

# EFFECTO ESTACIONAL DE LOS AFLUENTES EN LA ESTRUCTURA TÉRMICA DE UN PEQUEÑO EMBALSE NEOTROPICAL, LA FE – COLOMBIA

## SEASONAL EFFECT OF TRIBUTARIES ON THE THERMAL STRUCTURE OF A SMALL NEOTROPICAL RESERVOIR, LA FE - COLOMBIA

RICARDO ROMÁN-BOTERO

*M.Eng. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. rroman@unal.edu.co*

ANDRÉS GÓMEZ-GIRALDO

*Ph.D. Profesor asociado – Universidad Nacional de Colombia, Medellín. eagomezgi@unal.edu.co*

MAURICIO TORO-BOTERO

*Ph.D. Profesor titular – Universidad Nacional de Colombia, Medellín. fmtoro@unal.edu.co*

Recibido para revisar Febrero 10 de 2012, aceptado Septiembre 27 de 2012, versión final Octubre 25 de 2012

**RESUMEN:** Se investigó la evolución estacional de la estructura térmica en el embalse tropical La Fe, con base en información de variables físicas del cuerpo de agua y variables climatológicas obtenidas en los años 2010 y 2011 y en la aplicación del modelo hidrodinámico ELCOM. El embalse recibe fuentes naturales y agua importada mediante un sistema de bombeo en períodos de estiaje. Se encontró que la influencia del ciclo anual en los flujos de calor atmósfera-lago es relativamente baja, a pesar de que se presentaron condiciones climáticas de El Niño, transición y La Niña. Los cambios en la estructura térmica obedecieron principalmente a las condiciones hidrológicas de los afluentes naturales y a la operación del sistema de bombeo. Se advirtió que el cuerpo norte del embalse está dominado por las plumas de entrada de los afluentes naturales y la captación, mientras el cuerpo sur por la pluma del agua importada.

**PALABRAS CLAVE:** limnología física tropical, limnología neotropical, estructura térmica, embalse La Fe.

**ABSTRACT:** We investigated the seasonal evolution of the thermal structure of La Fe Reservoir based on field data and weather variables collected in 2010 and 2011 and the application of the hydrodynamic model ELCOM. The reservoir receives contributions from natural sources and water through a pumping system during the dry periods. We found that there is not a relevant influence of the annual cycle in the atmosphere-lake heat fluxes, although there were measurements during El Niño, transition, and La Niña. The observed changes in the thermal structure are mainly due to the hydrological conditions of the inflows and the operation of the pumping system. It was found that the northern basin is dominated by the dynamics of the natural inflows and water withdrawal, while in the south basin dynamics is dominated by the imported water.

**KEYWORDS:** tropical physical limnology, neotropical limnology, thermal structure, La Fe reservoir.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los cambios espacio temporales de la estructura térmica en un embalse condicionan la dinámica de procesos físicos, químicos y biológicos que alteran la calidad del agua embalsada [e.g. 1].

Son diversos los mecanismos que influyen en los cambios de la estructura térmica, y pueden ser difíciles de caracterizar individualmente, pues entre ellos existe una fuerte interacción que abarca todas las

escalas espacio temporales [e.g. 1-2]. Sin embargo, algunos de esos mecanismos son menos difíciles de identificar en el ciclo hidrológico anual, siendo ésta una de las escalas temporales más importantes en los estudios limnológicos, ya que la calidad del agua varía en función de la dinámica estacional de la estructura térmica.

Según Lewis Jr. [3-4] los sistemas tropicales se diferencian de los sistemas templados principalmente por la diferencia entre la irradiación mínima y máxima

anual. Mientras en el trópico bajo (cercano a El Ecuador) la irradiación anual mínima es cerca del 85% de la irradiación máxima anual, en latitudes cercanas a los 30° es del 50%, y aún mucho menor en las latitudes altas. Se ha encontrado como consecuencia de esto, que en los lagos tropicales la diferencia entre la temperatura mínima (del fondo) y máxima (en superficie) durante la estratificación es mucho menor que en los lagos de latitudes templadas.

