de Acapulco en Guerrero, Puerto Ángel en Oaxaca, la presa Valsequillo en Puebla (Gutiérrez L. y Ramirez I., 2014), y la presa Valle de Bravo (Okely, Imberger and Shimizu 2010), en la Bahía de Todos Santo (Ramírez I., Torres C. y Mejía A., 2006), Estero Urías en Sinaloa (Páez-Valencia 2013), Bahía San Quintín (Ramírez, et al. 2012) y la Bahía de Todos Santos (Torres, et al. 2006).

En las zonas elevadas de la altiplanicie mexicana, los cuerpos de agua se caracterizan por tener un comportamiento monomictico cálido, con periodos de mezcla durante el invierno, asociados con el enfriamiento de la superficie debido a los frentes fríos, y otro periodo de estratificación durante el resto del año, cuando la superficie del lago es calentada (M. Merino-Ibarra, et al. 2008). La presa Valle de Bravo es un lago artificial ubicado en el Estado de México, el agua del lago es utilizada por el Sistema Hidráulico Cutzamala, el cual abastece de agua potable a 3.9 millones de habitantes.

En este trabajo se utilizan datos medidos *in situ* para adaptar y validar el modelo tridimensional ELCOM en la presa de Valle de Bravo, con el objetivo de simular la respuesta en la distribución espacio-temporal de la temperatura a los forzamientos ambientales.

1.2 Antecedentes

Los procesos que afectan la distribución de temperatura en el embalse de la presa Valle de Bravo, durante su fase de estratificación, han sido estudiados, a partir de mediciones de temperatura, su relación con las condiciones meteorológicas y la adaptación de modelos. Lo que ha permitido caracterizar los procesos involucrados en la distribución de temperatura, como lo son ondas internas, procesos de turbulencia y el intercambio de agua entre las capas.

Merino-Ibarra *et al.* (2003) observaron que durante el periodo de estratificación, la distribución de temperatura y oxígeno disuelto a lo largo del eje principal del embalse, muestran patrones que sugieren el ascenso de agua del hipolimnio hacia la superficie, entre 100 y 400 m al este de la cortina de la presa. También observaron que una zona a casi 4 km hacia el este, había un descenso de agua asociado a una celda de circulación que se genera a lo largo del eje del embalse.

Anis y Singhal (2006) estudiaron la frontera de la capa superficial, utilizando observaciones de temperatura y de las condiciones meteorológicas (21-23 de agosto del 2003), en conjunto con un modelo de turbulencia. En los datos de viento medidos durante el muestreo, se observa que durante la mañana el viento es ligero con dirección hacia el sureste, mientras que durante la tarde la velocidad aumenta en un rango de $7-8 \text{ ms}^{-1}$, con dirección del noreste. Este patrón de viento induce la formación de ondas internas, en el extremo este del embalse, donde se observó que la capa superficial aumenta su espesor durante la tarde y disminuye en la noche. Parte de la energía debida al estrés del viento en la superficie, promueve, la por turbulencia asociada al esfuerzo de cizalla generado en la termoclina, o por la

turbulencia generada por la fricción en el fondo. La diferencia de temperatura entre el agua en la superficie y la atmosfera es de 2 a 3 °C durante el día, en la noche la diferencia aumenta a 5-6 °C, promoviendo las condiciones para el proceso de convección, lo que permite que la distribución vertical de temperatura sea homogénea en la capa superficial

En un trabajo posterior se observó que el embalse de la presa tiene un régimen similar al de otros cuerpos de agua en la zona tropical de la altiplanicie mexicana, excepto por el constante incremento en la temperatura del hipolimnio durante la estratificación, lo que implica que hay intercambio de agua entre el epilimnio y esta capa. Merino-Ibarra *et al.* (2008) proponen que éste comportamiento está asociado con los numerosos procesos de mezcla en los márgenes, propiciados por ondas internas que se generan debido al régimen de viento. Asociados a las ondas internas, se observaron movimientos verticales de la termoclina con velocidades de 0.58 a 1.10 mhr⁻¹.

Okely *et al.* (2010) utilizaron mediciones en campo para realizar una simulación numérica con el modelo ELCOM en el embalse de la presa, con el objetivo de caracterizar la dispersión horizontal. Los movimientos horizontales en la superficie estuvieron influenciados en parte, por la interacción entre dos ondas internas generadas por el viento vespertino característico (WSW), las cuales tienen periodos de 12 y 22.5 h. Otro factor involucrado en la dispersión es la circulación topográfica, giros y corrientes, generados por la compleja batimetría en el embalse.

Recientemente Ramírez-Zierold *et al.* (2015) utilizaron perfiles de temperatura y oxígeno mensuales, medidos en diferentes puntos del embalse durante 14 años (febrero, 2001-enero, 2015), para estimar la estabilidad de la estratificación y los flujos verticales de mezcla. El embalse tuvo un periodo de estratificación medio de 241.4±30.1 días. La variabilidad temporal de la estratificación estuvo relacionada con las fluctuaciones en el nivel del embalse, en los años en que las fluctuaciones son pequeñas el embalse permaneció estratificado más tiempo, y se redujo aproximadamente a la mitad en los niveles bajos. Definieron la tasa de calentamiento hipolimnético en un rango de 0.27-0.66 °C mes⁻¹, claramente correlacionada con el nivel mínimo del embalse, con un promedio de 0.3 °C mes⁻¹, cuando el nivel baja un poco y aumenta casi al doble con los mayores descensos del nivel. Se evaluaron dos escenarios de mezcla vertical: el intercambio entre el epilimnio-hipolimnio y el intercambio entre el metalimnio-hipolimnio. La media de flujo de mezcla vertical entre las capas fue mayor para el segundo escenario y mostró una correlación inversa con el nivel de agua.

1.3 Justificación

A pesar de los estudios anteriores que se han realizado en el embalse de la Presa Valle de Bravo, aun no se ha descrito la dinámica espacio temporal de la temperatura. El objetivo de este estudio es complementar la información de los estudios anteriores, mediante la simulación hidrodinámica y termodinámica al nivel de sub mesoescala, que permita representar el efecto del viento, radiación solar, temperatura ambiental, precipitación, descarga de los ríos y extracción por parte del sistema Hidráulico Cutzamala, en la distribución de temperatura del embalse.

Actualmente la Comisión Nacional del Agua, a través de la Subgerencia de Estudios de Calidad del Agua e Impacto Ambiental, cuenta con una boya en el embalse de la presa la cual realiza mediciones de manera automática, de calidad del agua y de las variables meteorológicas. Las series de tiempo obtenidas por la boya en conjunto con mediciones verticales distribuidas en el embalse, permiten adaptar y validar el modelo hidrodinámico ELCOM, para simular la respuesta de las condiciones espacio-temporales de temperatura a los forzamientos ambientales, asociada a los procesos físicos que han sido caracterizados a partir de mediciones.

1.4 Hipótesis

En el embalse de la presa Valle de Bravo es un cuerpo de agua monolítico cálido, la distribución espacio temporal de temperatura se determina por los procesos físicos asociados al régimen de viento, radiación solar incidente, temperatura atmosférica y precipitación. El aporte de los ríos y el volumen de extracción por parte del Sistema Hidráulico Cutzamala, afecta en menor medida la hidrodinámica y variación de temperatura.

1.5 Objetivo

Este estudio espera ampliar el conocimiento en la dinámica de la estratificación en un cuerpo de agua monomítico cálido, que se localiza a 1780 msnm de elevación. Mediante el análisis de mediciones en campo y la aplicación de un modelo hidrodinámico-termodinámico forzado con series de tiempo continuas, medidas en el embalse por la Comisión Nacional del Agua.

Para poder cumplir con este objetivo es necesario definir *objetivos particulares*:

- Realizar una campaña de mediciones en el embalse de la presa Valle de Bravo, para obtener datos de la distribución vertical de temperatura, su variación espacial y temporal.
- Adaptar el modelo numérico tridimensional ELCOM para simular las condiciones hidrodinámicas en el embalse de la presa Valle de Bravo y la variación espacial de la temperatura.
- Validar los resultados obtenidos del modelo con mediciones *in situ* de temperatura.

Capítulo 2. Metodología

Se adaptó el modelo tridimensional ELCOM (Estuary and Lake and Computer Model) para simular la hidrodinámica y determinar la distribución de la temperatura en el embalse de la presa Valle de Bravo. Para adaptar el modelo se utilizaron mediciones de temperatura de un arreglo de termistores y condiciones meteorológicas de una estación meteorológica, instalada en una boya a cargo de Comisión Nacional del Agua, que se localiza en el embalse. Los resultados de temperatura del modelo se validaron con mediciones *in situ*. Estos datos consisten en mediciones de temperatura obtenidas en una campaña de muestreo y series de tiempo medidas por un arreglo vertical de termistores instalado en la boya.

2.1 Área de estudio

2.1.1 Generalidades

La presa se localiza en el municipio Valle de Bravo, Estado de México, situada aproximadamente a 50 km al oeste de la ciudad de Toluca. Está ubicada en los 19° 13' 26" N y 100° 7' 19.5 W, a 1,759 metros sobre el nivel medio del mar (Figura 1).

La presa Valle de Bravo es un lago artificial o embalse, construido con el objetivo de ampliar el Sistema Hidráulico Miguel Alemán. La construcción de la cortina estuvo bajo el cargo de la Comisión Federal de Electricidad, y el trabajo se finalizó en 1944. En 1982 la presa cambió de jurisdicción, quedando a cargo de la Secretaría Agraria y de Recursos Hidráulicos, con el propósito de formar parte del sistema hidráulico Cutzamala, utilizado para satisfacer la demanda de agua potable en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).

Actualmente el sistema Cutzamala está bajo la jurisdicción de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), abasteciendo con 480 millones de metros cúbicos a la ciudad de Toluca, 11 delegaciones del Distrito federal y 11 municipios del Estado de México, beneficiando a 3.6 millones de habitantes. La presa Valle de Bravo aporta el 38% del total de agua en el sistema.

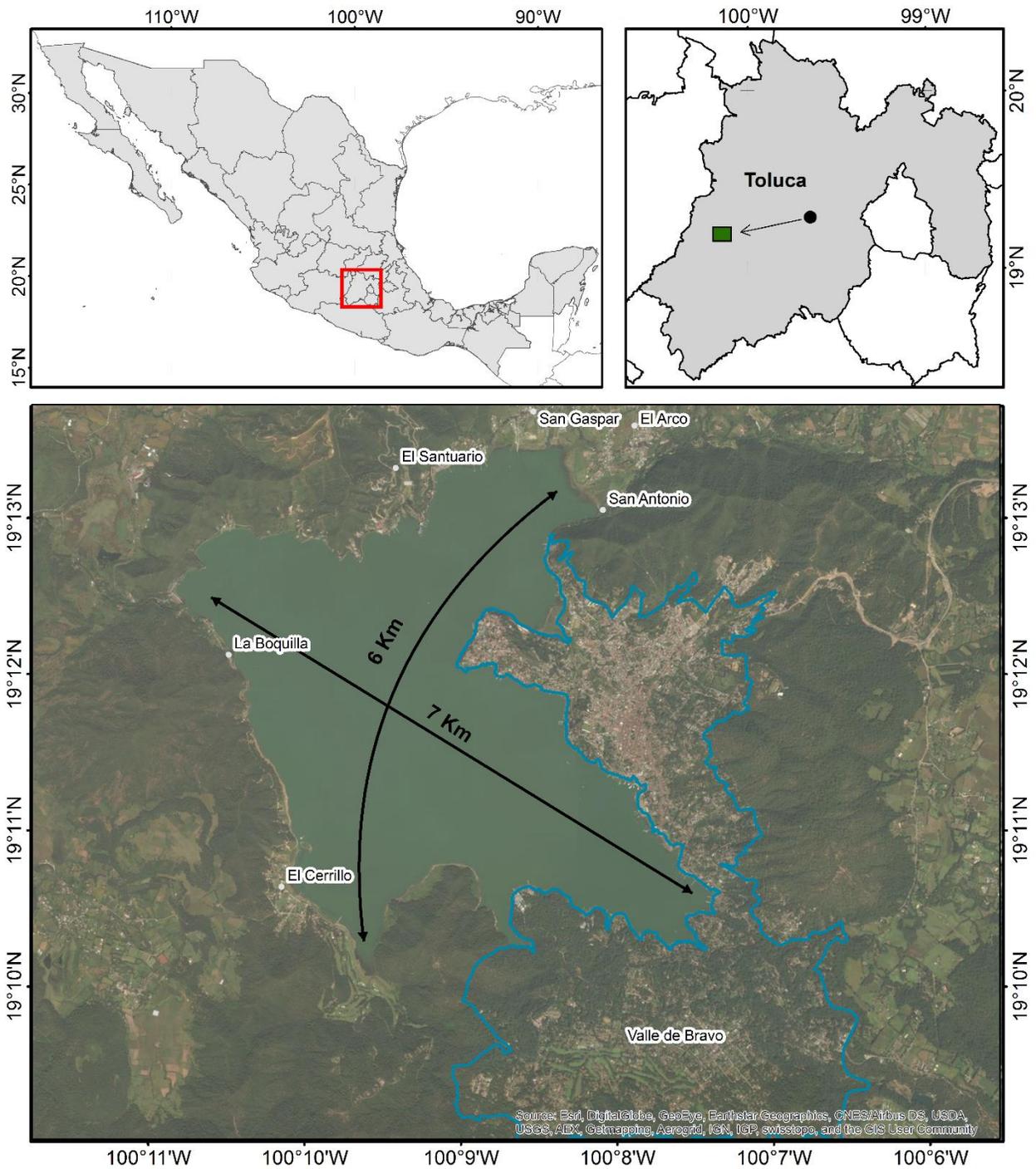


Figura 1. Localización de la presa Valle de Bravo. Se muestra el Eje A que tiene orientación E-W con longitud de 7 km y el Eje B con orientación N-S y longitud de 6 Km.

La superficie del embalse es de 17 km² y tiene un perímetro de 31 km. La profundidad promedio es 21.1 m y alcanza una profundidad máxima de 38.6 m en la zona cercana a la cortina. Tiene una capacidad de

almacenamiento de 394.4 hm^3 (CONAGUA 2014). El volumen de trasvase para uso del sistema Cutzamala varía a lo largo del año (OCAVM 2013)

El embalse tiene dos principales ejes con comportamientos hidrodinámicos y condiciones fisicoquímicas diferentes determinados por su orientación, los diferentes afluentes, la batimetría y el efecto antropogénico asociado a las localidades en los márgenes (Figura 2).

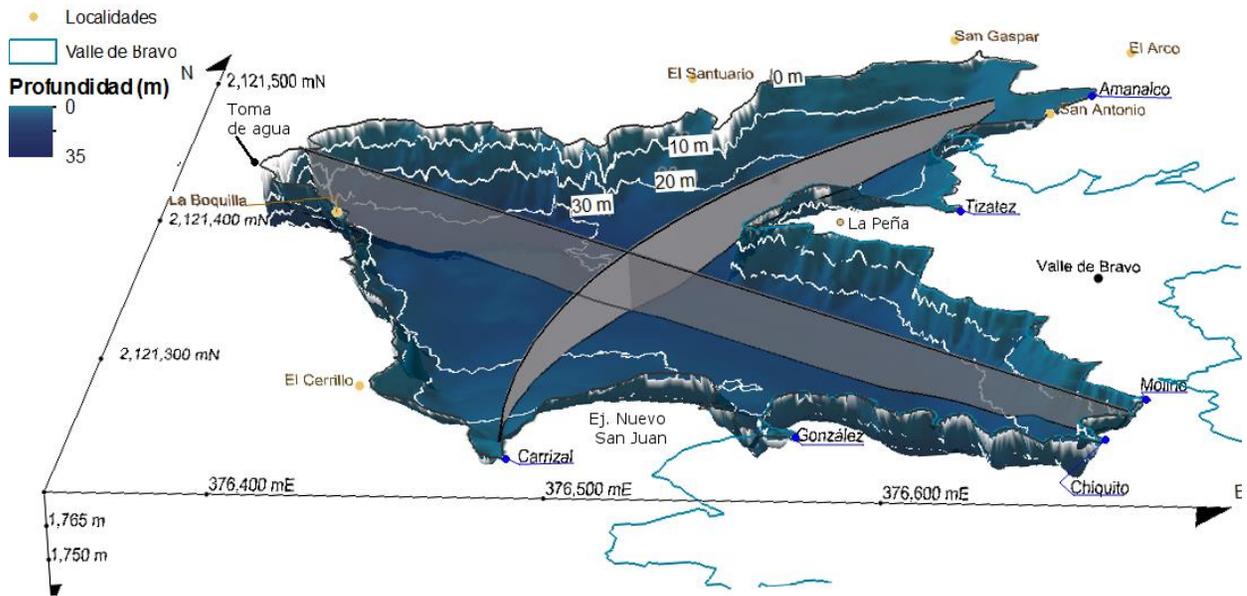


Figura 2. Batimetría de la presa Valle de Bravo.

El eje mayor (Eje A) tiene orientación Este-Oeste y una longitud cercana a 7 km. En su extremo este se encuentra una bahía de 3.5 km de longitud, la cual comienza en el extremo este, en la desembocadura del río Molino y Chiquito, y delimita en La Peña al norte y 2.2 km al sur por el ejido Nuevo San Juan. En el margen norte de la bahía se encuentra la localidad Valle de Bravo, al sur desemboca el río González. El eje termina en la cortina de la presa, en el extremo oeste del embalse, donde se encuentra la obra de toma de agua para el sistema hidráulico Cutzamala. El eje tiene una profundidad de 5 metros en la desembocadura del río Molino, aumenta con una pendiente suave hacia la cortina donde alcanza los 31 metros.

El eje menor (Eje B) está orientado de norte a sur y tiene 6 km de longitud. La parte norte del eje se encuentra en una bahía donde desembocan el río Amanalco en el margen norte y el río Tizates en el margen este. La boca de la bahía tiene una longitud de 2 km, está delimitada por La Peña al este y El Santuario un kilómetro hacia el oeste. La parte sur del eje se extiende hasta la desembocadura del río Carrizal. El eje tiene una profundidad de 5 metros en la zona norte, aumenta hasta los 30 m en la zona centro del embalse y disminuye por debajo de los 5 metros en la desembocadura del río Carrizal.

2.1.2 Monitoreo

La Comisión Nacional del Agua, a través de la Subgerencia de Estudios de Calidad del Agua e Impacto Ambiental, cuenta con una boya que realiza mediciones en tiempo real de variables físico-químicas y meteorológicas en el embalse. Gracias al interés de este trabajo por parte de la subgerencia, se tuvo acceso a los datos. La boya está instalada en el extremo oeste del eje principal junto a la cortina de la presa (Figura 3).

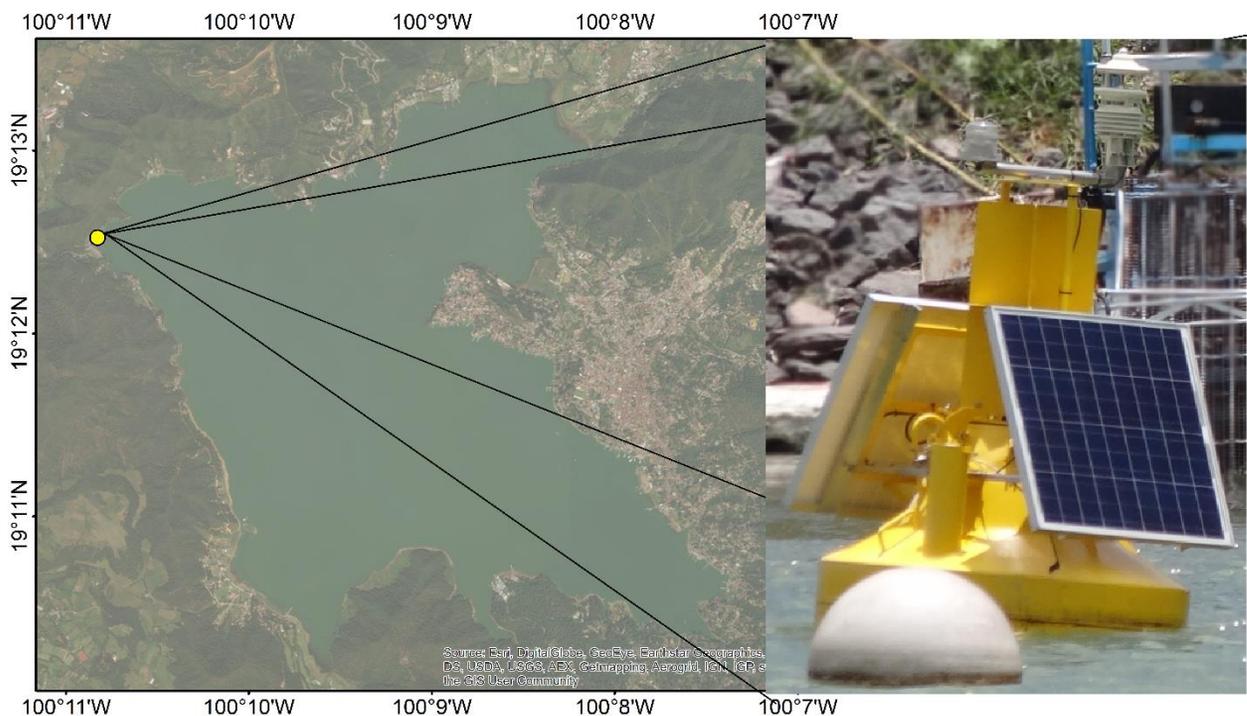


Figura 3. Ubicación de la boya a cargo de CONAGUA.

La boya tiene instalada una estación meteorológica que está compuesta por un multisensor el cual integra en un solo encapsulado la medición de las variables de temperatura del aire, humedad relativa, presión barométrica, la velocidad y dirección del viento (Tabla 1). Los sensores son administrados por un Datalogger NetDL1000 el cual almacena los datos que posteriormente son transmitidos mediante un servicio general de paquete de radio (SGPR), las variables son medidas con una frecuencia de 20 minutos. La boya también cuenta con un arreglo de 20 sensores de temperatura marca OTT. Están colocados a una distancia de un metro entre sí, a partir de la superficie, la temperatura en cada termistor es medida cada 20 minutos.

Tabla 1. Variables meteorológicas medidas por la estación a cargo de CONAGUA.

Variable	Unidades
Dirección del viento	Grados norte
Velocidad del viento	m/s ²
Humedad relativa	%
Presión atmosférica	hPa
Radiación solar	W/m ²
Temperatura Ambiental	Grados centígrados
Temperatura del agua (1-20 m)	Grados centígrados

2.1.3 Hidrografía

El área de estudio se encuentra en la provincia fisiográfica Depresión Río Balsas (IV), tiene una superficie de 117,305 Km² lo que representa el 9.8% del territorio nacional, está limitada en el sur por la provincia fisiográfica Sierra Madre Sur, el eje Neovolcánico transversal al norte y la Sierra Norte de Oaxaca en el límite este. En esta provincia se encuentra la Región Hidrológica Río Balsas (RH 18), la presa Valle de Bravo se ubica en la subregión Media Balsas, en la cuenca Río Cutzamala (RH 18G), subcuenca Río Tílostoc (RH 18Gg), (Figura 4).

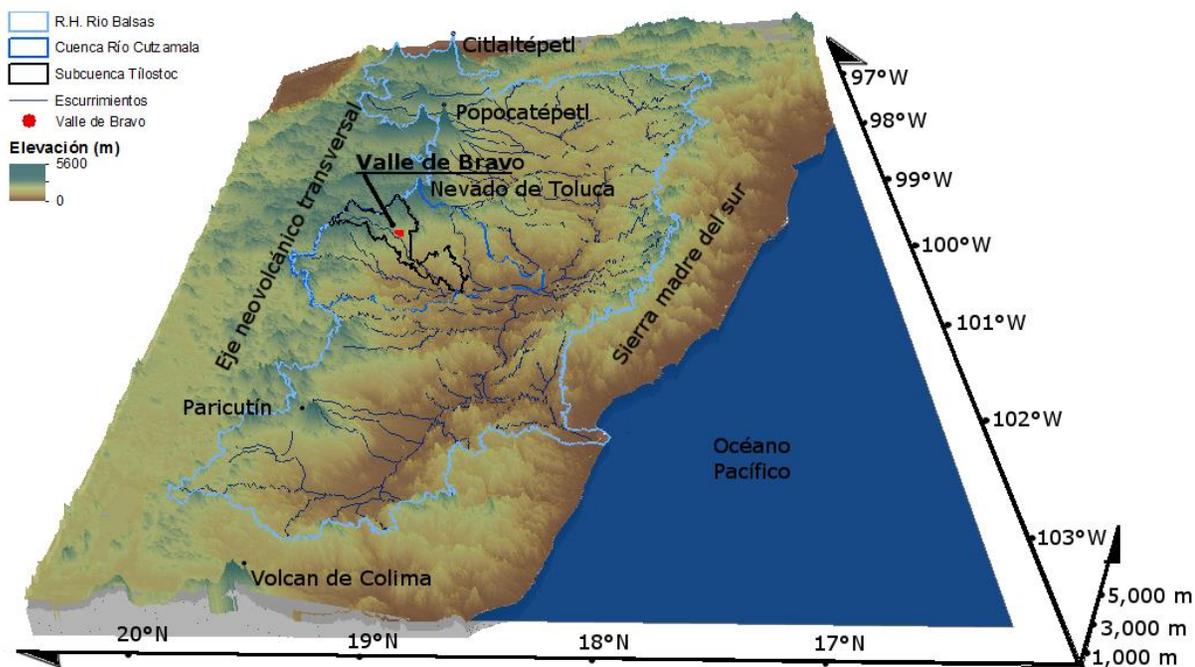


Figura 4. Localización de la presa Valle de Bravo en la Región Hidrológica Río Balsas.

Se definieron las subcuencas de los principales afluentes al embalse, utilizando la paquetería Hydrology del programa ArcMap™. Para este proceso es necesario ingresar la elevación del terreno a través de un modelo digital de elevación, se utilizó el Continuo de Elevaciones de Mexicano 3.0, el cual tiene una resolución de pixel de 15 metros y está referido al datum International Terrestrial Reference Frame 1992 (1988) elipsoide GRS80, (INEGI 2015)

Con el análisis se definieron las 6 subcuencas y los escurrimientos de los principales afluentes, las cuales suman un área de 573 km² (Figura 5 y Tabla 2).

Tabla 2. Subcuencas que desembocan al embalse de la presa Valle de Bravo.

Subcuenca	Área (km ²)	Perímetro (km)	Clasificación
Molino	154.8	77.7	Pequeña
Amanalco	320.6	100.4	Intermedia pequeña
Tizatez	18.7	31.8	Muy pequeña
Chiquito	12.5	26.7	Muy pequeña
González	36.7	28.9	Pequeña
Carrizal	29.8	29.3	Pequeña

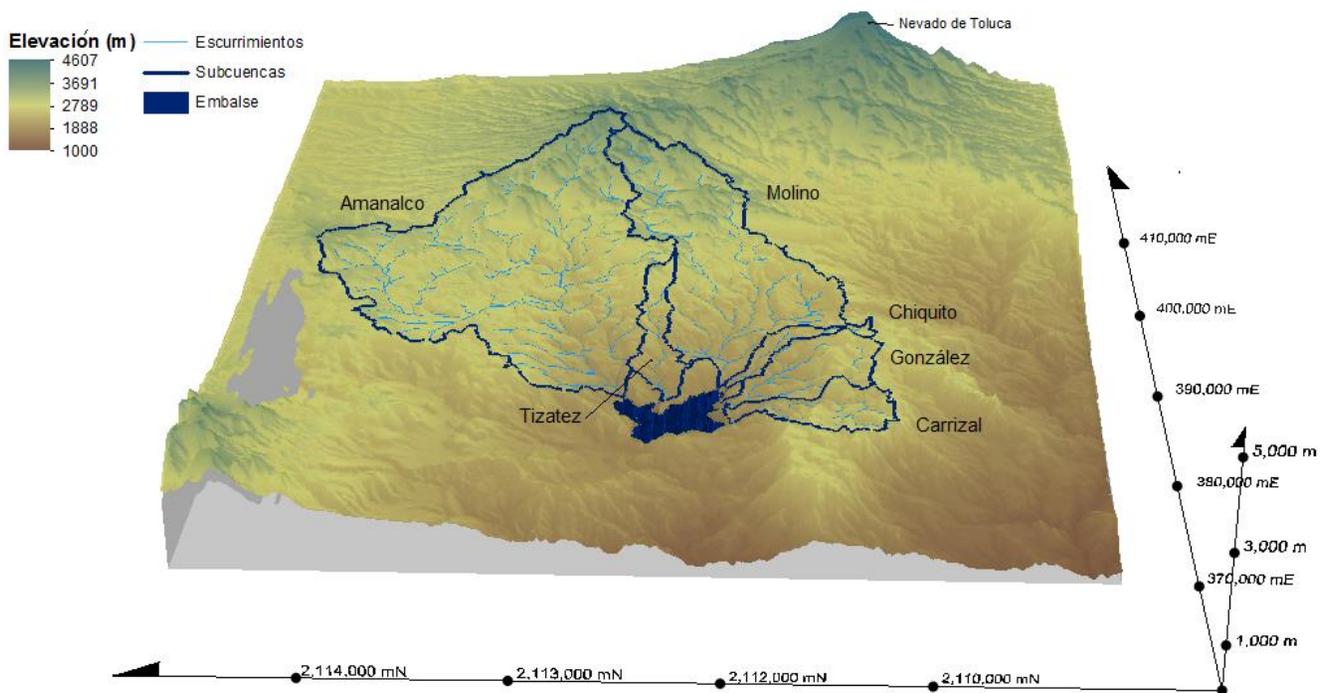


Figura 5. Subcuencas que desembocan al embalse de la presa Valle de Bravo.

2.1.4 Clasificación

Con base a la latitud, profundidad y longitud del embalse, Valle de Bravo se clasifica como un cuerpo de agua tropical monomictico cálido (Lewis Jr 1983), caracterizados por tener un período de estratificación térmica y otro con distribución de temperatura homogénea en el ciclo anual. Merino *et al.* (2003), observó que la distribución de temperatura y oxígeno presenta estratificación térmica durante la mayor parte del año, de marzo a octubre, asociado con el calentamiento del agua en la superficie, mientras el fondo permanece frío y anóxico; en el período de noviembre a febrero la columna de agua se encuentra homogénea, asociado con las bajas temperaturas atmosféricas, los niveles de oxígeno son menores al de saturación (M. Merino-Ibarra, et al. 2008)

La Figura 6 muestra las dos fases en el régimen de estratificación térmica del embalse, observado por Merina-Ibarra *et al.* (2008).

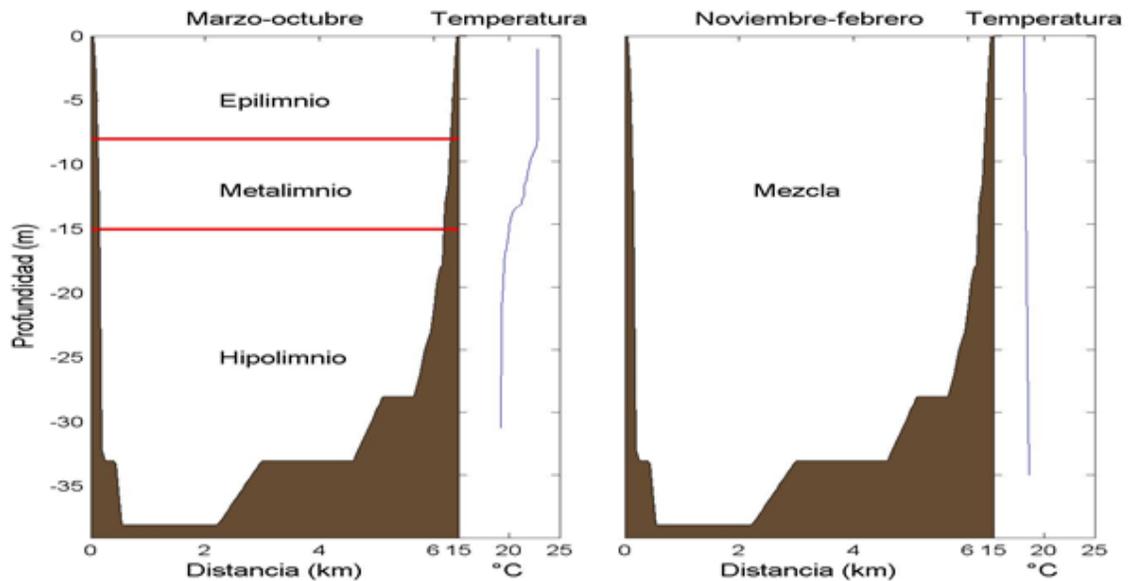


Figura 6. Esquema de estratificación térmica de la columna de agua en el embalse de la presa Valle de Bravo.

2.1.5 Clima

Con base a la clasificación de Köppen modificado por García (1988), el clima de la región es semiárido subhúmedo. Presenta lluvias en verano y sequía en invierno, la temperatura media anual varía entre 18 y 22 °C.

De acuerdo con los datos de la estación meteorológica Valle de Bravo, a cargo del sistema meteorológico nacional, la precipitación media anual es de 886.5 mm, la temperatura media anual de 18.8 °C. La época de lluvias es en verano, siendo julio el mes de mayor precipitación (187.8 mm), la temporada de estiaje en invierno, mayo el mes más cálido y enero el más frío.

2.2 Modelación

ELCOM es una herramienta de modelación numérica que aplica modelos hidrodinámicos y termodinámicos, para simular temporalmente el comportamiento estratificado de cuerpos de agua en base a forzamientos ambientales. El modelo es utilizado para determinar la variación espacial y temporal de velocidad, temperatura, densidad y salinidad en lagos, presas, estuarios y lagunas costeras.

El algoritmo en ELCOM aplica el método Euler-Lagrange para la advección de momento con una solución de gradiente conjugado para la altura en la superficie libre. La advección de los escalares pasivos y activos se realiza utilizando la discretización conservativa ULTIMATE QUICKEST (Leonard 1991).

El esquema numérico es adaptado de la familia de modelos TRIM, el cual se basa en la aproximación de Casulli y Cheng (1992), modificado para una mejor resolución, conservación de escalares, difusión numérica y la implementación de la cerradura de turbulencia para la capa de mezcla.

El modelo se basa en la aproximación de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds y las ecuaciones de transporte de escalares utilizando la aproximación hidrostática y de Bussinesq. La evolución de la superficie libre es gobernada por la integración vertical de la ecuación de continuidad aplicada a la condición de frontera cinemática. El modelo simula la respuesta a los procesos baroclínicos y barotrópicos, el efecto rotacional, forzamiento por marea, el esfuerzo por el viento, calentamiento de la superficie libre, flujos de entrada y salida, además del transporte de sal, calor y escalares pasivos. A continuación se muestran un resumen de las ecuaciones que resuelve el modelo ELCOM:

Ecuaciones de conservación de momentum (Reynolds):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ V_1 \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V_2 \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ V_3 \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right\} + f\bar{v} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ V_1 \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V_2 \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ V_3 \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right\} - f\bar{u} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -g \left\{ \frac{\partial \eta}{\partial z} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial z} \int_z^\eta \rho' dz \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ V_1 \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V_2 \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ V_3 \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right\} \quad (3)$$

Ecuaciones de conservación de masa:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Condiciones de frontera de momentum en la superficie:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = 0; \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = 0; \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

Condiciones de frontera de momentum en el fondo y en las paredes:

$$\bar{u} = 0; \bar{v} = 0; \bar{w} = 0; \quad (6)$$

Transporte de escalares:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right\} + S_c \quad (7)$$

Condiciones de frontera para transporte de escalares:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = 0; \frac{\partial c}{\partial y} = 0; \frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

Evolución de la superficie libre:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \bar{u} dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} \bar{v} dz \quad (9)$$

Esfuerzo cortante del viento en la superficie:

$$(u_o)^2 = C_{10m} \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} (W_y W_y)^{\frac{1}{2}} W_x; (v_o)^2 = C_{10m} \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} (W_x W_x)^{\frac{1}{2}} W_y \quad (10)$$

Momentum inducido por el viento:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \frac{(u_*)^2}{h}; \quad \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = \frac{(v_*)^2}{h} \quad (11)$$

Donde:

Variables	Definición
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	Componentes de velocidad en las direcciones x, y y z
η	Altura de la superficie libre a un nivel de referencia
ρ'	Densidad
ρ_0	Densidad de referencia
ρ_{aire}	Densidad del aire
ρ_{agua}	Densidad del agua
$V_{1,2,3}$	Coefficientes de viscosidad turbulenta en la dirección x, y y z
$K_{x,y,z}$	Coefficientes de difusividad en direcciones x, y y z
S_c	Fuentes o sumideros de escalares
c	Concentración de los escalares
h	Profundidad de la capa con respecto al nivel de referencia
C_{10m}	Coefficiente de arrastre del viento a una altura de referencia de 10 m
W_y	Magnitud de la velocidad del viento en la dirección x
u_*, v_*	Las velocidades de corte en la dirección x, y.

El intercambio de calor en la superficie del embalse se estima tomando en cuenta el calentamiento debido a la radiación de onda corta incidente (280 – 2,800 nm), la radiación de onda larga (>2,800 nm), los flujos asociados a la evaporación y calor sensible. En ELCOM, la radiación de onda corta está dividida en radiación fotosintética activa (PAR, 45%), cercano infrarrojo (NI, 41%), ultravioleta A (UVA, 3.5%) y ultravioleta B (UVB) 0.5%, la profundidad a la que cada componente penetra en la columna de agua está dada por la Ley de Beer-Lambert. La radiación de onda corta se mide directamente en el sitio de estudio, a diferencia de la radiación de onda larga, que, en este caso, ELCOM estima con base a la cobertura de nubes y la temperatura ambiental. El flujo de calor sensible se estima con la ecuación Fischer *et al.* (1979), que toma en cuenta la velocidad del viento a 10 metros sobre la superficie del lago, la densidad del aire y el calor específico a una presión constante. El flujo de calor latente asociado con la evaporación está dada por la ecuación Fischer *et al.* (1979) ec. (6.20).

