

XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010

EFFECTO DE LA POSICIÓN DE LA COMPUERTA DE CAPTACIÓN SOBRE  
LA ESTRUCTURA TÉRMICA DE UN EMBALSE TROPICAL

*Juan David Franco Velásquez<sup>1</sup>, Francisco Mauricio Toro Botero<sup>2</sup> y Andrés Gómez-Giraldo<sup>3</sup>*  
*Universidad Nacional de Colombia - Escuela de Geociencias y Medio Ambiente – Posgrado en Aprovechamiento de*  
*Recursos Hidráulicos*

*<sup>1</sup> Estudiante de Maestría, <sup>2</sup> Ph.D Profesor Titular, <sup>3</sup> Ph.D Profesor Asociado*  
*jdfranco@unal.edu.co, fmtoro@unal.edu.co, eagomezgi@unal.edu.co*

RESUMEN

El embalse Riogrande II, propiedad de Empresas Públicas de Medellín (EPM), es un embalse multipropósito localizado en el departamento de Antioquia, Colombia. En este trabajo se presentan los resultados del estudio de la estructura térmica del embalse mediante la simulación numérica en la etapa de sensibilidad a los parámetros numéricos y físicos con el fin de identificar las variables que mayor influencia presentan sobre ésta. La simulación numérica se realiza con el modelo ELCOM, el cual se usa para estimar la estructura térmica en la columna de agua del embalse. Se usa el modelo para investigar posibles escenarios de operación del embalse, con el fin de evaluar el efecto que generan sobre la estructura térmica. Para este estudio, el modelo se alimenta con datos meteorológicos y de caudales de afluentes correspondientes a la campaña de campo realizada en marzo de 2010. Al realizar el análisis del efecto de la posición de la compuerta de captación sobre la estructura térmica del embalse, se encontró que tiene gran importancia en la dinámica del cuerpo de agua y afecta significativamente la estructura térmica. La posición de la compuerta afectó la posición de la termoclina, generando un mezclado vertical que prácticamente la destruyó para el caso de captación con compuerta inferior con caudales superiores a 20 m<sup>3</sup>/s.

ABSTRACT

Riogrande II is a multipurpose reservoir located in the Antioquia province, Colombia. In this paper, the thermal structure of the reservoir is simulated with the ELCOM numerical model considering the sensitivity analysis of the physical and numerical parameters in order to identify those which have the highest impact on the thermal structure. The sensitivity analysis is carried out by using meteorological parameters and discharges collected during a field campaign carried out in March 2010. The results of the simulations showed that the position (elevation) of the intake gates have high impact on the thermal structure of the reservoir, by affecting the position of the thermocline which in some cases is completely destroyed when the lowest gate is used and the outflow is greater than 20 m<sup>3</sup>/s.

PALABRAS CLAVES

Limnología física, estratificación térmica, simulación numérica, embalse Riogrande II

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los factores que afectan la calidad de un cuerpo de agua, están la evolución de su estructura térmica y de los procesos físicos asociados, entendiéndose por procesos físicos aquellas interacciones entre forzantes externos (radiación solar, viento, entrada y salida de caudales, etc.) y el cuerpo de agua que favorecen o se oponen a la mezcla. Uno de los comportamientos es la estratificación térmica, la cual se opone a la mezcla dentro del cuerpo de agua y puede convertirse en una problemática para los embalses.

En un embalse la captación de agua a distintas profundidades se usa para obtener aguas de diferentes calidades, con el fin de satisfacer demandas específicas. Si el agua se capta mediante una estructura pequeña, el gradiente vertical de densidad producirá fuerzas de flotación suficientemente fuertes para impedir el movimiento vertical, generando que el agua captada provenga de una delgada capa horizontal a nivel de la captación. Al aumentar la descarga, la capa de extracción puede interceptar la termoclina y para descargas mucho mayores el efecto de flotación puede sobrecargar completamente el sistema y volverlo un flujo potencial (Fischer et al., 1979).

