

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**PLAN DE MONITOREO AMBIENTAL Y
MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL LAGO ROTOITI
REGIÓN BAY OF PLENTY, NUEVA ZELANDA**

DAVID HAMILTON¹
TORADJI URAOKA²

RESUMEN

Importantes *blooms* de algas, altos aportes de nutrientes y desoxigenación en aguas profundas son elementos que están siendo observados en el Lago Rotoiti en la región de los lagos de Rotorua en Nueva Zelanda. Como medida de mejoramiento de la calidad de las aguas se sugiere optar por costosas obras de ingeniería que permitirían controlar parte de las causas que la han deteriorado. Como parte de un proyecto regional de investigación, se ha evaluado el comportamiento hidrodinámico del lago y su calidad de agua asociada. Para ello se ha utilizado el modelo unidimensional DYRESM y el módulo acoplado de calidad de agua CAEDYM. Las salidas del modelo han sido comparadas con información de terreno medida a través de un plan de monitoreo especialmente diseñado para captar las especiales características del lago que incluye, entre otras cosas, una importante corriente de densidad de su principal afluente y el aporte geotérmico del fondo capaz de modificar la temperatura del *hipolimnion*.

¹ Professor B.Sc. Otago, Ph.D Otago, Environment BOP Chair in Lakes Management & Restoration, University of Waikato, New Zealand - mail: d.hamilton@waikato.ac.nz

² Ingeniero Civil, Research Assistant Centre for Biodiversity and Ecology Research, University of Waikato – mail: toradji@vtr.net

1. INTRODUCCIÓN

La región de los lagos de Rotorua se encuentra cerca de los 38° latitud sur, en un clima templado y de precipitación similar a la IX región. El origen de los lagos es de carácter volcánico y la componente geotérmica marca una fuerte presencia en toda la región. En la imagen satelital de la Figura 1 se muestra una serie de lagos, dentro de los cuales se destacan el Lago Rotoiti (área 35 km² y profundidad 120 m) y el Lago Rotorua (área 90 km² y profundidad 30 m).

El deterioro de la calidad de agua en algunos lagos (*Burns et al. 1997*) ha llevado a las autoridades medioambientales a gestionar planes de mejora, en las que se contempla una intensiva investigación multidisciplinaria con el fin de evaluar variadas alternativas que pueden aplicarse en distintas escalas de tiempo.

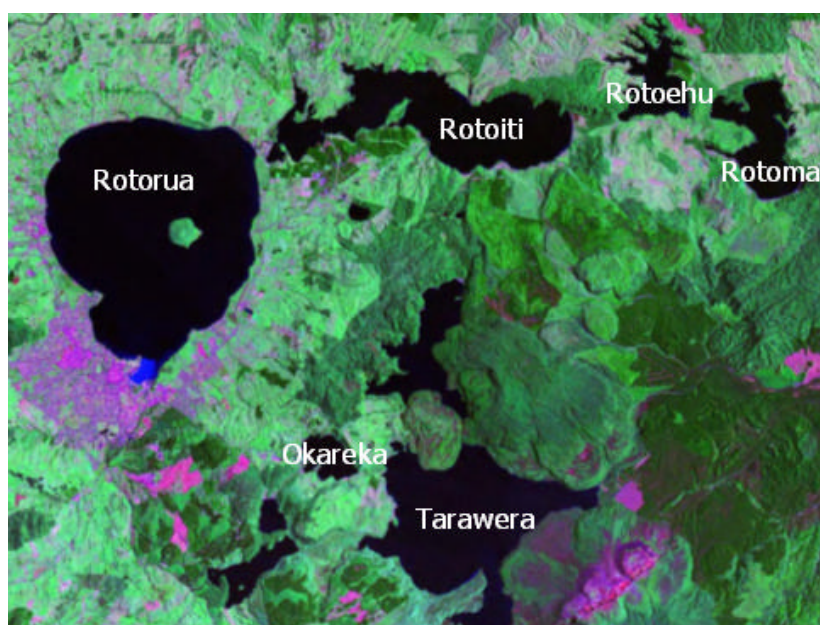


Figura 1. Imagen Satelital Landsat de la region de los lagos de Rotorua, Isla Norte de Nueva Zelanda.

El Lago Rotorua drena sus aguas a través del canal Ohau hacia el Este, llevando una deteriorada calidad de agua hacia la cubeta principal del Lago Rotoiti, acelerando el proceso de eutroficación (*Vincent et al. 1984* y *Priscu 1986*). En el Lago Rotorua se genera un importante incremento de nutrientes debido a la dinámica interna (*Rutherford 1996*) y la liberación de nutrientes desde el fondo cuando poco eficientes períodos de mezcla producen un descenso del oxígeno disuelto en el *hipolimnion* (*Hamilton et al. 2003*). La conexión de ambos sistemas a través del canal Ohau muestra una compleja relación en la que intervienen, entre otros, factores meteorológicos, corrientes de densidad por diferencia de temperatura, fuentes geotérmicas y una accidentada batimetría.

2. METODOLOGÍA

El estudio es abordado en forma conceptual con la aproximación del lago como un cuerpo de agua con propiedades horizontales homogéneas, por lo que se aplica un modelo numérico unidimensional para evaluar el comportamiento hidrodinámico. Para ello, se explica en detalle el plan de monitoreo que va a recopilar la información que alimenta el modelo específico del Lago Rotoiti.