Radiación de onda corta y ecuación de Beer-Lambert:

$$Q_{sw} = Q_{sw(total)} (1 - r_a^{(sw)}); Q(z) = Q_{sw} e^{-\eta_0 z} \quad (12)$$

Ecuación de radiación de onda larga:

$$Q_{lw} = (1 - r_a^{(lw)}) (1 + 0.17C^2) e_a (T_a) \sigma T_a^4 - e_w \sigma T_w^4 \quad (13)$$

Calor sensible Fischer et al. 1979 ec. 6.19:

$$Q_{sh} = C_s \rho_a C_p U_a (T_a - T_s) \Delta t \quad (14)$$

Calor latente Fischer et al. 1979 ec. 6.20:

$$Q_{lh} = \min \left(0, \frac{0.622}{P} C_L \rho_a L_E U_a (e_a - e_s(T_s)) \Delta t \right) \quad (15)$$

Balance de calor en la superficie:

$$Q_{\text{non-pen}} = Q_{lw} + Q_{sh} + Q_{lh} \quad (16)$$

Donde $Q_{sw(\text{total})}$ la cantidad radiación de onda corta que incide en la superficie, $r_a^{(sw)}$ el albedo de la superficie del agua. $Q(z)$ cantidad de radiación de onda corta, para cada banda, que penetra en la profundidad z , con respecto al coeficiente de atenuación $-\eta_o$. Q_{lw} la cantidad de calor estimada a partir de la cobertura de nubes C , la temperatura superficial del agua T_w , la temperatura del aire T_a , σ la constante de Stefan-Boltzman ($5.6697 \times 10^{-8} \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$) y $e_w(0.96)$ el coeficiente de emisividad de la superficie del agua $e_w(0.96)$ y e_a el de la atmosfera estimado para la temperatura ambiental. Q_{sh} es la perdida de calor sensible para el periodo de tiempo Δt , C_s el coeficiente de transferencia de calor sensible para la velocidad del viento a 10 m sobre la superficie (1.3×10^{-3}), ρ_a la densidad del aire en kgm^{-3} , C_p el calor especifico del aire a presión constante ($1003 \text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$), U_a Es la velocidad del viento en ms^{-1} a la altura referencia estándar de 10 m. Q_{lh} es el flujo de calor latente que se estima a partir de la presión atmosférica P , el coeficiente de transferencia de calor latente C_L (1.3×10^{-3}) para la velocidad del viento a la altura de referencia de 10 m, la densidad del aire ρ_a en Kgm^{-3} , el calor latente por evaporación del L_E ($2.453 \times 10^6 \text{Jkg}^{-1}$), U_a la velocidad del viento a la altura de referencia de 10 m, la presión de vapor del aire e_a y la presión de vapor saturado e_s a la temperatura de agua superficial (T_s). $Q_{\text{non-pen}}$ es el total de densidad de energía que no penetra en la capa superficial durante el periodo Δt .

El balance de masa en la superficie se calcula para cada celda tomando en cuenta el flujo asociado al calor latente y la precipitación.

Flujo de masa por evaporación:

$$\Delta M_N^{lh} = \frac{Q_{lh} dx dy}{L_v} \quad (17)$$

Flujo de masa por precipitación:

$$\Delta M_N^{\text{rain}} = \rho_{\text{rain}} dx dy r \Delta t \quad (18)$$

2.2.1 Implementación del modelo

El uso del modelo ELCOM está dividido en 4 etapas, las cuales se deben de realizar de manera consecutiva y ordenada (Figura 7). En estas etapas el modelo utiliza el lenguaje Fortran 90, la información que requiere en cada una de ellas se ingresa en archivos de texto con formatos rígidos. La primer etapa consiste en la discretización del área de estudio, en la cual se define el dominio en un sistema de coordenadas (i, j, k) a partir de la geometría, batimetría y un sistema de referencia vertical mediante capas con un intervalo de profundidad., También se establecen las fronteras abiertas tomando en cuenta la ubicación de los efluente y afluentes. En la segunda etapa se adaptan las series de tiempo de las variables meteorológicas y el flujo en las fronteras abiertas, también se definen las variables para los diferentes archivos de salida donde se muestran los resultados del modelo. La siguiente etapa consiste en definir las condiciones iniciales de temperatura, adaptar los parámetros del modelo y establecer las condiciones de simulación. Después de haber completado estas tres etapas el modelo está listo para realizar la simulación a través de un emulador del entorno Unix para Windows. Al terminar la simulación, la última etapa consiste en convertir los archivos de salida a formato NetCDF (Network Common Data Format), para poder visualizar y analizar los resultados. En la Figura 7 se observa un diagrama a de flujo donde los primeros dos pasos se muestran en color azul, el tercer paso en verde y el último en amarillo.

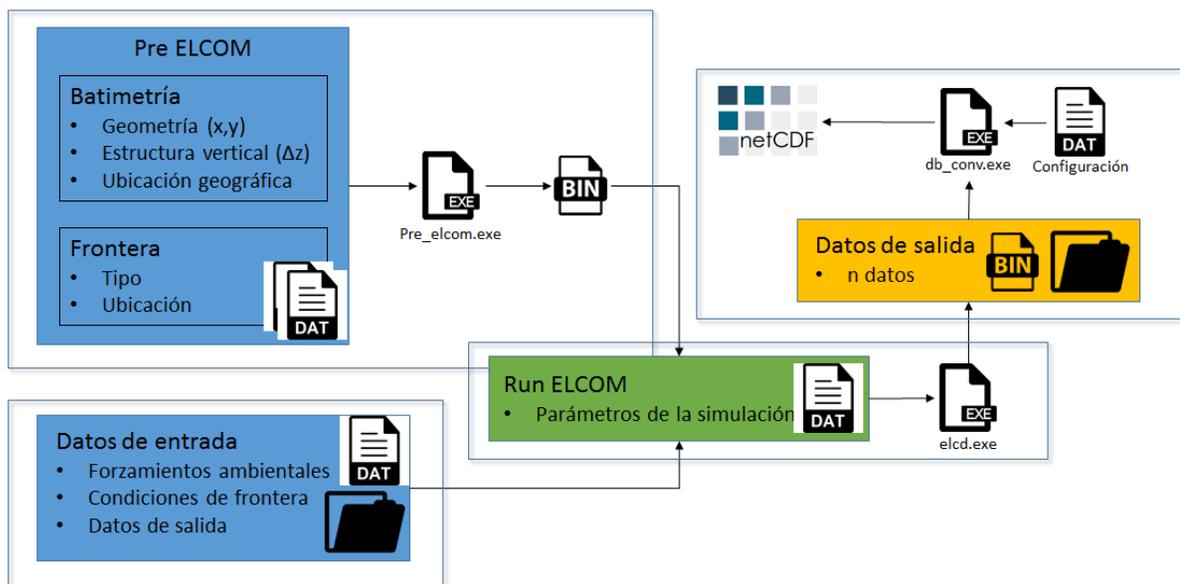


Figura 7. Esquematización de las etapas de ELCOM.

El modelo se adaptó para simular la distribución tridimensional de temperatura en el embalse de la presa Valle de Bravo, se tomaron en cuenta 3 principales afluentes y la toma de agua del sistema Cutzamala. El período de simulación se definió tomando en cuenta la fecha en que se realizó la toma de datos, para poder validar los resultados del modelo con los datos medidos, se simularon las condiciones hidrodinámicas en el embalse iniciando el 19 de julio a las 00:00 horas y finalizando hasta el 1 de agosto las 00:00 horas.

2.2.1.1 Discretización

La geometría y batimetría del embalse se ingresa en el modelo mediante una matriz (i, j) que se representa a través de una malla rectangular de tamaño definido $(\Delta X, \Delta Y)$ La localización geográfica se asocia ingresando las coordenadas geográficas, en grados decimales, de la esquina superior izquierda de la malla. La estructura vertical se define con un vector donde se especifica el tamaño de las capas (ΔZ) . Esta información se ingresa en un archivo de texto definido por ELCOM como *Bathymetry.dat*.

Para generar la matriz que define el dominio en el modelo, se utilizó la batimetría de la presa proporcionada por la Subgerencia de Calidad del Agua e Impacto Ambiental, la cual consiste en isobatas cada 5 m. Los datos se complementaron con nuevos datos obtenidos durante una campaña de mediciones en el embalse. Para generar la matriz se utilizó la subrutina *griddata* del programa Matlab R2013b™, se interpoló una malla rectangular que representa la profundidad en un área de 50x50 metros (Tabla 3).

Tabla 3. Características de la discretización.

	Tamaño (m)	Numero de celdas
ΔX	50	123
ΔY	50	125
ΔZ	0.5	76

La estructura vertical del embalse se definió utilizando capas horizontales con un $-\Delta Z$ constante de 0.5 metros. Esta resolución vertical permite identificar la distribución vertical de la termoclina que se encuentra en un rango de 7 a 14 metros (Okely, Imberger and Shimizu 2010), (Figura 8).

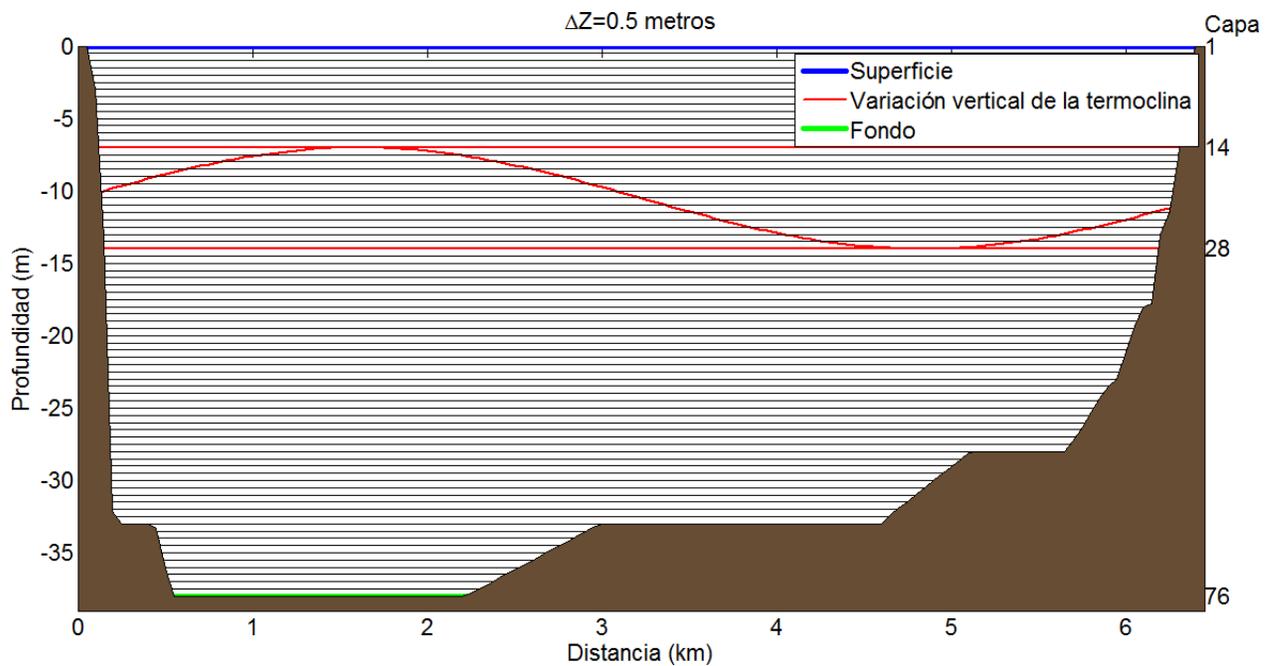


Figura 8. Esquematación de la discretización vertical utilizada en la simulación.

Debido a la magnitud de descarga y disponibilidad de datos, solo se tomaron en cuenta tres de los seis afluentes, como entradas de agua al sistema. También se tomó en cuenta el sistema hidráulico Cutzamala como una salida del sistema. Se sobrepuso en Google Earth™ la malla generada con la batimetría, se identificaron las celdas donde se encontraba la desembocadura de los tres ríos y la obra de toma del sistema Cutzamala. Posteriormente en un archivo de texto definido por ELCOM como Boundary conditions (BC) se especificó su ubicación en forma matricial (i, j) y el tipo de frontera (entrada o salida), (Tabla 4).

Tabla 4. Localización de las fronteras abiertas.

Tipo de frontera	i	j	k	Nombre
Inflow	20	100	:	Río Amanalco
Inflow	47	90	:	Río Tizates
Inflow	111	124	:	Río Molino
Inflow/Outflow	38	2	:	Sistema Cutzamala

ELCOM utiliza un compilador para convertir los datos ingresados en formato de texto a un formato binario. Después de haber generado los archivos se corrió el ejecutable Pre_elcom.exe para continuar con la siguiente etapa.

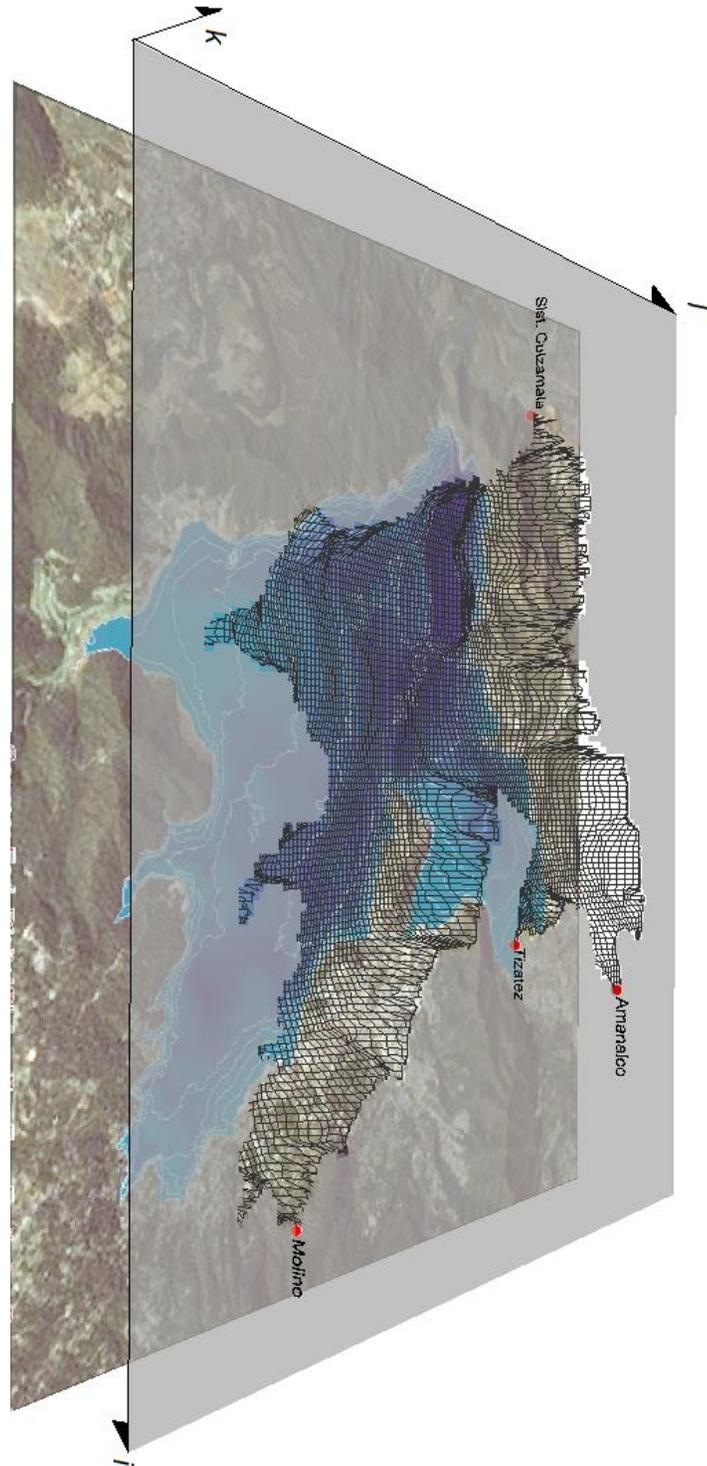


Figura 9. Esquema de la discretización del embalse de la presa Valle de Bravo.

2.2.1.2 Datos de entrada y salida

Los datos de entrada consisten en los forzamientos ambientales con los que el modelo resuelve las ecuaciones para cada intervalo de tiempo. Se utilizaron las variables meteorológicas, obtenidas por la estación meteorológica instalada en la boya propiedad de CONAGUA; también se tomó en cuenta el gasto de los tres ríos y el volumen de extracción por parte del sistema Cutzamala.

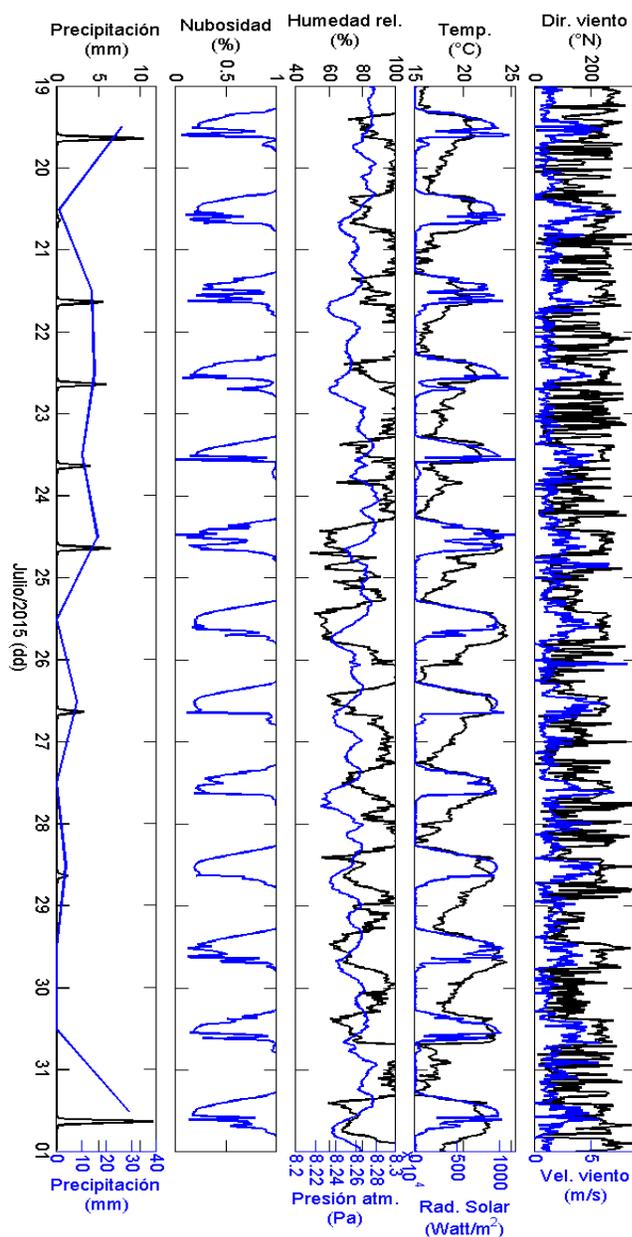


Figura 10. Forzamientos ambientales utilizados en la simulación, en la gráfica de precipitación se muestran los valores proporcionados por CONAGUA (azul) y los valores interpolados para la simulación (negro).

Los datos de meteorológicos, medidos por la boya, se procesaron en Matlab R2013b™, para adecuarlos al formato de texto con las especificaciones que el modelo requiere. Se utilizaron todas las variables medidas por la estación (Tabla 1). Los datos de precipitación se obtuvieron del reporte mensual de la presa Valle de Bravo, los datos son diarios, por lo que se ajustaron a una función gaussiana, para que la cantidad total de lluvia diaria registrada se distribuyera de las 14:00 a las 18:00 h, que es cuando se observó la precipitación durante la campaña (24Figura 10).

El caudal de los principales afluentes al embalse se obtuvo del informe “Seguimiento de Calidad del Agua de las Presas Valle de Bravo, Villa Victoria y el Bosque del Sistema Cutzamala, 2012, Estados de México y Michoacán” generado por el Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM) y la Subgerencia de Calidad del Agua e Impacto Ambiental. Los monitoreos se realizaron en un lapso de tres meses, se utilizó un flujómetro para medir la velocidad de la corriente, tomando en cuenta las dimensiones transversales de los cauces se calculó el gasto (Tabla 5).

Tabla 5. Gasto en m^3s^{-1} reportado para los monitoreos.

Fecha	Amanalco	Tizates	Molino	Cutzamala
16/07/2015	4.08	0.09	4.67	7.19
13/08/2015	5.59	0.10	5.10	6.78
10/09/2015	2.74	0.07	5.49	3.26

Debido a que el gasto para los tres ríos fue medido solo tres días, fue necesario interpolar el valor máximo utilizando una función gaussiana, la cual varía con un período diurno, de manera constante (Figura 11).

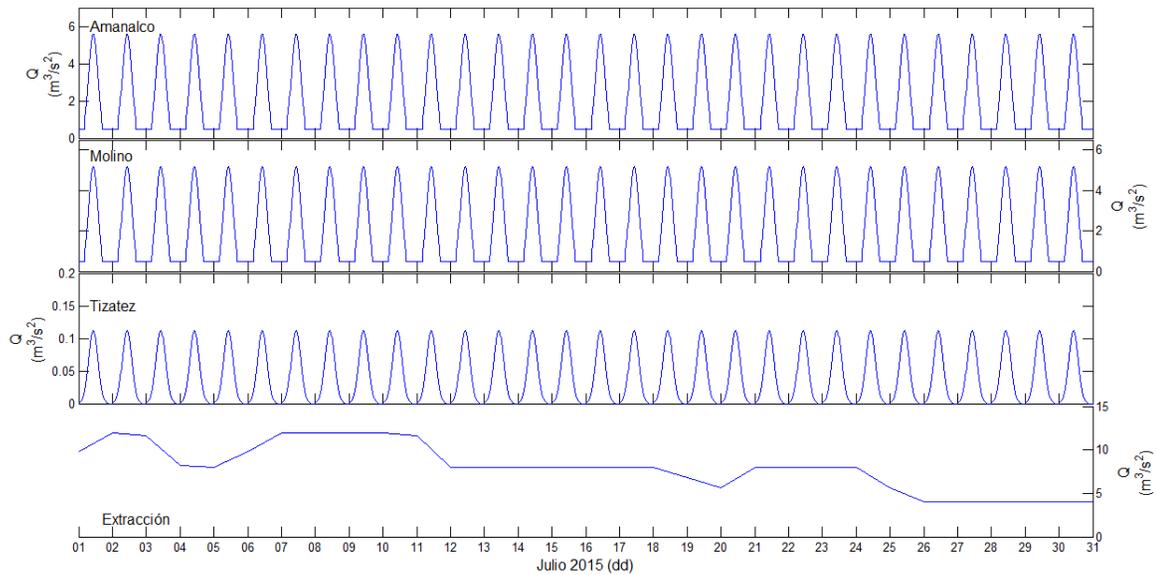


Figura 11. Series de tiempo del caudal asignadas a las fronteras abiertas de la discretización.

Para los datos de salida del modelo se establecieron diferentes archivos que permiten visualizar y analizar los resultados en las componentes x , y y z . Se definieron dos transectos verticales a lo largo de los principales ejes, 18 capas horizontales a diferentes profundidades y la variación temporal de las variables en los principales ríos y el punto donde se ubica la boya de CONAGUA (Figura 12).

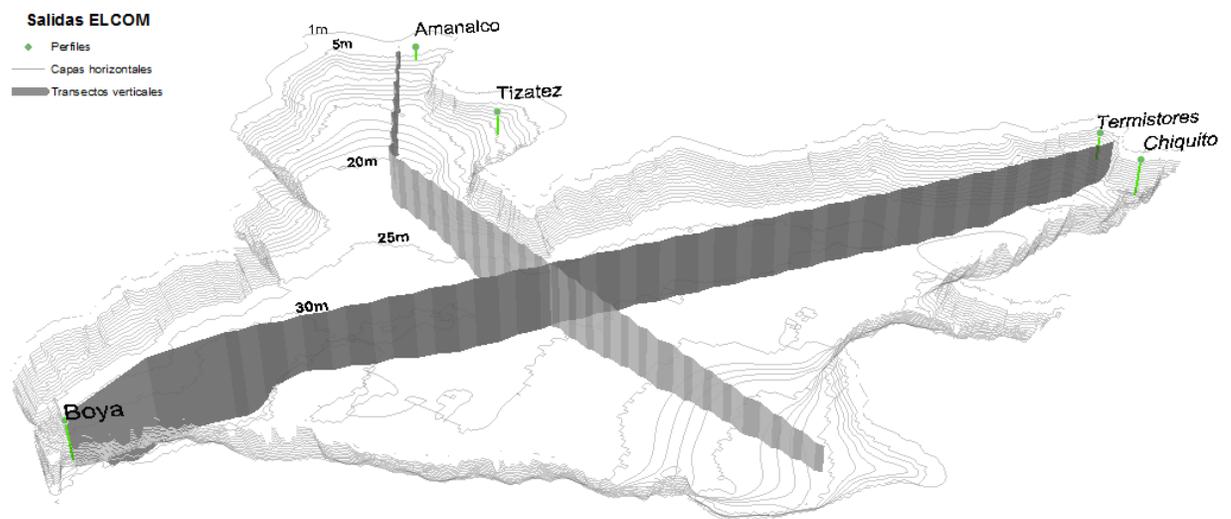


Figura 12. Salidas asignadas para la simulación realizada con ELCOM.

2.2.1.3 Parámetros de simulación

En los parámetros de simulación se definen las condiciones iniciales de temperatura en el embalse, el intervalo de tiempo y los módulos utilizados para la correr el modelo.

Las condiciones iniciales en la simulación se establecieron con un perfil de temperatura. El perfil utilizado se construyó a partir de la profundidad promedio de las isoterma para los días en que se realizó la campaña, de los datos medidos por el arreglo de termistores instalado en la boya, cercana a la cortina. Los datos de la boya se encuentran en formato Excel y se procesaron con el programa Matlab R2013b™, para adecuarlos al formato definido para ELCOM en un archivo de texto.

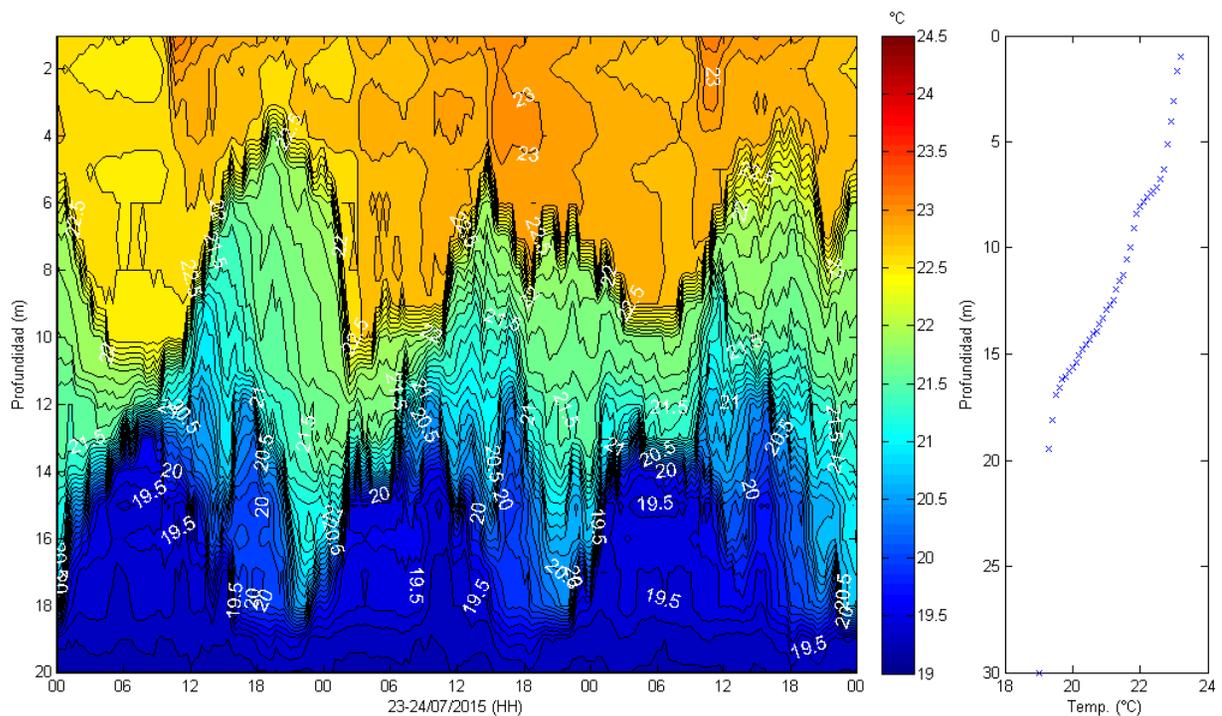


Figura 13. Variación vertical de temperatura durante los días de campaña (izquierda), perfil de temperatura obtenido a partir del promedio de profundidad de las isoterma (derecha).

En la Figura 14 se muestra el perfil de temperatura seleccionado para las condiciones iniciales, el cual es interpolado para todo el dominio. El perfil de temperatura se distribuye entre 19 y 23.2 °C. Muestra estratificación vertical, con un gradiente constante desde la superficie hasta los 8 metros. A partir de esta profundidad el gradiente aumenta hasta los 18 metros, y vuelve a disminuir hasta el fondo, los cambios en el gradiente delimitan las 3 diferentes capas en la columna.

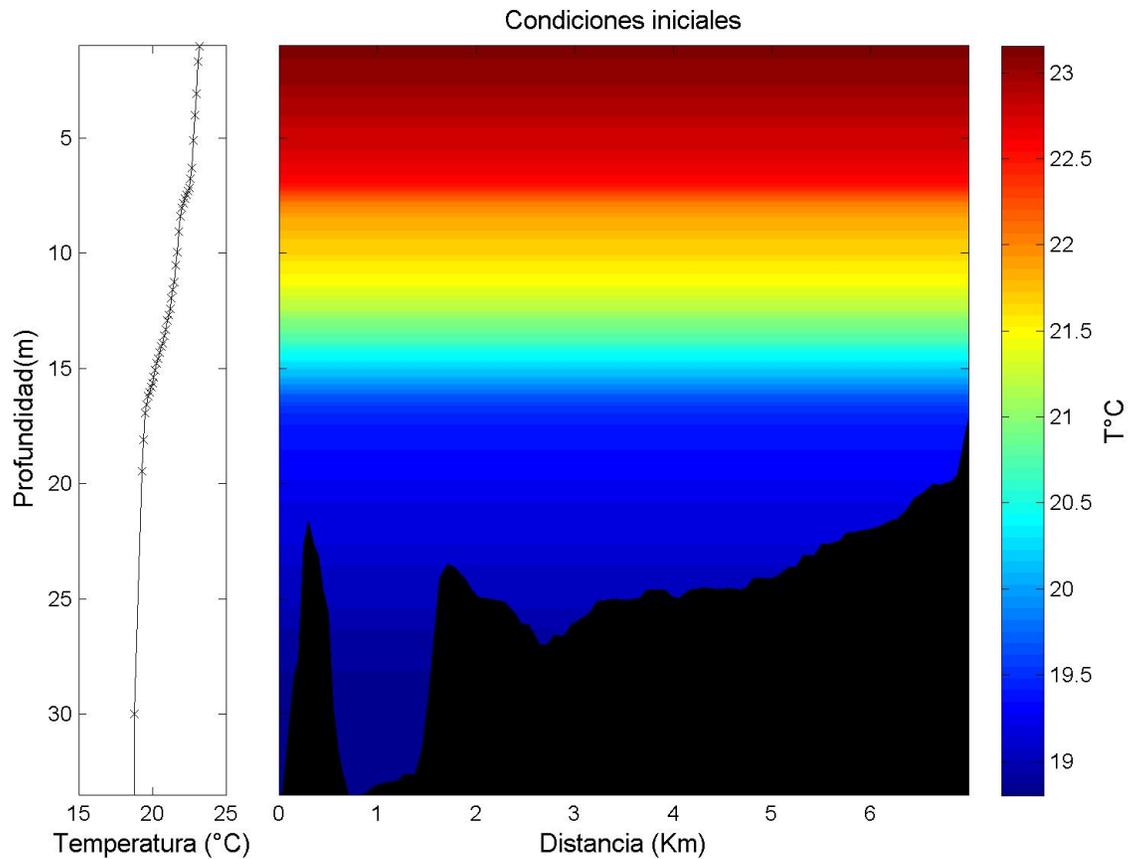


Figura 14. Condiciones iniciales de temperatura asignadas a todo el dominio de la simulación.

El intervalo de tiempo utilizado para resolver las ecuaciones del modelo se definió con base a la condición de Courant-Friedrichs-Lewys ec. (19). Se programó la simulación para iniciar a las 00:00 del 19 de julio al 31 00:00 del 2015, con intervalos de tiempo de 60 s, un total de 17,280 iteraciones.

$$\sqrt{g'D} \frac{\Delta t}{\Delta x} < \sqrt{2}; \quad (19)$$

$$\text{donde: } g' = g \left(\frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right); \quad \Delta t < \frac{CFL \Delta x}{U}$$

Los procesos que se tomaron en cuenta para la simulación se ingresan en ELCOM mediante un archivo de texto, *run_elcom.dat*, donde se utilizan los valores de cero y uno para definir si el módulo está activado. Se consideró la entrada y salida los ríos y el sistema Cutzamala al sistema (iflow), el balance de calor (iheat), el efecto rotacional en movimientos no inerciales (icoriolis); el cálculo de la temperatura y la densidad del agua en el embalse (itemperature, idensity), el tiempo de retención en el lago

(iretention). La estabilidad de la atmosfera es un factor que causa variabilidad en la transferencia de calor y momento en la superficie del lago, en ELCOM cuando las variables meteorológicas se miden sobre la superficie del lago y con intervalos menores a un día, se recomienda que se considere este proceso en el cálculo del intercambio de calor.

2.3 Validación

Para evaluar como el modelo reproduce el comportamiento de la temperatura en el embalse, se compararon los resultados calculados por ELCOM con datos medidos *in situ*, obtenidos en la salida de campo y series de tiempo medidas por los termistores instalados en la boya.

La variación temporal de temperatura en la columna de agua se evaluó en 5 diferentes profundidades (1, 5, 10, 15 y 20 m). Se compararon las series de tiempo de temperatura medidas por los termistores, instalados en la boya, correspondiente al período de la simulación, con los datos de salida del modelo calculados en la celda donde se localiza la boya. Para cada profundidad se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson (r) y la raíz del error cuadrático medio ($RECM$).

Raíz del error cuadrático medio:

$$RECM = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_m - T_t)^2 \right)^{1/2} \quad (20)$$

Coficiente de correlación de Pearson:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n T_m \cdot T_t - \sum_{i=1}^n T_m \cdot \sum_{i=1}^n T_t}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n T_m^2 - (\sum_{i=1}^n T_m)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n T_t^2 - (\sum_{i=1}^n T_t)^2}} \quad (21)$$

Especialmente se evaluaron los resultados del modelo solamente para los días en que se realizó la toma de datos, se compararon los resultados del modelo con los perfiles de temperatura medidos con el CTD Seabird.

2.3.1 Obtención de datos

Se realizó una campaña de muestreo los días 23 y 24 de julio del 2015 para obtener la variación vertical y espacial de las variables fisicoquímicas del embalse. Cada día se realizaron dos muestreos, uno por la mañana y el segundo al medio día. En cada sitio de muestreo se realizaron mediciones de la variación vertical de temperatura utilizando dos perfiladores CTD y se obtuvo la posición geográfica con un GPS. La distribución de los sitios de muestreos en cada campaña se seleccionó tratando de obtener la mayor cobertura posible, tomando en cuenta los dos principales ejes del embalse.

Para conocer el comportamiento de mezcla y estratificación en el embalse, se midió el comportamiento temporal de la temperatura en la columna de agua utilizando dos arreglos verticales de termistores ubicados: (1) en la parte este del embalse, cercano a la desembocadura del río Molino, (2) el arreglo instalado en la boya de CONAGUA cercana a la cortina.



Figura 15. Embarcación propiedad de Marina, utilizada en la campaña de mediciones en el embalse de la presa Valle de Bravo.

Las mediciones en el embalse se realizaron a bordo de una embarcación inflable Zodiac, propiedad de Capitanía de Puerto de Valle de Bravo y fue operada por personal de dicha institución (Figura 15).

2.3.1.1 Variación vertical de temperatura

Se obtuvieron los datos medidos por el arreglo de termistores en la boya de CONAGUA, para todo el mes de julio. La base de datos consiste en la hora de la medición y la temperatura medida por los 20

termistores. Los datos se encuentran en formato Excel™, el procesamiento y visualización se realizó con el programa Matlab R2013b™. La localización de los arreglos de termistores se observa en la Figura 16 y Figura 17.

Se instaló un arreglo de 5 termistores cerca de la desembocadura del río Molino a una profundidad de 15 m. Los sensores utilizados son marca ONSET modelo HOBO U22 Water Temp Pro. V2, y una separación de 1 metro entre sí. Los termistores se instalaron utilizando un peso muerto en el fondo y una boya en la superficie. El primer termistor se ubicó a un metro del fondo y se utilizó una boya para mantener el arreglo alineado verticalmente (Figura 16, Figura 17). Se utilizó el programa BoxCart Pro 4.3, para establecer una frecuencia de medición de 10 minutos. Los datos se obtuvieron en formato de texto, se procesaron y visualizaron con el programa Matlab R2013b™.