Una de las características más importantes de las zonas tropicales es la poca variación que presenta la temperatura a lo largo del año. La estratificación térmica presente en los sistemas lénticos tropicales, está ante todo determinada por las variaciones de temperatura durante el ciclo diario (Loffer, 1964). Marín (2008) determinó, con información escasa (perfiles de temperatura y pH) y apoyándose en la modelación numérica, que el embalse Riogrande II presenta estratificación permanente.

De otro lado, ante la imposibilidad de realizar un constante monitoreo debido a los altos costos que implican, la simulación de fenómenos naturales mediante el uso de modelos matemáticos es una técnica que proporciona ventajas, pues al tenerse el modelo calibrado y validado, se pueden realizar predicciones de condiciones futuras. En este estudio se usa el modelo tridimensional Estuary, Lake and Coastal Ocean Model (ELCOM, Hodges et al., 2000), desarrollado por el Centro de Investigaciones del Agua (Centre for Water Research-CWR) de la Universidad de Australia Occidental, para la simulación hidrodinámica del embalse Riogrande II. Mediante la variación de parámetros numéricos (tamaño de celda de cálculo, paso de tiempo) y físicos (caudales afluentes y efluentes, magnitud y dirección del viento, cobertura de nubes, coeficientes de extinción de luz, etc.), se realizó un análisis de sensibilidad a dichos parámetros, con el fin de ajustar el modelo para obtener una representación fiel a las condiciones naturales y poder evaluar la influencia de la posición de las compuertas de la captación sobre la estructura térmica de dicho embalse.

## OBJETIVO

Determinar el efecto de la posición de las compuertas de captación sobre la estructura térmica de un embalse tropical utilizando un modelo numérico alimentado con información de campo y en proceso de validación.

## ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio es el embalse Riogrande II, ubicado al norte del departamento de Antioquia entre las coordenadas 6°28'N, 75°34'N y 6°34'N, 75°26'N. El cuerpo de agua es de múltiple propósito dado que sirve como abastecimiento de agua potable para la población de la ciudad de Medellín, generación de energía en la central hidroeléctrica La Tasajera y mejoramiento ambiental del Río Medellín por dilución con las aguas de la descarga de la central (Empresas Públicas de

Medellín, 2005). El embalse está alimentado por tres corrientes principales que, en orden de importancia, son los ríos Grande y Chico, y la quebrada Las Ánimas (Figura 1). El embalse tiene una capacidad de almacenamiento de  $240 \times 10^6 \text{ m}^3$  a la cota de vertedero (2270 m.s.n.m), un área superficial de agua de  $12.1 \times 10^6 \text{ m}^2$  y una profundidad máxima de 40 m.