2.1 Aplicación del Modelo Hidrodinámico DYRESM-CAEDYM

La implementación del modelo hidrodinámico DYRESM (Dynamic Reservoir Simulation Model) se ha complementado con la utilización del módulo acoplado CAEDYM (Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model), lo que ha permitido poder evaluar el comportamiento integral del lago utilizando estadísticas completas en períodos de 3 a 4 años. El modelo se aplica en forma unidimensional como se muestra en la Figura 2.

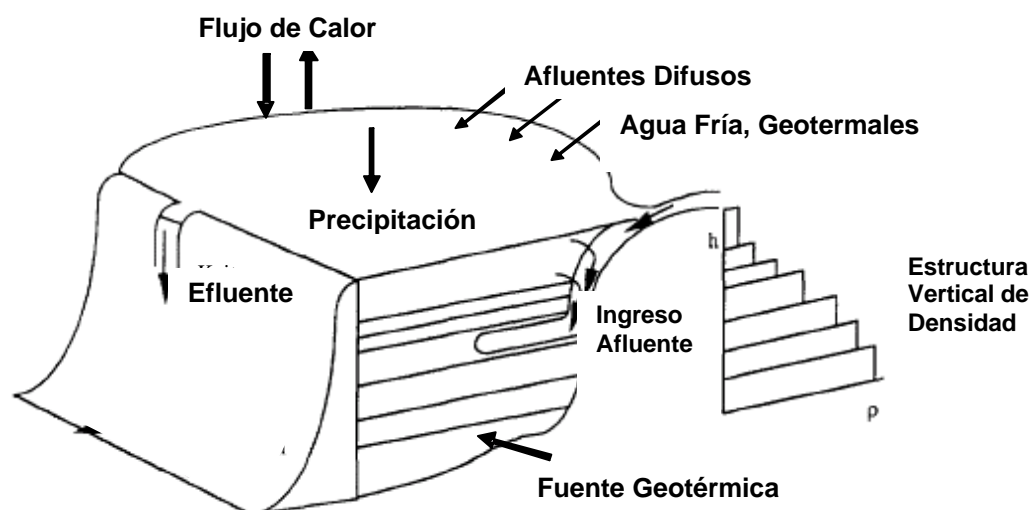


Figura 2. Esquema del modelo unidimensional DYRESM aplicado al Lago Rotoiti. En el lado derecho se muestra una conceptualización de la distribución vertical de densidad en función de la elevación.

2.2 Recolección de Información en Terreno

Parte fundamental del proyecto de investigación ha sido destinada al plan de monitoreo que debe recopilar información abundante y de calidad que permita describir los principales procesos que intervienen en el comportamiento de la calidad del agua.

Entre los equipos utilizados se encuentra el BIOFISH, el cual es una sonda multiparámetro radiocontrolada que permite medir en forma continua secciones transversales de un cuerpo de agua. Esta sonda mide temperatura, conductividad, oxígeno disuelto, fluorescencia, turbiedad, irradiancia y la presión de la columna de agua, lo que permite posicionar en forma vertical la

adquisición de datos. Toda la información queda además sincronizada con un GPS y un ecosonda, según se ve en la Figura 3.

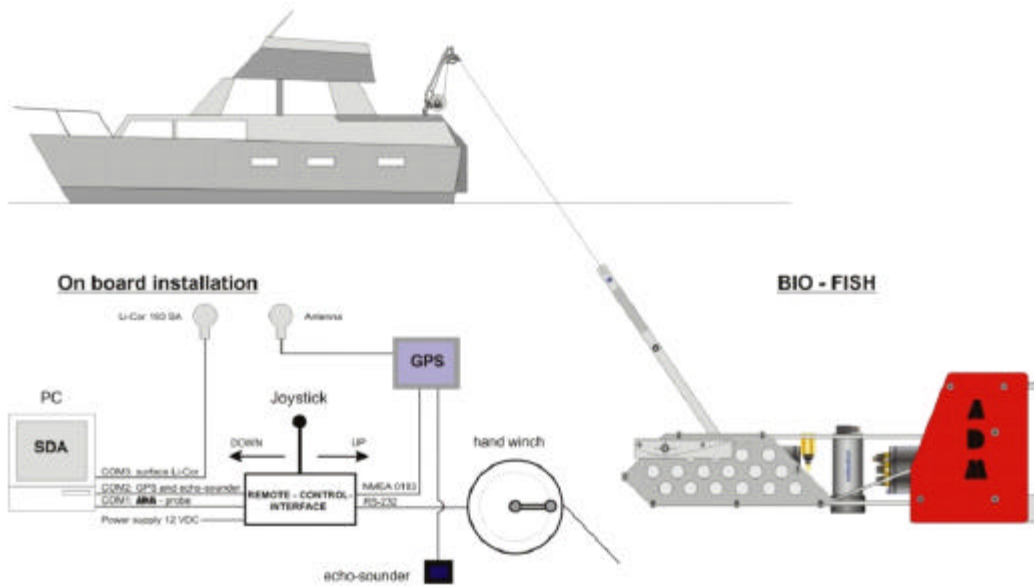


Figura 3. Ilustración de la configuración BIOFISH. El tamaño de la imagen del bote se ha reducido cerca de 10 veces comprado con la imagen de la sonda BIOFISH.