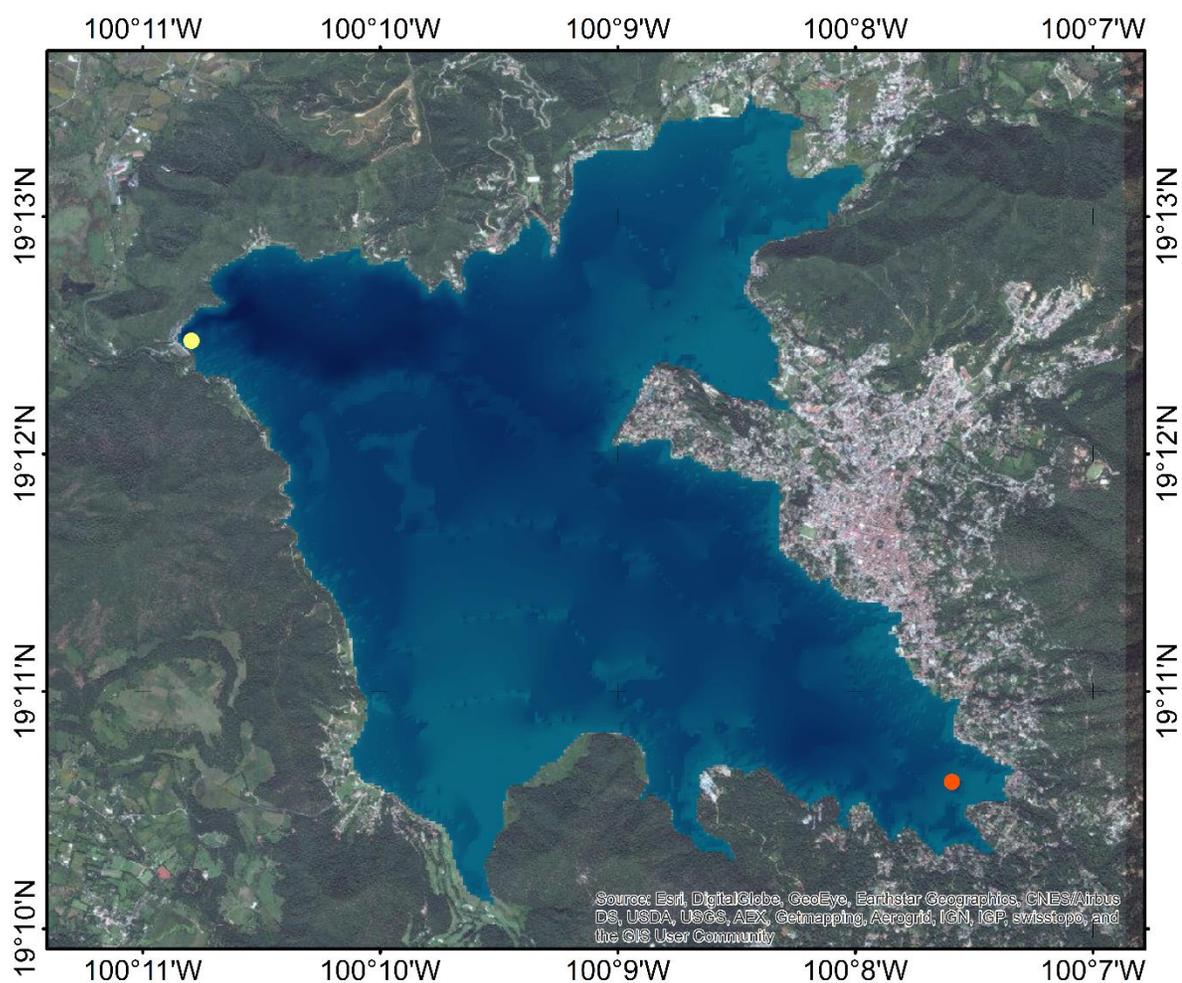


Figura 16. Localización de los arreglos de termistores utilizados en la campaña de muestreo.

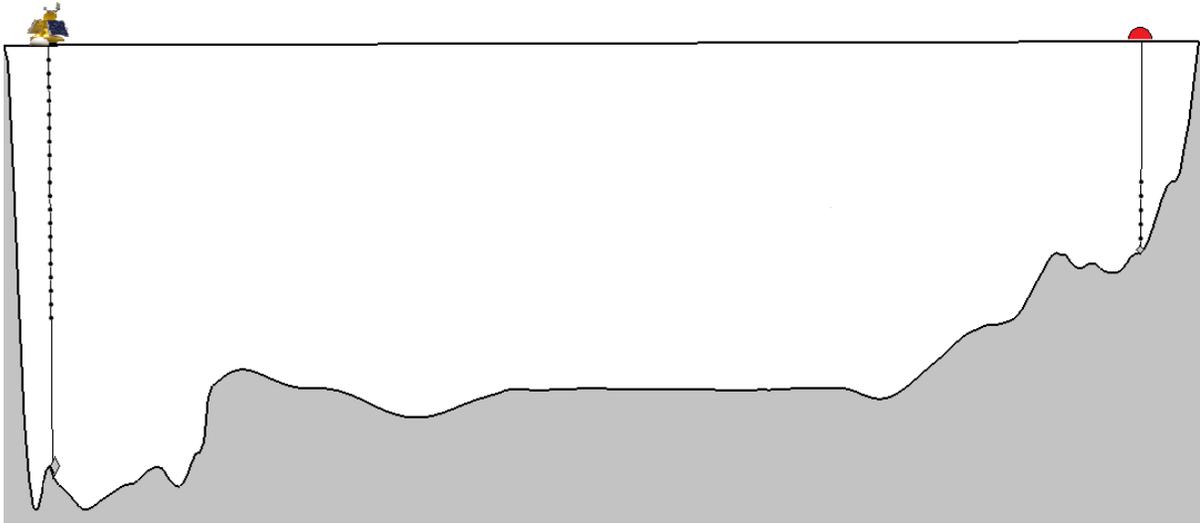


Figura 17. Esquema de instalación de los termistores en cada arreglo utilizado durante el 23 y 24 de julio de 2015.

2.3.1.2 Perfiles

Para definir las características fisicoquímicas del embalse se utilizaron 2 perfiladores CTD con los cuales se midieron 9 variables Tabla 6 en 74 puntos. Los perfiladores conocidos como CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*), miden la conductividad, temperatura y profundidad en el océano y cuerpos de agua continentales. La profundidad se deriva a partir de las mediciones de presión hidrostática, la salinidad se calcula utilizando la conductividad eléctrica y temperatura medida. El instrumento mide los parámetros mientras desciende en la columna de agua.

En cada uno de los puntos de muestreo se realizaron mediciones con los dos perfiladores; uno es marca Seabird modelo CTD SBE 19plus Seacat Profiler, complementado con sensores de turbidez, clorofila-a, oxígeno y pH. El segundo CTD es marca YSI modelo CastAway, es un instrumento muy sencillo y fácil de usar.

Tabla 6. Variables medidas con los perfiladores CTD.

Variable	Unidades	Instrumento
Clorofila-a	Mgl ⁻¹	Seabird
Conductividad	Sm ⁻¹	Seabird/CastAway
Densidad	Kgm ⁻³	Seabird/CastAway
Oxigeno	Mgl ⁻¹	Seabird
pH	adimensional	Seabird
Profundidad	metros	Seabird/CastAway
Salinidad	UPS	Seabird
Temperatura	°C	Seabird/CastAway
Turbidez	UNT	Seabird

El CTD Seabird mide la presión mediante un sensor interno de deformación. Controla las mediciones de temperatura y conductividad regulando el flujo de agua a través de los sensores con el uso de una bomba de agua miniatura SBE 5M. De esta forma se asegura que se analiza la misma parcela de agua para obtener un cálculo de la salinidad más preciso. Está montado en una jaula de metal, para protegerlo de golpes durante la operación. Los sensores adicionales están conectados mediante una interface RS-232. El instrumento tiene un conector de 6 pins para establecer comunicación con una computadora y poder programarlo y descargar los datos, mediante un cable I/O conectado a un adaptador serial-USB. El CTD toma muestras con una frecuencia de 4Hz, almacenando la información en una memoria interna de 64 Mb y está equipado con 9 baterías alcalinas D (Figura 18).

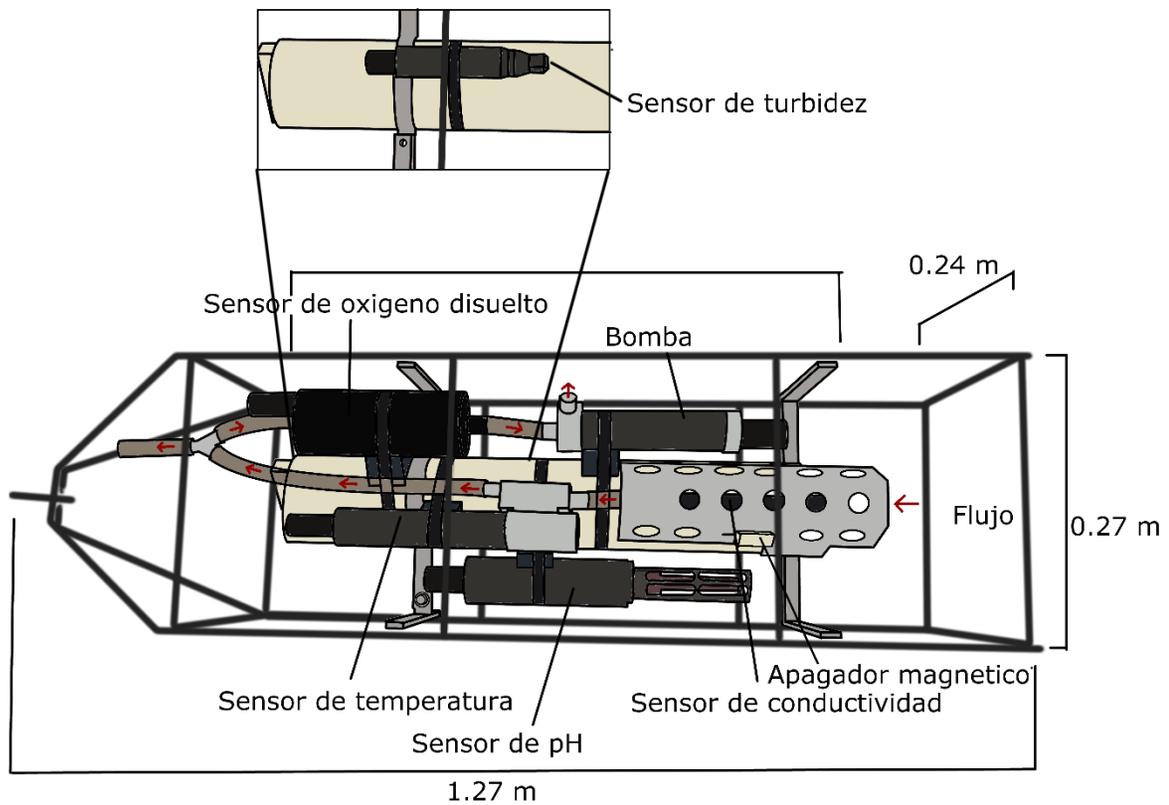


Figura 18. Esquema del perfilador CTD marca Seabird.

El instrumento fue calibrado, por la compañía Seabird, antes de la campaña. Para su uso utilizado en Valle de Bravo, se tomó en cuenta que se encuentra a 1789 msnm, que es un cuerpo de agua dulce y tiene una diferencia de 2 h con respecto a la hora local de Ensenada. Se utilizó el programa Seaterm V2 V2.4.1, para programar el instrumento y poder utilizarlo en el sitio de estudio.

El sensor de presión se ajustó utilizando un factor definido por la diferencia en la medición de presión del CTD y la de un barómetro; se utilizó el valor de -1.9 db, que es la diferencia entre las mediciones de presión atmosféricas obtenidas de la estación meteorológica de CONAGUA y presión que registro el CTD en Valle de Bravo. El sensor de conductividad tiene un circuito eléctrico acoplado que emite a una frecuencia establecida (1 Hz) cuando el sensor está seco. Al sumergirlo la señal aumenta con respecto al valor de conductividad y activa la bomba del CTD. El ajuste por la diferencia en la magnitud de la conductividad del agua de mar y el agua dulce se realiza cambiando la frecuencia mínima de salida necesaria para encender la bomba. El valor típico para el agua dulce es de 2593 Hz. El sensor se ajustó a la hora local de Valle de Bravo (UTC/GMT -6 hora).

El CTD CastAway es un instrumento de medición de alta tecnología, diseñado para utilizarse en sitios con profundidades de hasta 100 metros. Su sistema incorpora características que le permiten realizar mediciones a una frecuencia de 5Hz, con una fina resolución espacial y alta precisión. Utiliza una celda de conductividad con 6 electrodos acoplados con un termistor de rápida respuesta para obtener mediciones de alta precisión. Su forma hidrodinámica le permite descender a una velocidad de 1 m/s. Cuenta con características únicas que simplifican la toma de datos. Se manipula con dos botones y cuenta con una pantalla LCD a color donde se despliega el menú y también se pueden visualizar las mediciones realizadas. Cuenta con un GPS interno con el que se toma la ubicación antes y después de cada lance, realiza la transferencia de datos de manera inalámbrica vía Bluetooth a computadoras con sistema operativo Windows™, mediante el software CastAway V1.5, diseñado específicamente para este dispositivo, con el que se puede configurar el instrumento, descargar, visualizar y exportar los datos de manera sencilla sin tener que realizar un postproceso.

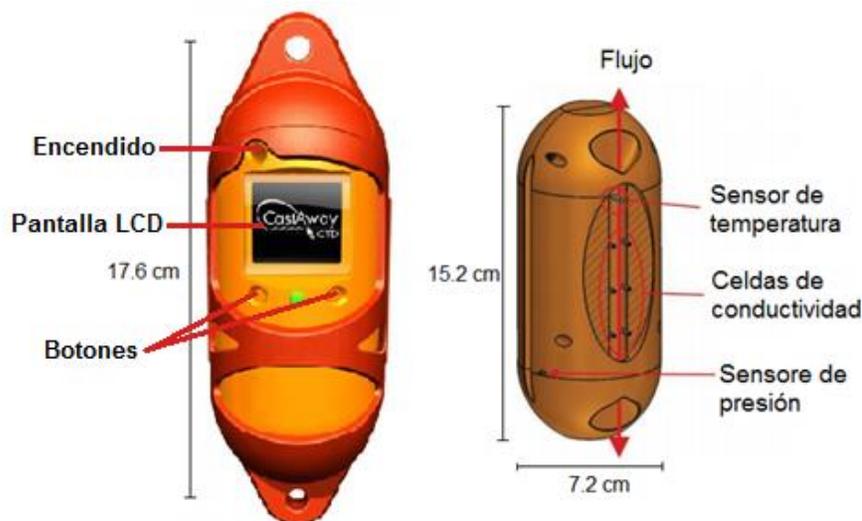


Figura 19. Esquema del perfilador CTD marca CastAway.

Se utilizaron los dos perfiladores en cada sitio simultáneamente, intentando minimizar la diferencia de la posición por la deriva de la embarcación. La toma de datos con el CTD CastAway es sencilla, en cada sitio de muestreo se activa el CTD, se define el tipo de muestreo y se esperaba a que el GPS interno obtenga la posición geográfica del punto. Cuando el instrumento estaba listo se sumergía en el agua hasta el fondo asegurado a un cabo, intentando que bajara a una velocidad constante para que la toma de datos

fuera consistente, posteriormente se regresaba a la superficie para detener la toma de datos. El perfilador Seabird tiene un tiempo de espera de 40 s para empezar a realizar las mediciones después de haberlo encendido. En los sitios de muestreo se prendía el CTD y se colocaba en la superficie del agua asegurado a un cabo, para que la bomba interna se llenara de agua en los 40 s, posteriormente se sumergía intentando mantener una velocidad constante hasta llegar al fondo y se regresaba a la superficie para detener la toma de datos.

Los datos medido con el CTD CastAway no requieren de un postproceso, utilizando el software CastAway V1.5 se descargaron y verificaron los datos, posteriormente se exportaron en formato de texto para poder visualizarlos con Matlab R2013b™.

Los datos medidos con el perfilador Seabird, a diferencia de los obtenidos con el CastAway, requieren realizar un postproceso antes de poder visualizarlos. Este proceso se lleva a cabo mediante el programa SBE Data Processing V 7.23.2, el procesamiento consiste en 6 etapas las cuales se tiene que realizar de manera ordenada utilizando diferentes módulos del programa. A continuación se describen estas etapas:

1. Convertir los datos crudos en formato hexadecimal a formato de texto para cada lance. En este paso también se seleccionan las variables medidas por el CTD en el descenso.
2. El siguiente paso consiste en ajustar el tiempo de las mediciones realizadas por el sensor de presión, para asegurar que los cálculos de salinidad, oxígeno disuelto y algunos otros parámetros, provengan de la medición de la misma parcela de agua. El objetivo de esta etapa es ajustar el cálculo de las variables tomando en cuenta la posición y la diferencia de respuesta de los diferentes sensores, también toma en cuenta el tiempo de retraso del agua que pasa por la bomba. Para esta campaña se ajustó el sensor de temperatura con una diferencia de 0.5 s debido a su lenta respuesta con respecto a la presión.
3. Posteriormente se utiliza la temperatura, conductividad y presión medida por el CTD, en conjunto con la latitud y longitud, para derivar los parámetros que el CTD no puede medir: Salinidad, densidad, profundidad, oxígeno disuelto y saturación de oxígeno. Las ecuaciones utilizadas para calcular las variables se pueden consultar en el manual del programa (www.Seabird.com).
4. Se aplica un filtro pasa-bajo para suavizar los datos de alta frecuencia.

5. Se promediaron los datos con respecto a la profundidad, para tener las mediciones cada 10 cm.
6. Finalmente los datos procesados se seleccionan y se convierten a formato ASCII.

El CTD no mide la posición geográfica de cada lance, solo registra la hora en la que se realizó. Se obtuvo la posición geográfica utilizando un GPS Garmin 76, cuyas mediciones están referidas al sistema World Geodetic System 1984. La ubicación de cada punto fue obtenida al momento en que se prendía el CTD marca Seabird.

Los datos se descargaron del GPS utilizando la interface MapSource 6.16.3 de la marca Garmin™, y se exportaron a formato de texto separado por comas. La base de datos obtenida consistió en la posición en coordenadas geográficas y la hora en que se tomó cada punto. Se utilizó Matlab R2013b™ para generar un archivo de texto donde se relaciona el número de lance y su posición geográfica.

Se graficaron todas las variables de cada lance, para verificar los perfiles medidos y se filtraron los datos, tomando en cuenta que las primeras mediciones del CTD se realizaron en la superficie del agua. Para este proceso, se utilizaron programas generados previamente por la Dra. Isabel Ramírez, preparados para usarse en Matlab R2013b™. Estos programas permiten graficar las diferentes variables con respecto a la profundidad, también interpolar cortes verticales y superficies horizontales que fueron utilizados en la validación

Los cortes verticales se obtuvieron interpolando cada 0.5 m, los datos de los perfiles que se midieron a lo largo de los transectos a una misma profundidad, cada 0.1 m desde la superficie hasta el fondo. Las gráficas se presentan utilizando los tres ejes de referencia (x , y , y z) con una exageración vertical de 25x. En las figuras los números a lo largo de los transectos indican los perfiles medidos. A cada transecto se le asignó una letra minúscula para identificarlo. Las líneas grises representan la profundidad cada 10 m a partir de la superficie. A partir de los transectos, se interpolaron superficies horizontales cada 5 m (1, 5, 10, 15, 20 y 25 m de profundidad).

Capítulo 3. Resultados

3.1 Campaña de mediciones

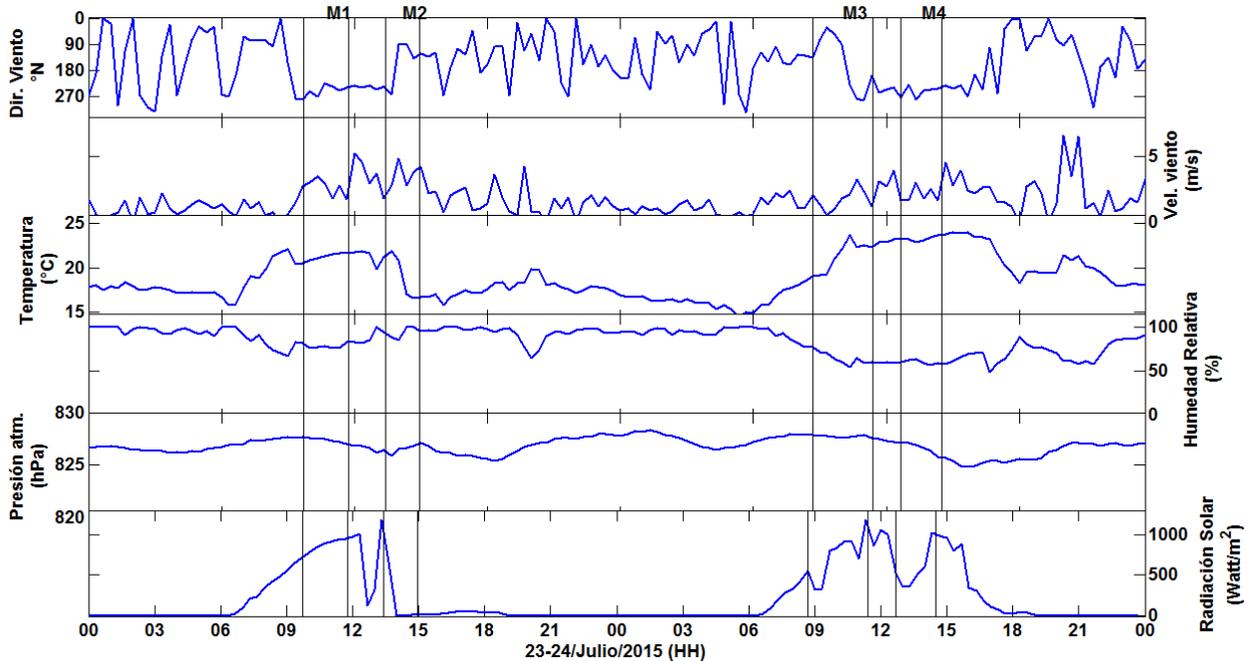


Figura 20. Condiciones meteorológicas medidas por la estación ubicada en el embalse de la PVB, los días de campaña.

El muestreo se realizó en la temporada de lluvias, cuando el Monzón de Norteamérica promueve la entrada de humedad desde el Pacífico. Este sistema y las condiciones meteorológicas locales ocasionaron precipitación con granizo durante el segundo muestreo del primer día de campaña. Las series de tiempo de las variables meteorológicas ocurridas en la zona durante este lapso se obtuvieron de la estación meteorológica instalada en la boya propiedad de CONAGUA (Figura 20). La radiación solar presentó una variación diaria en un rango de 0 a $1200 \text{ Watts m}^{-2}$. Los valores se empezaban a registrar en el amanecer después de las 6:00 h con máximos cerca de las 14:00 h, que disminuyen a 0 Watts m^{-2} en el ocaso cerca de las 18:00 h. Las variaciones en este periodo se asocian con un aumento en la cobertura de nubes sobre el lago. La velocidad del viento varía en un rango promedio de 0 a 4 m s^{-1} , tiene un régimen con bajas velocidades ($0\text{-}2 \text{ m/s}$) de las 21:00 a las 9:00 h y máximas ($2 \text{ hasta } 6 \text{ ms}^{-1}$) durante la tarde. La dirección del viento permanece con una componente principalmente del suroeste con algunas ráfagas

hacia el sur durante el periodo de baja velocidad. A partir de la 9:00 h la dirección predominante es sur y cambia rápidamente al norte cuando la radiación se acerca a 0. La temperatura ambiental responde al comportamiento de la radiación solar incidente, y es influenciada por la variación en el régimen de viento. En general se registró un rápido calentamiento a partir del amanecer; un periodo de alta temperatura durante la tarde, el cual se interrumpe cuando la magnitud del viento que sopla hacia el norte aumenta. Al disminuir la velocidad el viento, la temperatura aumenta rápidamente y se registra un máximo de menor intensidad que gradualmente disminuye hasta el amanecer del siguiente día. La humedad relativa se comporta de manera inversa y proporcional a la temperatura, los valores registrados fueron mayores al 90% cuando la temperatura era menor a 18°C. La presión atmosférica tiene un comportamiento semiduro con dos mínimos a las 05:00 y 16:00 en promedio y dos máximos a las 09:00 y 12:00 h, el primero mayor al segundo, y el rango de presión se mantuvo entre los 825 y 828 mPa.

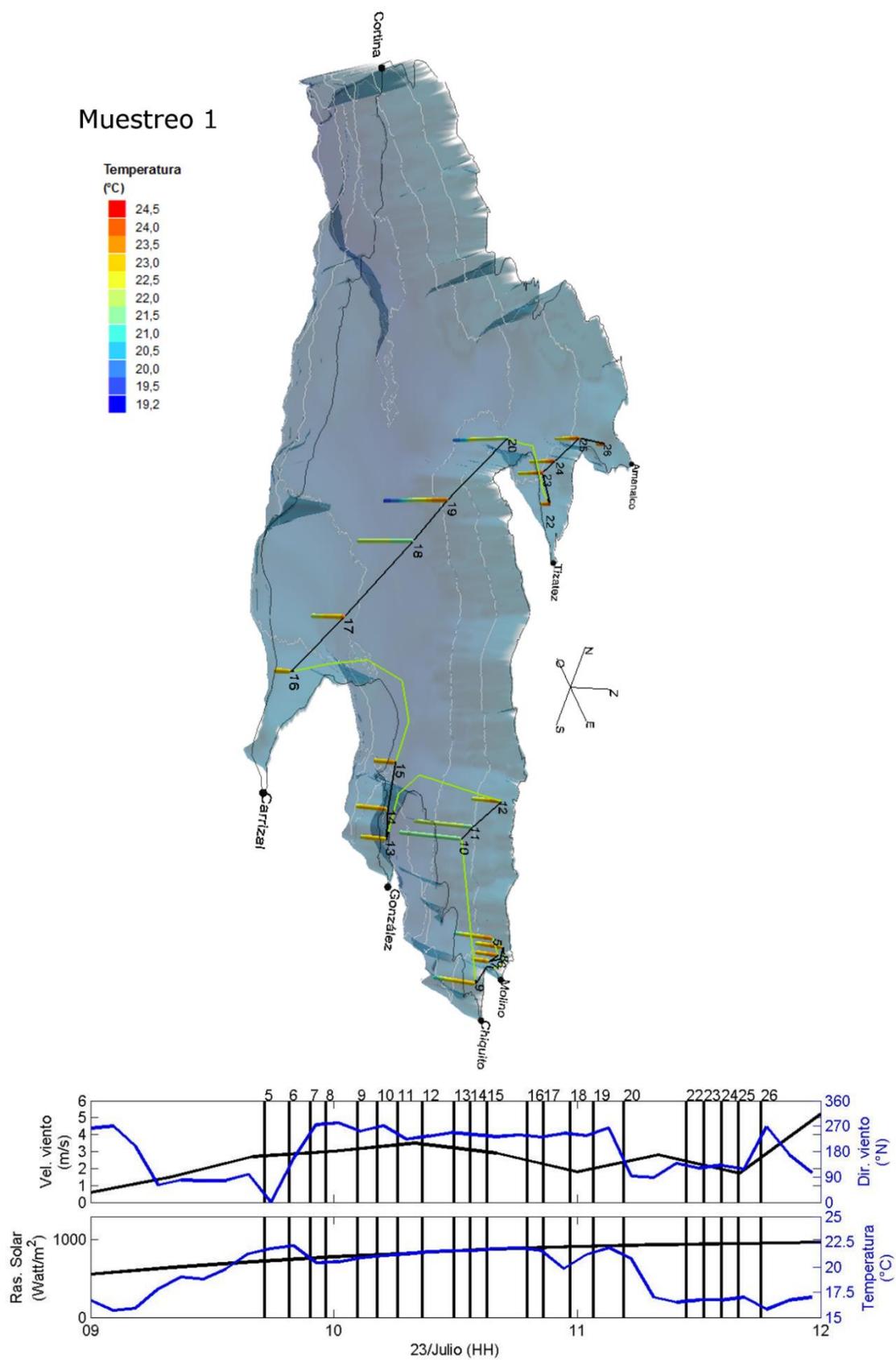
Después de procesar los datos medidos con el CTD marca Seabird, se obtuvieron un total de 73 perfiles distribuidos en cuatro muestreos. A continuación se presentan las condiciones meteorológicas y la distribución espacial de los perfiles obtenidos para cada muestreo. Las gráficas se generaron utilizando los tres ejes de referencia (x, y y z), debido a la proporción que hay entre la profundidad del embalse y su longitud, se generaron con una exageración vertical de 25x para apreciar los rasgos verticales. En la distribución de los muestreos se indica con líneas de colores los recorridos que se realizaron, las líneas de color negro indican los transectos en los que se dividieron los muestreos. A cada transecto se le asignó una letra para diferenciarlos. En las condiciones meteorológicas las líneas verticales representan los perfiles realizados durante cada muestreo.

El primer muestreo (Figura 21) comprende la parte este del embalse. Se inició a las 9:40 h en el sitio donde se instaló el arreglo de termistores, cercano a la desembocadura del río Molino. Se realizaron 22 lances a lo largo de 5 transectos, la última medición se realizó a las 11:45 h en la desembocadura del río Amanalco. No se muestra el perfil 21 debido a que durante la medición entro sedimento en el tubo del instrumento y no se obtuvieron datos.

Las condiciones meteorológicas durante el muestreo fueron relativamente homogéneas. El viento se mantuvo con una dirección promedio hacia el suroeste. La velocidad del viento aumento de 2.7 ms^{-1} al inicio del muestreo a 3.5 ms^{-1} a la 10:20 h, posteriormente disminuyo a 1.7 ms^{-1} hacia el final del muestreo, y se registró una ráfaga de 2.8 ms^{-1} a las 11:20 h. La radiación solar aumentó de manera constante desde 700 a 950 Watts m^{-2} . La temperatura aumento de 20.5 a 21 .5 °C.

Durante el segundo muestreo se intentó incluir las zonas en las que no se pudo medir durante el primer muestreo (Figura 22). El muestreo inicia con el perfil 27 a las 13:20 h en la desembocadura del río Amanalco. La última medición del muestreo se realizó a las 14:50 h. Se obtuvieron 13 perfiles agrupados en los dos transecto. El último transecto se suspendió debido al evento de precipitación con granizo que sucedió durante el muestreo.

La dirección del viento durante el muestreo cambió rápidamente de suroeste a oeste. La velocidad del viento aumentó de 1.8 ms^{-1} a 4.8 ms^{-1} durante las mediciones del primer transecto, disminuyó a 2.8 ms^{-1} al inicio del segundo transecto y aumento hasta 4.2 ms^{-1} al final del muestreo. La radiación solar tuvo una rápida disminución desde 1200 Wattsm^{-2} a las 13:20 h hasta 500 Wattsm^{-2} al finalizar el primer transecto, posteriormente se mantuvo muy cercana a 0 Wattsm^{-2} hasta el final del muestreo. La temperatura también descendió de manera rápida a lo largo del muestreo desde $21.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $16.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$. El evento de precipitación ocurrido inició cerca de las 14:00 h en la zona este del embalse y se desplazó hacia la cortina de la presa, el último perfil se midió dentro de la zona de precipitación. En el recorrido de este punto al puerto cayó granizo de alrededor de 2 cm de diámetro.



Muestreo 2

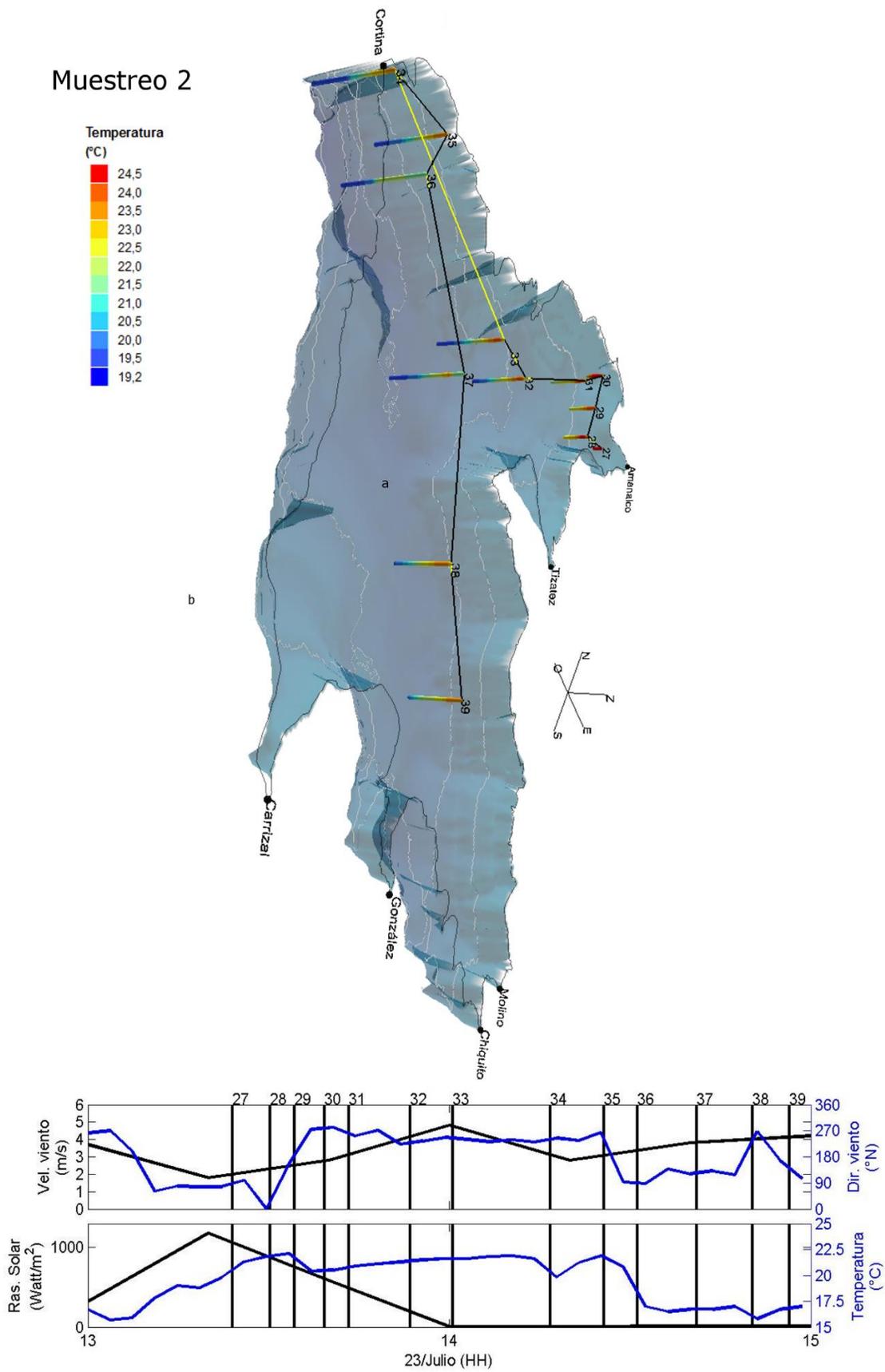


Figura 22. Perfiles de temperatura y condiciones meteorológicas medidos en el segundo muestreo.

Durante el segundo día las condiciones meteorológicas y la logística del muestreo, permitieron un mayor número de perfiles (Figura 23). El muestreo inicio a las 8:40 h, en el punto donde se instaló el arreglo de termistores frente al rio Molino. El primer transecto se realizó a lo largo del Eje A, se obtuvieron 10 perfiles, la última medición se realizó lo más cerca que se pudo de la boya propiedad de CONAGUA. En el segundo transecto se midieron 9 perfiles a lo largo del Eje B y se midió un perfil más frente al rio Tizatez. Al final del muestreo se midieron dos perfiles, formando un último transecto desde el margen sur de La Peña hasta la parte media de la bahía frente al rio González. La última medición del muestreo se realizó a las 11:20 h, en total se obtuvieron 22 perfiles distribuidos en los tres perfiles.

La dirección del viento al inicio del muestreo tenía una componente principal hacia el norte y cambio hacia el sur a partir del perfil 46. La velocidad del viento registrada al inicio fue de 2ms^{-1} , disminuyó a 0.5ms^{-1} a las 9:20 h, aumento a 3.2ms^{-1} a la mitad del segundo transecto y disminuyó a 1.2ms^{-1} hacia el final del muestreo. La radiación solar registrada al inicio del muestreo fue 560Wattsm^{-2} , al finalizar el muestreo aumento a $1,180\text{Watts m}^{-2}$. La presencia de nubes en la zona ocasionó que disminuyera a 300Wattsm^{-2} durante el primer transecto y a 700Wattsm^{-2} a las 11:00 h. Durante el muestreo la temperatura aumento de manera casi constante de $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $22.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, a las 10:20 h se observó un máximo de $22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En el cuarto y último muestreo se obtuvieron 17 perfiles (Figura 24). Inicio a las 12:40 h con el perfil 62, en el punto donde se ubicó el arreglo de termistores. Se midieron 7 perfiles más a lo largo del Eje A hacia la cortina de la presa. Durante el recorrido para iniciar las mediciones del segundo transecto la embarcación se quedó sin combustible frente a El Santuario, debido a esto se midieron dos perfiles (70 y 71) mientras la embarcación se encontraba a la deriva. Posteriormente se midió a lo largo del Eje B, desde la desembocadura del rio Amanalco hasta el rio Carrizal y finalmente se midió un último perfil frente al rio González a las 14:30 h.

La dirección del viento cambio de este a suroeste durante el muestreo. La velocidad del viento tuvo en promedio 2ms^{-1} , con dos máximos de 3 y 2.5ms^{-1} a las 13:20 y 14:00 h, respectivamente. La temperatura se mantuvo casi constante, con una máxima de $23.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 13:20 h y mínima de $23.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a las 13:40 h. La radiación solar fue de 535.4Wattsm^{-2} al inicio del muestreo disminuyendo a 353Wattsm^{-2} a las 13:00 h y aumentando de manera casi constante hasta 1025Wattsm^{-2} al final del muestreo.