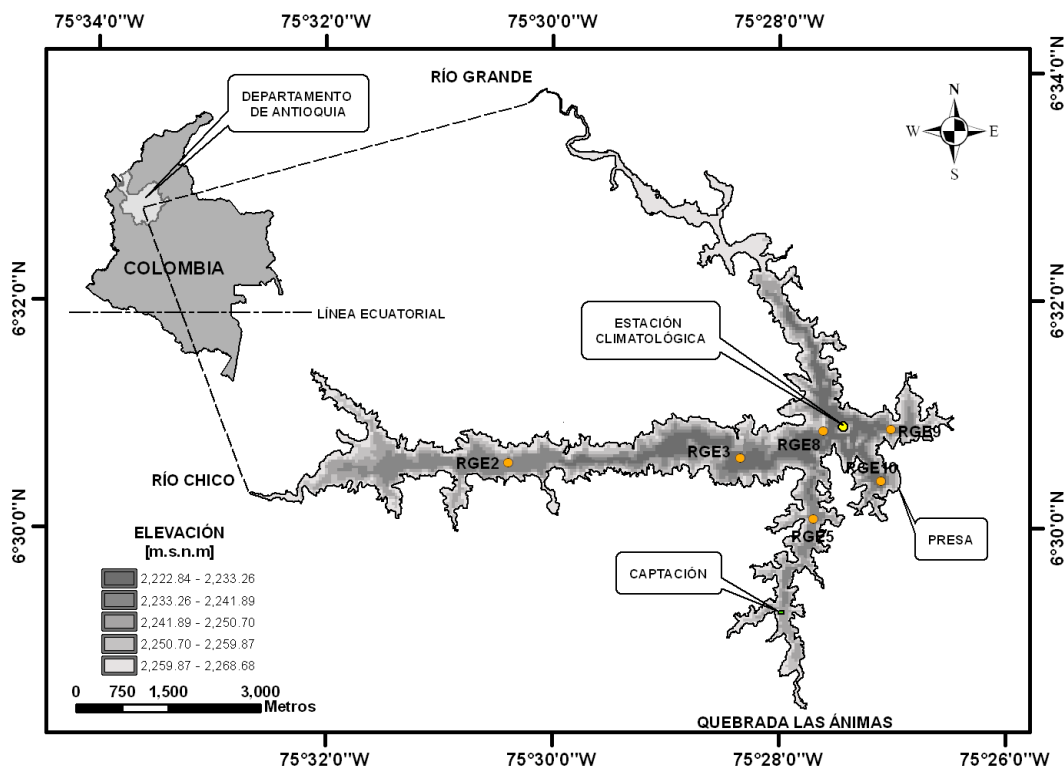


Figura 1. Morfometría del sitio de estudio - Localización de los principales afluentes, punto de muestreo de variables climatológicas y puntos de medición de perfiles y de extracción de resultados del modelo.

El agua se capta en la torre de captación por un sistema de cuatro compuertas rectangulares distribuidas en 2 niveles así: Entre los niveles 2257.53 – 2254.03 m.s.n.m. (compuerta superior) se capta por una compuerta (1) para la planta de tratamiento de aguas Manantiales un caudal máximo de  $6.4 \text{ m}^3/\text{s}$ , entre los niveles 2249.47 – 2245.97 m.s.n.m. (compuertas inferiores) por dos (2) compuertas para la central hidroeléctrica La Tasajera un caudal máximo de  $40 \text{ m}^3/\text{s}$ , y por la compuerta restante se capta en ocasiones para la planta Manantiales.

## METODOLOGÍA

La metodología para este estudio consta de tres etapas. Inicialmente se realizó el levantamiento de información primaria en la zona de estudio. Dicha información incluye los parámetros climatológicos (radiación solar, velocidad y dirección del viento, humedad relativa del aire, precipitación y presión) y variables relacionadas con la dinámica térmica del cuerpo de agua como perfiles de temperatura en diversos puntos del cuerpo de agua. Posteriormente, con dicha información se realiza el análisis de sensibilidad del modelo numérico, usando la batimetría del embalse y modificando uno a uno las variables antes mencionadas de forma sistemática con el fin de evaluar cuales de ellas son las que más afectan los resultados del modelo. Como condición inicial en la temperatura del cuerpo de agua se usan parte de los perfiles medidos en campo para reducir el tiempo de calentamiento del modelo, y los perfiles restantes son usados para realizar comparaciones y verificar el grado de ajuste del modelo en la etapa de sensibilidad. Finalmente, con el modelo ajustado se plantean escenarios de simulación para los diferentes niveles de compuertas en la captación, con el fin de entender como afecta este tipo de captación la estructura térmica del cuerpo de agua.

## Información hidroclimatológica

La información climatológica se obtiene mediante el uso de una estación climatológica Vantage pro2 plus, de la empresa Davis, con una resolución de muestreo de 10 minutos. Esta estación se localizó en la isla ubicada en la confluencia de los tres brazos del embalse tal como se presenta en la Figura 1. Las variables registradas por la estación en el período marzo 18 a marzo 27 de 2010 fueron radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, dirección y magnitud del viento (Figura 2).

Los caudales de entrada se miden en estaciones hidrométricas operadas por EPM que se encuentran ubicadas aguas arriba de los puntos de entrada al embalse, razón por la cual se estimaron los caudales a la entrada del embalse corrigiendo los registros mediante el método del rendimiento hidrológico. Los caudales de salida del embalse (Manantiales y Central Tasajera) son medidos por EPM y presentados, al igual que los caudales de los afluentes, en la Figura 2. Es importante tener en cuenta que la corriente de la quebrada las Ánimas no se encuentra instrumentada, además su caudal es mucho menor que los aportes de las otras dos corrientes, así que no se considera en el proceso de modelación.