La ruta representativa que entrega una visión completa del estado del lago se programa con coordenadas GPS y la toma de datos queda replanteada según se muestra en la Figura 4.

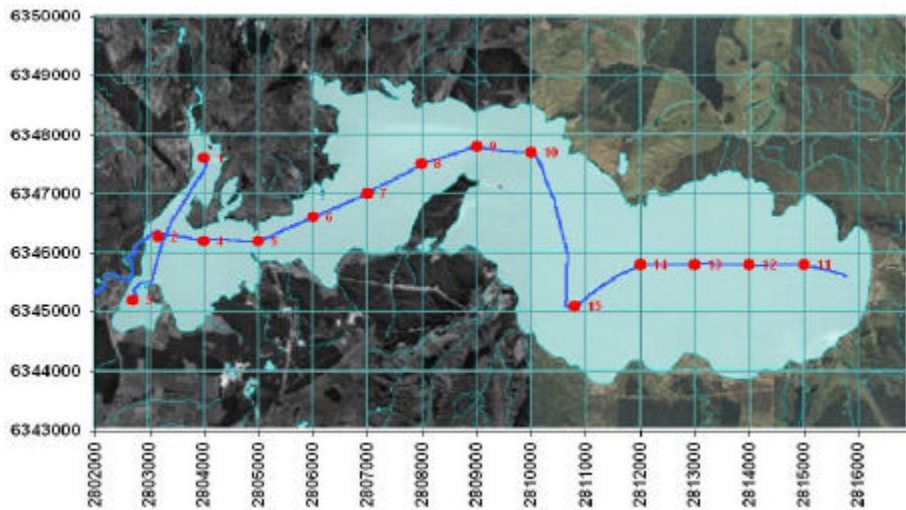


Figura 4. Coordenadas UTM (Norte y Este en metros) del Lago Rotoiti, mostrando los principales Waypoints GPS (puntos rojos) y la ruta efectiva seguida (línea azul) en las mediciones de transectos del lago.

La ruta ondulatoria del BIOFISH genera más de 200.000 puntos con datos en un trayecto de 20 km similar al que se muestra en la Figura 5. Luego, es posible interpolar la información para tener una imagen bidimensional del lago.

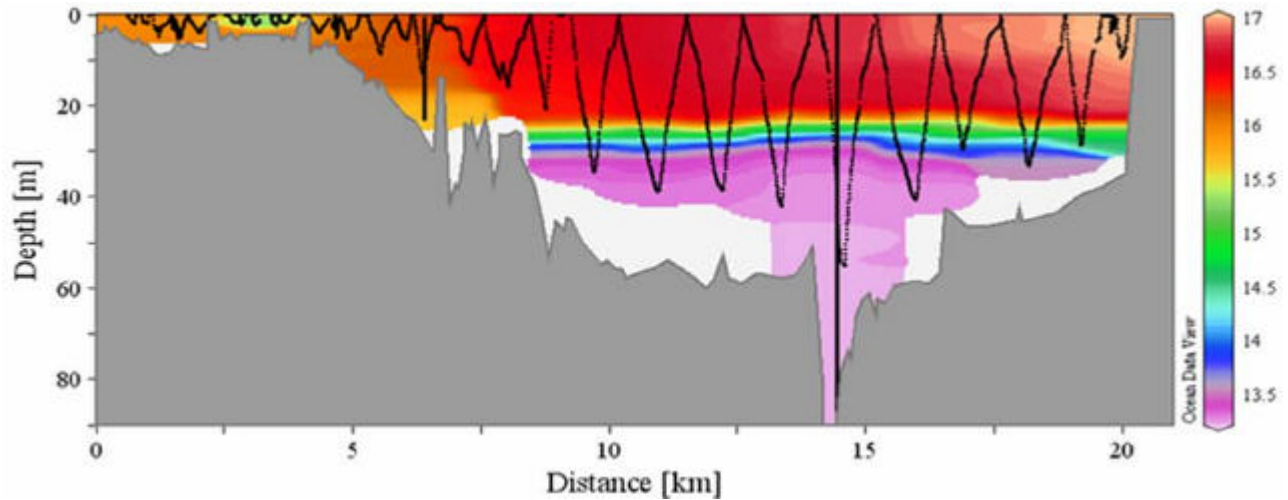


Figura 5. Sección transversal del Lago Rotoiti mostrando la ruta ondulada de la sonda BIOFISH desde el efluente del río Kaituna hasta el extremo Este del lago. La línea negra muestra las profundidades donde se tomaron mediciones, y el fondo en escala de color muestra valores de Temperatura [°C].

Con el plan intensivo de monitoreo se logró medir sobre 15 secciones transversales, las que muestran claramente el comportamiento estacional de la estructura vertical del lago, además se identificó la trayectoria de las aguas que provienen del afluente, el canal Ohau.

La Figura 6 muestra una serie de gráficos que corresponden a 4 de las principales variables: conductividad, temperatura, oxígeno disuelto y fluorescencia.