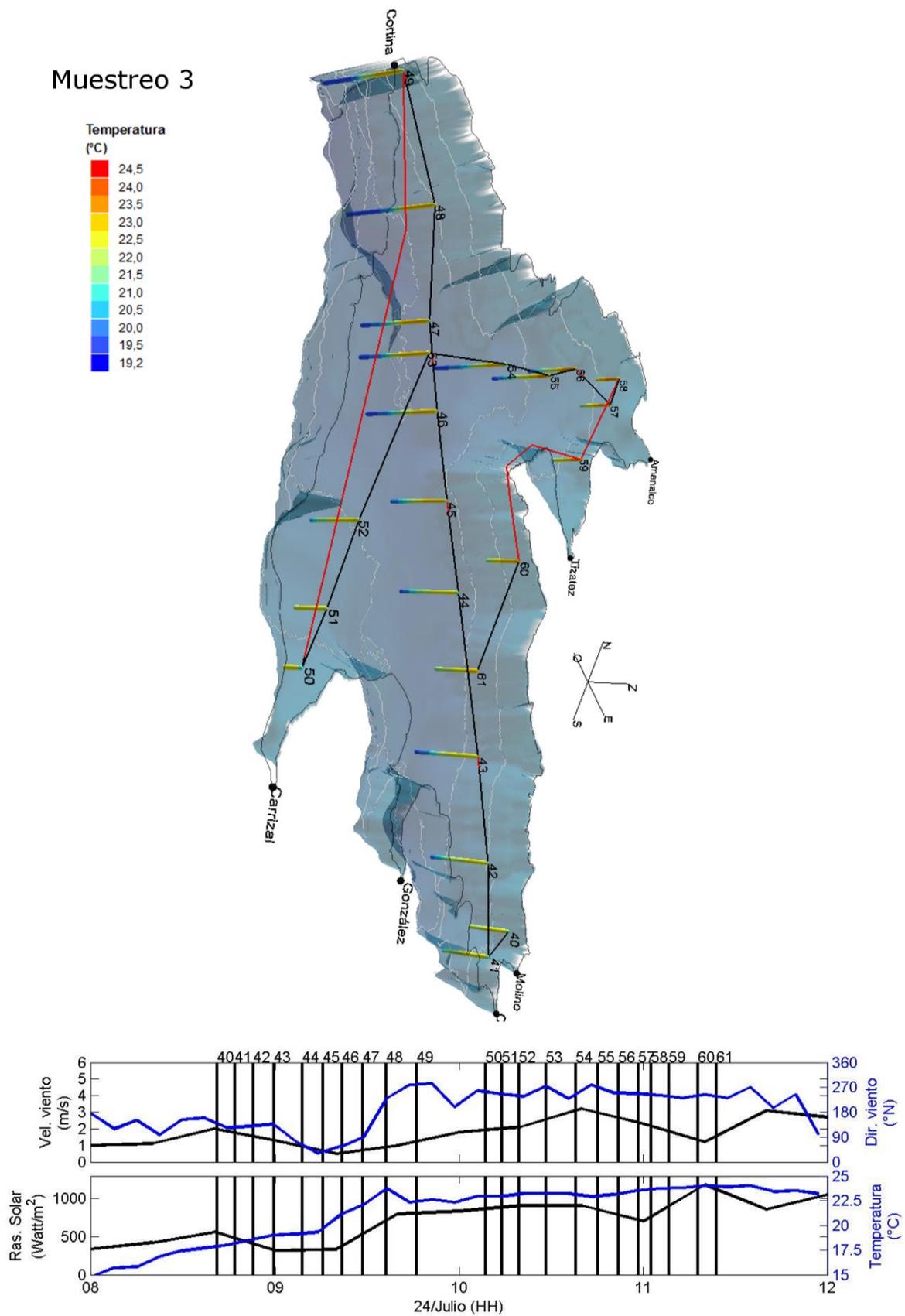


Figura 23. Perfiles de temperatura y condiciones meteorológicas medidos en el tercer muestreo.

Muestreo 4

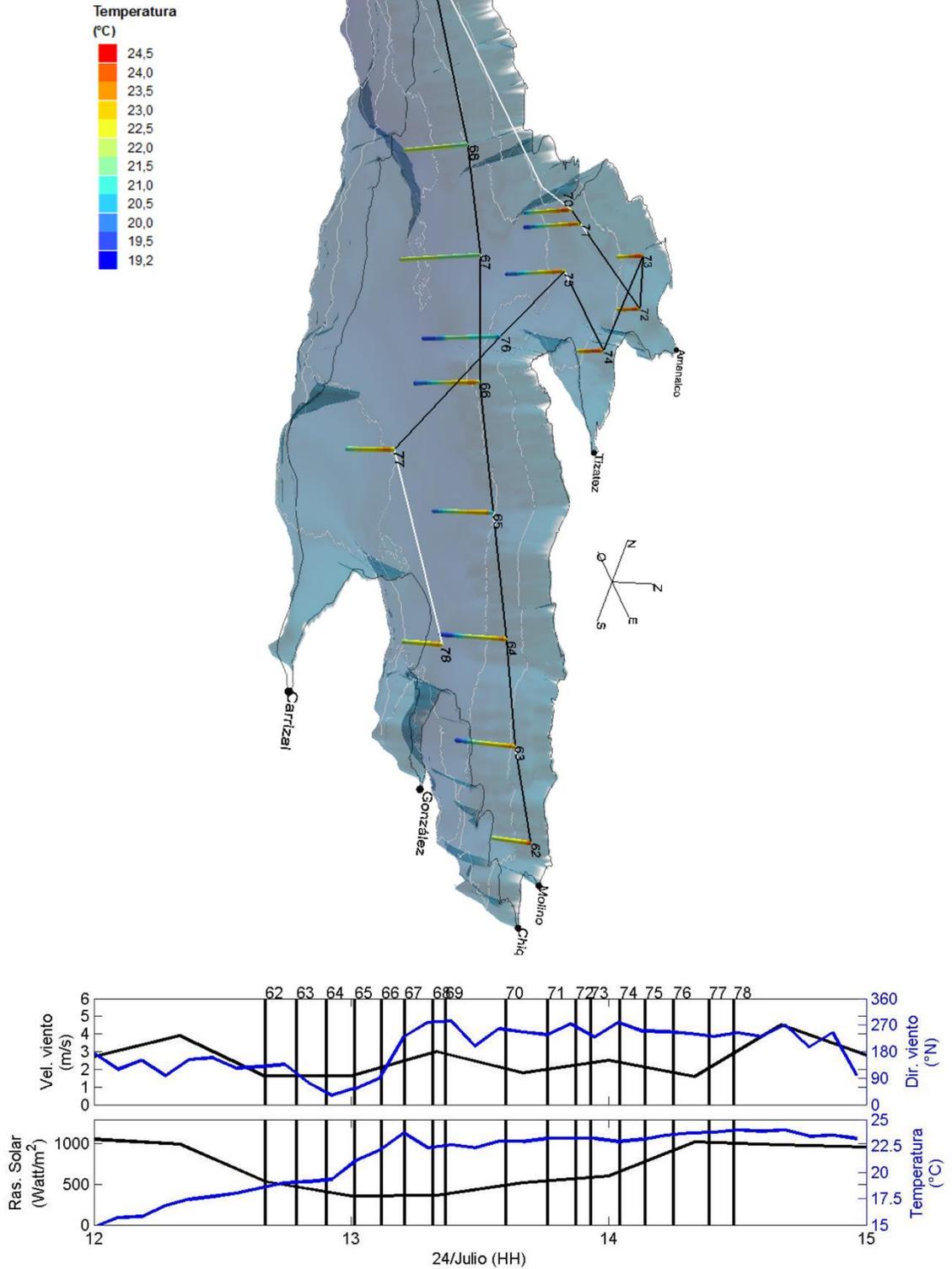


Figura 24. Perfiles de temperatura y condiciones meteorológicas medidos en el cuarto muestreo.

3.2 Variación temporal de temperatura

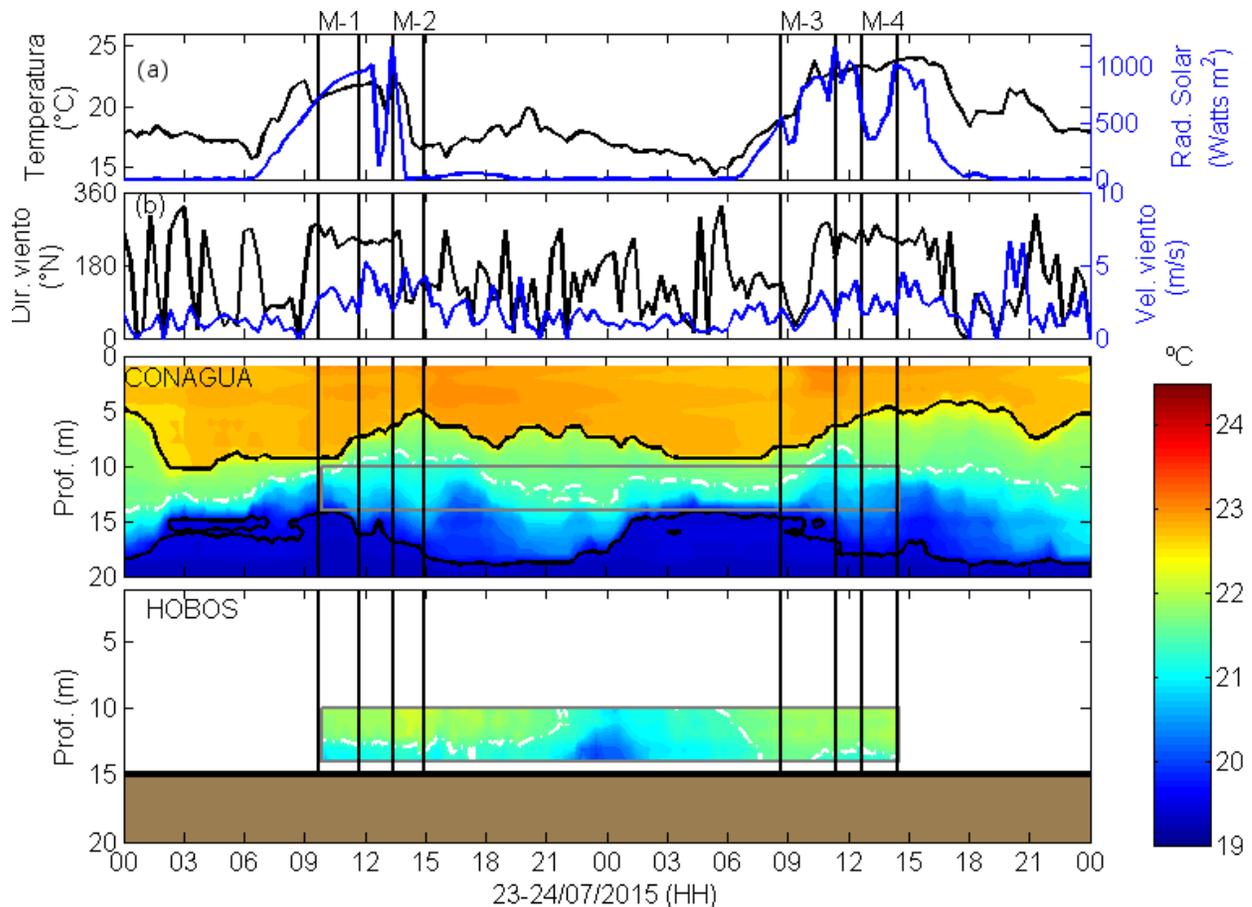


Figura 25. Variación de temperatura ambiental y radiación solar (a), la dirección y velocidad del viento (b) y la distribución vertical de temperatura medida en la zona de la boya (CONAGUA) y en el extremo este del Eje A (HOBOS), las líneas negras representan la isoterma de 22.5 y 19.6 °C, la línea blanca la isoterma de 19.5 °C. Las líneas verticales indican los límites de los muestreos. El recuadro gris en el panel de CONAGUA representa la cobertura de datos medidos por los termistores HOBOS.

En la figura 25 se muestra la variación temporal de temperatura en la columna de agua, medida por los arreglos de termistores en la cortina y al extremo este del embalse. El registro de datos obtenidos con los termistores HOBO, inició a las 09:50 h del 23 de Julio y finalizó a las 14:30 h del 24. Los datos se distribuyen entre los 10 y 14 m de profundidad. Los datos medidos con los termistores instalados en la boya, se muestrean para los dos días y comprenden del primer metro a los 20 metros de profundidad. Debido a la diferencia en el rango de profundidad de los datos, se utilizó la isoterma de 21.5 °C como referencia para comparar la variación vertical de la temperatura en los dos sitios. Los datos se graficaron

en la misma escala, en la gráfica que corresponde al sitio de la boya se indica con un recuadro gris la cobertura de los datos medidos con los termistores HOBO.

La columna se encontraba estratificada en tres capas (Figura 25). El epilimnio presentó una temperatura promedio de 22.8 °C y máxima de 23.1°C, esta capa estuvo delimitada por la isoterma de 22.5 °C, que tiene una profundidad promedio de 9.4 m. En el metalimnio se observó que la temperatura descendió con un gradiente vertical casi constante, hasta los 19.6 °C. En el hipolimnio la temperatura promedio fue 19.4 °C y mínima de 19.2°C.

La profundidad del epilimnio tuvo variaciones entre los 4 y los 10 m. Se observa que la profundidad de la capa fue mayor durante la noche, cuando el viento soplaba desde el norte y la temperatura disminuía. La profundidad en el metalimnio tuvo variaciones entre los 14 y 19 m. La variación en la profundidad de esta capa muestra un comportamiento inverso al observado en la profundidad del epilimnio. Lo que sugiere que al ascender el epilimnio, también lo hace el agua que se encuentra en el hipolimnio y esto ocasiona que la temperatura del metalimnio descienda. El gradiente vertical de temperatura es menor durante este proceso.

Para poder apreciar los cambios de temperatura en el epilimnio con respecto al tiempo, se graficaron únicamente las temperaturas mayores a 22.5°C (Figura 26). Al inicio de la serie se observaron los valores mínimos (menores 22.7 °C) hasta las 03:00 h, cuando comienza a aumentar la temperatura en el epilimnio. La temperatura en el epilimnio no aumentó de manera homogénea, la mayor temperatura se observa en la superficie y entre los 3 y 4 m. A partir de las 09:00 h la temperatura aumenta rápidamente. La temperatura aumentó hasta las 16:00 h, cuando se observan los máximos de ese día (23 °C). A partir de esa hora la temperatura descendió más rápido, a los 2 y 5 m de profundidad, hasta que la capa se homogenizó a una temperatura de 22.7 °C, después de las 06:00 h. El segundo día la capa se comenzó a calentar a partir de las 08:00 h, con un gradiente vertical que desciende hacia el fondo, a diferencia del día anterior. La máxima temperatura de 23 °C se observa a las 11:45 h. La radiación solar incidente presentó un mínimo después de las 12:00 h y aumentó de nuevo cerca de las 15:00, en este periodo se observa que la temperatura en la superficie también disminuyó. El epilimnio comenzó a enfriarse a partir de las 15:00 h hasta el final del registro.

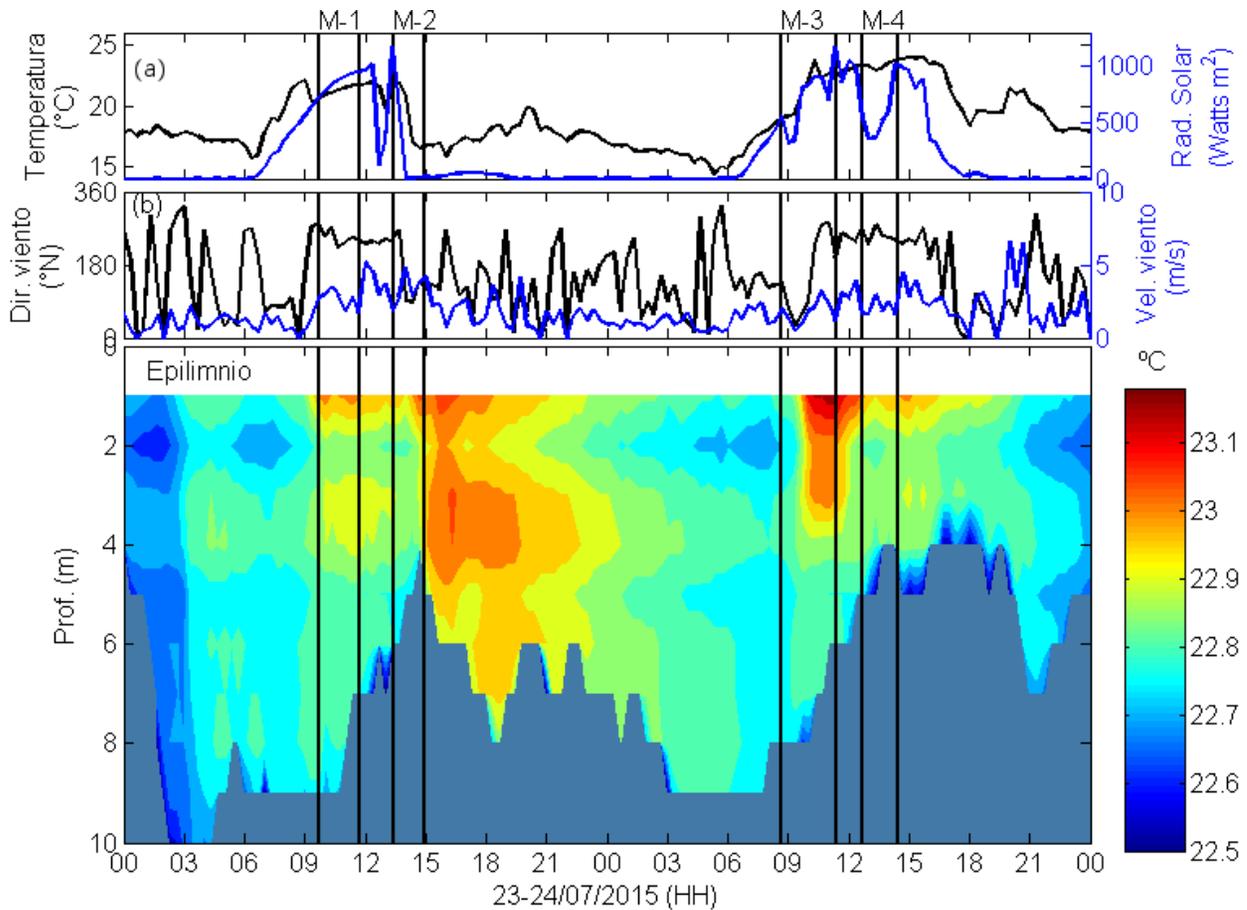


Figura 26. Variación de temperatura ambiental y radiación solar (a), la dirección y velocidad del viento (b) y distribución vertical de temperatura en el epilimnio (c). Datos medidos por CONAGUA.

La profundidad de la capa tuvo variaciones durante el periodo de mediciones. Al inicio de la serie la interface se encontraba a 5 m de profundidad, descendió hasta los 10 m a las 03:00 h. Llegó a la profundidad de 4 m a las 15:00 h y descendió a los 8 m a las 18:00 h. Posteriormente se observa que tuvo variaciones entre los 6 y 8 m hasta las 03:00 h, cuando descendió hasta los 9 m. El segundo día la profundidad de la capa disminuyó rápidamente a los 4 m, al calentarse. Posteriormente se mantuvo somera, a las 20:00 h comenzó a descender hasta los 7 m, a partir de las 21:00 h la profundidad disminuyó hacia el final de la serie.

La temperatura medida cerca del rio Molino con los termistores HOBO de CICESE (Figura 26), se distribuyó entre los 19.9 °C y 22.2 °C. Estos valores se encuentran dentro del rango de temperatura observado en el metalimnio. La columna se encontraba estratificada en dos capas, delimitadas por la isoterma de 21.5°C. La profundidad de la isoterma tuvo variaciones alrededor de los 12.5 m, al inicio de

la serie. A las 21:00 h la isoterma ascendió a más de los 10 m. La porción de la columna se homogenizó con una temperatura promedio de 20.6 °C. A partir de las 05:30 h la zona se calentó y la isoterma descendió a menos de 14 m hacia las 07:30 h. A partir de las 10:00 h se observa que la temperatura en la zona disminuyó provocando el ascenso de la isoterma.

En los datos medidos cerca de la cortina se observa que la profundidad de la isoterma de 21.5 °C tuvo un comportamiento inverso al del otro extremo del eje Este. La diferencia en la profundidad de la isoterma en los dos extremos puede estar influenciada por una onda interna, que es generada debida al esfuerzo del viento sobre la superficie.

En la figura 25 y 26 se observa que los 4 muestreos se realizaron durante la fase en la que la zona de la cortina el metalimnio asciende y el epilimnio comienza a calentarse. En los datos cercanos al río Molino la isoterma de los 21.5 °C se encuentra a una profundidad casi constante entre los 12 y 13 m durante los muestreos del primer día, y durante el segundo día la isoterma se encuentra por debajo de los 14 m y asciende hacia la mitad del muestreo a los 13 m.

3.3 Variación espacial

3.3.1 Temperatura

A continuación se presenta la distribución vertical y horizontal de temperatura obtenida con los perfiladores CTD. En general las mediciones de temperatura en el embalse de la presa Valle de Bravo muestran que las zonas someras en las márgenes del lago, que también están asociadas a las desembocaduras de los ríos, tuvieron las mayores temperaturas superficiales. Espacialmente el rango vertical de temperatura aumenta con la profundidad. La zona más cálida en el embalse fue la bahía donde desembocan los ríos Amanalco y Tizatez. En el centro del embalse se observaron eventos de menor temperatura es menor en la superficie y aumenta con la profundidad, los valores de temperatura en la columna de agua durante estos eventos se asocian con el rango definido para el metalimnio en la variación temporal.

3.3.1.1 Datos medidos con el CTD marca Seabird

Durante el primer muestreo (Figura 27) el epilimnio se observó desde la superficie a los 5 y 10 m de profundidad. El promedio de temperatura de esta capa fue de 23°C. Las zonas someras en los márgenes del embalse, presentaron las menores temperaturas. La máxima temperatura fue 23.8 °C y se observó en el **transecto e**. En la superficie se observaron valores de temperatura asociados con el metalimnio, en el margen oeste de La Peña (perfil 20), al centro del **transecto d** (perfil 18) y hacia el sur del **transecto b** (perfil 10). El hipolimnion se encontraba hacia el centro del embalse por debajo de los 19 m de profundidad.

Durante el segundo muestreo el epilimnio en el **transecto a** aumentó un grado centígrado con respecto al muestreo anterior (Figura 28). En esta zona la temperatura promedio de la capa fue 24.3 °C y descendió cerca de un grado centígrado hacia el centro del embalse. El metalimnio ascendió a partir de desembocadura del río Amanalco hacia el centro del embalse. Esta tendencia se observa en los perfiles 36 y 37 del **transecto b**, en los que el metalimnio se encontraba sobre el epilimnio, desplazando el agua cálida de la superficie, que se observa al este del **transecto b**. En la zona de la cortina la estratificación se mantuvo, el epilimnio tuvo una profundidad máxima de 8 m. En esta zona el hipolimnio se encontraba a los 16 m y descendió a 20 m hacia el centro. El comportamiento del metalimnio que se observó en la zona centro, puede estar asociado con el aporte de los ríos Amanalco y Tizatez a esta capa, la cual ascendió cuando el epilimnio fue desplazado por el arrastre del viento, que a partir de la mitad del muestreo se encontraba en su fase de mayor velocidad, con dirección hacia el noreste.

Durante el tercer muestreo el epilimnio se encontraba a una profundidad promedio de 8m, esta capa se observó de La Peña hacia la cortina de la presa y desde la desembocadura del río Amanalco hasta la zona centro del embalse (Figura 29). En la zona cercana a la cortina, el hipolimnio se encontraba por debajo de los 16 m de profundidad y descendió 20 m hacia el río Molino. El metalimnio tuvo un grado centígrado menos que la mañana del día anterior. En las últimas dos mediciones del tercer muestreo (**transecto c**), la capa superficial se calentó, y el metalimnio descendió a menos de los 5 m de profundidad. Este comportamiento puede estar asociado al calentamiento por la radiación solar.

En la Figura 30 se observa que la temperatura en el epilimnio aumentó un grado centígrado durante el cuarto muestreo y la capa se desplazó hacia el este. El límite de la capa se encontraba a 9 m de profundidad en la zona centro y ascendió a casi 2 m en el extremo este del **transecto a**. En la zona norte del **transecto b**, la temperatura en la capa fue más homogénea y su profundidad disminuyó a casi 5 m.

En los perfiles 67 y 68 del **transecto a**, localizados en el centro del embalse, la temperatura de la columna de agua se asocia con valores definidos en el rango del metalimnio. En la zona centro, donde se intersectan los transectos, se observa como la temperatura descendió en la superficie del perfil 76, desplazando al epilimnio con respecto al muestreo anterior. La zona de la cortina se mantuvo estratificada, el epilimnio se encontraba sobre los 8 m y el metalimnio descendió hasta los 23 m. En el perfil medido en esta zona (perfil 69) no se observa la isoterma de los 19.6 °C que limita el hipolimnion.

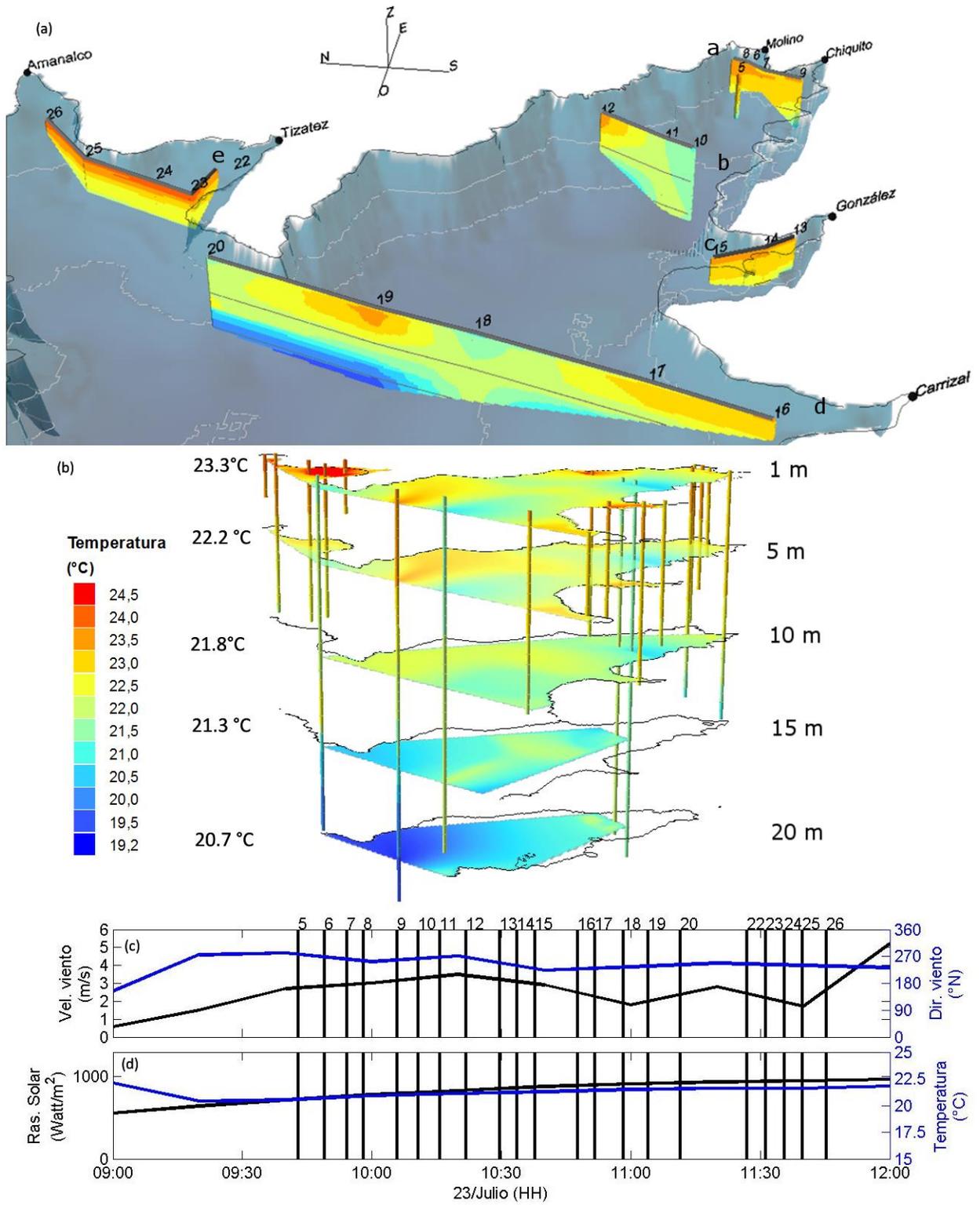


Figura 27. Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del primer muestreo. Seabird, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).

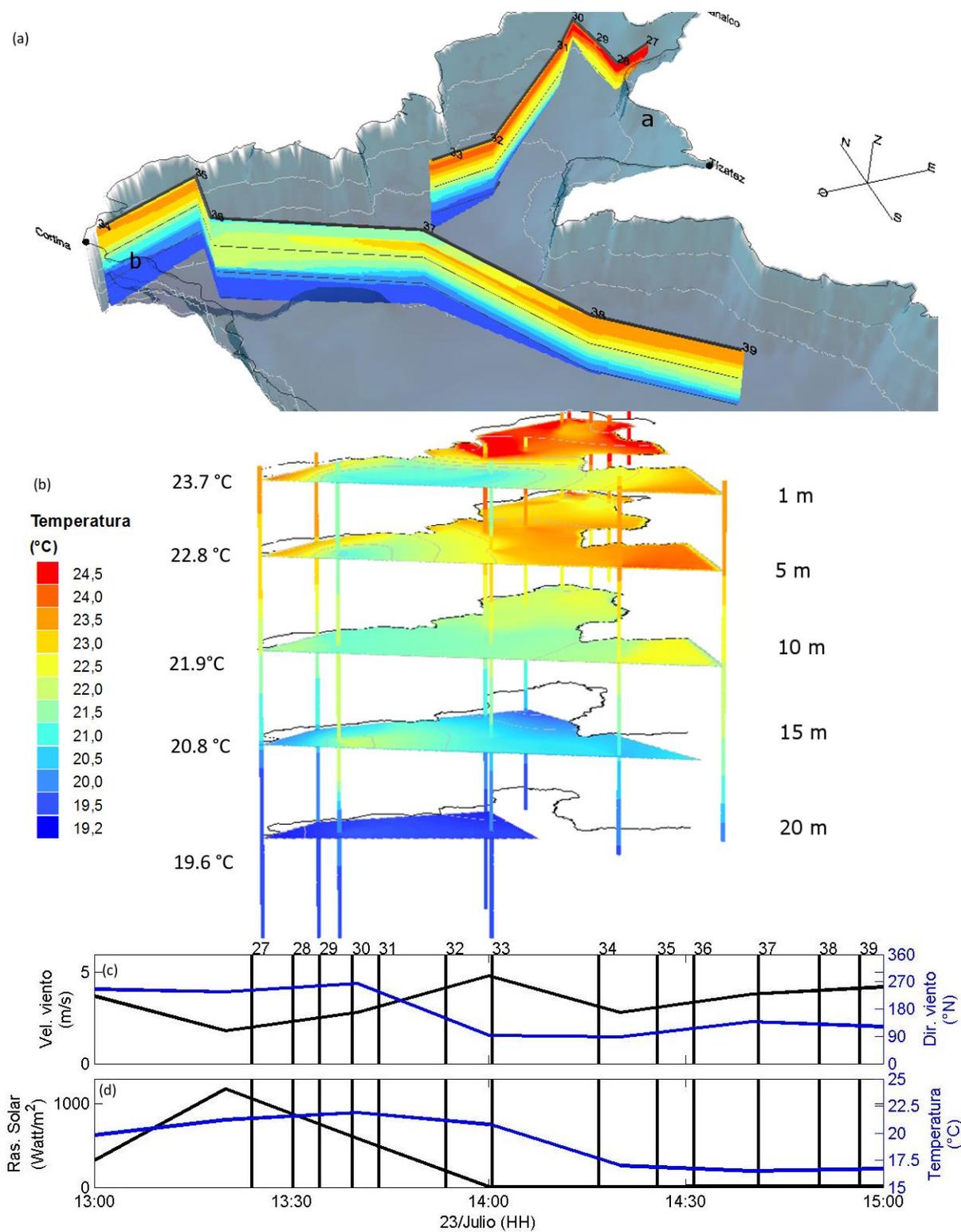


Figura 28. Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del segundo muestreo. Seabird, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).

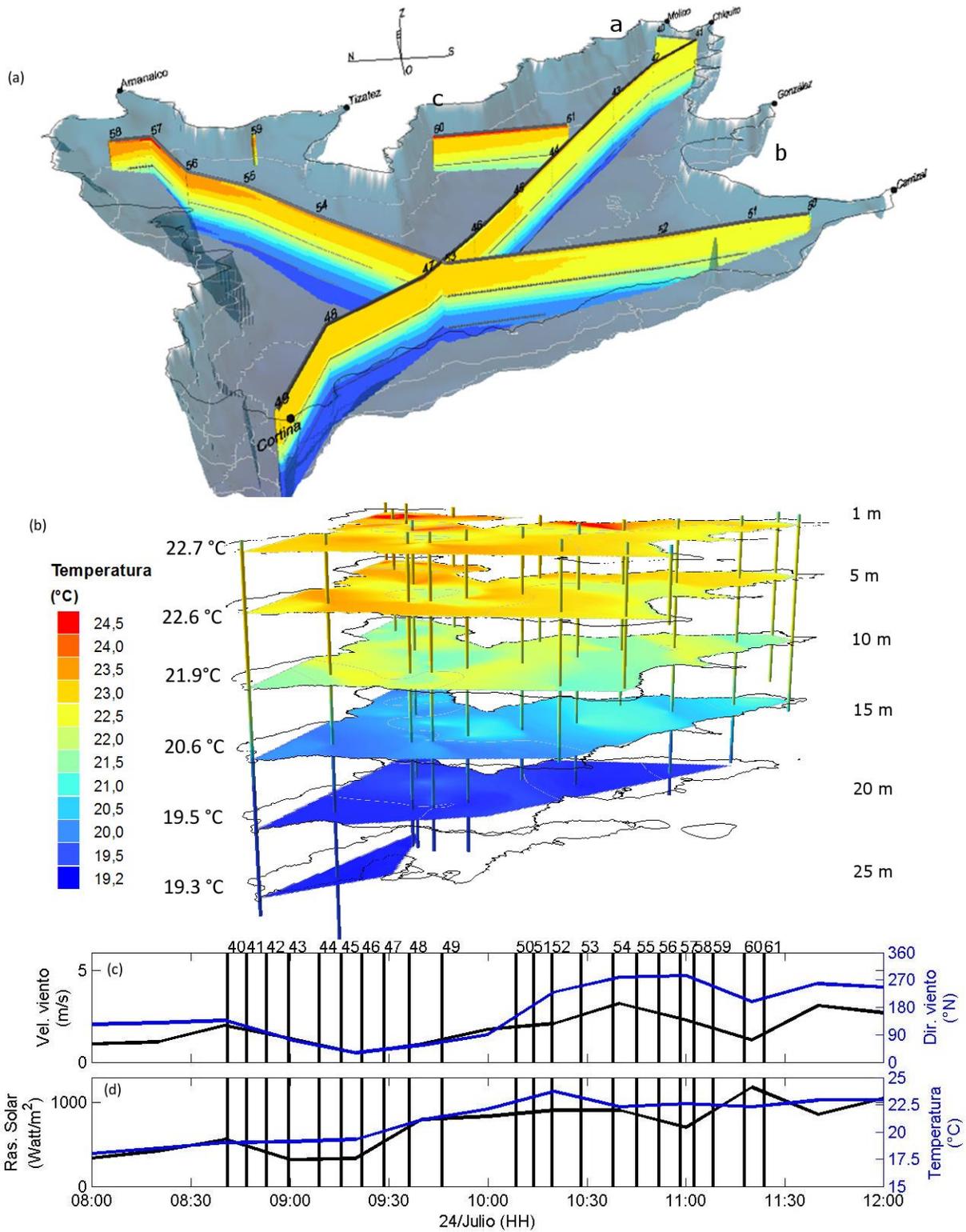


Figura 29. Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del tercer muestreo. Seabird, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).

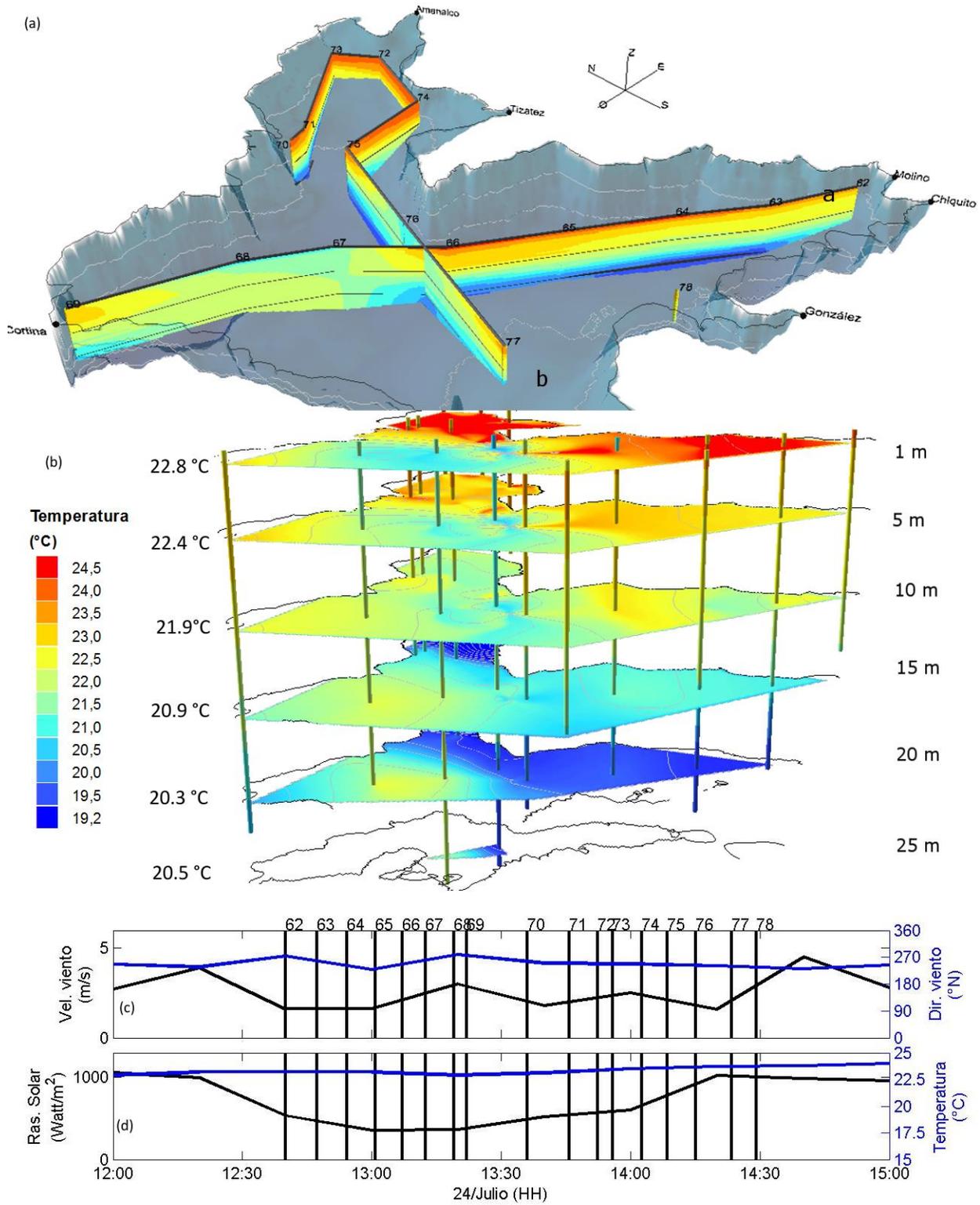


Figura 30. Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del cuarto muestreo. Seabird, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).