La evolución estacional de la estructura térmica en los sistemas templados depende significativamente de la irradiación [e.g. 1,5], contrario a lo que sucede en los sistemas tropicales [e.g. 3-4]. Diferentes estudios [e.g. 3-4, 6-12] evidencian que los patrones de estratificación y mezcla en los sistemas del neotrópico, ubicados a diferentes elevaciones sobre el nivel del mar, no pueden explicarse sólo como función de la irradiación, sino además de otros factores como el viento, la climatología, la hidrología de los afluentes y la operación del sistema.

En la presente investigación se estudió la importancia de los cambios estacionales de caudal de los afluentes y de los flujos de calor atmósfera-lago, en los cambios estacionales de la estructura térmica del embalse neotropical La Fe, un sistema pequeño y poco profundo, y se discutió la importancia relativa entre ellos.

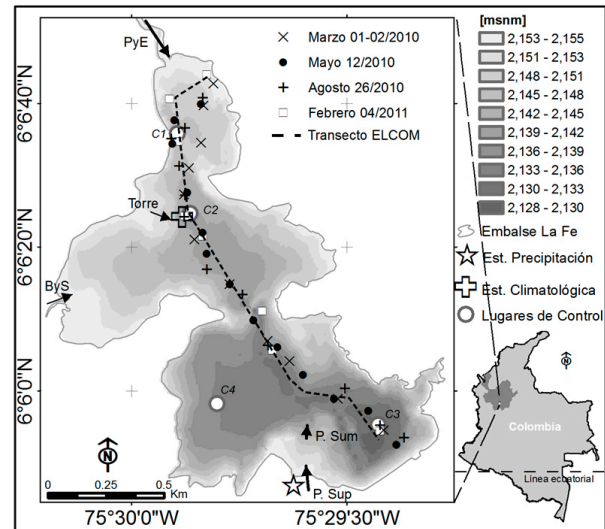
Si bien algunas investigaciones en Colombia han advertido la importancia de los cambios hidrológicos en la estructura térmica de ciertos ambientes [e.g. 7,13], en ninguna se ha cuantificado la incidencia de cada uno de los forzantes.

## 2. EMBALSE LA FE

El embalse La Fe se encuentra ubicado en el Municipio de El Retiro, al oriente del departamento de Antioquia, Colombia (Figura 1). Es un embalse destinado al abastecimiento de agua potable para la ciudad de Medellín.

Los principales afluentes naturales son las quebradas Las Palmas, Espíritu Santo, Boquerón y San Luis. Las dos primeras confluyen al norte, aguas arriba de la entrada al embalse, en un solo afluente denominado en adelante PyE, mientras que las dos últimas confluyen al oeste en un afluente llamado en adelante ByS.

Finalmente, agua importada del río Pantanillo es bombeada para alimentar el embalse en períodos de estiaje, entrando al embalse por una tubería sumergida (P. Sum) y por un canal superficial (P. Sup).



**Figura 1.** Embalse La Fe. Localización y batimetría. Ubicación de los transectos longitudinales. Posición de lugares donde se compararon los perfiles de temperatura medidos y simulados.

El embalse está formado por dos cuencos unidos por un estrecho de baja profundidad que corresponde a la antigua presa de la primera fase de desarrollo del proyecto, denominada Los Salados. En el cuenco norte se encuentra la torre de captación y posee tres compuertas deslizantes de sección rectangular cuyos centros están a 6.2 m (orientada WSW), 10.7 m (N) y 15.2 m (ESE) por debajo de la cota de rebose del vertedero (2155.5 msnm).

Estudios anteriores [e.g. 13] revelan que la estructura térmica muestra un patrón permanentemente estratificado y que la mezcla se restringe a los primeros metros de la columna de agua.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1. Medición de Campo

Se realizaron cuatro campañas de campo, cada una de cinco días continuos, durante los meses de marzo, mayo y agosto de 2010 y febrero de 2011, con el objetivo conocer el comportamiento espacio-temporal de la

estructura térmica en diferentes períodos hidrológicos. Se midieron perfiles de temperatura y conductividad en el cuerpo de agua, con un SBE 25 Sealogger CTD, y se diseñó el muestreo realizando transectos longitudinales en dirección norte-sur, desde la entrada de PyE hasta la presa. La duración de cada transecto tomó entre 40 y 100 minutos y en la primera campaña el transecto fue una combinación de dos días de medición.