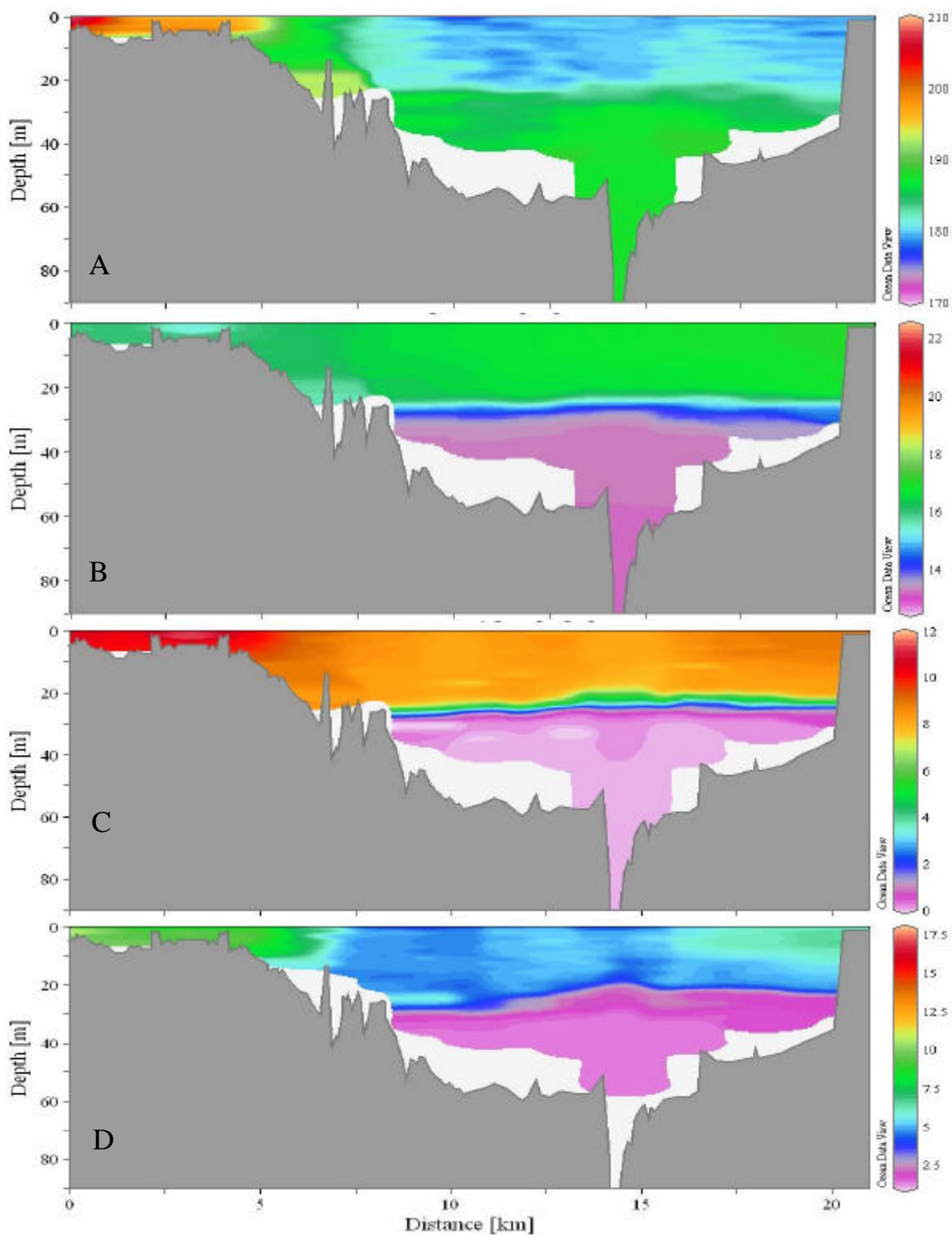


Figura 6. Transectos BIOFISH del Lago Rotoiti desde el efluente río Kaituna (0 km), hasta el extremo Este (22 km) el 7 de Abril de 2004. Variables incluidas (A) conductividad [$\mu\text{S cm}^{-1}$], (B) temperatura [$^{\circ}\text{C}$], (C) oxígeno disuelto [mg L^{-1}] y (D) fluorescencia en unidades aproximadas de clorofila *a* en $\mu\text{g L}^{-1}$.

En forma adicional se realizaron levantamientos con la sonda BIOFISH en el Lago Rotorua con el objetivo de captar el comportamiento del sistema conjunto. Según se muestra en la Figura 7 existe una diferencia notable en las conductividades, lo que permite realizar un seguimiento de las aguas que se insertan en el Lago Rotoiti. La conductividad cobra especial importancia por representar un trazador natural que permite la evaluación de mezcla de la corriente de densidad.