3.3.1.1 Datos medidos con el CTD marca CastAway

Durante el primer muestreo los datos muestran que el embalse se encontraba estratificado verticalmente con un gradiente similar en todos los transectos interpolados (Figura 31). El epilimnio se observa a un máximo de 10 m en el **transecto c**, la mayor temperatura se encontró en el **transecto e**. El hipolimnio solo se observa en el **transecto d** después de los 21 m.

En el segundo muestreo se observó que la temperatura aumentó y se homogenizó en la capa superficial hacia el extremo este del embalse (**transecto a**), (Figura 32). En el margen del río Amanalco esta capa tiene la mayor temperatura y disminuye hacia el centro de la cortina. En promedio esta capa se observa sobre los 8 m. El metalimnio ocupa hasta un máximo de 21 m, en la zona centro del embalse.

Durante el tercer muestreo la temperatura en el epilimnio disminuyó un grado centígrado con respecto al día anterior (Figura 33). En la bahía del río Amanalco y hacia la cortina se observó la mayor temperatura en esta capa. En este muestreo se observa como en la zona centro del embalse, sobre el Eje A, la temperatura disminuye con respecto a la zona de la cortina y el perfil 45. Durante el segundo transecto en esta zona, la superficie se calentó medio grado centígrado, con respecto al primer transecto. El hipolimnio se encuentra a partir de los 20 m.

Durante el último muestreo la temperatura aumentó en el epilimnio cerca de medio grado centígrado, en la zona de la cortina hacia La Peña. La máxima profundidad del epilimnio fue de 8 m en la zona centro y mínima de 2 m en el extremo este del eje (Figura 34). No se observó un ascenso del metalimnio, entre El Santuario y la zona centro del Eje A. En la zona más somera de la bahía del río Amanalco la temperatura aumentó hasta un grado centígrado. El hipolimnio se observa por debajo de los 20 m de profundidad, excepto en La Peña en la zona del Eje A, donde el metalimnio desciende hasta el fondo.

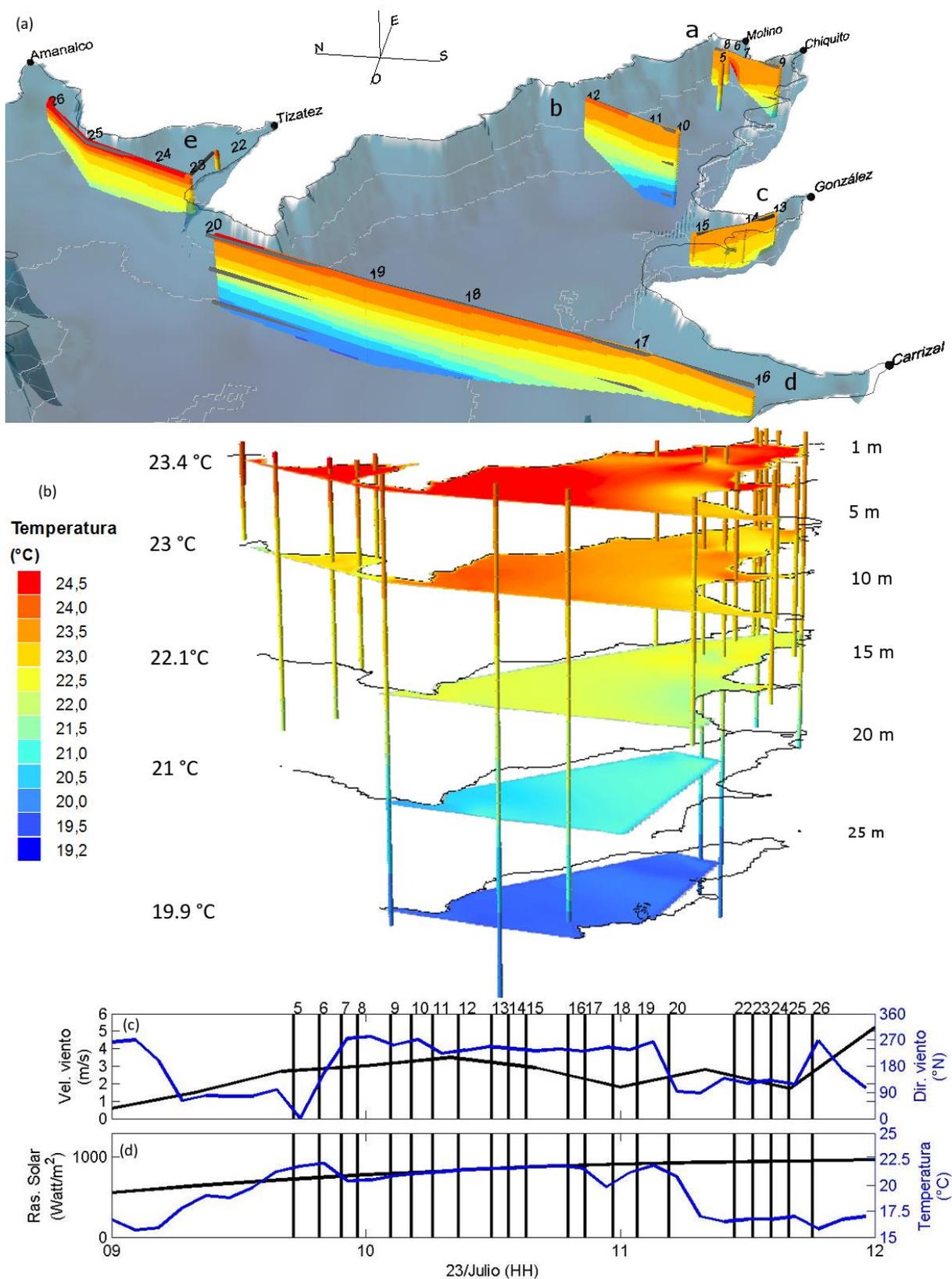


Figura 31. Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del primer muestreo. CastAway, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).

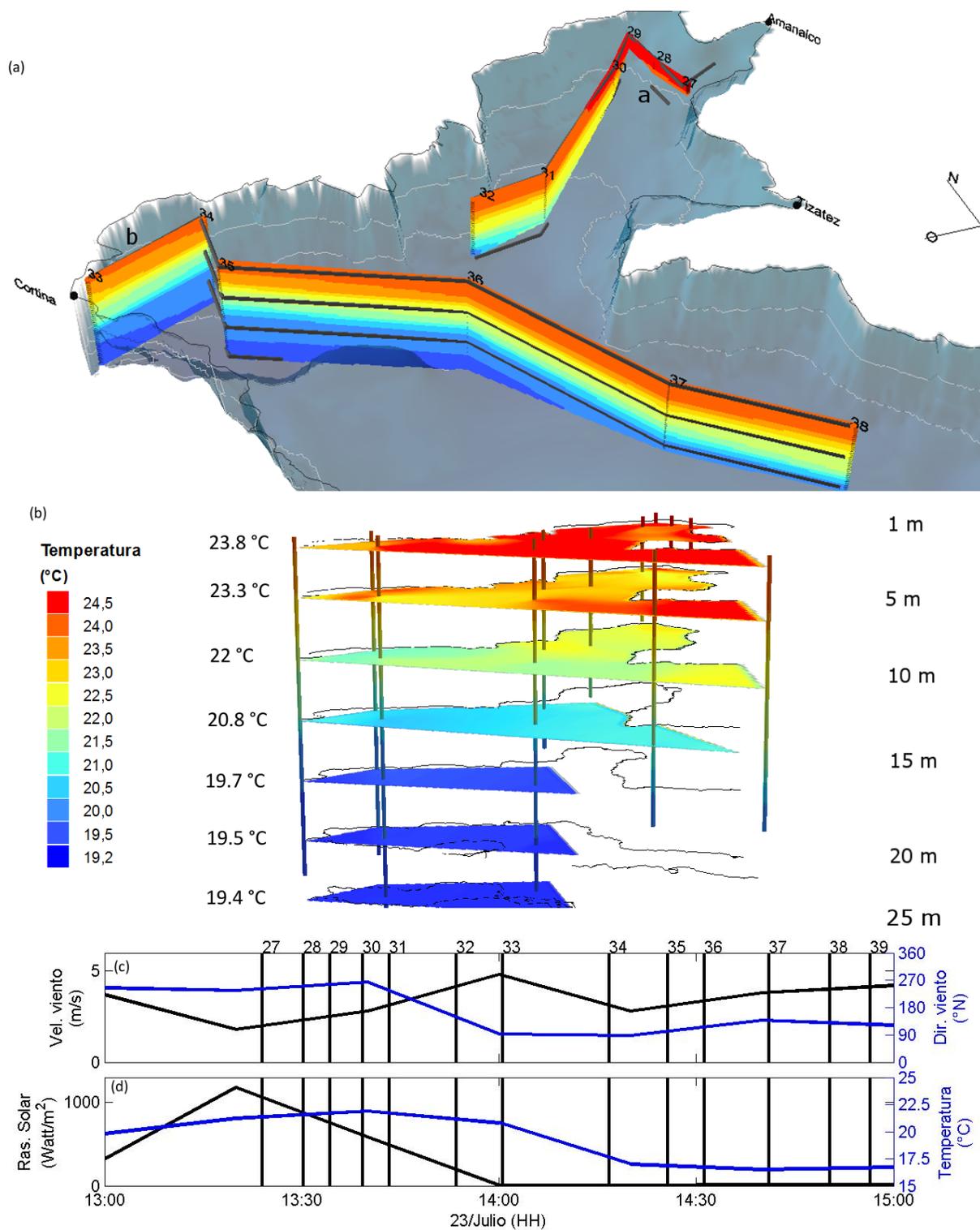


Figura 32. Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del segundo muestreo. CastAway, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).

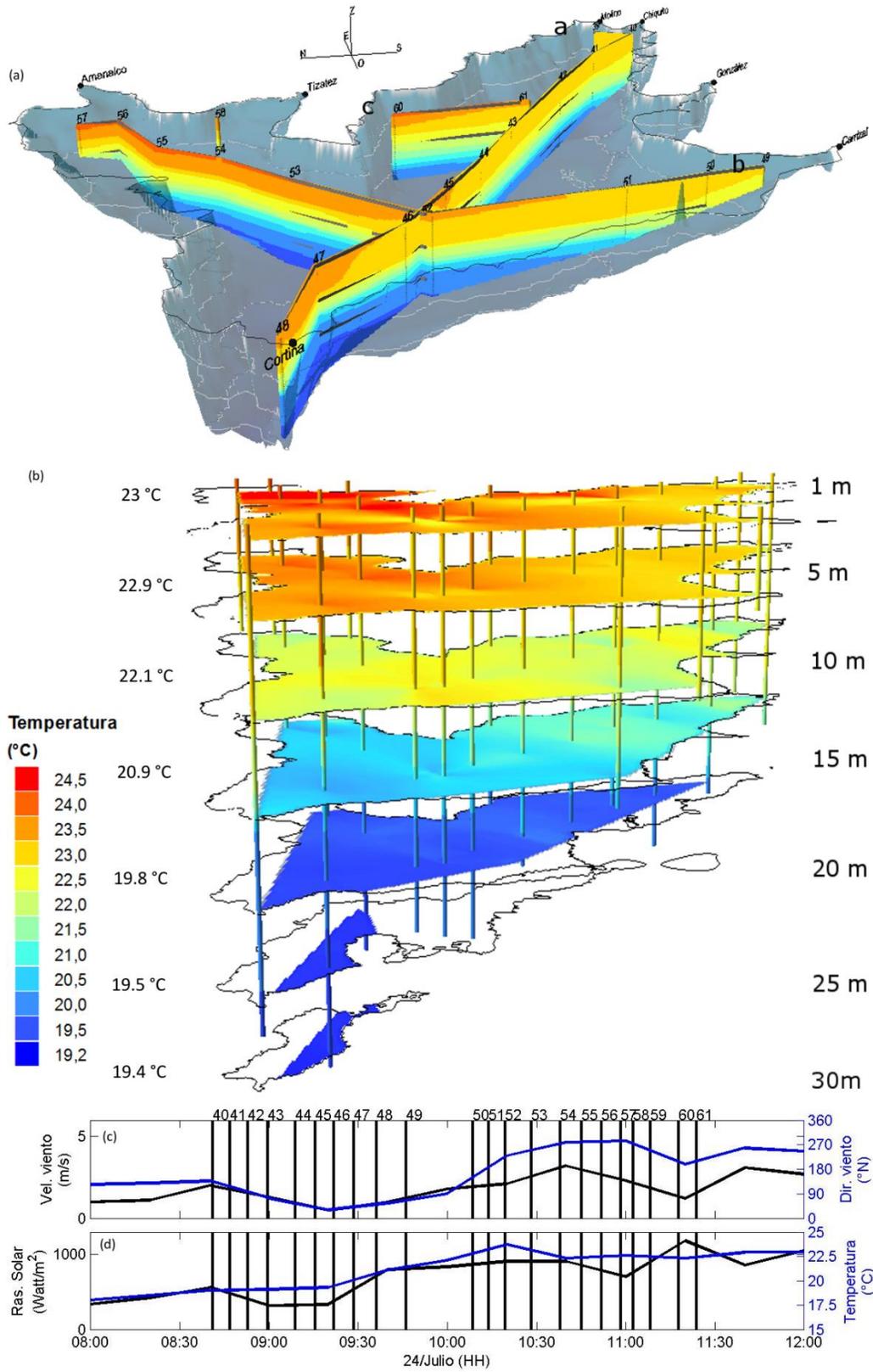


Figura 33. Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del tercer muestreo. CastAway, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).

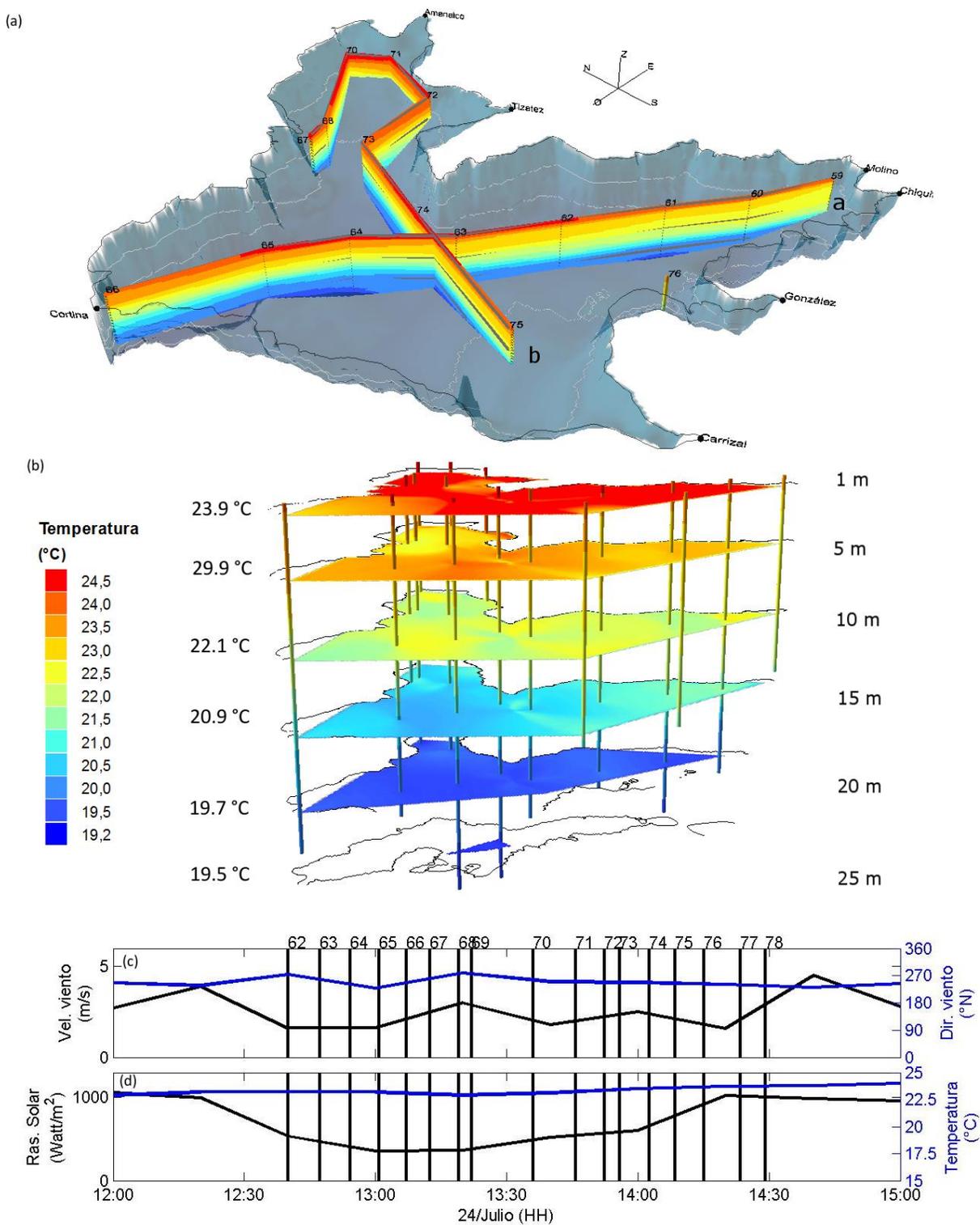


Figura 34. Secciones transversales de temperatura (a), horizontales en el lado izquierdo se indica el promedio de temperatura de la capa (b) de temperatura, obtenidas a partir de las mediciones del cuarto muestreo. CastAway, dirección y velocidad del viento (c) y temperatura y radiación Solar (d).

3.3.2 Turbidez

Para complementar las mediciones de temperatura se utiliza el parámetro de turbidez, que se define como una expresión de las propiedades ópticas de un líquido debida a la dispersión y absorción de la luz que es transmitida a través de una muestra. Es afectada por la presencia de materia disuelta y materia suspendida, como arcillas, limos, materia orgánica, microalgas y otros organismos microscópicos, ácidos orgánicos y colorantes.

A continuación se muestran los resultados de turbidez medidos con el CTD Seabird. En general se observa que la turbidez tuvo un comportamiento asociado a la estratificación térmica. En el hipolimnio los valores fueron cercanos a cero, presentando entre los 9 y a 16 UNT en la superficie. El metalimnio tuvo valores promedio menores a 3 UNT, en las zonas influenciadas por el aporte de los ríos, se observa que aumentó a más de 16 UNT y disminuyó con la distancia hacia la cortina.

Durante el primer muestreo se observó la mayor turbidez en la desembocadura del río Amanalco (Figura 35). En la desembocadura del río Molino los valores aumentaron hacia el margen norte. En el **transecto b**, se observa que la turbidez aumentó entre los 11 y 18 m, en la zona norte del transecto donde la profundidad del embalse es menor. En el **transecto d**, la distribución de turbidez fue más homogénea por debajo del epilimnio, aumentando desde la zona somera hacia la desembocadura del río Carrizal.

En el segundo muestreo se observa la influencia del río Amanalco entre los 12 y 16 m de profundidad, la turbidez tuvo valores cercanos a 18 UNT en la desembocadura del río y disminuyó con un gradiente horizontal hasta 6 UNT al final del **transecto a** (Figura 36). La influencia del río llegó hasta el **transecto b**, entre los 12 y 14 m de profundidad con valores entre 5 y 3 UNT. En el epilimnio la mayor turbidez se estuvo en la zona de la cortina (14.5 UNT), pero en promedio esta capa varió entre 10 y 11 UNT

En el tercer muestreo la turbidez en el embalse aumentó. Asociado al aporte de sólidos suspendidos por los ríos, que tuvieron un mayor caudal a la precipitación del día anterior (Figura 37). En la desembocadura del río Amanalco, la influencia de la descarga alcanzó 400 m más que la observada el día anterior, entre los 10 y 18 m de profundidad con valores cercanos a 20 UNT. La influencia del río Molino se observa a más de un kilómetro desde el inicio del **transecto a**.

La distribución de turbidez durante el cuarto muestreo, fue muy similar al muestreo anterior (Figura 38). A lo largo del **transecto a**, la capa superficial ascendió 2 m, con una turbidez de 14 UNT en la cortina y de

11 UNT en el río Molino. En el **transecto b** aumentó la turbidez asociada a la desembocadura de los ríos Amanalco y Tizatez.

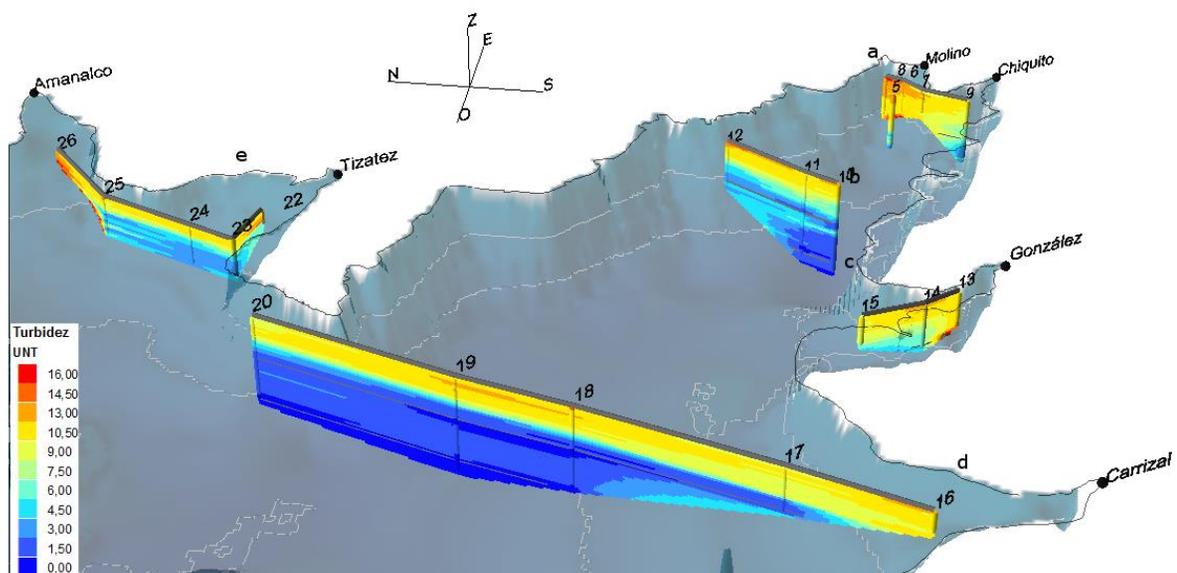


Figura 35. Secciones transversales de turbidez, obtenidas a partir de las mediciones del primer muestreo.

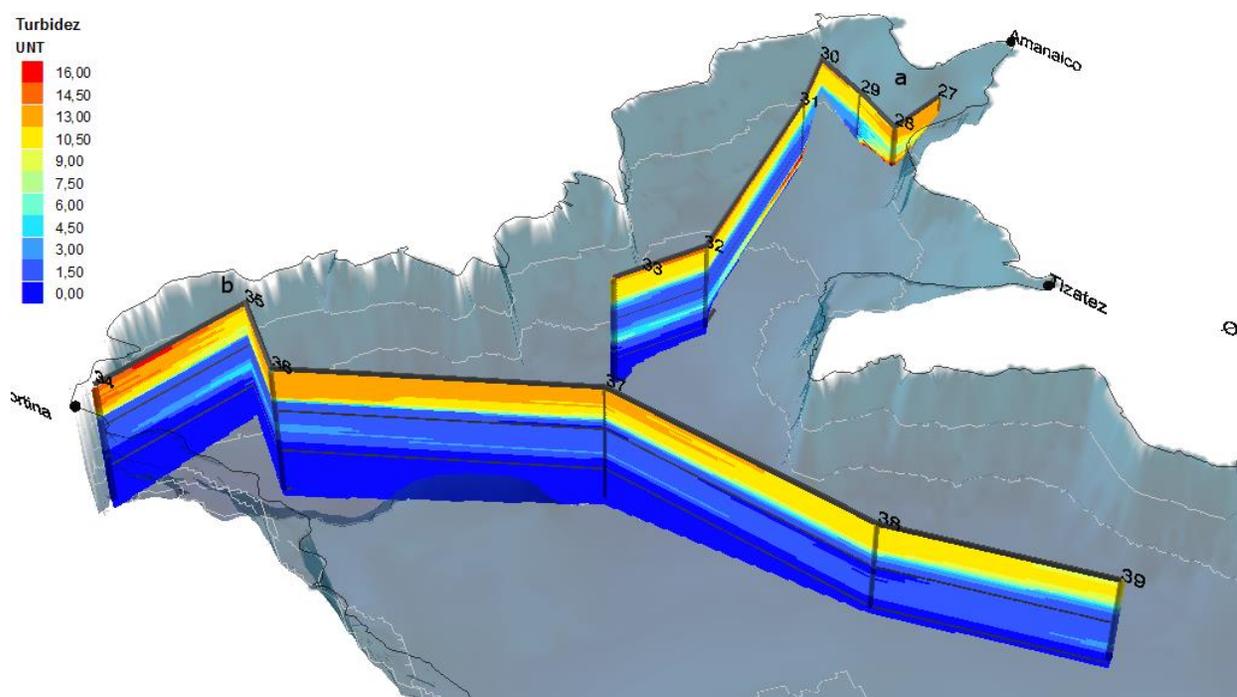


Figura 36. Secciones transversales de turbidez, obtenidas a partir de las mediciones del segundo muestreo.

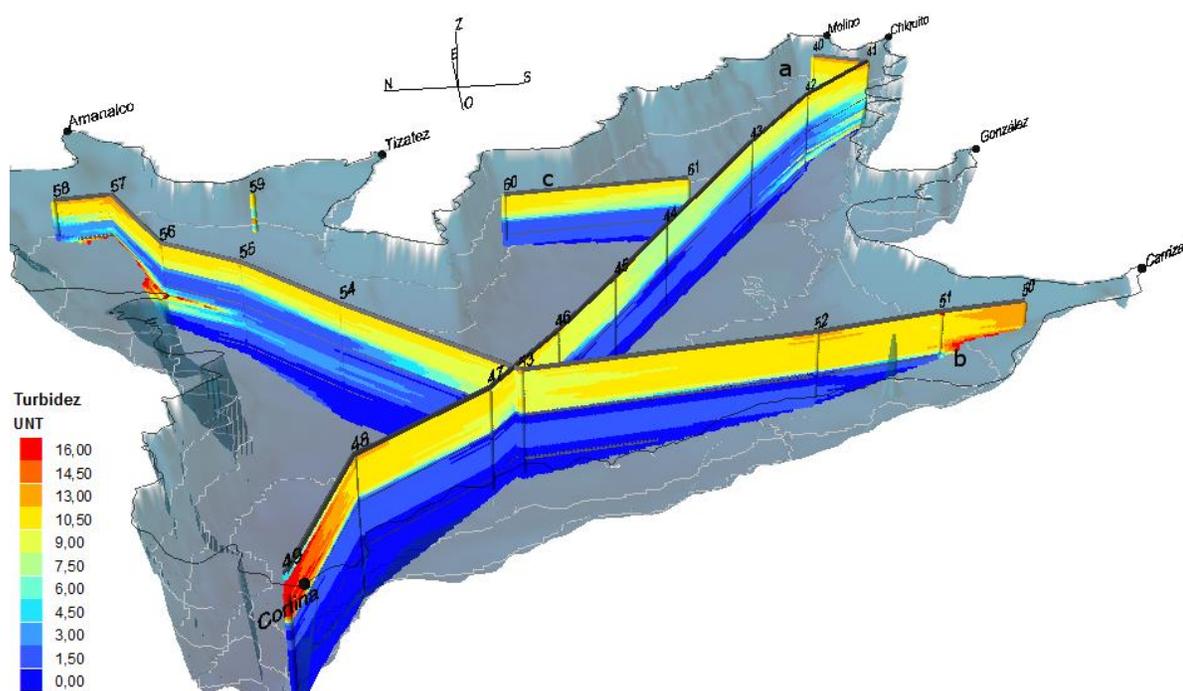


Figura 37. Secciones transversales de turbidez, obtenidas a partir de las mediciones del tercer muestreo.

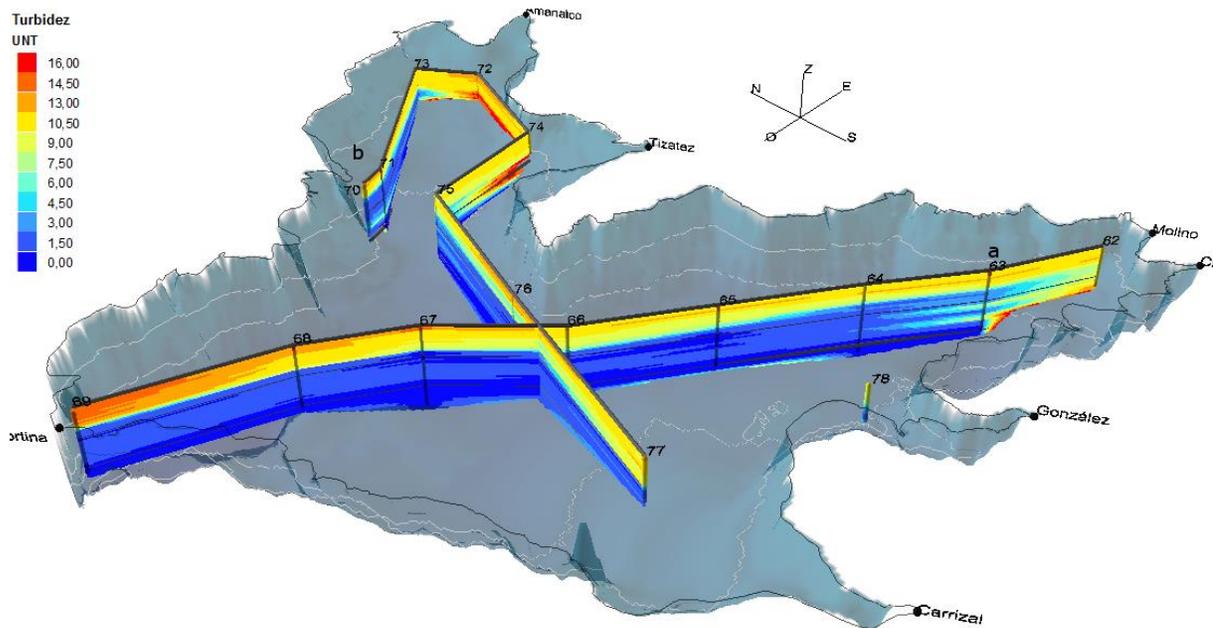


Figura 38. Secciones transversales de turbidez, obtenidas a partir de las mediciones del cuarto muestreo.

3.3.3 Oxígeno disuelto

La distribución de oxígeno disuelto en el embalse también está relacionado con la dinámica de la estratificación térmica. Las mayores concentraciones de oxígeno se asocian con la capa superficial. A partir del metalimnio la concentración desciende rápidamente a cero.

Durante el primer muestreo la concentración promedio de oxígeno disuelto en el epilimnio fue 5.8 mg l^{-1} . La máxima concentración se observa en la desembocadura del río Molino con valores promedio 7.2 mg l^{-1} (Figura 39) En los **transectos a y b**, a concentración de oxígeno desciende a cero rápidamente en donde se registró un ascenso del metalimnio. En el **transecto c** se observa como la concentración descendió rápidamente a cero, desde la desembocadura del río González hacia el centro del transecto, y aumentó en la boca de la bahía.

La Figura 40 muestra la concentración del oxígeno disuelto medido durante el segundo muestreo. Se observa que en la zona oeste del embalse la concentración fue baja, debido al ascenso del metalimnio. Las máximas concentraciones (9.2 mg l^{-1}) se observan en la capa superficial del **transecto a**. A lo largo del

transecto b, el oxígeno disminuyó 0.5 mg l^{-1} en promedio, desde la desembocadura del río Amanalco hacia la zona centro del embalse.

Los valores de oxígeno disuelto en el epilimnio durante el tercer muestreo (Figura 41) variaron entre 7.9 mg l^{-1} a 4.5 mg l^{-1} . En el **transecto a** los valores máximos se observan en la zona de la cortina y descendieron hacia el este del embalse. En el **transecto b** la mayor concentración se encontraba entre los 5 y 10 m, por debajo de los 15 m fue muy cercana cero.

Durante el último muestreo el oxígeno disuelto disminuyó casi a cero en la zona centro del embalse, al igual que sucede con la temperatura. En la zona este del **transecto a** y en la bahía del río Amanalco, la concentración aumentó a cerca de 2 mg l^{-1} , excepto en el perfil 66 donde disminuyó con respecto al muestreo anterior.

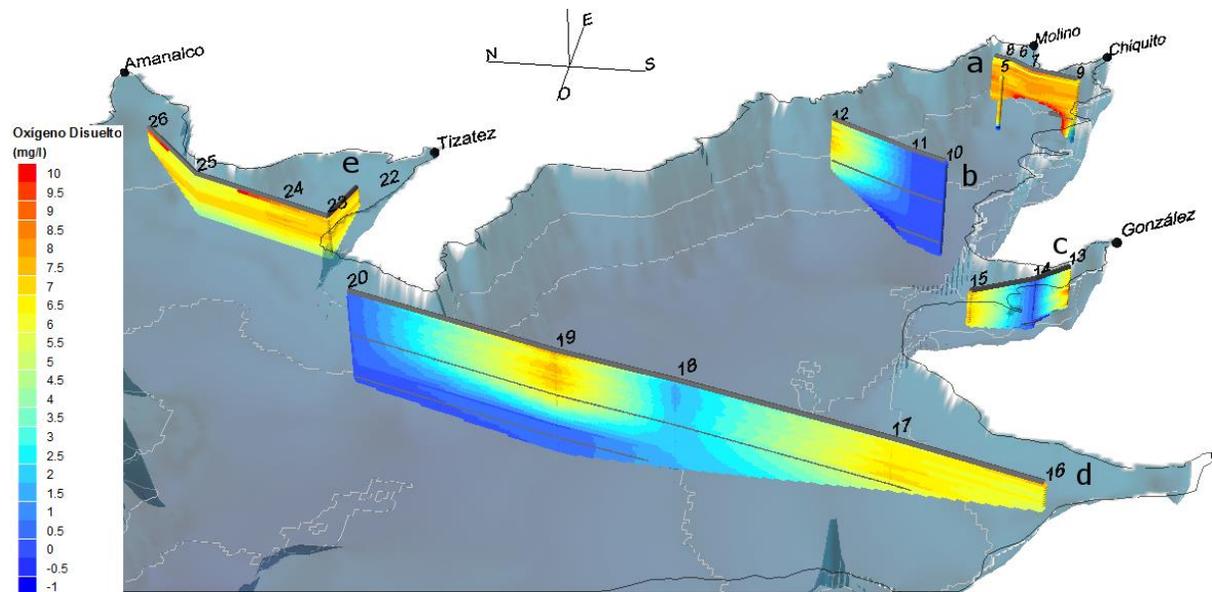


Figura 39. Secciones transversales de oxígeno, obtenidas a partir de las mediciones del primer muestreo.

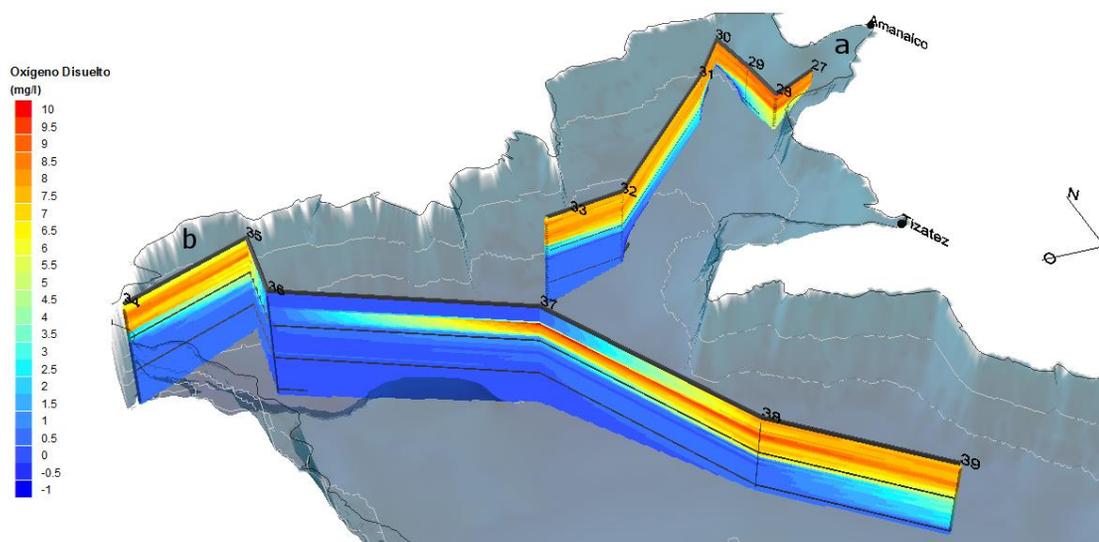


Figura 40. Secciones transversales de oxígeno disuelto, obtenidas a partir de las mediciones del segundo muestreo.

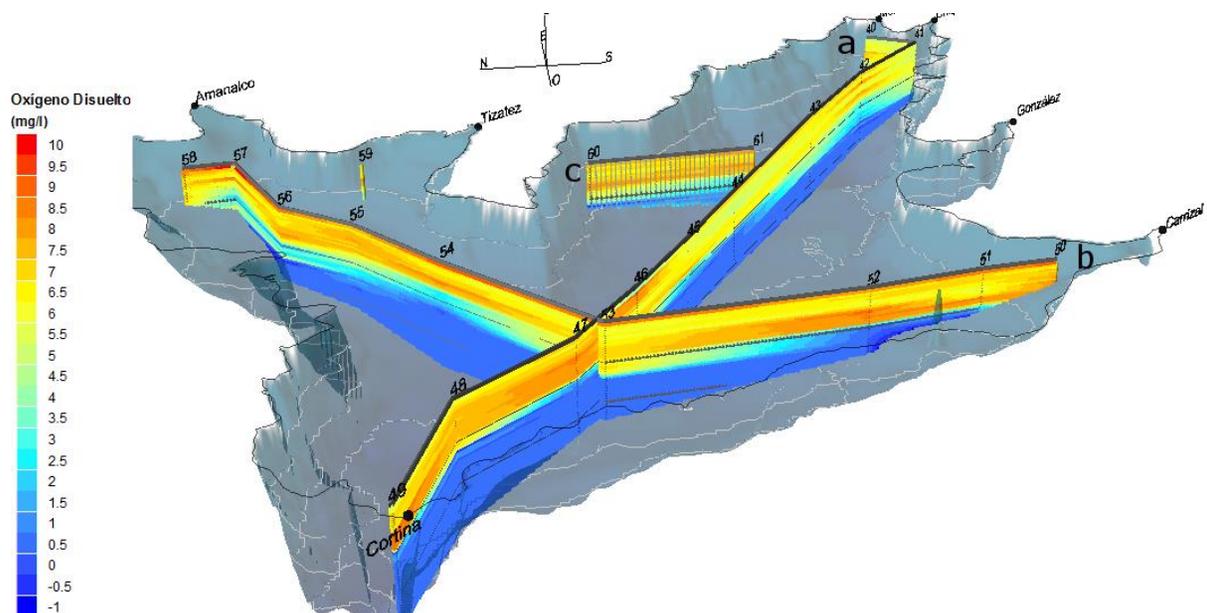


Figura 41. Secciones transversales de oxígeno disuelto, obtenidas a partir de las mediciones del tercer muestreo.