Previo a cada campaña se instaló una estación climatológica portátil DAVIS Vantage pro2 plus en la torre de captación, registrando con ella las variables climatológicas (radiación de onda corta, humedad relativa, temperatura ambiente, temperatura de rocío, presión atmosférica, magnitud y dirección del viento) con una frecuencia de 15 minutos, que permitieron estimar los flujos de calor atmósfera-lago, siguiendo los métodos propuestos en Hodges [14]. La temperatura superficial del agua se midió en la tercera y cuarta campaña con termistores HOBO Pro v2 con una frecuencia de 15 minutos. En la primera y segunda campaña la temperatura superficial del agua se estimó de la temperatura de muchos perfiles de temperatura tomados en el cuerpo del agua (no mostrados) y se asumió un ciclo diario y repetido en los cinco días de análisis. La serie de cobertura de nubes en las tres campañas se dedujo a partir de las observaciones visuales, realizadas en las horas del día, suponiendo que en la noche, donde no hubo información, la cobertura de nubes disminuía, o aumentaba, de acuerdo a la primera observación del día siguiente.

La temperatura de los afluentes se midió con una sonda paramétrica Hydrolab MS5 en los dos primeros muestreos. En la tercera y cuarta campaña se instalaron sensores de medición continua (cada 15 minutos) de temperatura (HOBO Pro v2).

Empresas Públicas de Medellín (EPM) suministró la información de caudales, lluvia y niveles del embalse con una frecuencia de 15 minutos y el caudal vertido con resolución diaria.

### 3.2. Modelación Numérica

El modelo numérico *Estuary, Lake and Coastal Ocean Model* (ELCOM), desarrollado por el *Centre for Water Research* (CWR) de la Universidad de Australia Occidental, fue usado para estudiar el avance de las

plumas de los afluentes a través del embalse durante la segunda y tercera campañas. ELCOM es un modelo tridimensional, hidrodinámico y termodinámico que simula la variación espacio-temporal de variables como la temperatura, salinidad y velocidad en sistemas estratificados. ELCOM resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas usando la descomposición de Reynolds, mediante el método de las diferencias finitas, y de forma acoplada las ecuaciones de masa, momentum, masa de constituyentes y temperatura [14].

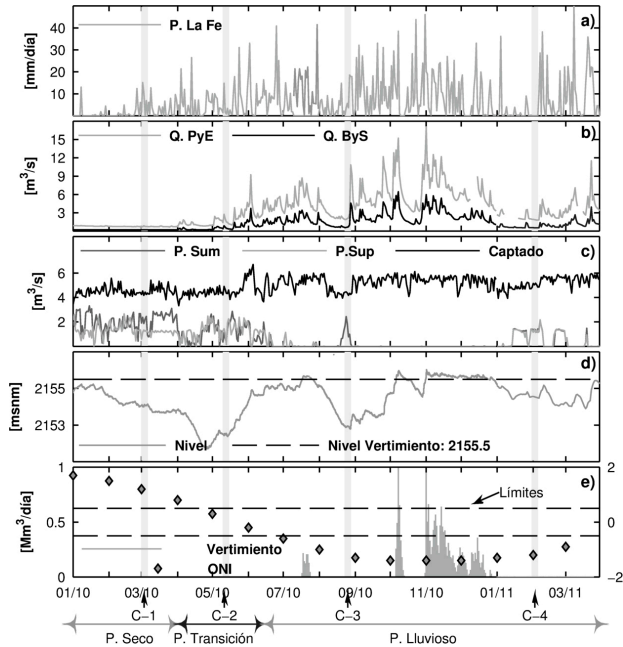
El modelo fue calibrado con información de la segunda campaña de campo, simulando desde el 14 de mayo un total de 20 días. Los parámetros de calibración se utilizaron en la validación, que se hizo para la tercera campaña de campo, simulando un total de 19 días desde el seis de agosto.