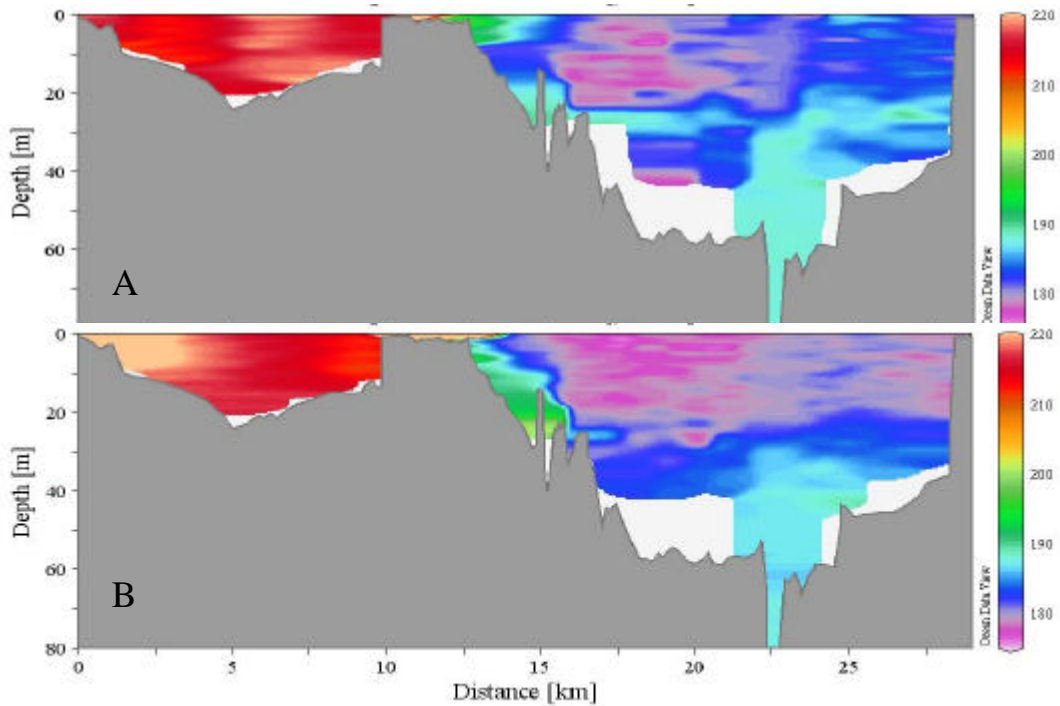


Figura 7. Conductividad [$\mu\text{S cm}^{-1}$] en un transecto a través del Lago Rotorua desde Ngongotaha hasta el Canal Ohau (0-10 km), a través del Canal Ohau (10-12 km) y el extremo Este del lago (12-30 km). Los transectos corresponden a (a) 31 Marzo y (b) 19 Abril de 2004.

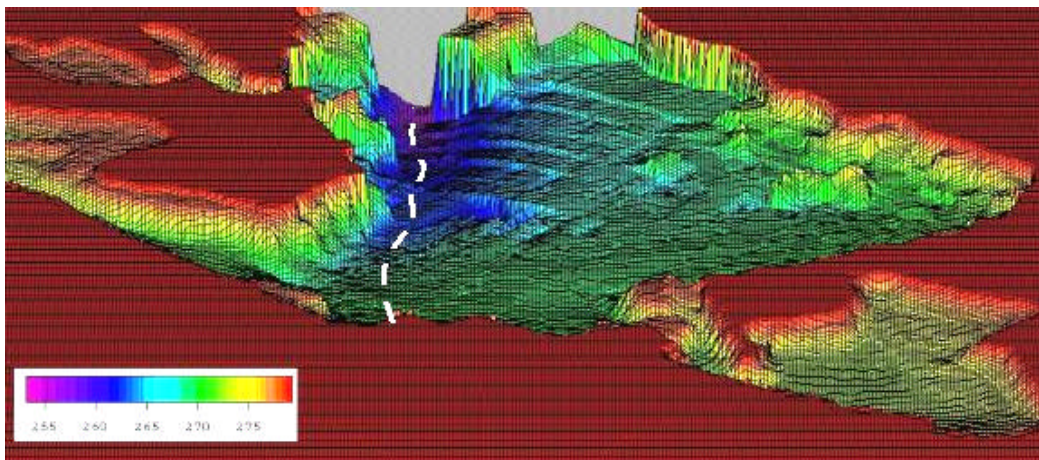


Figura 8. Corriente de densidad del canal Ohau (línea discontinua) como entra en la cubeta del Lago Rotoiti. La distancia de la línea es de aprox. 2.5 km y representa la sección transversal de la sonda BIOFISH de la Figura 9.