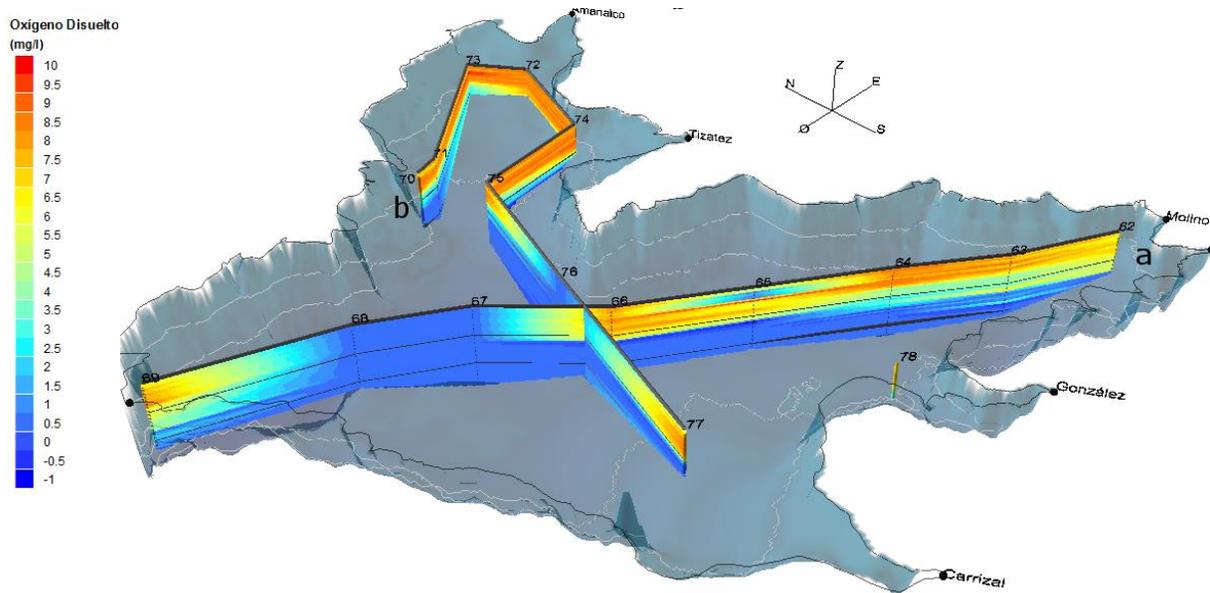


Figura 42. Secciones transversales de oxígeno disuelto, obtenidas a partir de las mediciones del cuarto muestreo. Los números sobre las secciones indican las posiciones de los lances.

3.3.4 Clorofila-a

La concentración de clorofila-a medida con el CTD Seabird, presenta en general un aumento desde la superficie hacia los 5 m de profundidad, con valores promedio mayores a 8 mg l^{-1} , y posteriormente desciende hacia el fondo. La distribución espacial está asociada al aporte de nutrientes por parte de los diferentes ríos, principalmente el Amanalco, Tizatez y Molino. La variabilidad temporal de las concentraciones en la capa superficial obedece a la actividad fotosintética realizada por las microalgas.

Durante el primer muestreo se observaron las mayores concentraciones en la desembocadura del río Molino, entre los 2 y 8 m, con valores máximos de 21 mg l^{-1} . Hacia el **transecto b** la concentración disminuyó a un rango de 10 a 15 mg l^{-1} . En la capa superficial del **transecto d** la concentración de clorofila disminuyó desde la bahía del río Amanalco hacia el río Carrizal, y por debajo de los 10 m fue cercana a cero. No obstante, en este transecto se observó que la concentración de clorofila aumentó en el fondo.

Durante el segundo muestreo se observa que en la capa superficial la concentración se encontraba entre 5 y 22.5 mg l^{-1} . A lo largo de los dos ejes la concentración disminuyó hacia la zona centro de embalse, en donde se observó agua de menor temperatura, proveniente del metalimnio. En esta zona la

concentración superficial de clorofila fue menor en la superficie fue menor a 5 mg l^{-1} . En promedio la concentración de clorofila aumento 2 mg l^{-1} , con respecto al muestreo anterior en la superficie

Durante el tercer muestreo el rango de clorofila-a en el embalse fue menor al del día anterior por 2 mg l^{-1} , en promedio. El aumento de nutrientes asociado con el aporte de los ríos, ocasionó un aumento de las concentraciones de clorofila en las zonas del rio Amanalco, Tizatez y Molino (Figura 45). En estas zonas tuvo valores promedio de 17 mg l^{-1} , mientras que en la zona de la cortina la máxima concentración (16.2 mg l^{-1}) se encontró a los 5 m de profundidad.

Durante el último muestreo la concentración descendió de nuevo 2 mg l^{-1} en promedio con respecto al muestreo anterior. En el **transecto b** se puede observar que la concentración disminuyó a casi cero, en la zona de la cortina y al sur de La Peña. En la bahía del rio Amanalco, las mayores concentraciones se observaron en la zona somera, cercana a las desembocaduras de los ríos, y disminuye hacia la boca de la bahía. La influencia de los ríos Amanalco y Tizatez se observó en los perfiles 57 y 58 del **transecto a**, en la zona donde el metalimnio ascendió ocasionando que la concentración de clorofila aumentara entre 7.5 y 10.2 mg l^{-1} .

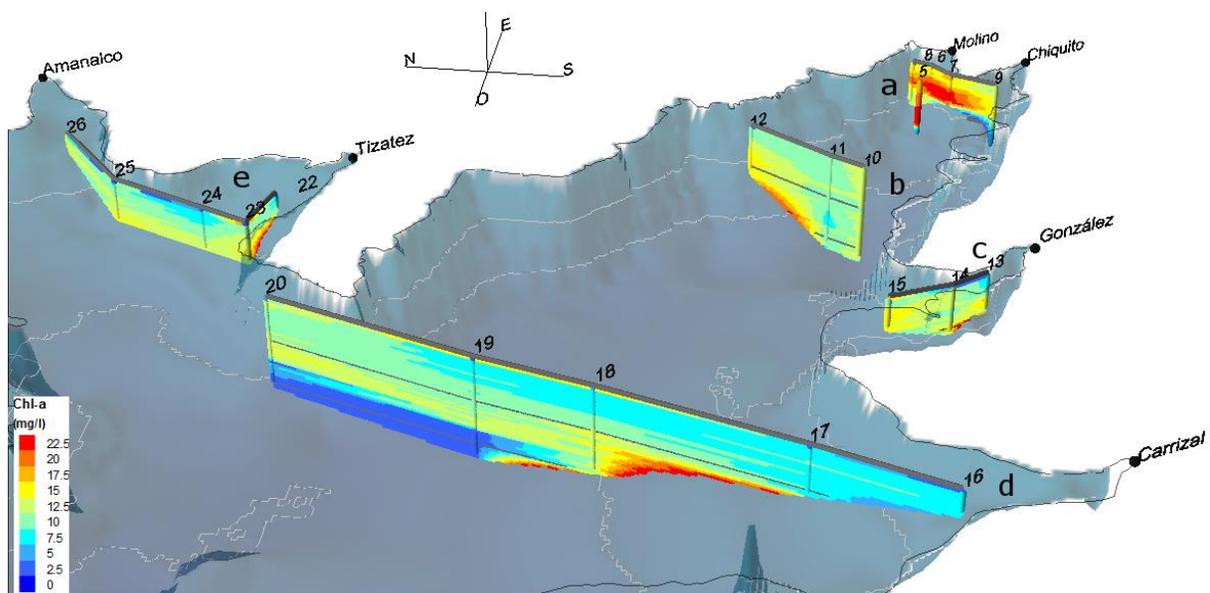


Figura 43. Secciones transversales de clorofila-a, obtenidas a partir de las mediciones del primer muestreo.

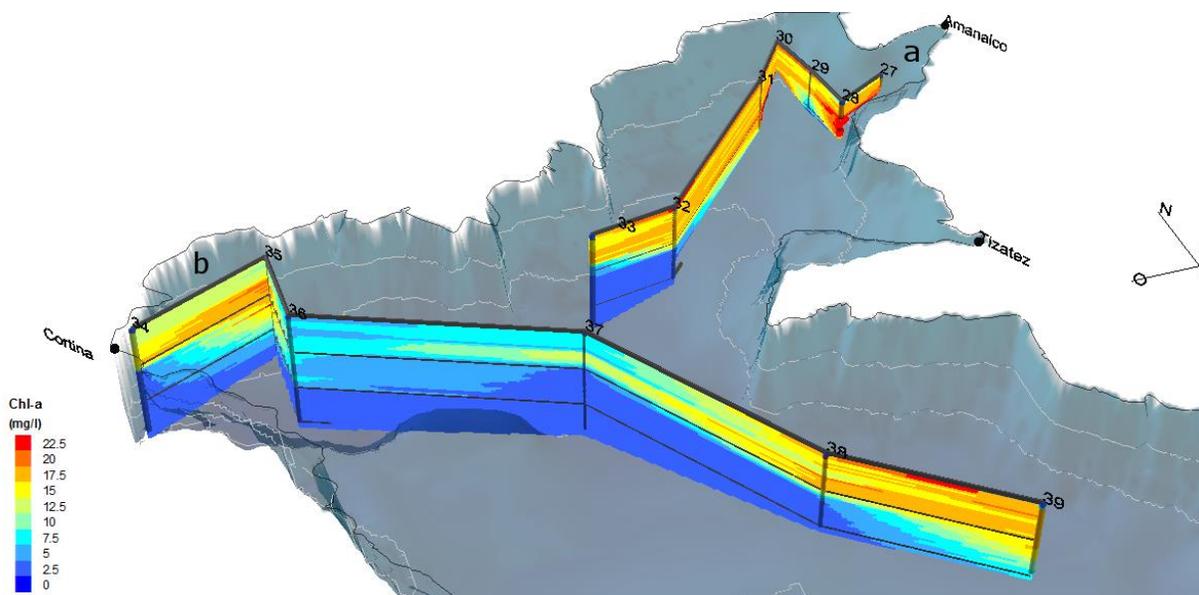


Figura 44. Secciones transversales de clorofila-a, obtenidas a partir de las mediciones del segundo muestreo

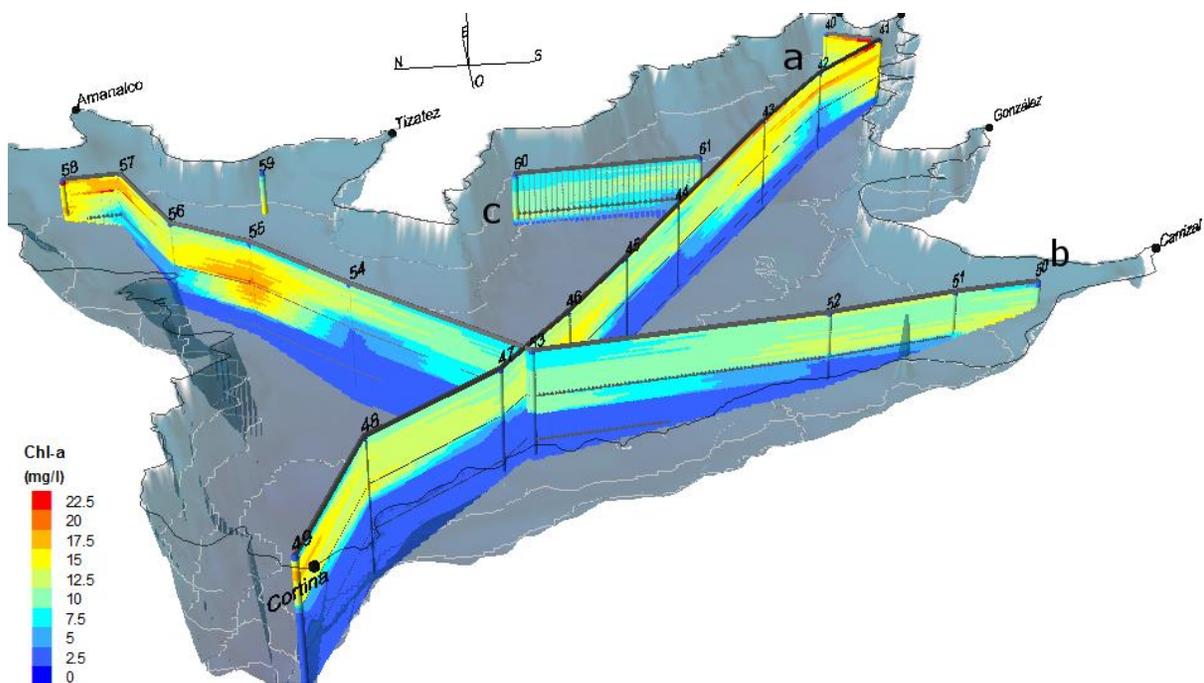


Figura 45. Secciones transversales de clorofila-a, obtenidas a partir de las mediciones del tercer muestreo.

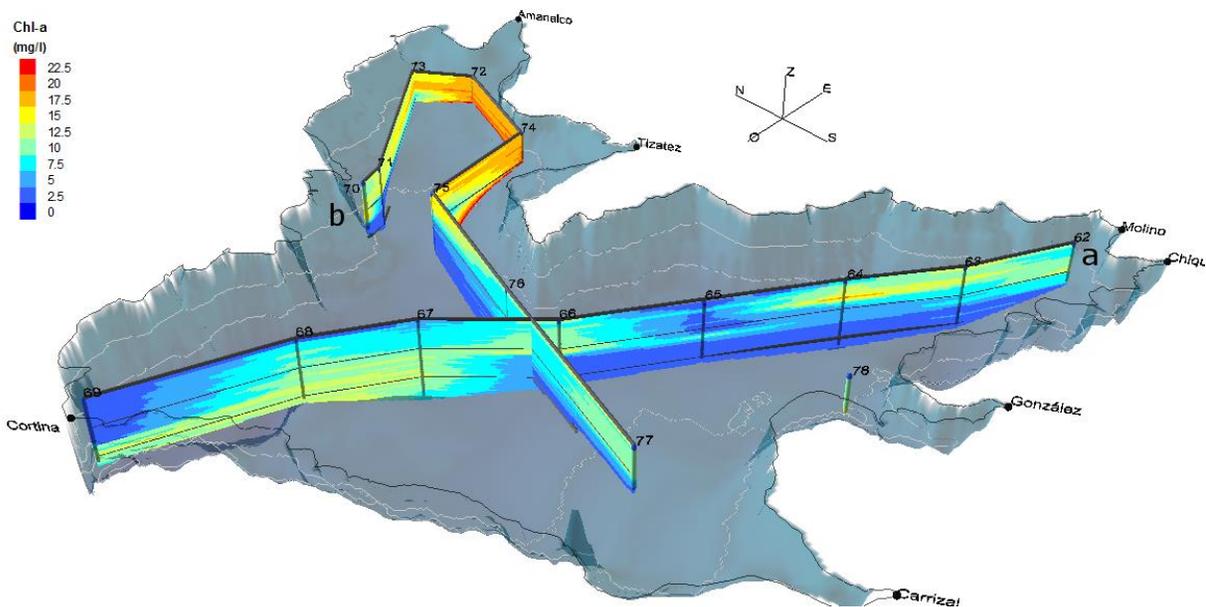


Figura 46. Secciones transversales de clorofila-a, obtenidas a partir de las mediciones del cuarto muestreo.

3.4 Resultados del modelo ELCOM

En el proceso de adaptación del modelo se realizaron ajustes al albedo, profundidad de la radiación fotosintéticamente activa y condiciones iniciales. Los resultados de cada adaptación se compararon con las series de tiempo de temperatura, medidas por el arreglo de termistores instalado en la boya de CONAGUA.

En los resultados iniciales, la serie de tiempo de temperatura en el sitio de la boya de CONAGUA, era mayor que los datos medidos por el arreglo de termistores hacia el final de la simulación. Considerando que la estación meteorológica instalada en la boya de CONAGUA, se encontraba 15 m por debajo del nivel de la cortina durante el periodo de mediciones, se realizaron simulación en las que se modificaron los datos medidos por la estación, que fueron utilizados como forzantes. El mejor resultado se observó cuando se modificó la velocidad del viento. En el régimen de viento que ocurre en Valle de Bravo, el viento de mayor magnitud tiene dirección hacia el noreste. La estación meteorológica se localiza a 50 m de la cortina de la presa y su ubicación con respecto a la cortina (Figura 47), puede tener un efecto en los datos medidos, subestimando la magnitud del viento que proviene de la cortina. La velocidad del viento se multiplicó, utilizando diferentes factores (1.2, 1.5 y 1.7). Los resultados de la simulación que tuvieron un mejor ajuste a los datos, se obtuvieron al multiplicar la magnitud del viento por 1.5.

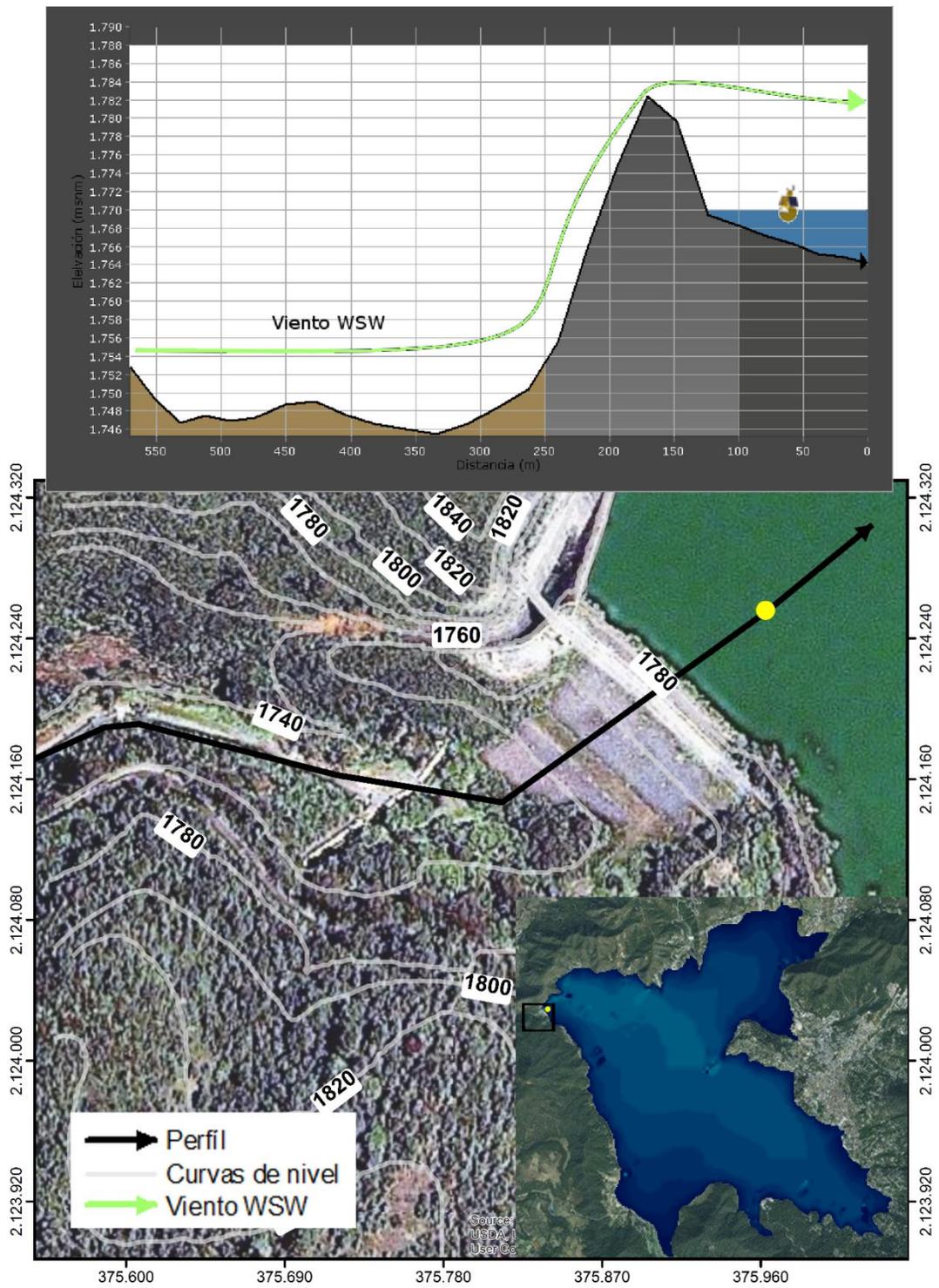


Figura 47. Esquema que representa el ascenso del viento por la cortina de la presa Valle de Bravo.

3.4.1 Variación temporal

En este capítulo se muestra la variación temporal de temperatura calculada por el modelo. Las series de tiempo de temperatura, fueron graficadas para los días en que se realizó la campaña de mediciones y corresponden a los sitios donde se localizan los arreglos de termistores.

Se calculó el cambio de temperatura cada metro en la componente Z, para estimar la estratificación de la columna de agua, en los datos la zona de la boya de CONAGUA. Los resultados muestran que en la capa superficial el cambio de temperatura disminuye de manera constante hasta la isoterma de 22°C. En el metalimnio la temperatura desciende hasta los 19 °C. A partir de la isoterma de 19 °C la temperatura permanece casi constante hacia el fondo. Para describir la variación de temperatura en las series de tiempo, se hace referencia a los rangos de temperatura estimados para cada capa.

En la zona de la boya, el epilimnio presentó una temperatura promedio de 22.4 °C (Figura 48). La profundidad de la capa varía entre los 10 y 14 m de profundidad, y tiene 8.2 m en promedio. El gradiente de temperatura en el metalimnio fue menor cuando la capa superficial tuvo la mayor temperatura. Al enfriarse el epilimnio, la temperatura en el metalimnio permaneció casi constante con un promedio de 19.5 °C. En el hipolimnio la temperatura permaneció casi constante con un promedio de 18.9°C. Esta capa ascendió al inicio de la serie hasta las 03:00 h, y posteriormente la temperatura aumentó, mientras que en el hipolimnio descendió hasta el fondo a las 18:00 h. Durante el segundo día, la columna se enfrió por debajo de los 15 m, permitiendo que el hipolimnio ascendiera hasta las 12:00 h, cuando la columna de agua se calentó y el hipolimnio comenzó a descender hasta el final de la serie. La temperatura en el hipolimnio tuvo variaciones diurnas, la temperatura disminuyó de las 00:00 h a las 03:00 h, y aumentó a partir de las 17:00 h. El aumento en la temperatura ocasionó que la capa descendiera y el metalimnio ocupara desde el epilimnio hasta el fondo.

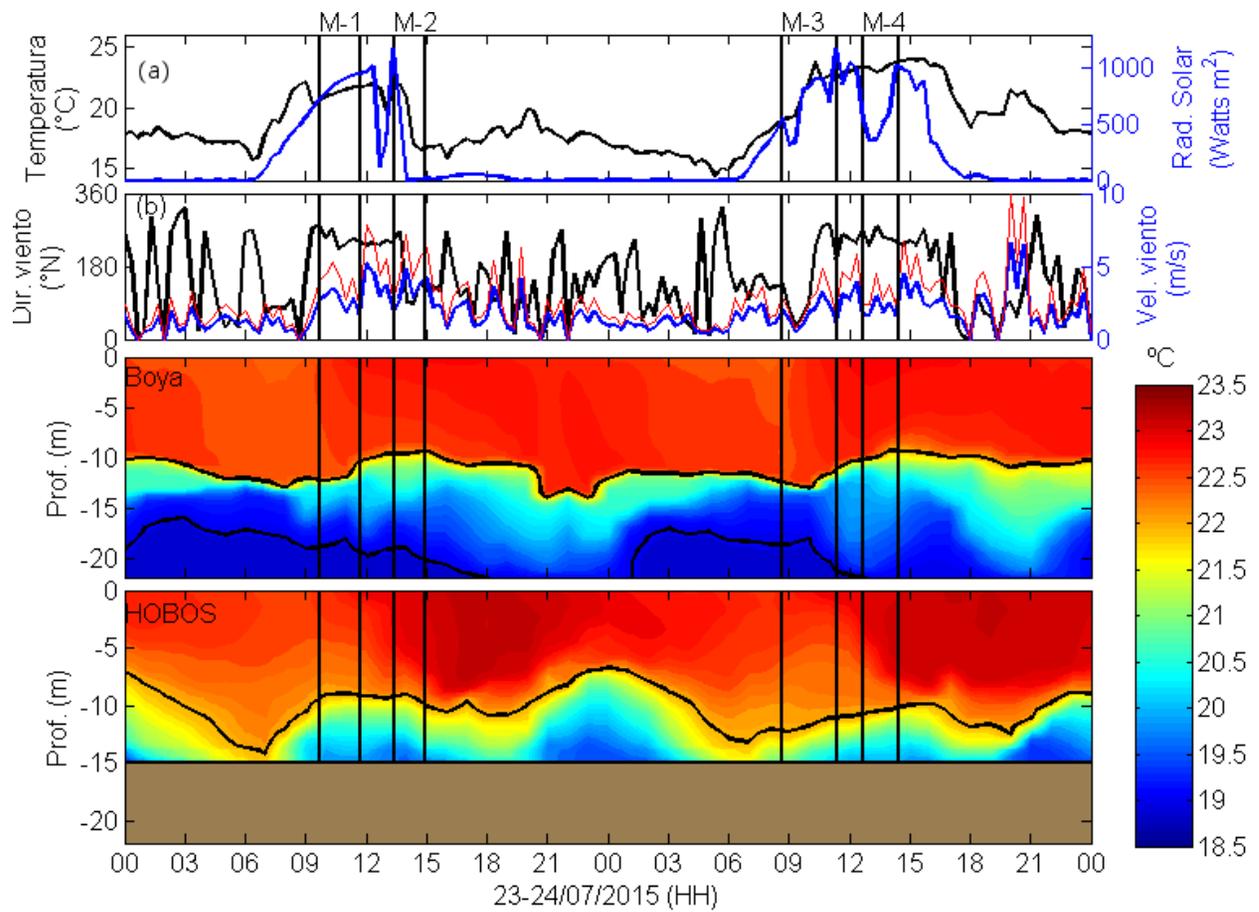


Figura 48. Resultados de la variación temporal de temperatura por el modelo, en las celdas localizadas en los arreglos de termistores, boya de CONAGUA y termistores HOBOS de CICESE, velocidad y dirección del viento (a), radiación solar y temperatura ambiental (b). Las líneas negras representan las isotermas de 19 y 22 °C. La línea roja representa la velocidad del viento multiplicada por 1.5.

En la zona de los termistores HOBOS, no se observan valores de temperatura menores a 19 °C. La columna se encontraba estaticada en el epilimnio y metalimnio. La profundidad de la capa superficial varió entre 6 y 14 m, ocupando 5 m más que en la zona de la boya. En el metalimnio el cambio de temperatura con respecto a la profundidad fue menor que en la zona de la boya. La temperatura promedio en el metalimnio, tuvo variaciones semidiurnas con máximos a las 06:00 y 18:00 h y mínimos a las 12:00 y 00:00 h.

El epilimnio comenzó a calentarse a partir de las 06:00 h y tuvo la máxima temperatura cerca de las 18:00 h (Figura 49), en las dos zonas. En los termistores HOBOS se calentó cerca de 0.5°C más que en la zona de la boya. Durante el primer día en la zona de los termistores la capa se calentó 0.1 °C más que el segundo. En esta capa los cambios de temperatura pueden estar relacionados con las variaciones de

temperatura ambiental. En los termistores HOBOS la temperatura promedio tuvo variaciones mayores a 0.5°C , de las 09:00 h a las 18:00 h. En la zona de la boya la variación promedio de temperatura fue menor a 0.3°C .

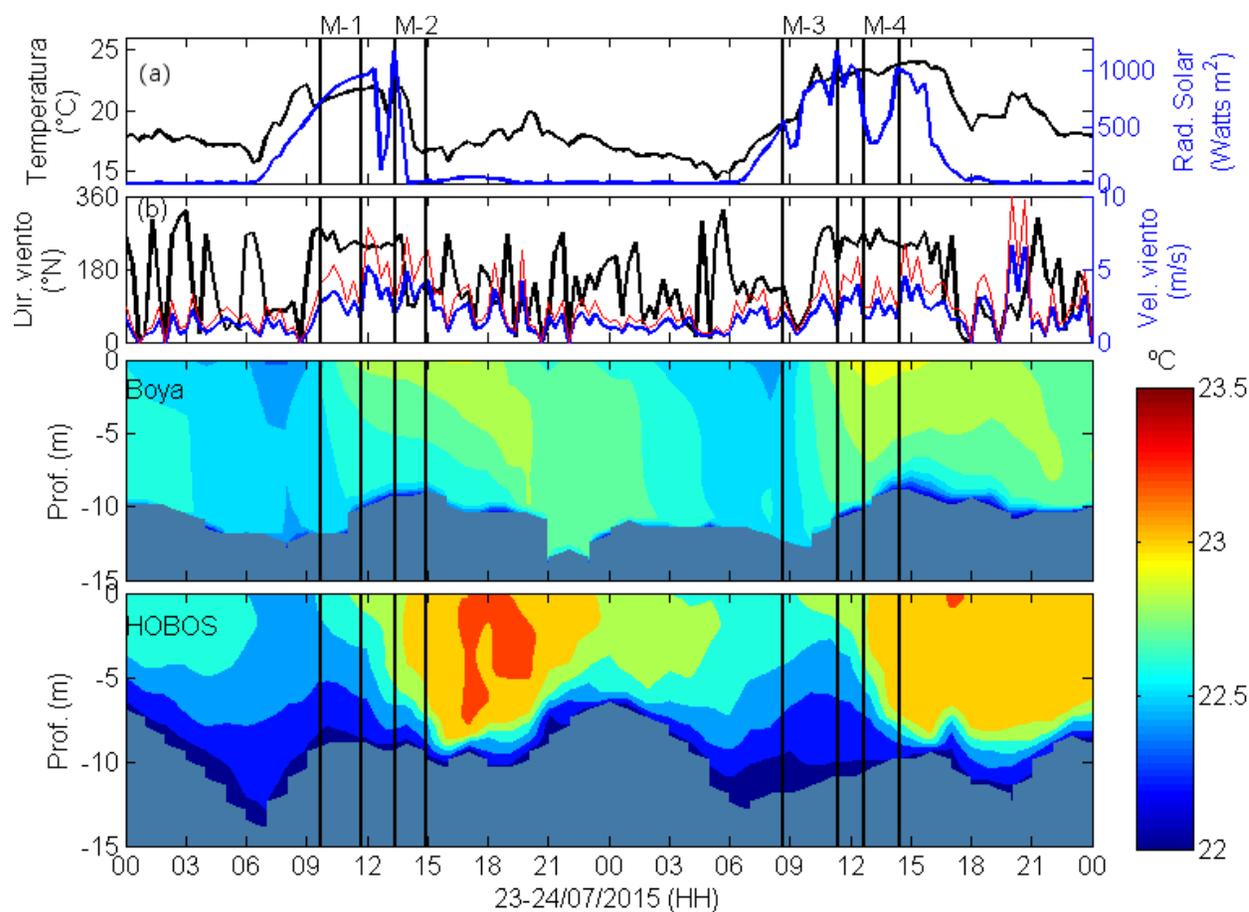


Figura 49. Resultados de la variación temporal de temperatura en la capa superficial por el modelo, sobre la isoterma de 22°C , en las celdas localizadas en los arreglos de termistores, boya de CONAGUA y termistores HOBOS de CICESE, velocidad y dirección del viento (a), radiación solar y temperatura ambiental (b).

3.4.2 Variación espacial

La variación espacial de temperatura calculada con ELCOM, se describe para el 23 y 24 de julio del 2015. La descripción de los resultados se realiza para 4 instantes en cada día: 03:00, 07:00, 13:00 y 19:00 h (Figura 50).

A las 03:00 h la temperatura se encontraba descendiendo, y el viento en su fase relajada con dirección del norte. Cuatro horas después la radiación solar comenzó a aumentar al igual que la temperatura atmosférica, el aporte de los ríos aumentó a la mitad del máximo, el viento continuó relajado y con dirección del norte. Durante el tercer instante (13:00 h) la temperatura se encontró casi al máximo, la velocidad del viento aumentó y la dirección fue del suroeste, el caudal de los ríos alcanzó su máximo a las 12:00 h y ahora está disminuyendo. En el último instante evaluado la temperatura se encontraba disminuyendo al igual que la velocidad del viento y el caudal de los ríos. Durante el primer día se observa que el evento de precipitación ocurrió entre las 14:00 y 18:00 h.

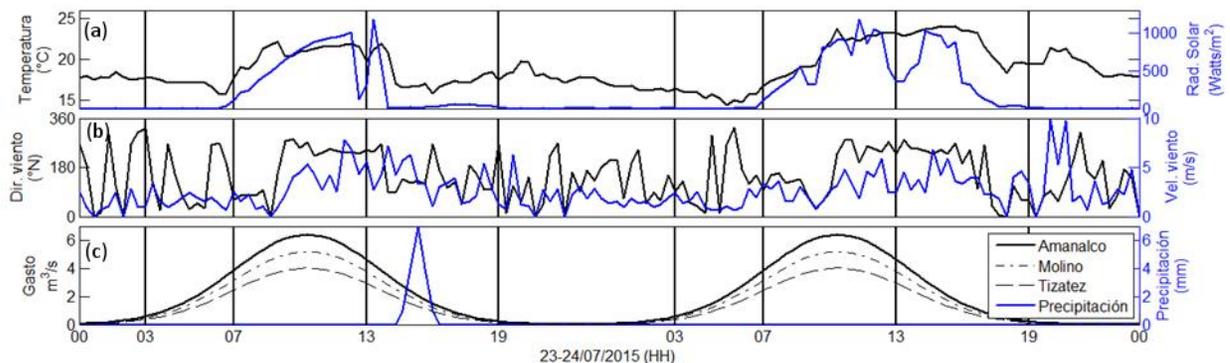


Figura 50. Temperatura y radiación solar (a), Velocidad y dirección del viento (b) y caudales de los ríos y precipitación (c). Las líneas verticales indican los instantes en los que se evalúan los resultados del modelo.

En el epilimnio a las 03:00 h del 23 de julio la temperatura promedio en la capa superficial fue 22.6 °C, esta capa se observa entre los 8 y 10 m de profundidad (Figura 51). En la capa horizontal a los 10 m de profundidad, se observan zonas de mayor temperatura, principalmente en los márgenes del Eje A. En los primeros metros, la temperatura en estas zonas fue menor que en el resto del transecto. En los cortes verticales se observa que la zonas de mayor temperatura, con una diferencia de hasta 0.5 °C, se encontraban en la bahía del río Amanalco y desde La Peña hacia el río Molino, en el Eje A. El metalimnio

tuvo una temperatura promedio de 20.2 °C y su profundidad varió entre los 18 y 19 m. Las zonas de menor profundidad se observaron hacia los márgenes, en las zonas donde la temperatura de la capa superficial fue menor. En el hipolimnio la temperatura promedio fue de 18.8 °C.

Este comportamiento indica que, a las 03:00 h, la dirección del viento permitió el intercambio de agua entre las diferentes capas. Las zonas en la superficie donde la temperatura fue baja, pueden asociarse con el ascenso de agua desde el hipolimnio, y las zonas cálidas a los 10 m de profundidad, con el agua que desciende desde la superficie.

Cerca de las 07:00 h la temperatura ambiental disminuyó y la dirección del viento cambió hacia el suroeste (Figura 52). La temperatura promedio en el epilimnio disminuyó y en el metalimnio aumento, 0.1 °C en las dos capas. La distribución espacial de temperatura en los primeros 5m fue similar al de las 03:00 h. Las zonas de mayor temperatura se localizaron desde La Peña hacia el río Molino y en la bahía del río Amanalco. A los 10 m se observa el límite del epilimnio, que ascendió en la bahía del río Amanalco, con la menor temperatura a esta profundidad, mientras que en la zona oeste, desde La Peña hacia la cortina, aun se observaba a esta capa. A los 15 m la temperatura fue casi homogénea en todo el embalse, en promedio disminuyó casi 2 °C desde los 10 m. A partir de los 20 m hasta el fondo la temperatura se mantuvo casi constante, delimitando al hipolimnio.

A las 13:00 h la temperatura ambiental aumentó 2 °C, el régimen de viento cambió, aumentando la velocidad y con dirección desde la cortina hacia el noreste, y el aporte de los ríos era la mitad de su máximo (Figura 53). La temperatura del agua en el epilimnio tuvo un aumento máximo de 0.5°C en la bahía del río Amanalco. En promedio la capa aumentó 0.2°C y el metalimnio se enfrió 0.2°C con respecto a las 07:00 h. En el primer metro la temperatura fue casi constante en todo el embalse. A los 5m de profundidad, la bahía del río Amanalco y el margen noreste, desde La Peña hasta el río Molino, tuvieron las mayores temperatura. Este comportamiento continuó hasta los 15 m de profundidad, lo cual sugiere que el arrastre del viento promueve el descenso de agua cálida hasta los 10 y 15 m de profundidad en el margen noreste, principalmente en las zonas someras, como los son la desembocadura de los ríos Amanalco y Molino. En el margen suroeste, desde la cortina hacia el río Carrizal, donde el agua de superficie es desplazada, asciende agua con menor temperatura

A las 19:00 h la velocidad del viento disminuyó a 1.2 m s⁻¹ y la temperatura descendió 2 °C con respecto a las 13:00 h (Figura 54). En el epilimnio la temperatura del agua fue casi constante con un promedio de 22.9 °C, desde la superficie a los 5 m de profundidad. Se observó un gradiente horizontal con una

diferencia máxima de 0.5°C entre la zona de la cortina al río Molino y la desembocadura del río Amanalco al río Carrizal. A los 10 m el epilimnio ascendió en la desembocadura del río Amanalco y desde La Peña hacia el río Molino. En la zona de La Peña hacia la cortina el metalimnio se observa a partir de los 12 m y en la zona del río Molino a partir de los 5m. La mayor diferencia en la profundidad del epilimnio se observa en el Eje A con un máximo de 7 m de diferencia.