El tamaño óptimo de malla y del tiempo de simulación se obtuvo siguiendo la metodología descrita en Villegas [15]. La batimetría del embalse se discretizó en un mallado horizontal de celdas de 30 x 30 m. La resolución en la vertical fue cambiando gradualmente desde la superficie hasta el fondo, pasando de 0,4 m en los primeros 12 m hasta un máximo de 2,0 m en el fondo. El intervalo de tiempo de cálculo usado fue de 40 s. Las variables físicas calibradas fueron el coeficiente de extinción de luz, los caudales afluentes (que son medidos aguas arriba de su entrada al embalse) garantizando los niveles medidos y simulados, el ciclo diario de temperatura de los afluentes, la cobertura de nubes y el modelo del chorro sumergido (que simula la entrada de P.Sun). La calidad de los resultados del modelo se evaluó comparando los perfiles de temperatura medidos y simulados en diferentes sectores del embalse (Figura 1). En Román-Botero [16] se pueden consultar más detalles sobre la calibración del modelo.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Hidrología y flujos de calor atmosféricos

La información hidrológica diaria y de operación se muestra en la Figura 2. Las campañas de campo se realizaron durante diferentes períodos hidrológicos, principalmente por el progreso del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS), el cual presentó sus dos fases de El Niño y La Niña y condicionó la hidrología y la operación del sistema.

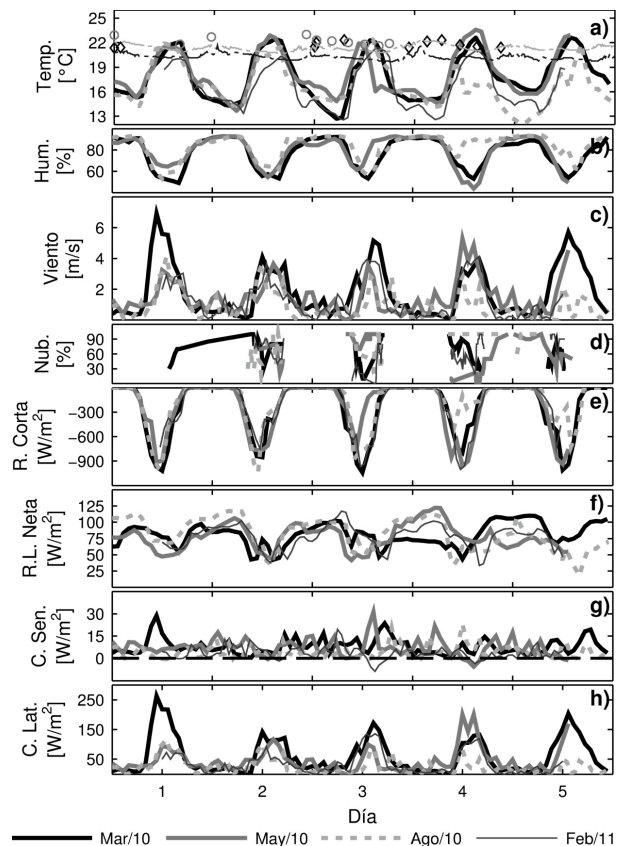


**Figura 2.** (a) Precipitación, (b) caudales naturales, (c) caudales operados, (d) nivel del embalse, (e) vertimientos e índice ONI. Los recuadros grises verticales indican el momento del muestreo

El índice “Oceanic Niño Index” (ONI – Figura 2e) muestra la influencia de El Niño (ONI >0.5) antes de la primera campaña y durante ella, cuando los caudales de los afluentes naturales (Figura 2b) fueron menores a  $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Debido a las bajas lluvias (Figura 2a) y el bajo caudal natural, fue necesario un bombeo constante para mantener un volumen apropiado (Figura 2c). El nivel del embalse cayó continuamente (Figura 2d), alcanzando los niveles más bajos registrados durante el periodo 2010-2011. La segunda campaña se realizó en un período hidrológico normal ( $-0.5 < \text{ONI} < 0.5$ ). Durante ella se presentó un aumento del caudal natural debido a una mayor intensidad de las lluvias, iniciando la recuperación del nivel del embalse. El bombeo, aunque siempre activo, fue reducido. La tercera campaña se efectuó una vez La Niña estuvo plenamente establecida (ONI < -0.5), cuando los aportes naturales aumentaron considerablemente, recuperando el volumen embalsado e incluso, generando vertimientos. El caudal bombeado fue prácticamente nulo. Entre la tercera y la cuarta campaña las lluvias aumentaron en intensidad y los aportes del caudal natural fueron los mayores registrados, con lo que se presentaron mayores vertimientos. La Niña estuvo presente desde finales de la segunda campaña hasta la finalización del muestreo.