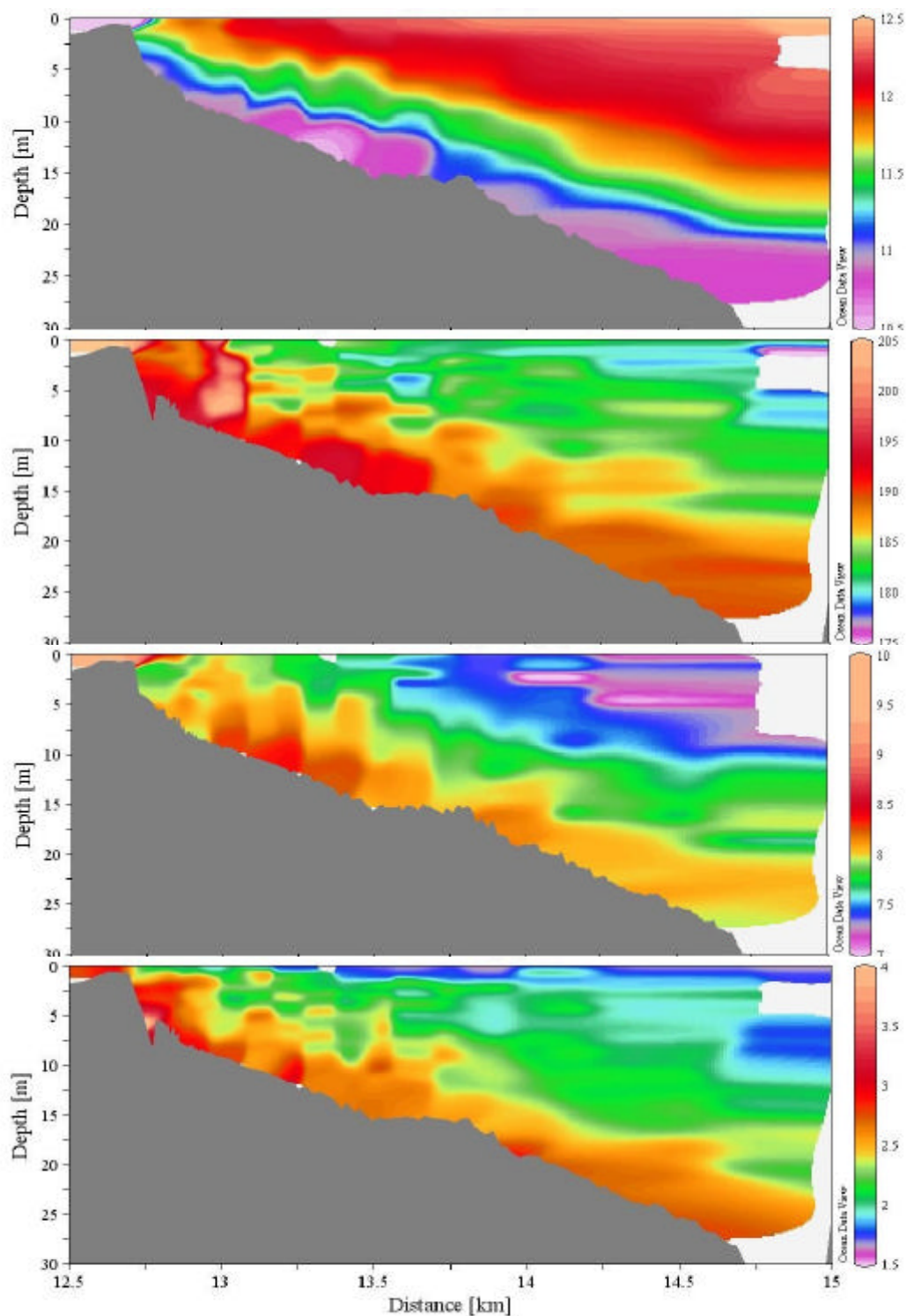


Figura 9. Propiedades del Lago Rotoiti en la zona de inserción del canal Ohau e ingreso de aguas hacia el Este como corriente de densidad el 17 Mayo 2004. Variables incluidas (a) temperatura [°C], (b) conductividad [uS cm⁻¹], (c) oxígeno disuelto [mg L⁻¹] y (d) fluorescencia en unidades aproximadas de clorofila *a* in ug L⁻¹.

La mezcla generada por el ingreso de un fluido de distinta densidad ha sido estudiada por Jirka y Watanabe (1980), los cuales definen el factor de dilución:

$$D = \frac{Q_u}{Q_i} = \frac{Q_i + Q_r}{Q_i} = \frac{1.2 \cdot U_i}{\left(g \cdot \frac{\rho(T_i) - \rho(T_r)}{\rho(T_i)} \cdot \left(\frac{A_i}{2} \right)^{1/2} \right)^{1/2}} - 0.2 \quad (1)$$

Sin embargo, por sobre estas consideraciones teóricas Vincent (1986), Leong (1988), Gibbs (1992 y 2003) y Spigel (estudio en proceso), han llegado a relaciones empíricas y modelos más adecuados a las condiciones de mezcla y batimétricas del Lago Rotoiti.

3. RESULTADOS

El modelo fue calibrado según las mezclas observadas en terreno de acuerdo a las variables de temperatura, conductividad y oxígeno disuelto. Se logró modelar la profundidad de la inserción del canal Ohau en forma estacional según se ve en la Figura 10.