La temperatura ambiental el 24 de julio a las 03:00 h descendió a 16.4 °C, un grado menos con respecto a las 19:00 h del día anterior, y 1.4 °C menor que a las 03:00 h (Figura 55). La velocidad del viento fue 2.4 ms⁻¹ con dirección hacia el oeste. El epilimnio descendió en el lado este del Eje A y en la desembocadura del río Amanalco, la profundidad de esta capa varió entre los 8 y 10 m. Las zonas de menor temperatura se observaron a los 10 m de profundidad en las que el metalimnio ascendió, en el centro del embalse a la altura de La Peña. En las diferentes capas horizontales se aprecia como la mezcla en el margen suroeste del embalse, desde la cortina hacia el río Carrizal, ocasionaron el enfriamiento del epilimnio y el metalimnio promoviendo el ascenso del metalimnio. En la zona del río Molino la temperatura en las capas horizontales indicó que la influencia del agua superficial llegó casi hasta el fondo, sugiriendo que en esta zona el agua se hunde.

Viento del este se presentó a las 07:00 h como a las 03:00 h, desde el este (Figura 56). La temperatura ambiental se mantuvo a los 16 °C. En el embalse la temperatura del agua fue también muy similar, con excepción de la desembocadura de los ríos Amanalco y Molino. A la profundidad de 10 m, se observó el ascenso del metalimnio en la desembocadura del río Amanalco, asociado a un enfriamiento en esta capa. En el río molino el descenso de agua cálida ocurrió hasta los 15 m de profundidad.

La temperatura durante el 24 de julio fue mayor que en el día anterior, aumentando a las 13:00 h hasta 23.2 °C, casi siete grados más que en la mañana (Figura 57). La dirección del viento cambio hacia el noroeste, pero con menor intensidad que el día anterior. El aumento en la radiación solar ocasionó que el embalse se calentara 0.5°C en el primer metro, con una temperatura promedio de 23.1 °C. Las condiciones de baja velocidad del viento y alta temperatura atmosférica, con respecto a la misma hora del día anterior, ocasionaron diferencias en el patrón de circulación vertical. El agua presentó un descenso principalmente por la bahía del río Amanalco, mientras que ascendió en el margen al sur hacia la zona somera al este del embalse. El epilimnio se observó por encima de los 10 m al norte y oeste del embalse a partir de La Peña hacia la cortina.

A las 19:00 h la temperatura atmosférica disminuyó a 19.4 °C, el viento cambio de dirección hacia el suroeste con una velocidad de 3.3 ms⁻¹, casi un metro por segundo más que a las 13:00 h (Figura 58). En el epilimnio la distribución horizontal de temperatura fue más homogénea con un promedio de 22.8 °C. En la bahía del rio Amanalco la temperatura descendió, sugiriendo el ascenso de agua desde el hipolimnio por esta zona.

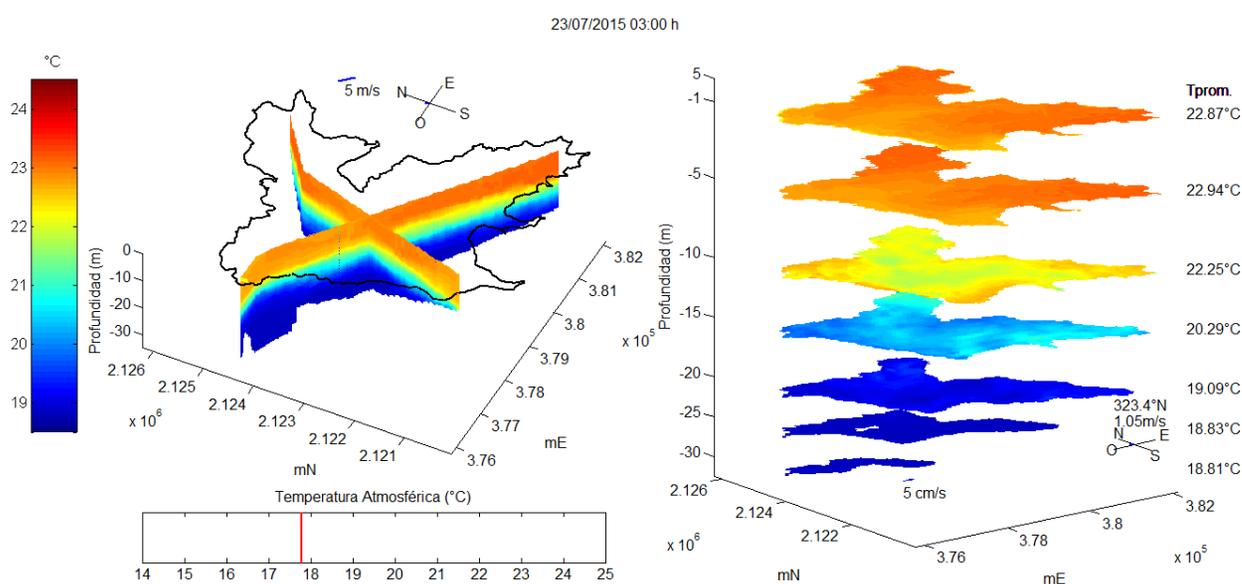


Figura 51. Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 23 de julio del 2015 a las 03:00 h.

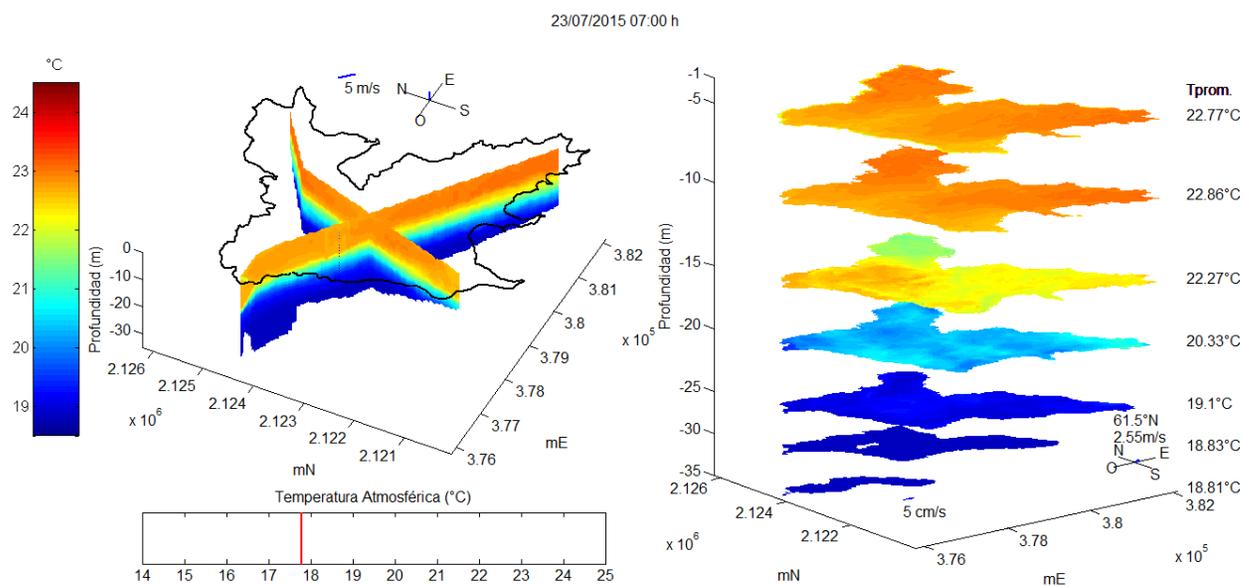


Figura 52. Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 23 de julio del 2015 a las 07:00 h.

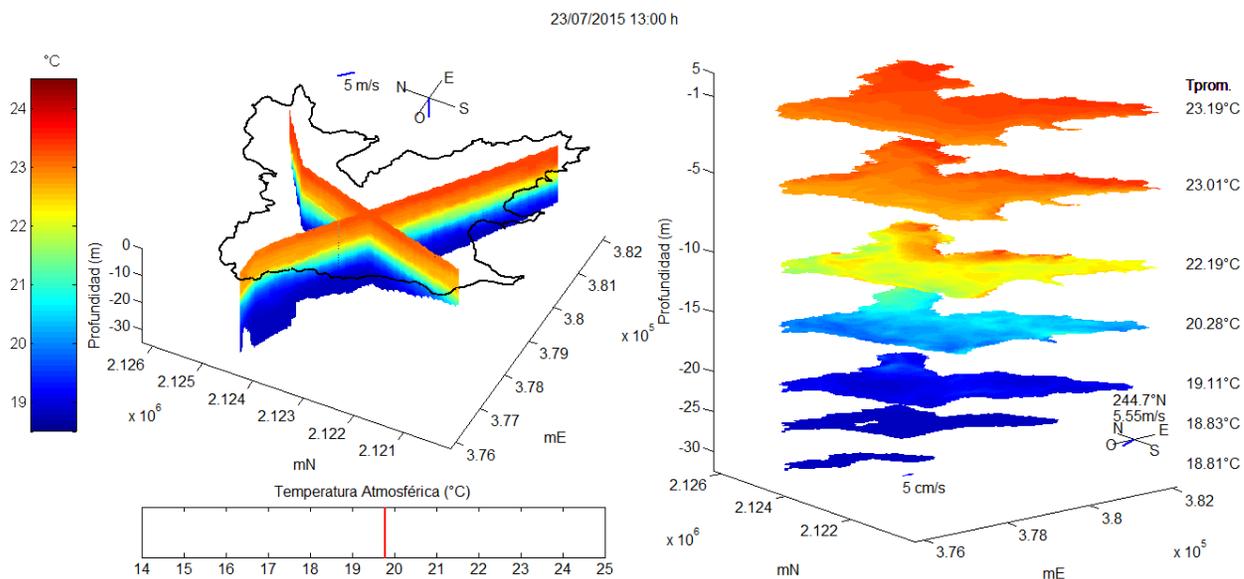


Figura 53. Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 23 de julio del 2015 a las 13:00 h

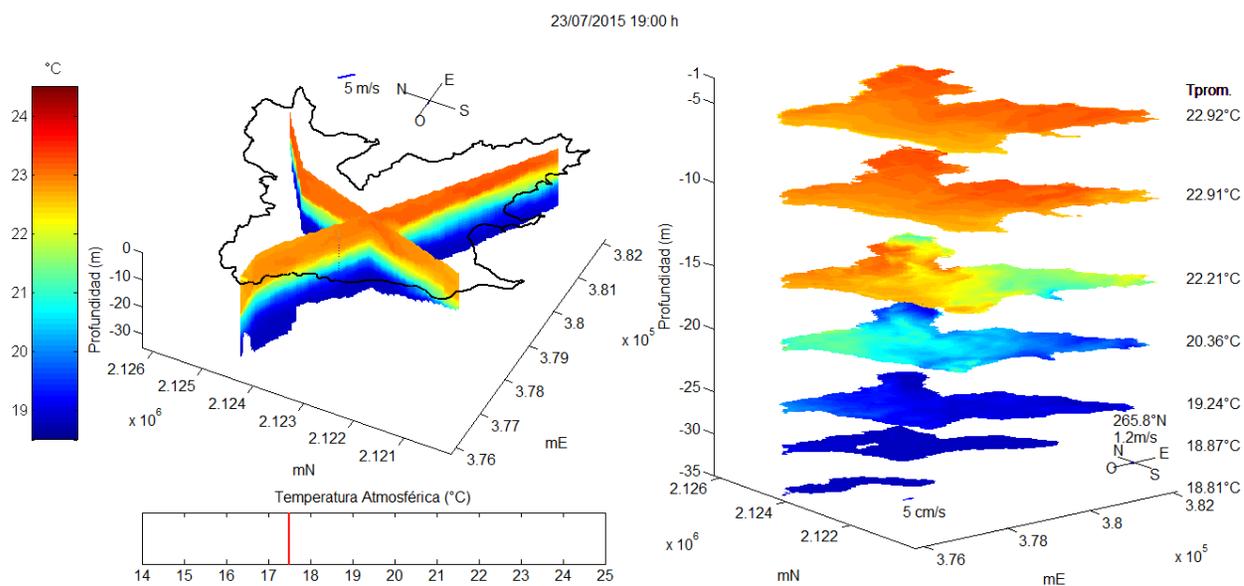


Figura 54. Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 23 de julio del 2015 a las 19:00 h.

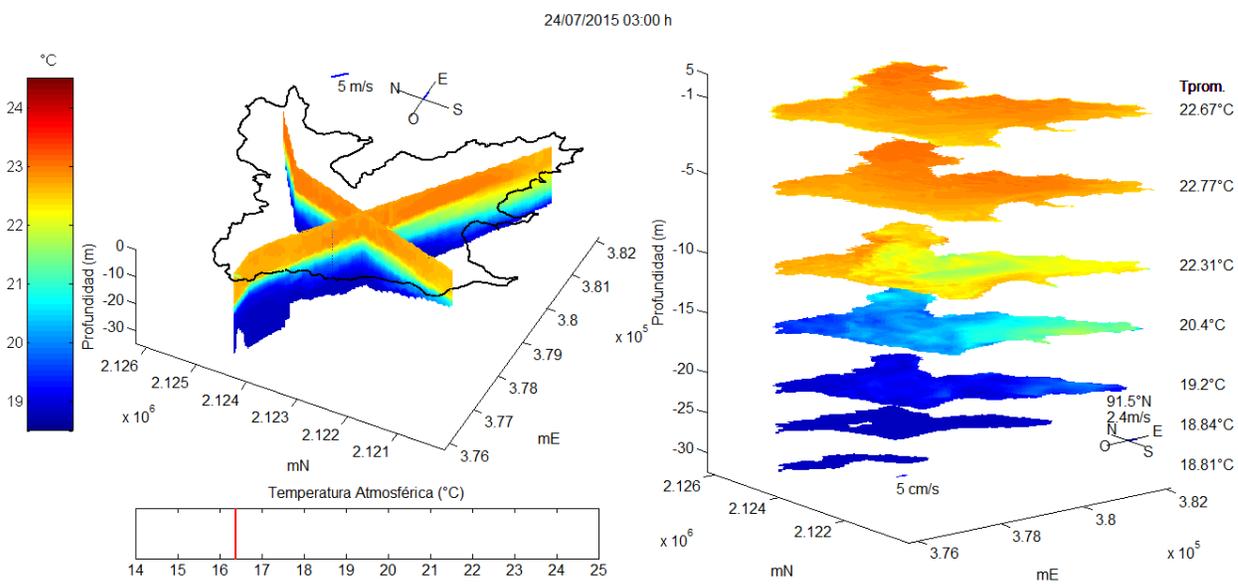


Figura 55. Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 24 de julio del 2015 a las 03:00 h

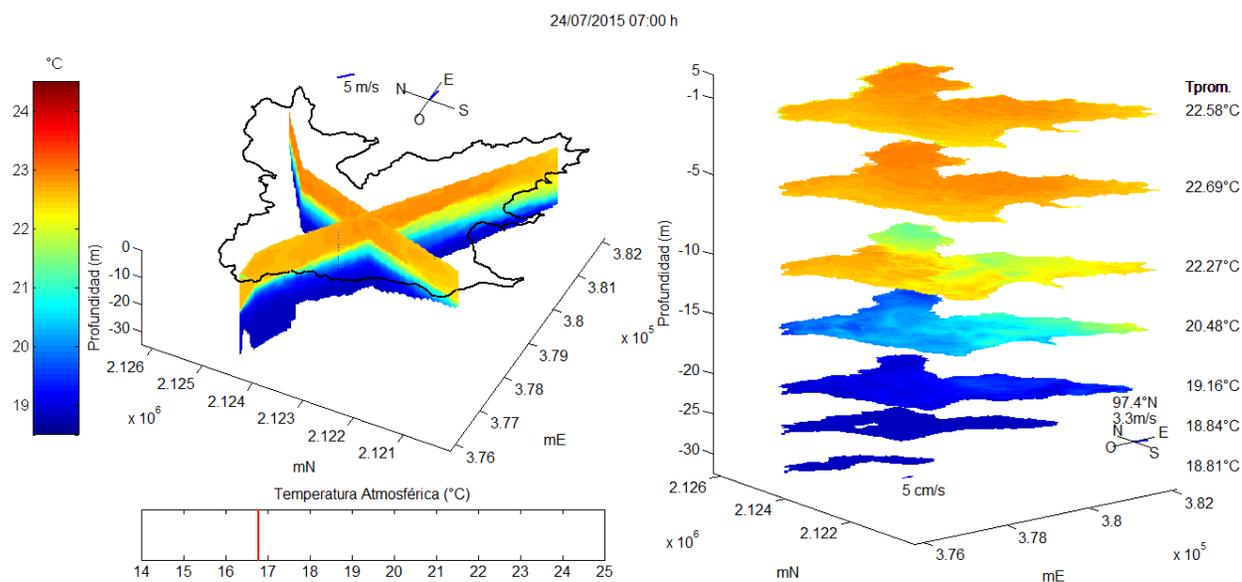


Figura 56. Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 24 de julio del 2015 a las 07:00 h

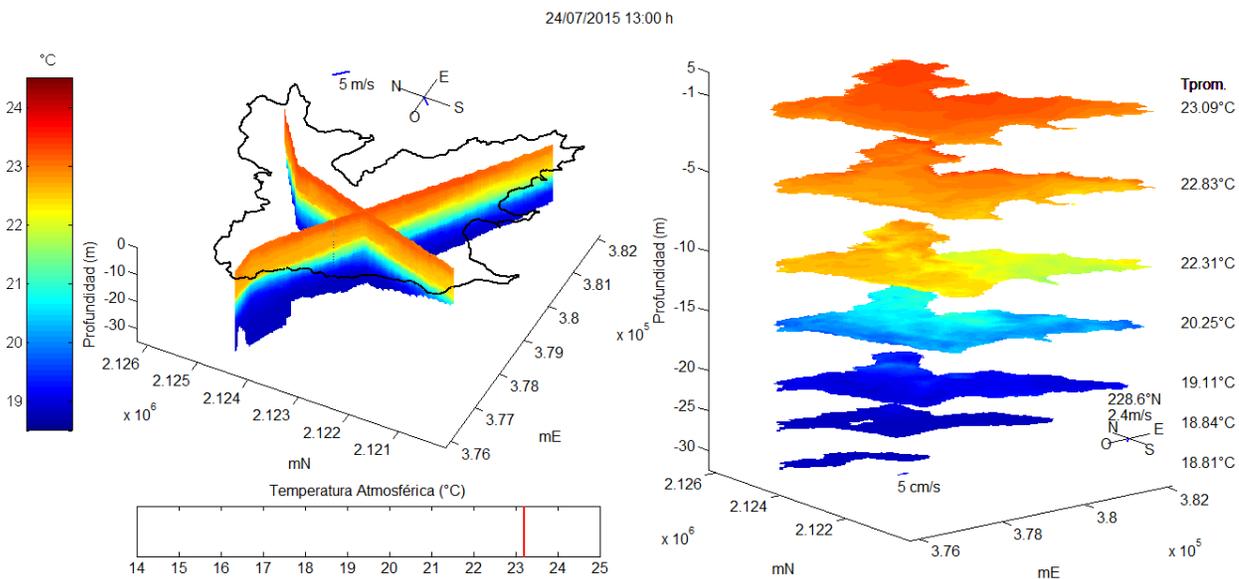


Figura 57. Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 24 de julio del 2015 a las 13:00 h

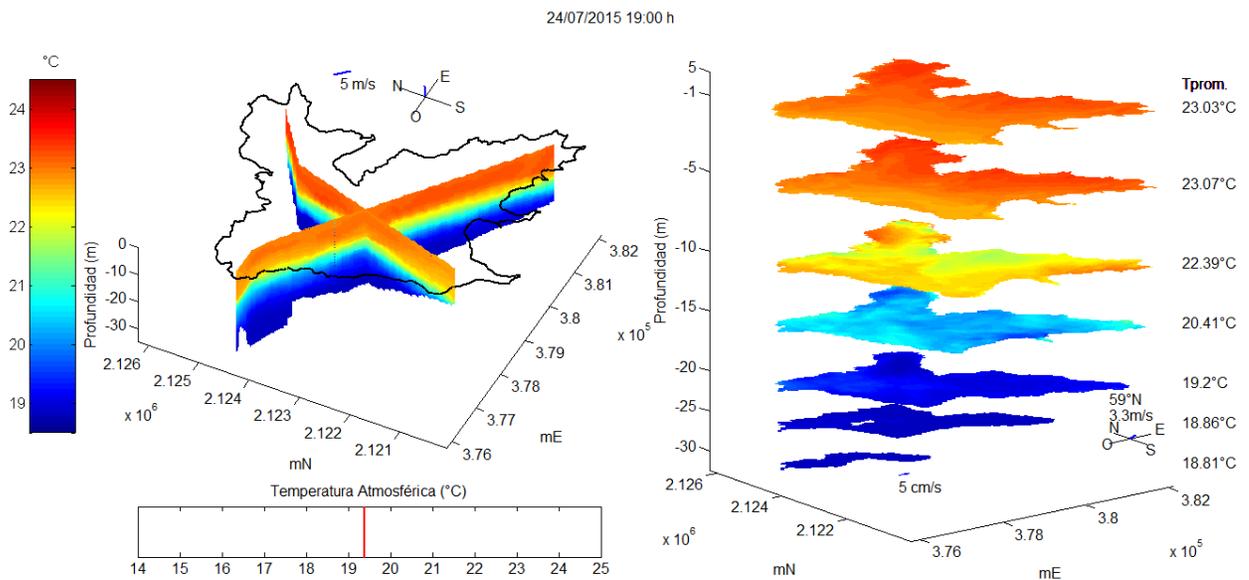


Figura 58. Resultados de temperatura del modelo ELCOM, para el día 24 de julio del 2015 a las 19:00 h

La dinámica de la onda interna es un factor importante en la distribución de temperatura del embalse. En la variación temporal obtenida por el modelo en la zona de la boya de CONAGUA, se observó que el epilimnio está delimitado por la isoterma de los 22 °C, estratificando la columna de agua. Los promedios de temperatura de las diferentes capas horizontales muestran que a los 10 m de profundidad los cambios de temperatura estuvieron asociados con la oscilación vertical del epilimnio. Para observar la dinámica de la onda interna, se comparó la variación de temperatura a 10 m de profundidad con la profundidad de la interface de 22 °C, obtenidos por el modelo ELCOM.

La Figura 59 muestra las condiciones iniciales definidas para todo el dominio, donde la interface de los 22 °C se encontraba a 8.3 m de profundidad, y a los 10 m la temperatura fue 21.7 °C. A las 15:30 h, cuando la velocidad del viento con dirección de la cortina hacia el noreste comienza a disminuir, el arrastre superficial promovió el ascenso de la interface en la zona suroeste y el descenso en la zona noreste del embalse, distribuyéndose entre 5 y 13 m de profundidad (Figura 60). La temperatura a los 10 m fue entre 21.5 °C y 23.5 °C. Seis horas después (21:30 h), la velocidad el viento se relajó, la interface descendió en la zona de la cortina a 11 m y asciende a 8 m hacia el río Molino y en la bahía del río Amanalco.

A las 9:30 h del segundo día de simulación, cuando el viento sopla desde el noreste hacia la cortina con menor velocidad (2.1 m s^{-1}), promueve que la interface ascienda en la zona noreste del embalse, 6 m en el rio Molino y 7.5 m en la bahía del rio Amanalco, mientras que desciende a 11.5 m de profundidad en la zona de la cortina. A los 10 m de profundidad la temperatura fue de $22.5 \text{ }^\circ\text{C}$ donde el epilimnio desciende y un grado centígrado menos en la zona noreste del embalse (Figura 62). La dirección del viento cambio hacia el noreste a las 15:30 h, la profundidad de la interface de $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ascendió a 7 m en el margen suroeste y descendió a 14 m en la bahía del rio Amanalco (Figura 63). La temperatura a los 10 m de profundidad aumentó a $23 \text{ }^\circ\text{C}$ en la bahía del rio Amanalco donde se registró el descenso de la interface, y tiene una diferencia de dos grados centígrados con respecto a la zona en donde ascendió. Seis horas después cuando la velocidad del viento disminuyó, la interface desciende hacia el margen suroeste del embalse.

El comportamiento general de la interface de $22 \text{ }^\circ\text{C}$ obtenida del modelo ELCOM, se caracteriza por el descenso hacia el margen noroeste en la bahía del rio Amanalco y el ascenso hacia el margen suroeste, con una diferencia promedio de 5 m en la profundidad, asociada a los eventos en que el viento tiene mayor velocidad y dirección hacia el noreste. La dinámica en la profundidad la interface se invierte, seis horas después cuando el viento se relaja y sopla en dirección contraria,

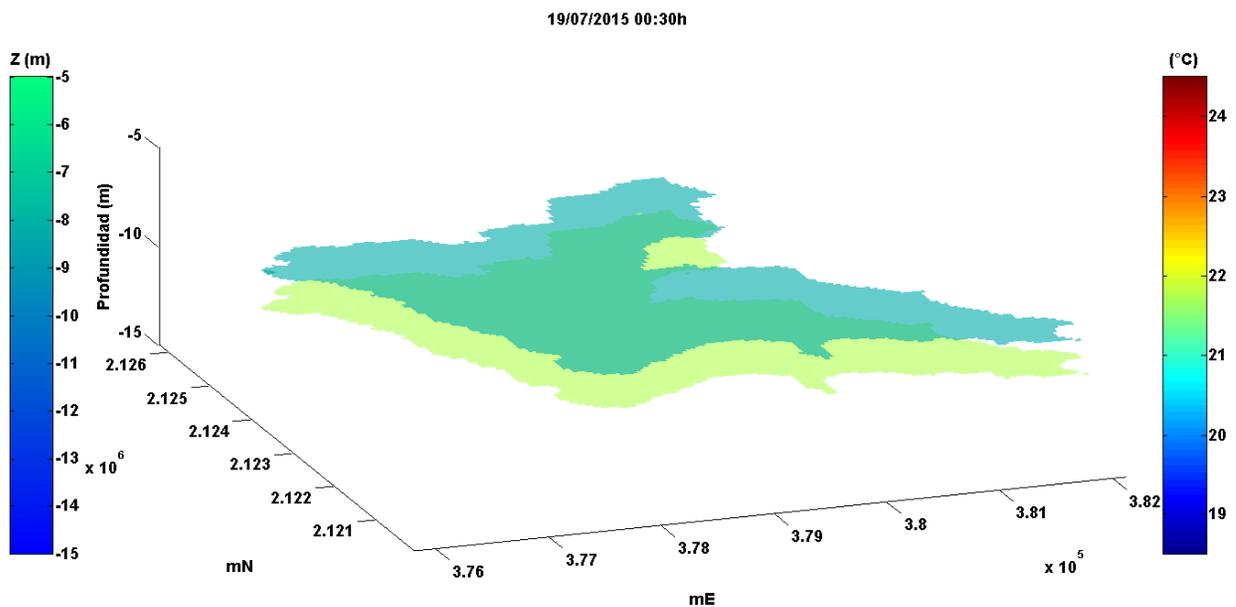


Figura 59. Interface de $22 \text{ }^\circ\text{C}$ y temperatura a 10 m de profundidad, al inicio de la simulación realizada con ELCOM.

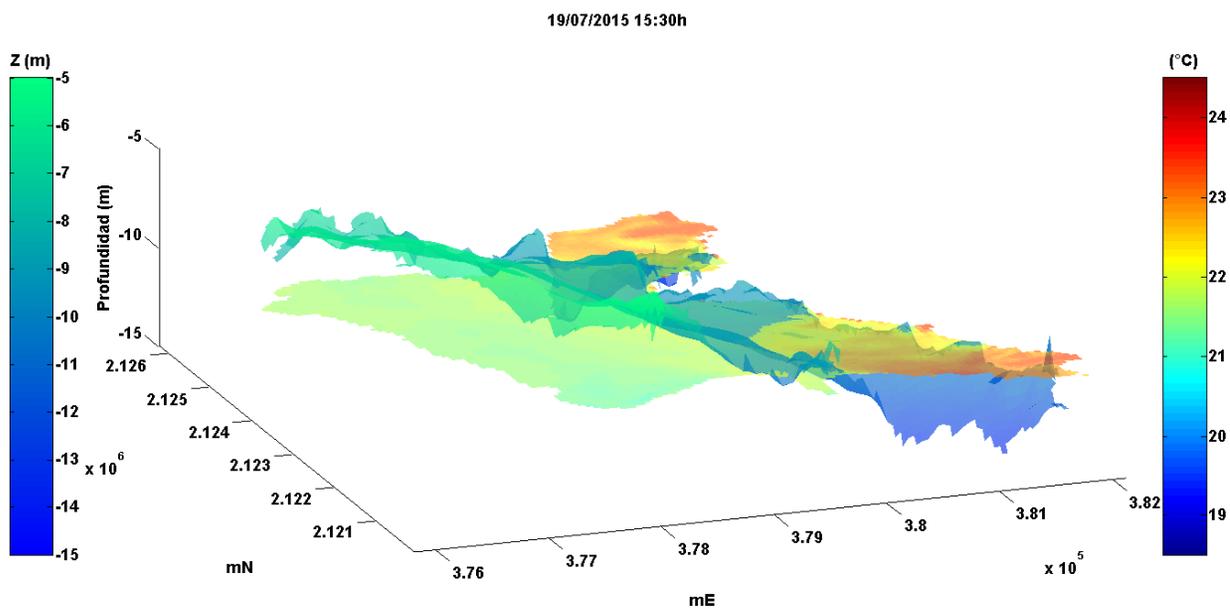


Figura 60. Interface de 22 °C y temperatura a 10 m de profundidad, el 19 de Julio del 2015 a las 15:30 obtenida con ELCOM.

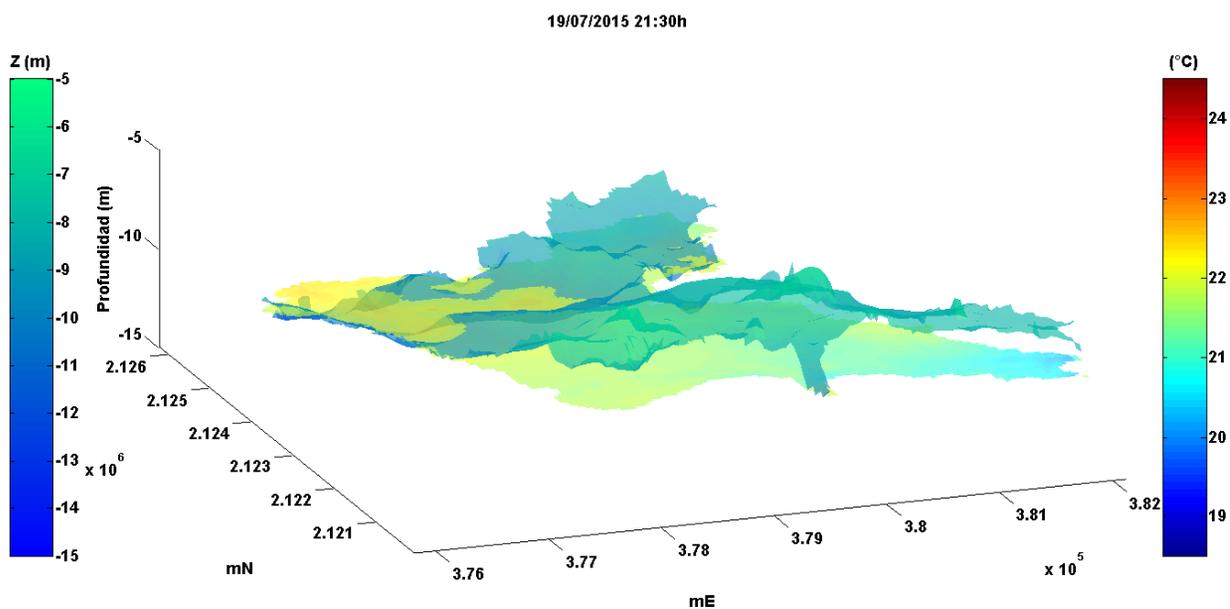


Figura 61. Interface de 22 °C y temperatura a 10 m de profundidad, el 19 de Julio del 2015 a las 21:30 obtenida con ELCOM.

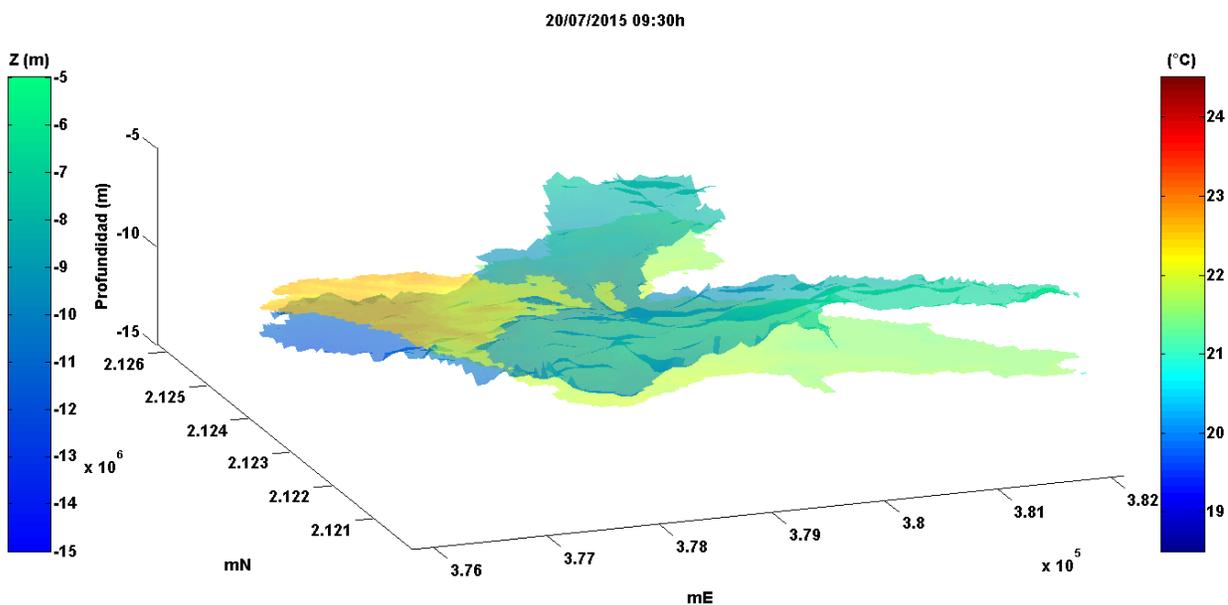


Figura 62. Interface de 22 °C y temperatura a 10 m de profundidad, el 20 de Julio del 2015 a las 09:30 obtenida con ELCOM.

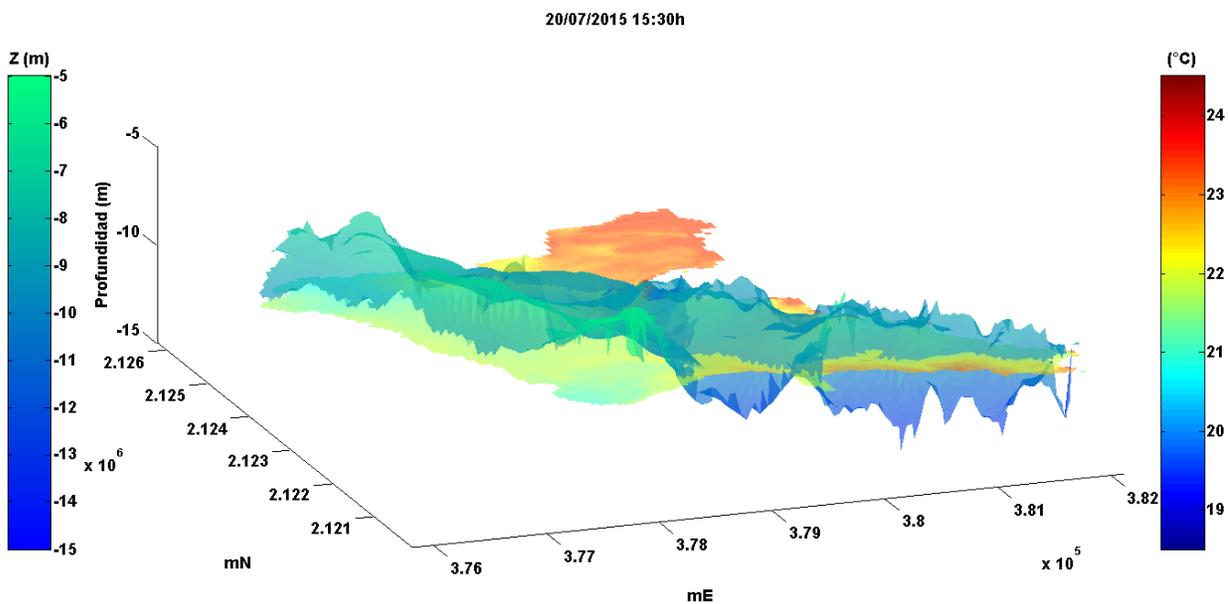


Figura 63. Interface de 22 °C y temperatura a 10 m de profundidad, el 20 de Julio del 2015 a las 15:30 obtenida con ELCOM.

3.5 Validación

3.5.1 Validación temporal

La validación temporal se realizó para todo el período de simulación, comparando las series de tiempo de temperatura medidas por los termistores instalados en la boya de CONAGUA y los resultados del modelo, en la celda situada donde se localiza la boya, en 5 profundidades: 1, 5, 10, 15 y 19 m. También se comparó la variación de profundidad de las isotermas de 19.6, 20, 21, 22 y 22.5 °C, que incluyen el rango de temperatura observado en el metalimnio.