El caudal captado (Figura 2c) fue menor durante las dos primeras campañas ( $\sim 5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) en relación a las restantes ( $\sim 6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ).

La Figura 3 muestra la información climatológica y la temperatura superficial del embalse, medidas durante los cinco días que duró cada campaña de campo, y los flujos de calor estimados, siendo éstos positivos si sale calor del embalse o negativos en caso contrario. Se aprecia un patrón característico de cambios en el ciclo diurno de todas las variables climatológicas. En las noches la temperatura del aire disminuyó (Figura 3a), por debajo de la temperatura superficial del agua (Figura 3a), favoreciendo el mezclado convectivo de la capa superficial. La magnitud del viento disminuyó durante la noche (Figura 3c), con valores que difícilmente superaron  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , y la mayor magnitud ( $>4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) fue medida entre las 12:00 y las 17:00 horas.



**Figura 3.** (a) Temperaturas del aire y superficial, (b) humedad relativa, (c) velocidad del viento, (d) cobertura de nubes, (e) radiación de onda corta, (f) radiación de onda larga neta, (g) calor sensible y (h) calor latente durante los cinco días de muestreo en cada campaña

Estacionalmente se observa que las variables climatológicas tuvieron pocas variaciones entre las cuatro campañas de campo, lo que se vio reflejado en los flujos de calor. La radiación de onda corta calentó el sistema (Figura 3e), con valores máximos cercanos a los  $-1100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  en todas las campañas, con fluctuaciones en el día, debido principalmente a la alta variabilidad de la cobertura de nubes. La pérdida de calor latente alcanzó valores de  $280 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (Figura 3h), producto de vientos fuertes del orden de  $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , y de  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  para vientos cercanos a  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . El enfriamiento debido al calor latente se observó principalmente en las horas de mayor actividad del viento, entre las 11:00 y las 17:00 horas. En la noche, debido a la leve brisa o ausencia del viento, la pérdida de calor latente fue muy pequeña. La radiación de onda larga neta (Figura 3f), definida como la diferencia entre la radiación larga emitida por el sistema y la radiación larga emitida desde la atmósfera, actuó siempre enfriando el sistema, indicando que es mayor el flujo de calor por radiación de onda larga que pierde el sistema que el que recibe. La radiación de onda larga neta varió entre 25 y  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , siendo menor en las horas de mayor irradiación. El calor sensible fue en promedio menor a  $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (Figura 3g), y generalmente positivo, y sólo en algunos casos, cuando la temperatura ambiente fue mayor a la temperatura superficial, entró calor al sistema. Valores similares han sido reportados en otros ambientes del trópico y según MacIntyre & Melack [17] las magnitudes son características de sistemas tropicales.

A pesar de la ligera disminución de la radiación de onda corta debido a días nublados entre campañas, y a un aumento en los calores sensible y latente en algunos días de la primera y segunda campaña, se aprecia que los flujos de calor son relativamente constantes en las cuatro campañas, por lo que no generan variaciones importantes del contenido de calor en el embalse a lo largo del año. La relativa persistencia estacional encontrada en los flujos de calor son acordes a lo expuesto por Lewis Jr. [3-4] quien afirma que en los lagos y embalses de zonas tropicales bajas, la diferencia estacional entre la irradiación máxima y mínima es muy baja, del orden del 10%, y que la fluctuación promedio anual de la temperatura del aire es  $\sim 2^\circ\text{C}$ . Lo anterior implica que los flujos de calor pueden ser similares durante el año en embalses de zonas tropicales bajas, siempre y cuando variables como la cobertura de nubes, la velocidad del viento, la

humedad relativa y la temperatura superficial del agua presenten fluctuaciones promedias mensuales bajas y, además, se mantenga la diferencia entre la temperatura superficial del agua y del ambiente, como sucedió en el caso estudiado.