La temperatura de entrada de los afluentes, la cual es una variable importante en el proceso de modelación, no fue medida en la campaña del mes de Marzo. Por dicha razón, se utilizaron los registros de temperatura medidos en los afluentes del 8 al 12 de Junio del 2010, con el fin de representar adecuadamente las variaciones en temperatura de las corrientes. La caracterización de la temperatura de los afluentes (ríos Grande y Chico) se realizó mediante el uso de sensores de temperatura HOBO, desarrollados por Onset Computer Corporation, con una resolución temporal de 15 minutos. De esta forma se caracterizaron 2 días de temperatura de los afluentes, los cuales se reproducen durante el período de simulación, presentando valores entre 19.18 °C – 16.62 °C y 17.38 °C– 15.57 °C para los ríos Grande y Chico, respectivamente.

## Perfiles de Temperatura en el embalse

Los perfiles de temperatura en la columna de agua fueron medidos con un CTD SBE 25 de Seabird con una frecuencia de 8 Hz. Los datos de temperatura en el embalse fueron recolectados entre el 23 y el 27 de marzo de 2010 y con el fin de reducir el tiempo de calentamiento para el proceso de sensibilidad del modelo, se usaron perfiles tomados en los puntos mostrados en la Figura 1 medidos en los primeros dos días de campaña (marzo 23 y 24). Perfiles típicos de la campaña se presentan en la Figura 3.

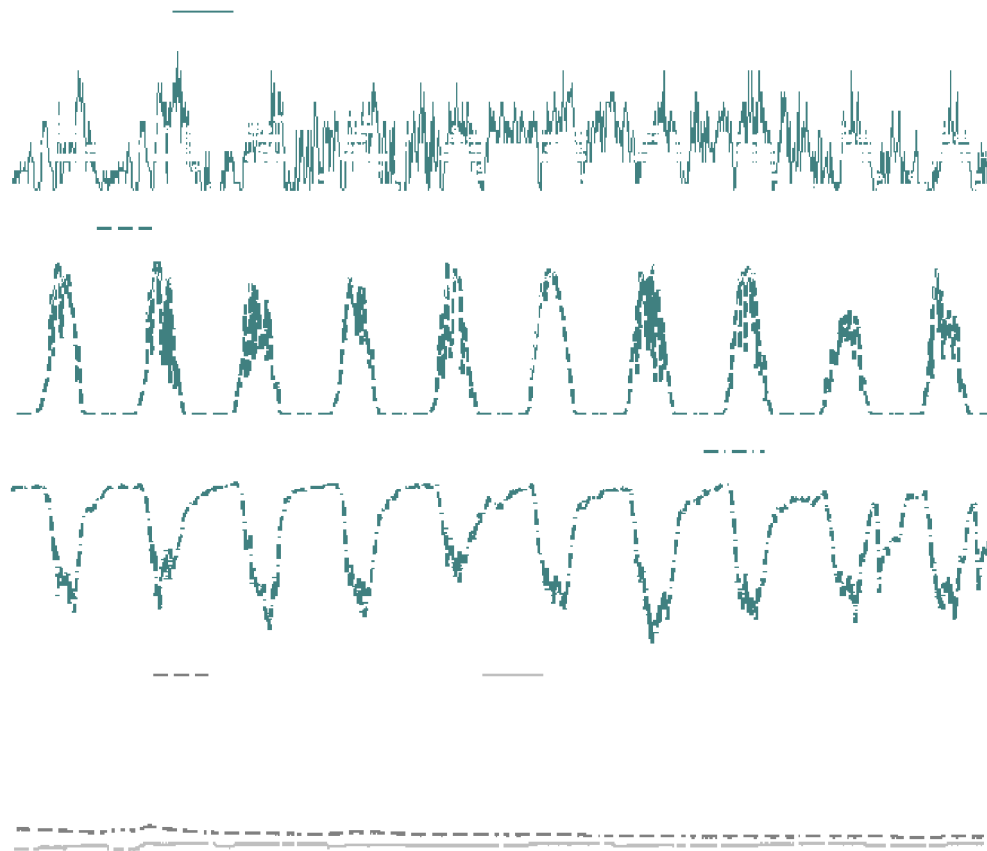


Figura 2. Variables climatológicas y caudales registrados durante el período de simulación.