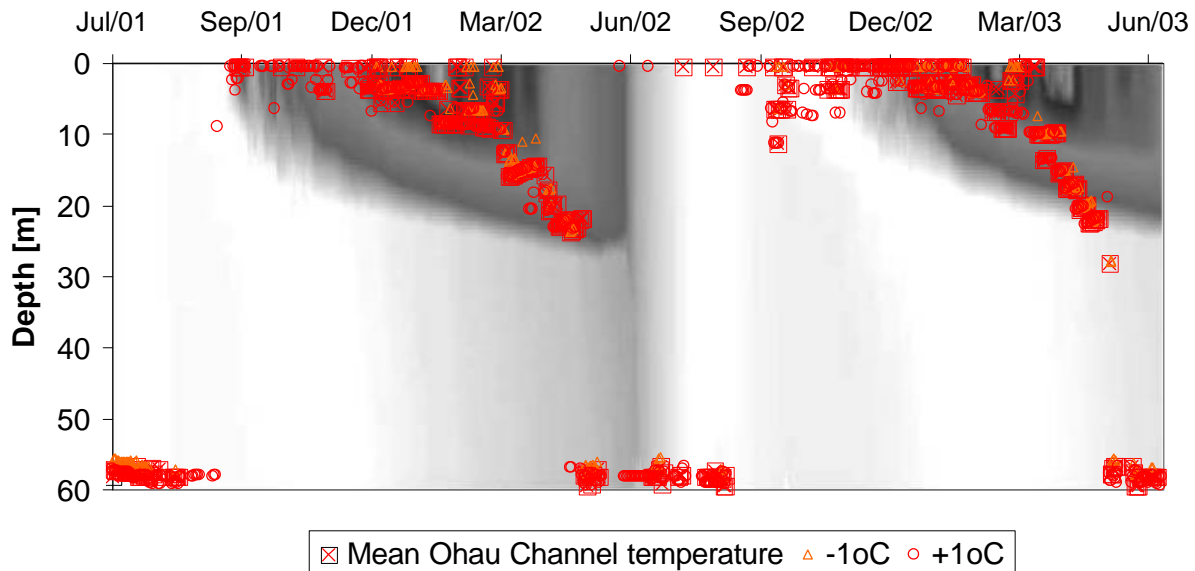


Figura 10. Profundidad de inserción predicha por el modelo DYRESM (puntos y cruces rojas) basado en simulaciones hechas desde el 1 Julio 2001 al 30 Junio 2003 (730 días). Referencialmente se muestra la estructura térmica en el fondo (sin escala de grises).

Los resultados de la modelación de temperatura y oxígeno disuelto se muestran en las Figuras 11 y 12. Se muestra una comparación de los datos reales medidos y los resultados modelados por DYRESM-CAEDYM.

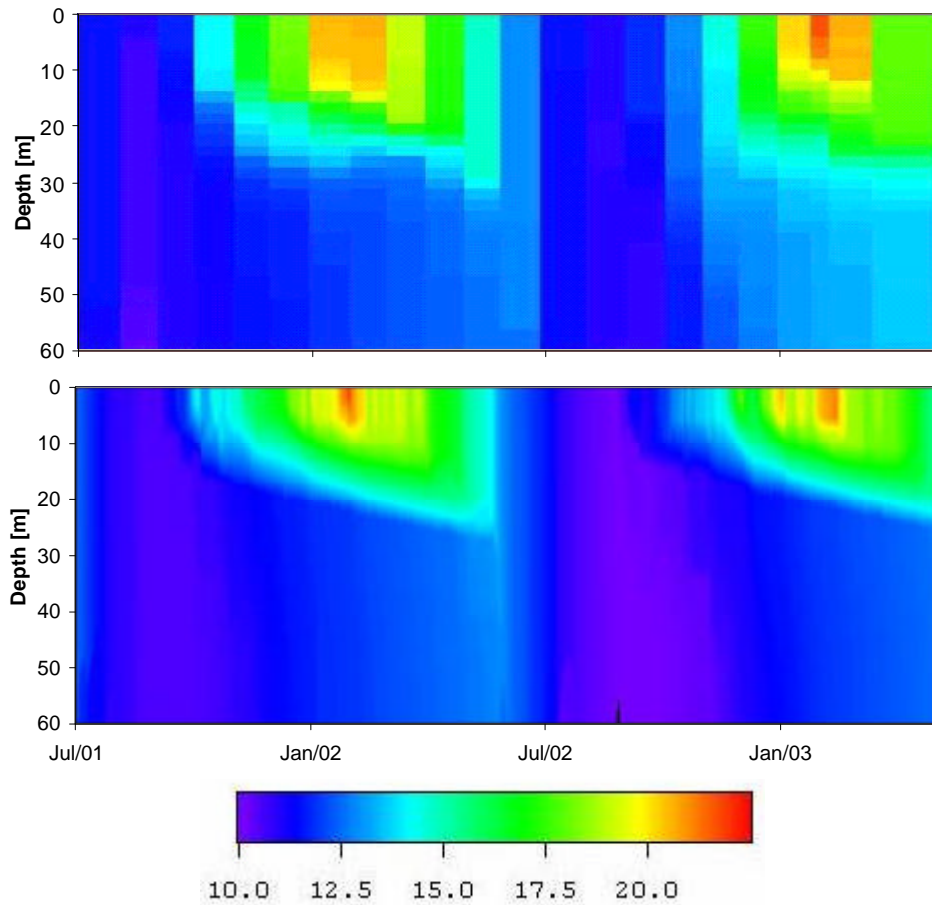


Figura 11. Contorno de Temperatura tiempo-profundidad desde 1 Julio 2001 al 12 Mayo 2003 (680 días) basado en mediciones de terreno (arriba) y simulaciones (abajo)