#### 4.2. Características físicas del cuerpo de agua

En la Figura 4 se muestran los perfiles de temperatura y conductividad medida en el cuenco sur en la zona profunda del embalse. La temperatura máxima fue un poco mayor de los  $23^\circ\text{C}$  y la mínima alrededor de  $17^\circ\text{C}$ , lo que representa una diferencia de temperatura entre la superficie y el fondo de  $6^\circ\text{C}$ . Los perfiles de temperatura exhibieron gradientes débiles y continuos en toda la profundidad, a excepción de la zona de mezcla, y a los 14 m de profundidad en la primera campaña. Dentro de la capa de mezcla se puede observar la homogeneidad en el perfil de conductividad.

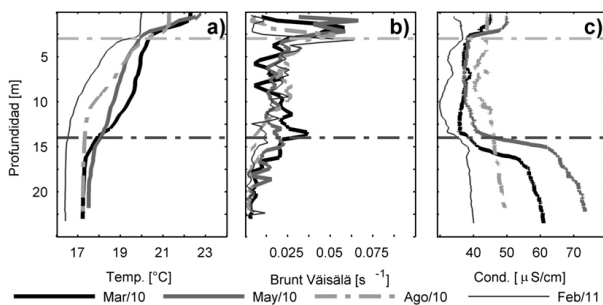
Estacionalmente los perfiles de temperatura en la zona sur mostraron una disminución progresiva de la temperatura y un cambio de concavidad a través de cada campaña, principalmente entre los 5 m y 14 m de profundidad. La profundidad de la capa de mezcla permaneció entre 2 m y 3 m. La frecuencia boyante,  $N=(g\rho_0^{-1}d\rho/dz)^{0.5}$  ( $g$  la aceleración de la gravedad,  $\rho_0$  una densidad de referencia,  $d\rho/dz$  el gradiente vertical de densidad), mantuvo valores menores de  $0,025\text{s}^{-1}$  en casi toda la columna de agua, disminuyendo en profundidad, a excepción de la zona superficial donde superó el umbral de  $0,05 \text{ s}^{-1}$ . En la primera y segunda campaña se destacaron cambios importantes de la frecuencia boyante cerca a los 14 m, siendo mayor en la primera campaña ( $0,030 \text{ s}^{-1}$ ) y menor en la segunda ( $0,020 \text{ s}^{-1}$ ).

En la primera y segunda campañas, alrededor de los 14 m, la conductividad varió drásticamente de  $35 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  a  $60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  y a  $70 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  respectivamente. En la tercera y cuarta campaña no hubo cambios significativos, aunque se puede observar un comportamiento más uniforme en los primeros 10 m de profundidad. La conductividad tendió a homogenizarse verticalmente, desde la tercera hasta la cuarta campaña, observándose en esta última los menores valores registrados.

Como se describió anteriormente, los flujos de calor atmosféricos fueron relativamente constantes en el año,

lo que implica que los fuertes cambios de temperatura a través de la columna del agua entre las cuatro campañas debe ser producto de otras fuentes de calor. Asimismo, el cambio de temperatura y concavidad observado a los 14 m de profundidad es contrario al producido por fuentes de calor atmosférico y no puede ser explicado por propagación del calor que ingresa al embalse a través de la superficie, lo que sugiere que existe otro mecanismo responsable. Teniendo en cuenta que el caudal captado fue prácticamente constante durante todo el año y que la magnitud de los vientos no es tan fuerte como para producir varias termoclinas a diferentes profundidades, la única posible fuente de calor responsable del enfriamiento en los perfiles de temperatura son los afluentes naturales y el bombeo.

La temperatura del agua en el rango de profundidad entre los 4 m y 14 m fue similar a la del agua que entró por el bombeo (entre 18°C y 19°C) en las dos primeras campañas (no hubo bombeo en la tercera), por lo que es probable que el agua bombeada desde el río Pantanillo busque su nivel de flotabilidad neutra en ese rango de profundidades y se propague horizontalmente hacia la torre de captación como una intrusión, homogenizando el perfil de temperatura. La desaparición de los gradientes de temperatura y conductividad hacia los 14 m de profundidad en la tercera y cuarta campañas, realizada varias semanas después de que el bombeo se desactivó, respaldan la hipótesis de que la pluma del bombeo es la responsable de esos cambios verticales en la columna de agua.



**Figura 4.** Perfiles de (a) temperatura, (b) frecuencia boyante y (c) conductividad medidos en C3. Las líneas punteadas horizontales indican el límite de la zona de mezcla y del mayor gradiente a los 14 m.