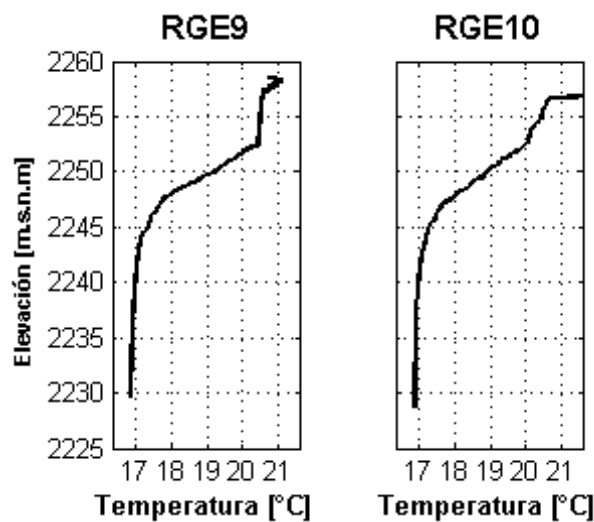


Figura 3. Perfiles típicos de temperatura medidos durante el mes de marzo en los puntos RGE9 y RGE10.

## MODELO NUMÉRICO

### Modelo ELCOM

Para la modelación del caso de estudio se usó el modelo ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model), herramienta de modelamiento numérico para lagos y estuarios desarrollada por el “Centre for Water Research”, CWR, de la Universidad de “Western Australia”. ELCOM modela los

procesos hidrodinámicos y termodinámicos que gobiernan el comportamiento espacial y temporal de cuerpos de agua estratificados sometidos a forzamientos ambientales externos. ELCOM es un modelo hidrodinámico tridimensional que resuelve las ecuaciones de Reynolds, bajo las suposiciones de presión hidrostática y de Boussinesq y las ecuaciones de transporte de escalares (Hodges et al., 2000). El momentum se incorpora en la columna de agua por medio del esfuerzo generado por la acción del viento sobre la superficie del agua y es distribuido verticalmente por un modelo de mezcla de capas. La información técnica sobre el modelo ELCOM se puede obtener de los manuales de usuario científicos disponibles en la página Web del CWR: <http://www.cwr.uwa.edu.au/services/models>.

Sensibilidad del modelo a los parámetros numéricos y físicos

En la etapa de sensibilidad del modelo a los parámetros numéricos y físicos se realiza una variación de cada uno de ellos de forma sistemática, con el fin de determinar el grado de afectación sobre la estructura térmica en la columna de agua. Con el proceso de sensibilidad fue posible determinar para los parámetros numéricos los siguientes valores: tamaño de malla horizontal variable (Celdas entre 50 y 30 m), malla vertical de 50 capas y paso de tiempo de 30 segundos. Los parámetros físicos variados en esta etapa son el coeficiente de extinción de luz, la cobertura de nubes, y velocidad del viento, siendo este último el más importante debido a las variaciones que induce en la dinámica del embalse.

En la actualidad se avanza con el proceso de calibración detallada del modelo, y aún, sin estar culminada dicha etapa, se logra tener una reproducción adecuada de las condiciones naturales (Figura 4), permitiendo analizar con más detalle ciertos fenómenos presentes en el cuerpo de agua.

## COMPARACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO CON LAS MEDICIONES DE CAMPO

Los perfiles de temperatura simulados se comparan con aquellos medidos en campo durante los últimos tres días de la campaña (marzo 25 al 27 de 2010), siendo posible observar cómo el modelo representa de forma adecuada las mediciones, según se presenta en la Figura 4. En esta Figura puede observarse cómo el modelo captura el comportamiento del perfil de temperatura en cada uno de los puntos de control, obteniéndose en puntos como RGE2, RGE5 Y RGE9 diferencias de temperatura por debajo de 0.06 °C entre los 2250 y 2252 m.s.n.m. En los puntos restantes se captura la tendencia, pero se observan diferencias en la profundidad de la capa de mezcla.

## ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Con el modelo ajustado se plantean escenarios de simulación, con el objeto de evaluar el comportamiento de la estructura térmica en la columna de agua para diferentes tipos de operación de la captación. Algunos de estos casos son hipotéticos y se realizan con fines académicos y de investigación. Los casos de simulación planteados son:

Caso 1: Compuerta superior = 5 m<sup>3</sup>/s, Compuerta inferior= 0 m<sup>3</sup>/s.

Caso 2: Compuerta superior = 0 m<sup>3</sup>/s, Compuerta inferior= 5 m<sup>3</sup>/s.

Caso 3: Compuerta superior = 5 m<sup>3</sup>/s, Compuerta inferior= 20 m<sup>3</sup>/s.

Caso 4: Compuerta superior = 0 m<sup>3</sup>/s, Compuerta inferior= 25 m<sup>3</sup>/s.

Es importante resaltar que los caudales de salida usados para los escenarios de simulación son menores a los caudales máximos reportados y son planteados de forma coherente con la operación hecha en el embalse.

Los resultados de los casos anteriormente descritos se analizarán para una misma fecha y hora de simulación con el fin de cuantificar las diferencias presentes en los perfiles de temperatura.

Figura 4. Perfiles de temperatura medidos y simulados

#### ANALISIS DE RESULTADOS

Al analizar los perfiles de simulación para el día Marzo 26 de 2010 a las 12:00 p.m. (Figura 6), es posible observar que la capa de mezcla presenta una profundidad aproximada de 4 a 5 metros, para todos los casos de simulación.

Realizando una comparación de los resultados entre los casos 1 y 2, los cuales consisten en la captación de un caudal máximo de  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  alternando las compuertas superior e inferior, no se observan cambios entre sí en la estructura térmica, aunque el perfil en la estación RGE2 presenta una temperatura superficial ligeramente mayor que en las otras estaciones. El análisis comparativo de los casos 3 y 4, en los que los caudales máximos extraídos por la compuerta inferior son de 20 y  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ , tampoco muestra diferencias o cambios en la estructura térmica, entre sí. Esto permite agrupar los casos de comparación en dos clases con respecto a la compuerta inferior:

Grupo 1: Caudal captado menor a  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Grupo 2: Caudal captado mayor de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ .

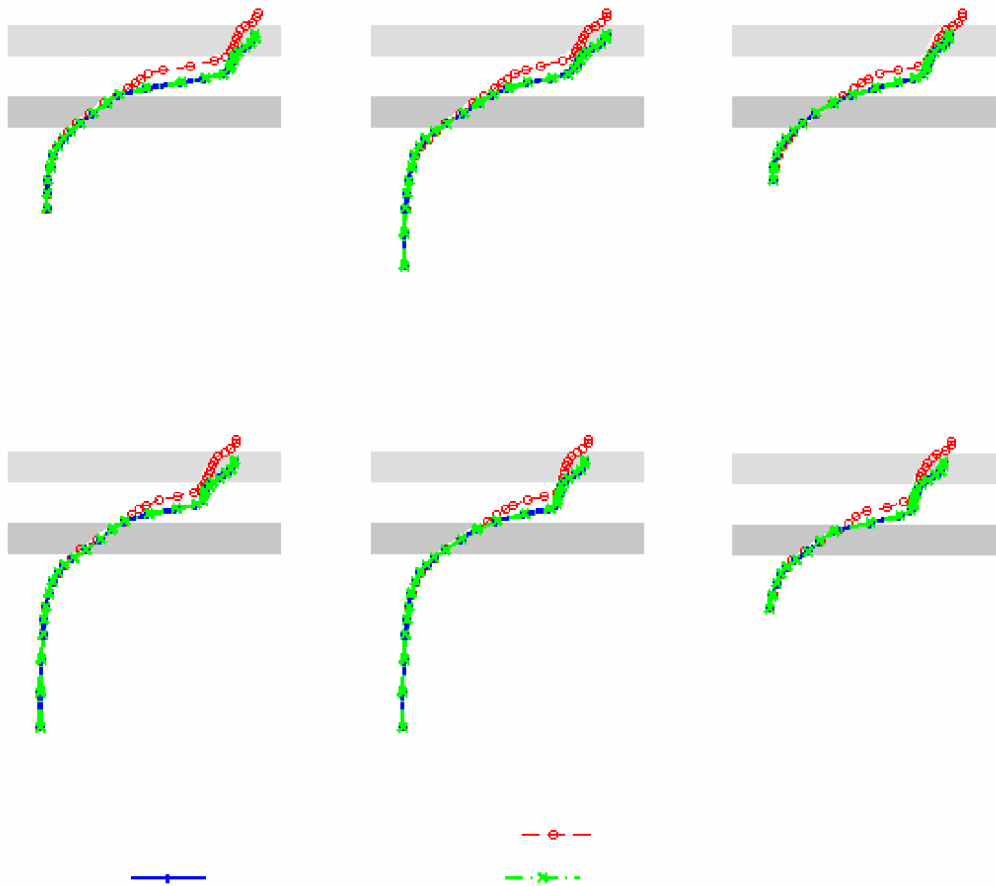


Figura 6.- Perfiles de los casos de simulación propuestos (Mar/ 26/ 2010, 12:00)

La comparación entre los 2 casos anteriores muestra que al realizar la captación de grandes caudales por la compuerta inferior, se logra modificar la estructura térmica en todo el embalse, haciendo que la termoclina descienda aproximadamente 2 metros con respecto al caso de captación por la compuerta superior (Figura 6). Este resultado evidencia la fuerte influencia que tiene la operación de la compuerta inferior y teniendo en cuenta que el caudal máximo captado por esta compuerta es de  $40 \text{ m}^3/\text{s}$  se espera que los efectos sobre la estructura térmica sean aun mayores.

La Figura 7 presenta los resultados de los escenarios de simulación para el día 27 de Marzo de 2010 a las 12:00 p.m., último día de simulación. Allí es posible observar como la capa de mezcla mantiene un espesor aproximado de 5 metros en los puntos de control, pero las temperaturas superficiales aumentan en  $0.2^\circ\text{C}$  debido al cambio en las condiciones climatológicas presentes para la fecha, donde la radiación de onda corta aumenta de  $750 \text{ W}/\text{m}^2$  el día Marzo 26 a las 12:00 p.m. a  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$  el día Marzo 27 a las 12:00 p.m.