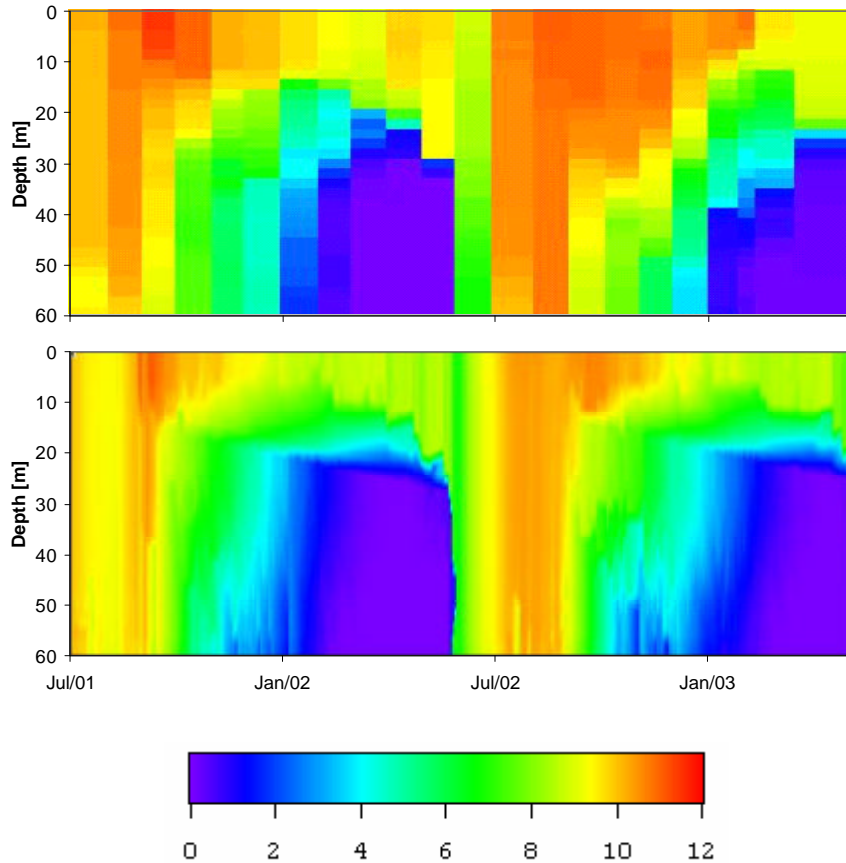


Figura 12. Contorno de Oxígeno Disuelto tiempo-profundidad desde 1 Julio 2001 al 12 Mayo 2003 (680 días) basado en mediciones de terreno (arriba) y simulaciones (abajo)

4. CONCLUSIONES

La aplicación de un plan integral de investigación, que incluye un intensivo plan de monitoreo y la implementación de un modelo numérico, permitió obtener una caracterización del comportamiento hidrodinámico y de calidad de aguas calibrado adecuadamente con la información adquirida en terreno.

Dado el buen ajuste del modelo se ha generado una serie de escenarios a través de la sensibilización de variables críticas como afluentes y concentración de nutrientes, lo que ha permitido tener una estimación del impacto que pueden tener medidas de control y manejo ambiental.

La similitud de las características de los lagos de Nueva Zelanda y Chile abre la posibilidad de colaboración e intercambio de experiencia en investigación entre ambos países.

REFERENCIAS

- Burns N. M.; Deely J.; Hall J.; Safi, K. 1997: Comparing past and present trophic states of seven Central Volcanic Plateau lakes, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 31: 71-87.
- Gibbs, M. M. 1992: Influence of hypolimnetic stirring and underflow on the limnology of Lake Rotoiti. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 26:453-463.
- Gibbs, M. M.; Hawes, I.; Stephens, S. 2003: Lake Rotoiti-Ohau Channel: Assessment of effects of engineering options of water quality. NIWA Client Report 2003: 142.
- Hamilton, D. P.; Alexander, W.; Burger, D. 2003: Nutrient budget for lakes Rotorua and Rotoiti. Part 1: Internal nutrients. Centre for Biodiversity and Ecology Report, University of Waikato – Report to the Lakes' Water Quality Society.
- Jirka, G. H.; Watanabe, M. 1980: Thermal structure of cooling ponds. *Journal of the Hydraulics Division ASCE*. 106: 701-715.
- Leong, D. C. K. 1988: Mixing of dense river inflows to lakes. Research Report 88/6, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Christchurch, 81 p.
- Priscu, J. C.; Spigel, R. H.; Gibbs, M. M.; Downes, M. T. 1986: A numerical analysis of hypolimnetic nitrogen and phosphorus transformations in Lake Rotoiti, New Zealand: A geothermally influenced lake. *Limnology and Oceanography*. 31: 812-831.
- Rutherford, J. C.; Dumnov S. M.; Ross A. H. 1996: Predictions of phosphorus in Lake Rotorua following load reductions. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 30: 383-396.
- Spigel, R.; Howard-Williams, C.; Gibbs, M.; Stephens, S.; Waugh, B. in press. Field Calibration of a Formula for Entrance Mixing of River Inflows to Lakes: Lake Taupo, North Island, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*.
- Vincent, W. F.; Gibbs, M. M.; Dryden, S. J. 1984: Accelerated eutrophication in a New Zealand lake: Lake Rotoiti, central North Island. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*. 18: 431-440.
- Vincent, W F.; Spigel, R. H.; Gibbs, M. M.; Payne, G. W.; Dryden, S. J., May, L. M.; Woods, P.; Pickmere, S.; Davies, J.; Shakespeare, B. 1986: The impact of the Ohau Channel outflow from Lake Rotorua on Lake Rotoiti. DSIR. Taupo Research Laboratory, unpublished report 92. 46 pp.