La Figura 5 muestra los transectos efectuados a lo largo del antiguo thalweg. La Figura 5a muestra una zona con mayor conductividad desde la entrada de PyE

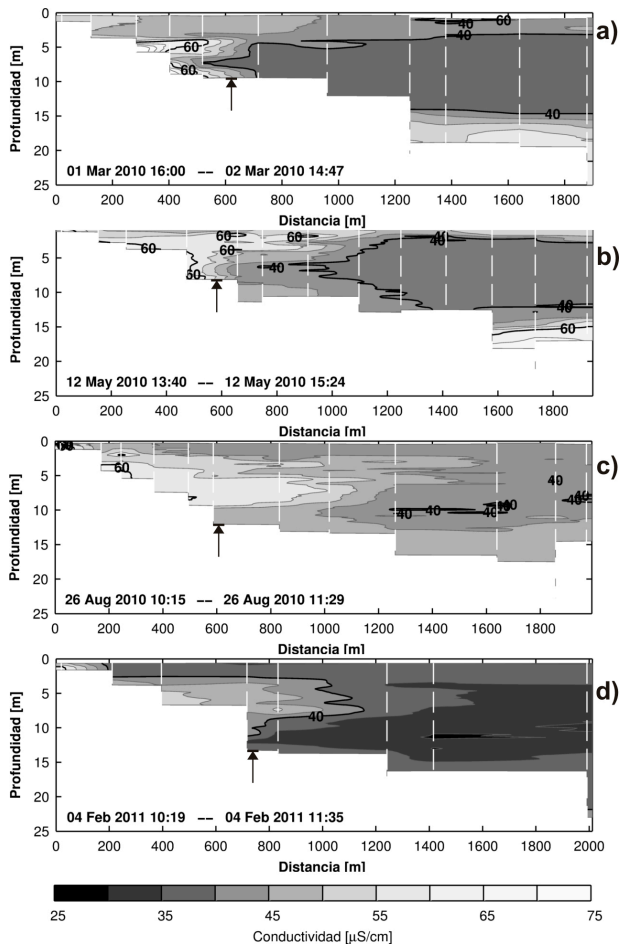
hasta la Torre de captación, que es probablemente la señal de la pluma de entrada del afluente al embalse, la cual tiene aproximadamente la misma conductividad ( $100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  en la primera campaña y  $60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  en la segunda; en las demás campañas no se midió conductividad de los ríos). Su alcance limitado indica que la captación probablemente absorbe la pluma. Se observa también que la señal de alta conductividad es menos extensa durante la primera campaña (Figura 5a), más extensa durante la segunda (Figura 5b) y aún más extensa durante la tercera campaña (Figura 5c). Este comportamiento está relacionado con el aumento estacional de caudal de los afluentes desde la primera hasta la cuarta campañas y la reducción gradual del bombeo del río Pantanillo. Es decir, cuando los caudales de los afluentes naturales son menores y el bombeo que viene del cuenco sur es mayor, las plumas de los afluentes naturales son fácilmente absorbidas por la captación y tienen un menor avance hacia el sur. Al aumentar los caudales de los afluentes naturales y desaparecer la pluma del bombeo que viene del cuenco sur, la señal de alta conductividad se extiende más hacia el sur, avanzando más allá de la presa Los Salados.

#### 4.2. Resultados de la simulación numérica: perfiles de temperatura

Dos de los cuatro perfiles de temperatura medidos y simulados para la segunda y tercera campañas se muestran en la Figura 6. El modelo reproduce bien la temperatura superficial y la de fondo en ambas campañas, conservando la estacionalidad. También reproduce bien la profundidad de la zona de mezcla, el gradiente de temperatura entre la zona de mezcla y el inicio de la zona del metalimnio. La variabilidad espacial es bien representada, ya que los perfiles simulados mantuvieron correspondencia con los medidos en todas las zonas.