En la Figura 64 se muestra la correlación entre los datos medidos y los calculados, que indica la capacidad del modelo de reproducir la dinámica en el embalse en la zona de la cortina. En el primer metro de profundidad se observa la menor Raíz del Erro Cuadrático Medio (*RECM*) entre los datos medidos y calculados, también se obtuvo la mejor correlación (0.72). En esta capa la temperatura es afectada principalmente por las variaciones en la radiación incidente y el régimen del viento, que varía cerca 0.5°C de manera diurna. La menor correlación entre los datos, se encontró a los 5 m. A esta profundidad el modelo tiene un comportamiento muy homogéneo, similar al primer metro, en la fase cálida de los datos medidos el modelo tiene un buen ajuste, pero no reproduce el descenso de temperatura que ocurre antes de las 24:00 h, es por eso que el *RECM* es menor de 0.5°. El descenso de temperatura a esta profundidad puede asociarse a la onda interna, que permite el ascenso del metalimnio y la mezcla con agua de menor temperatura. A los 10 m se observa la mayor *RECM*, donde el efecto de la onda interna es mayor, debido a esto la variación de temperatura medida a lo largo de la serie tuvo una diferencia de casi 2 °C. Al inicio de la serie el comportamiento del modelo es similar al de la serie, pero conforme continúa la simulación la temperatura no desciende a la misma velocidad que lo hacen los datos medidos. A los 15 metros de profundidad el modelo reproduce el comportamiento de temperatura de mejor manera, aun así la correlación sigue siendo baja. A los 19 m la variación en los datos medidos fue alrededor de 0.5 °C, en los datos calculados fue cercana a 1 °C. Debido a esto la diferencia entre los datos llega a ser mayor de 1 °C.

Al comparar las isotermas en el metalimnio, se hace evidente que el modelo no reproduce las variaciones asociadas con el ascenso y descenso de esta capa (Figura 65). Las isotermas de 22.5 y 22 °C tienen variación diurna, con una amplitud de hasta 10 m, en un rango de 0 a 15 y 5 a 15 m, respectivamente. El modelo reproduce el comportamiento con una correlación baja, las variaciones en la profundidad de las isotermas es alrededor de 5 m, se aprecia que la profundidad de las isotermas se ve

afectada por los eventos de precipitación que ocurrieron entre las 14:00 y 18:00 h inhibiendo el ascenso (Figura 10). En la isoterma de los 21 °C la RECM es la menor, con una correlación mayor al de las otras isotermas (22 y 22.5 °C). En las mediciones la isoterma varía entre los 10 y los 20 m. La mayor correlación se encontró para la isoterma de 20 °C, la RECM es relativamente baja, la variación de la profundidad se observa entre los 12 y 20 m.

En general el modelo reproduce el comportamiento de la oscilación vertical de temperatura, pero en la superficie subestima la amplitud de la onda. Debido a esto entre los 5 y 10 m de profundidad, la temperatura estimada por el modelo es mayor a la medida por los termistores en la zona de la cortina. Entre el metalimnio e hipolimnio la onda se sobre estima, promoviendo el calentamiento del hipolimnio. La mejor correlación de los datos se observó por debajo de la termoclina, en las isotermas de 19, 20 y 21 °C.

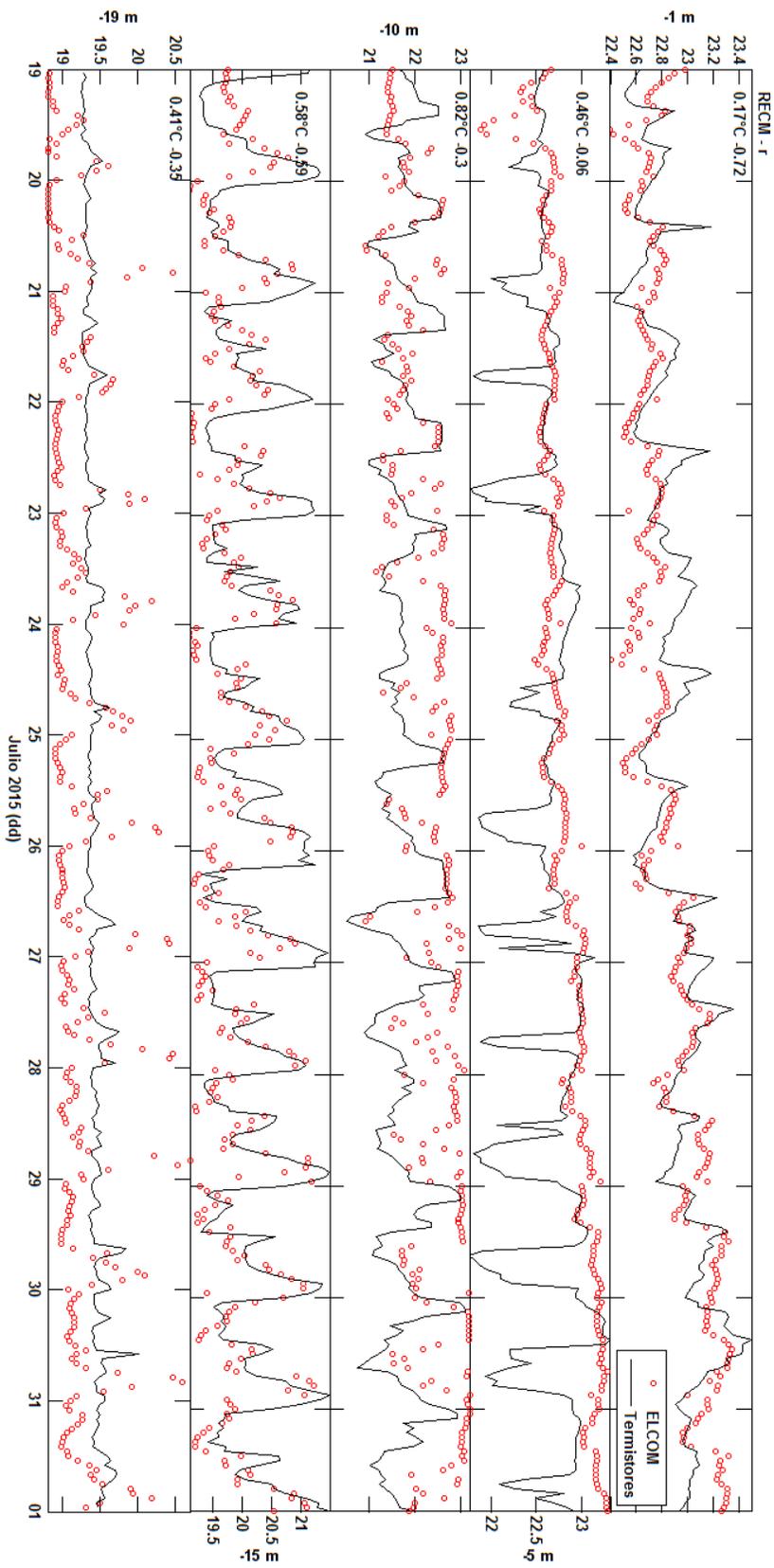


Figura 64. Comparación entre la temperatura medida por los termistores en la boya de CONAGUA y la calculada por el modelo el mismo sitio.

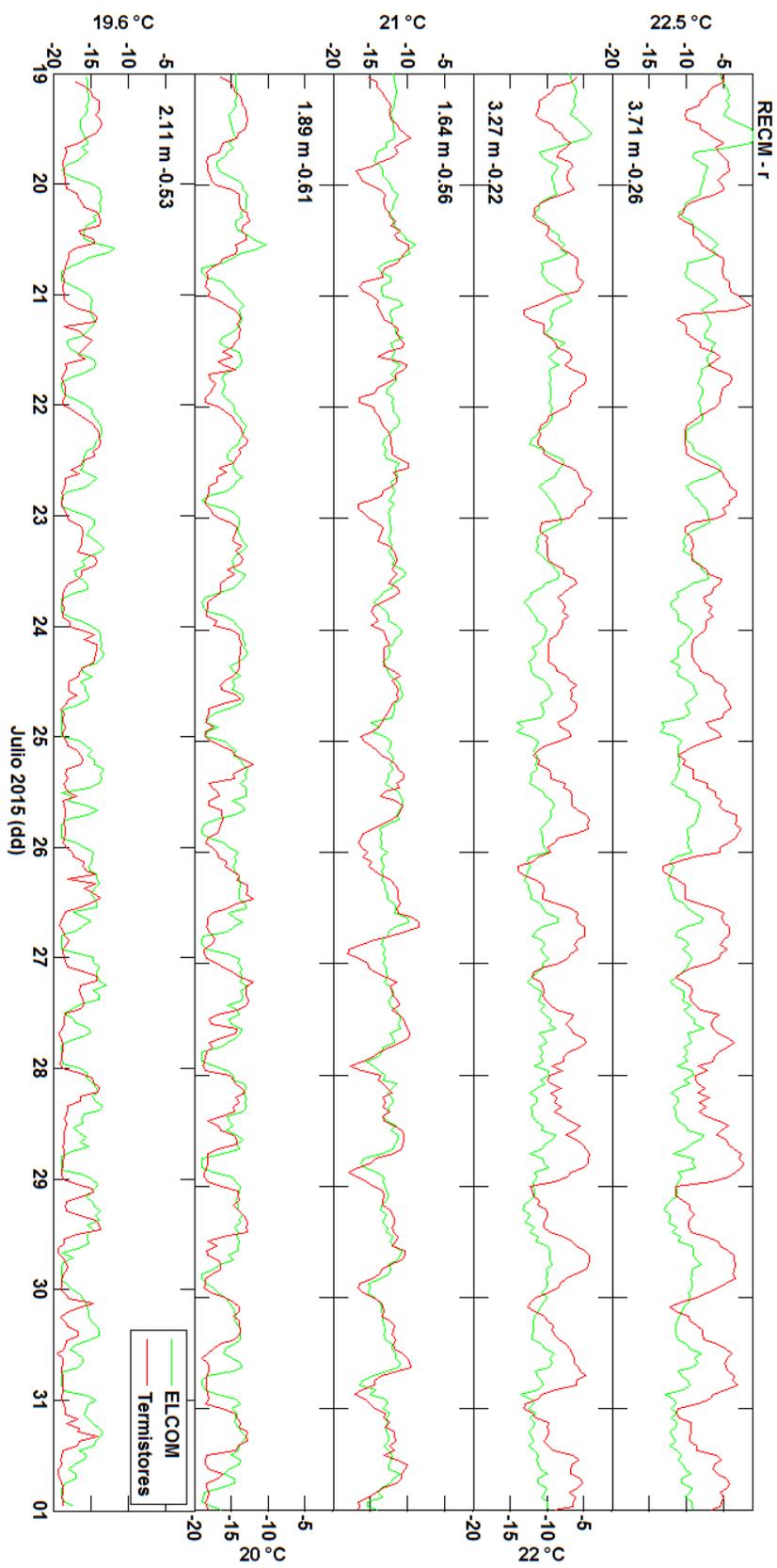


Figura 65. Comparación de la variación de profundidad de las isothermas

3.5.2 Validación espacial

Para validar espacialmente los resultados del modelo se compararon, la Interface de 22°C obtenida a partir de los datos del modelo, con la profundidad interpolada a partir de los perfiles medidos con el CTD Seabird. Para cada muestreo se calculó la raíz del error cuadrático medio entre los datos medidos y los calculados. En las figuras se muestra la diferencia de profundidad entre los datos medidos y la superficie obtenida a partir de los datos del modelo.

Durante el primer muestreo la profundidad de la superficie de 22 °C fue menor hacia la parte noreste del embalse, desde la bahía del río Amanalco hacia la el río Molino (Figura 66). La capa se distribuye entre los 7.8 y 12 m de profundidad y la *RECM* fue de 1.4 m que representa el 33.3 % de la variabilidad de profundidad. La mayor diferencia se observa en la río Carrizal. Durante el muestreo esta zona estuvo influenciada por el metalimnio que asciende por la parte central del Eje A. En la desembocadura de los ríos Molino, González y Tizatez, el aporte de agua fría es lo que provoca que el metalimnio ascienda.

En el segundo muestreo la distribución de la superficie de 22 °C se modificó, asociada al comportamiento de la onda interna (Figura 67). La máxima profundidad de la capa fue 13.9 m, en la zona de la cortina hacia el río González. La profundidad mínima de 8.3 m, se observó en la bahía del río Amanalco. El descenso de la capa en la bahía del río Amanalco no se observa en los datos medidos, y tuvo una diferencia máxima de 3.2 m de profundidad con respecto al modelo. Durante el segundo muestreo el metalimnio ascendió desde la bahía del río Amanalco hacia la superficie en la parte central del embalse. En los resultados del modelo se observa el descenso del metalimnio en esta zona. Asociado a esto la *RECM* fue de 1.8 m, 32% de la variación similar que al muestreo anterior.

En el tercer muestreo la *RECM* ascendió a 2m, manteniendo la proporción de 33.3% con respecto a la variación en la profundidad de la superficie de 22 °C (Figura 68). La profundidad en la superficie de temperatura fue menor en la zona noreste del embalse con un valor mínimo de 7.6 m y aumentó hacia la cortina, donde alcanza los 13.4 m de profundidad. Los datos medidos tuvieron un comportamiento similar. En los datos medidos con el CTD se observa el efecto del aporte de agua por los ríos al metalimnio, asociado al evento de precipitación del día anterior, debido a esto la capa es menos profunda con respecto a los resultados del modelo en los que el epilimnio se mantuvo cálido y con mayor profundidad.

En la distribución de temperatura del último muestreo, se observó el ascenso de agua asociada al metalimnio, hacia la zona centro del embalse. Debido a esto la temperatura fue menor a los 22 °C en esa zona. Los resultados del modelo muestran que en la zona este del Eje A, la superficie de los 22 ° se encontraba entre 9 y 10 m, y descendió continuamente hasta 12 m en la zona de la cortina (Figura 69). La mínima profundidad se observa en la bahía del río Amanalco y ascendió a 11 m hacia el centro del embalse. La *RECM* de los perfiles donde se midió los 22°C fue de 1.3 m, con la mayor diferencia en las zonas donde asciende el metalimnio.

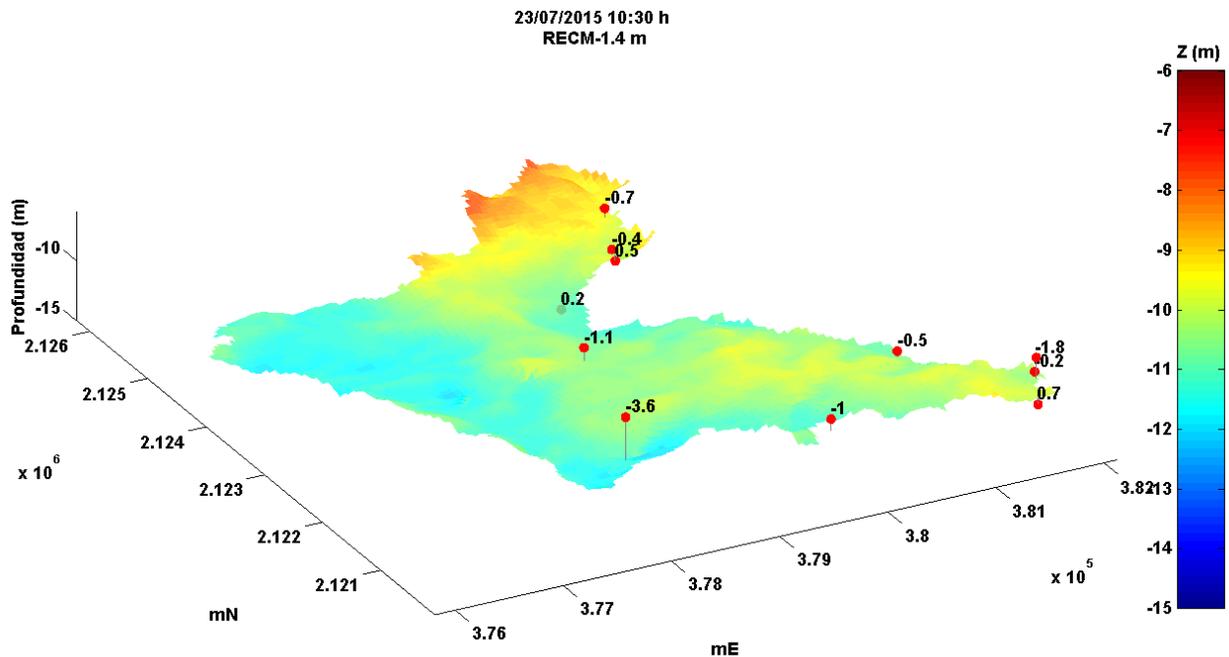


Figura 66. Comparación de la Interface y los datos medidos en el primer muestreo, para la temperatura de 22°C.

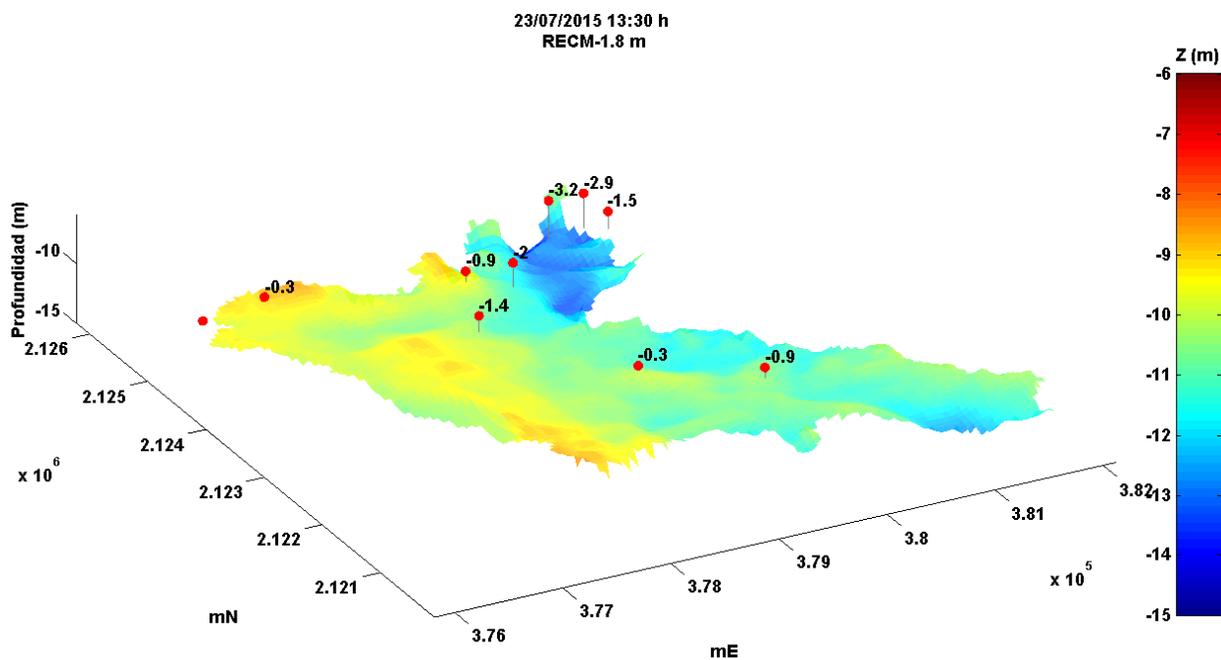


Figura 67. Comparación de la Interface y los datos medidos en el segundo muestreo, para la temperatura de 22°C.

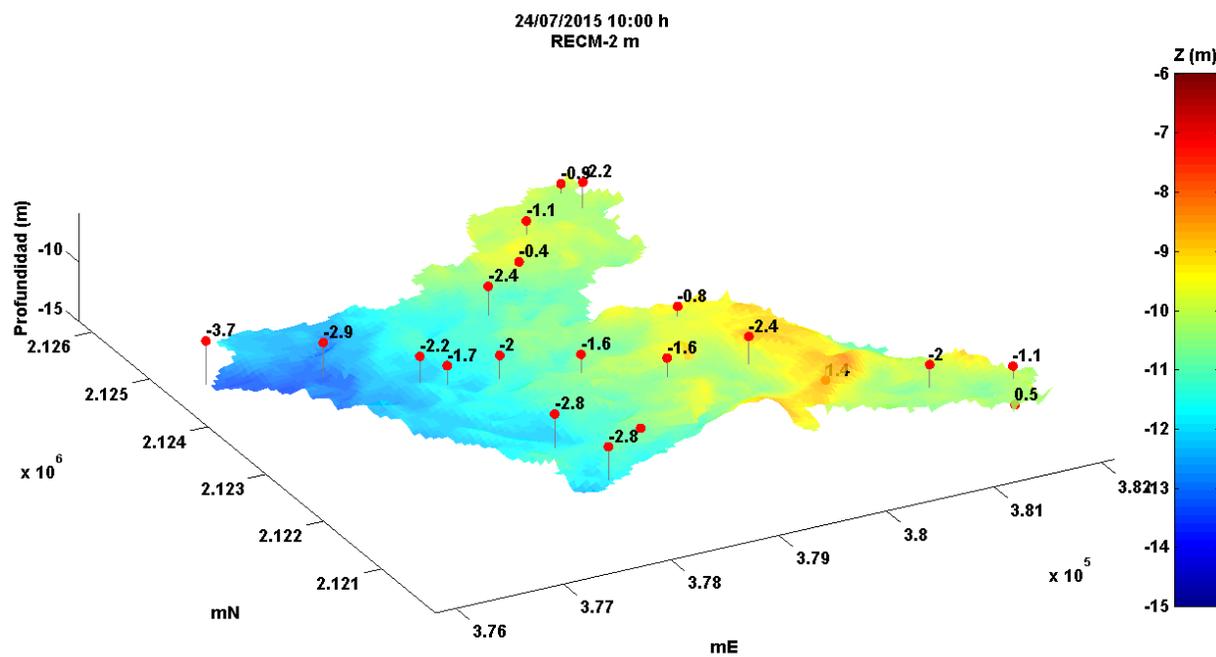


Figura 68. Comparación de la Interface y los datos medidos en el tercer muestreo, para la temperatura de 22°C.

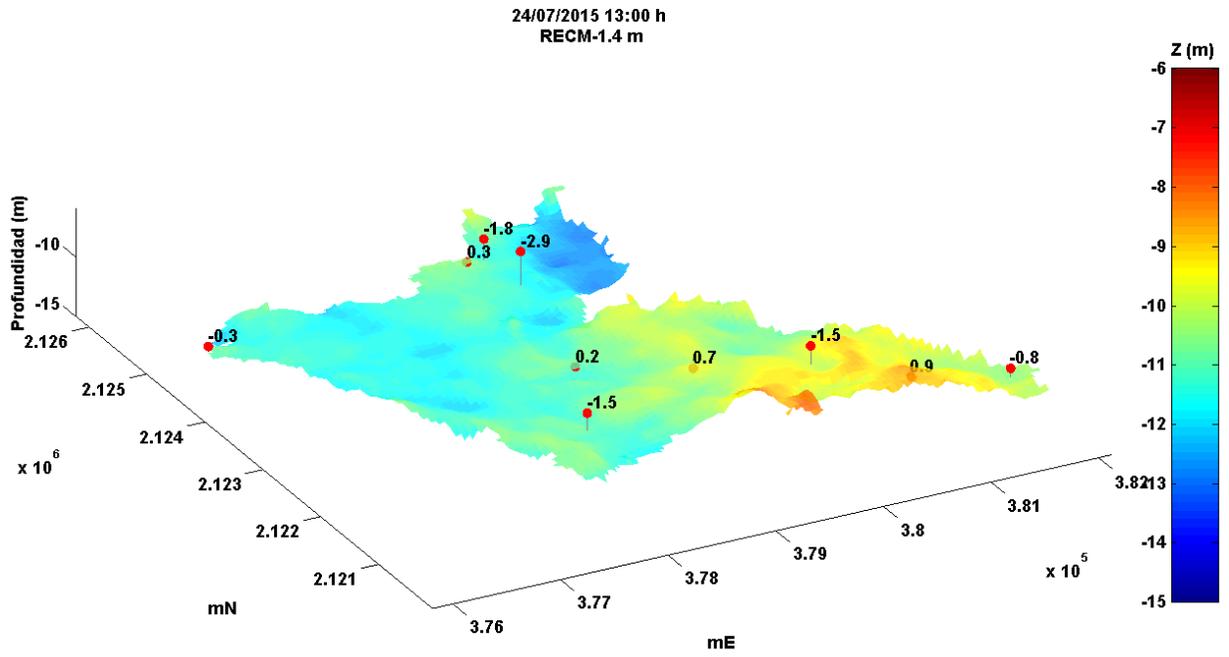


Figura 69. Comparación de la Interface y los datos medidos en el cuarto muestreo, para la temperatura de 22°C.

Capítulo 4. Discusiones

En este trabajo se asume que la dinámica en la estratificación térmica de Valle de Bravo es afectada principalmente por el régimen de viento, la radiación solar, la precipitación y con menor influencia por el aporte de los ríos y el volumen de extracción por parte del Sistema Hidráulico Cutzamala. Para comprobar la hipótesis de este estudio se utilizaron mediciones que fueron obtenidas durante la temporada de lluvia, cuando el embalse se encontraba estratificado, los días 23 y 24 de Julio de 2015. La adaptación del modelo hidrodinámico para el embalse de Valle de Bravo estuvo limitada por la información disponible.

En las series de tiempo de los termistores se observó que la columna de agua se encontraba estratificada en tres capas. La capa superficial o epilimnio tuvo una temperatura promedio de 22.8 °C y profundidad promedio de 9.4 m, limitó con el metalimnio en la isoterma de 22.5 °C. El metalimnio tuvo una temperatura promedio de 21 °C, limitó con el hipolimnio en la isoterma de 19.6 °C que se encontraba a una profundidad promedio de 16 m. El hipolimnio tuvo una temperatura promedio de 19.4 °C y se distribuyó desde los 16 m hasta el fondo (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Estos resultados pudieran explicarse asumiendo que el efecto de la radiación solar y mezcla por el esfuerzo del viento, afectaron hasta los primeros metros, mientras el hipolimnio permaneció con baja temperatura, provocando que se estratificara la columna. Las series de datos analizadas corresponden a la temporada de lluvias y fueron medidas el 23 y 24 de Julio del 2015. Los límites en la estratificación de los resultados del modelo, tuvieron en general una diferencia de 0.5 °C con las mediciones. El epilimnio limitó en la isoterma de 22 °C que tuvo una profundidad promedio de 8.2 m y temperatura promedio de 22.7 °C. El metalimnio limitó en los 19 °C y tuvo una temperatura promedio de 19.3 °C. En el hipolimnio la temperatura promedio fue de 18.9 °C. La diferencia en la estratificación podría deberse a que en la adaptación del modelo no se utilizó la medición *in situ* de la radiación de onda larga, sino que se estimó utilizando el modelo de Fischer *et al.* (1979). Las diferencias podrían ser menores si se utilizan mediciones *in situ* de la radiación de onda larga.

La profundidad en la isoterma de 21.5 °C tuvo variaciones en los extremos del Eje A, en la zona de la boya y en el río Molino (Figura 48). Este comportamiento podría explicarse asumiendo que durante la fase de mayor velocidad del viento cuando sopla desde la cortina hacia el este del embalse, el estrés del viento sobre la superficie transfiere momento a la superficie desplazándolo en dirección del viento, permitiendo que la termoclina ascienda en la zona de la cortina y descienda hacia el extremo este del

embalse, esta dinámica fue descrita por Imberger (1985) y ha sido observada en el embalse (Okely *et al.*, 2009; Merino *et. al*, 2008; Anis y Shingal, 2006).

En los datos de temperatura en la zona de la boya se observó que el ancho del metalimnio tuvo una variación diurna. Desde las 09:00 h hasta las 03:00 h del siguiente día, el metalimnio tuvo un ancho promedio de 13 m, entre las 03:00 y 09:00 h el ancho de la capa disminuyó a 5 m en promedio (Figura 25). Esta variación en el metalimnio podría explicarse asumiendo que el ascenso del metalimnio, debido al desplazamiento de la capa superficial, podría permitir la mezcla entre el metalimnio e hipolimnio enfriando al metalimnio y desplazando al hipolimnio hacia el fondo. Esto podría ser el inicio en la formación de la onda interna descrita por Okely *et al.* (2010) En los resultados del modelo, la dinámica diurna en el ancho del metalimnio tuvo menor variación. El ancho de la capa varió en promedio de 10 a 2.5 m (Figura 48). Una razón en las diferencias de la variación en el espesor entre los resultados del modelo y las mediciones, podría ser que la dinámica del viento no está bien representada en la adaptación del modelo, debido a que se utilizaron mediciones en un solo sitio, la topografía montañosa que rodea a Valle de Bravo podría provocar cambios locales en el régimen de viento que no fueron medidos. La adaptación del modelo se podría mejorar utilizando mediciones de dirección y velocidad del viento en diferentes sitios en el embalse, que permitan tener una mejor aproximación a las variaciones locales en la dinámica del viento.

En la distribución de temperatura obtenida a partir de las mediciones del segundo día campaña se observó que durante la mañana el metalimnio ascendió hasta la superficie en la parte este del embalse, la bahía del río Carrizal y a partir de La Peña hacia el río Molino, en el extremo oeste. En las últimas mediciones en ese mismo muestreo, se observó que el metalimnio descendió hacia la zona este del embalse. Durante la tarde el metalimnio ascendió en la zona oeste del embalse y descendió hacia el este (Figura 29Figura 30). Este comportamiento del metalimnio podría deberse al enfriamiento del epilimnio que provoca que la profundidad de la capa disminuya, y asociado con el balance de masa que produce por el desplazamiento de la capa superficial en la dirección del viento. En la zona de la cortina la columna de agua permaneció estatificada, durante los días de muestreos, a diferencia de las demás zonas en el embalse. Este comportamiento podría asociarse a la protección del viento, debido a la cortina de la presa. En los resultados del modelo se observó una dinámica fue similar a los resultados, pero con diferencias en la profundidad de las capas, asociadas con las limitaciones en la adaptación del modelo.

En las mediciones de turbidez realizadas con el perfilador Seabird se observó el aporte de sólidos suspendidos por parte de los ríos en el metalimnio, hacia la zona de la cortina. En las mediciones de

temperatura, no se observó un efecto significativo en la temperatura del embalse asociado al aporte de los ríos. Una posible explicación podría ser que el gradiente de temperatura entre el río y el embalse no es significativo. La temperatura del agua en los ríos no fue medida en la campaña de mediciones.

En la Interface de 22 °C, obtenida a partir de los resultados del modelo (Figura 59Figura 60Figura 61, 62 y 63), se observó la dinámica de la onda interna descrita por Okely *et. al* (2010), La cual permitió diferencias horizontales de temperatura que se observaron en el modelo a la profundidad de 10 m. Al comparar la Interface de 22 °C obtenida del modelo, con la profundidad a la que se encontraba la temperatura de 22 °C en los perfiles medidos con el CTD (Figura 66Figura 67Figura 68Figura 69), se observó un comportamiento similar, en el que la temperatura se encontraba a menor profundidad que en el modelo, esto podría explicarse asumiendo que la temperatura calcula en la capa de mezcla por el modelo fue menor que en las mediciones. Estos resultados indican que las series de tiempo utilizadas en la adaptación del modelo hidrodinámico, reproducen la dinámica vertical de la onda interna con diferencias en la amplitud.

Literatura citada

- Bocaniov, S. A., Ullmann, C., Rinke, K., Lamb, K. G., y Boehrer, B. (2014). Internal waves and mixing in a stratified reservoir: insights from three-dimensional modeling. *Limnological-Ecology and Management of Inland Waters*, 49, 52-67.
- Anis, A., y Singhal, G. (2006). Mixing in the surface boundary layer of a tropical freshwater reservoir. *Journal of Marine Systems*, 63(3), 225-243.
- Casulli, V., y Cheng, R. T. (1992). Semi - implicit finite difference methods for three - dimensional shallow water flow. *International Journal for numerical methods in fluids*, 15(6), 629-648.
- Chau, Kw. 2016. *Modelling for coastal hydraulics and engineering*. Taylor and Francis td.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. 2014. *Estadísticas del agua México*. México. 239 pp.
- Coronado, C., Czitrom, S., Imberger, J., y Ramírez, I. (2011). Three-Dimensional Modeling of a Wave-Driven Seawater Pump Inflow to the Port of Ensenada, Mexico. *Journal of Coastal Research*, 27(6A), 172-183.
- Fischer, Hugo, John List, C. Koh, Jorg Imberger, y Norman Brooks. 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press.
- Flores-Vidal, Xavier. (2006) *Circulación residual en Bahía San Quintín, B.C. México*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, Ensenada, Baja California, México. 80pp.
- Gámez, B., Ojeda, D., Larrazábal, G., y Cerrolaza, M. (2006). *Simulación y Modelado en Ingeniería y Ciencias*. Sociedad Venezolana de Métodos Numéricos en Ingeniería. Caracas.
- Gutiérrez López, E. D. y M. I. Ramírez Aguilar. (2014) Temperature and water age simulation of a reservoir in Central México. En VIII Pan-American Workshop on Applied and Computational Mathematics Del 21 al 25 de Julio. Barranquilla, Colombia. San Diego State University. Ponencia Oral. Publicado en: Resumen. (Internacional) (PA: 108572)
- Hodges, B. R., J. Imberger, A. Saggio, and K. B. Winters. 2000. Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnology and Oceanography*. 45(7): 1603–1620.
- INEGI. 2015. Datos de Relieve. Recuperado el 07 de febrero de 2013 de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>.
- Laval, B. E., Imberger, J., y Findikakis, A. N. (2005). Dynamics of a large tropical lake: Lake Maracaibo. *Aquatic sciences*, 67(3), 337-349.
- Laval, B., Imberger, J., Hodges, B. R., y Stocker, R. (2003). Modeling circulation in lakes: Spatial and temporal variations. *Limnology and Oceanography*, 48(3), 983-994.
- Lee, H., Chung, S., Ryu, I., y Choi, J. (2013). Three-dimensional modeling of thermal stratification of a deep and dendritic reservoir using ELCOM model. *Journal of Hydro-environment Research*, 7(2), 124-133.

- Leonard, B. P. (1991). The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 88(1), 17-74.
- Lewis Jr, W. M. (1983). A revised classification of lakes based on mixing. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40(10), 1779-1787.
- Merino-Ibarra, Martín, Emiliano Monroy-Ríos, Fermín S. Castillo-Sandoval, y Javier Alcocer. 2003. Wind-Driven Upwelling indicated by hydrological variability in a tropical eutrophied reservoir, Valle de Bravo, Mexico. En: 4th International Conference on Reservoir Limnology and Water Quality. eské Budìjovice: Institute of Hydrobiology, Academy of Sciences of the Czech Republic. 228-231.
- Merino-Ibarra, M., Monroy-Ríos, E., Vilaclara, G., Castillo, F. S., Gallegos, M. E., y Ramírez-Zierold, J. (2008). Physical and chemical limnology of a wind-swept tropical highland reservoir. *Aquatic Ecology*, 42(3), 335-345.
- OCAVM, Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México. 2013. Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII. CONAGUA.
- Okely, Patricia, Jörg Imberger, y Kenji Shimizu. 2010. Particle dispersal due to interplay of motions in the surface layer of a small reservoir. *Limnology and Oceanography*. 55(2), 589-603.
- Páez-Valencia, Emilio J. 2012. Modelación hidrodinámica y de calidad de agua en el estero de Urías, Sinaloa, México. Tesos de Maestría en Ciencias Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo. Mazatlán, Sinaloa. 152 pp.
- Panayotis, Prinos. 2016. *Modelling coastal hydrodynamics*. Accessed Recuperado el 27 de febrero de 2016 de http://www.coastalwiki.org/wiki/Modelling_coastal_hydrodynamics.
- Ramírez A., María Isabel, Carlos R. Torres N., y Mejía T., Adán. 2006. En VI Pan American Workshop in Applied and Computational Mathematics Del 24 al 28 de Julio. Huatulco, Oaxaca. Vol. x, pp x. San Diego State University. (Internacional) (PA: 48643)
- Ramírez Aguilar, M. I., R. Blanco Betancourt, R. Vázquez González y G. Ramírez Rosario. (2012) Simulating the hydrodynamics of San Quintín bay. En 16th Biennial Workshop Joint Numerical Sea Modeling Group (JONSMOD) 2012 Del 21 al 23 de mayo. Brest, Francia. Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer. Ponencia Oral. Publicado en: Resumen. (Internacional) (PA: 103896)
- Ramírez, Isabel, y Jörg Imberger. 2002. The numerical simulation of the hydrodynamics of Barbamarco Lagoon, Italy. *Applied Numerical Mathematics*. 40(1-2), 273-289.
- Ramírez-Zierold, Jorge, Martín Merino-Ibarra, F. Sergio Castillo-Sandoval, Emiliano Monroy-Ríos, Luz M. López-Gómez, José G. Quintanilla-Terminel, Patricia M. Valdespino-Castillo, Jorge Jiménez-Contreras, María E. Valeriano-Riveros, y Gloria Vilaclara-Fatjó. 2016. Variabilidad de la mezcla vertical y el flujo de nutrientes asociado en un embalse estratificado, Valle de Bravo, México. En *Tendencias de Investigación en Limnología Tropical: Perspectivas Universitarias en Latinoamérica*. México: Asociación Mexicana de Limnología, A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, y Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología. 39 pp.
- Shimizu, K., Imberger, J., y Kumagai, M. (2007). Horizontal structure and excitation of primary motions in a strongly stratified lake. *Limnology and oceanography*, 52(6), 2641-2655.

- Shintani, T., de la Fuente, A., Nino, Y., y Imberger, J. (2010). Generalizations of the Wedderburn number: Parameterizing upwelling in stratified lakes. *Limnology and Oceanography*, 55(3), 1377-1389.
- Spigel, R. H., J. Imberger, and K. N. Rayner. 1986. Modeling the diurnal mixed layer. *Limnology and Oceanography*. 31(3): 533–556.
- Spillman, C. M., Imberger, J., Hamilton, D. P., Hipsey, M. R., y Romero, J. R. (2007). Modelling the effects of Po River discharge, internal nutrient cycling and hydrodynamics on biogeochemistry of the Northern Adriatic Sea. *Journal of Marine Systems*, 68(1), 167-200.
- Valeriano-Riveros, M. E., Vilaclara, G., Castillo-Sandoval, F. S., y Merino-Ibarra, M. (2014). Phytoplankton composition changes during water level fluctuations in a high-altitude, tropical reservoir. *Inland Waters*, 4(3), 337-348.
- Zertuche-Chanes, Rebeca. 2013. Aplicación de un modelo numérico tridimensional para estudiar la hidrodinámica de la Bahía de Todos Santos. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California , Ensenada, BC. 59 pp.