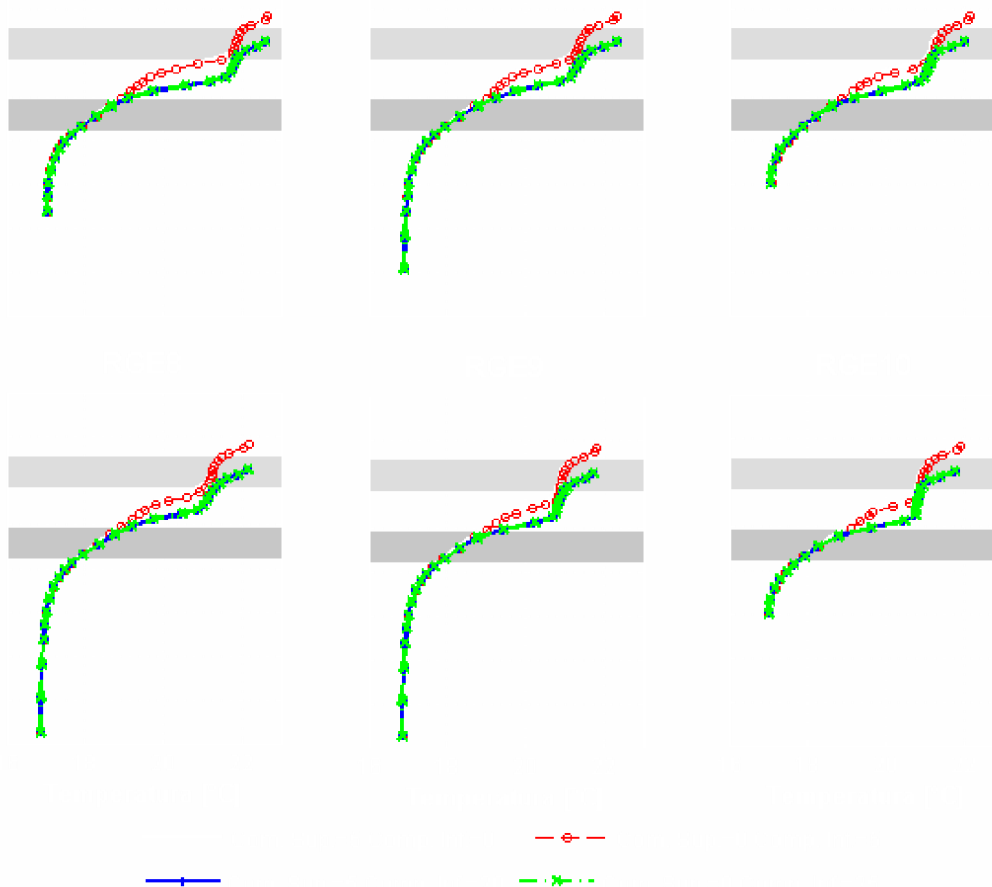


Figura 7.- Perfiles de los casos de simulación propuestos (Mar/ 27/ 2010, 12:00)

## CONCLUSIONES

Al realizar el análisis del efecto de posición de la compuerta de captación sobre la estructura térmica del embalse, es posible concluir que dicho efecto es importante y depende básicamente del caudal extraído y de la compuerta usada. Al captar caudales superiores a  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  por la compuerta inferior, se afectó la posición de la termoclina haciéndola descender aproximadamente 2 metros.

En el escenario de captación continua de caudales superiores a  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  por la compuerta inferior, durante un periodo superior a los 10 días, se observó un aumento de la temperatura en la zona del epilimnio y metalimnio de aproximadamente  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ , con respecto a los casos en los que se capta caudales menores a  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  alternando las compuertas superior e inferior, debido a cambios en la climatología de la zona.

Finalmente, cambios inducidos por los diferentes tipos de operación de la captación influirán en el funcionamiento del ecosistema, modificando la productividad del lago y generando en ciertos casos el crecimiento excesivo de algas y/o macrofitas, los cuales pueden eventualmente afectar la calidad del agua captada. Esto se vera reflejado en el incremento de costos en procesos de potabilización y en la reducción del rendimiento en la maquinaria para generación de energía.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al “Centre for Water Research” de la Universidad “Western Australia” por la autorización para usar el modelo ELCOM en este estudio. Así mismo a Empresas Públicas de Medellín el patrocinio dado para este estudio y a los compañeros de postgrado y pregrado pertenecientes al proyecto “Estudio de la Problemática Ambiental de tres embalses de EPM”, por su colaboración en la recolección de datos en campo.

## BIBLIOGRAFIA

- Empresas Públicas de Medellín (2005). “Revista Hidrometeorológica”. Lito Brasil, Vol. I.
- Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C., Imberger, J., Brooks, N. H. (1979). “Mixing in inland and coastal waters”. *Academic Press*.
- Hodges, B. R., Imberger, J., Saggio, A., and Winters, K. B (2000). “Modelling basin-scale internal waves in a stratified lake”. *Limnol. Oceanogr.* Vol 45, No.7, pp.1603–1620.
- Kennedy R. H (1999). Reservoir design and operation: limnological implications and management opportunities. In: Tundisi JG, StraskrabaM(eds) Theoretical reservoir ecology and its applications. *Leiden*, pp. 1 – 28.
- Löffler, H. (1964). “The limnology of tropical high-mountain lakes”. *Verh. Interant. Verein. Limnol.*, 15: 176- 193.
- Marín, L. (2008). “Modelamiento de la estructura térmica en embalses tropicales – Aplicación al embalse Riogrande II”. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. PARH.