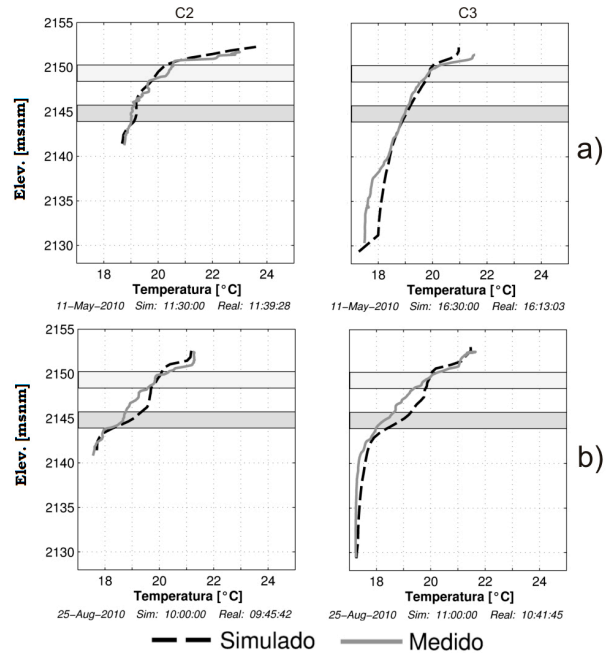
Los errores máximos de temperatura oscilaron entre 0,5 y 2,5°C, éste último en la cercanía de la entrada de PyE y puede ser un efecto local del río difícil de capturar. La diferencia de 0,5°C se observó principalmente al nivel de las compuertas, donde el perfil de temperatura simulado presenta concavidad opuesta al perfil de temperatura medido, efecto que es más evidente en los perfiles simulados en la tercera campaña. Posibles causas de esta diferencia son el efecto de corrientes concentradas al nivel de las compuertas de captación,

que homogeniza y mezcla el perfil de temperatura. Otra causa puede ser producto de un mayor proceso de mezcla en la entrada de los afluentes, causando que la pluma adquiera mayor temperatura y viaje por el sistema homogenizando hacia el nivel de la profundidad donde se ve el cambio en la concavidad. Estos argumentos son aún especulativos y requieren un estudio detallado.



**Figura 5.** Transectos longitudinales N-S de conductividad en (a) marzo/2010 , (b) mayo/2010, (c) agosto/2010 y (d) febrero/2011. Las líneas verticales blancas discontinuas indican el lugar de las mediciones. Las flechas negras indican la ubicación de la torre de captación.

Dado que el modelo numérico representó adecuadamente muchos de las características de los perfiles de temperatura medidos, particularmente la estacionalidad, se validó su uso para estudiar la evolución estacional de las plumas de los afluentes.



**Figura 6.** Perfiles de temperatura medidos y simulados en C2 y C3 en mayo y agosto 2010. Los rectángulos horizontales grises indican la ubicación de las compuertas de la captación

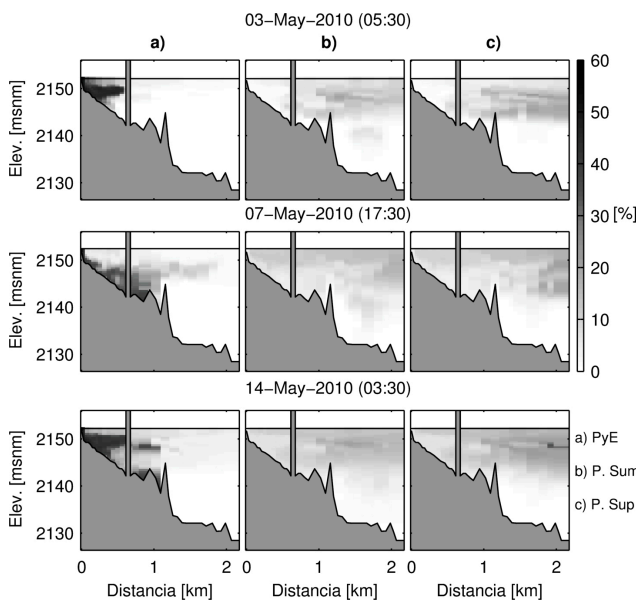
#### 4.2. Avance simulado de las plumas de los afluentes

Se inyectó en cada uno de los afluentes, desde el inicio de la simulación, un trazador con flotabilidad neutra con concentración del 80 %, y se rastreó su desarrollo espacial y temporal a lo largo de un transecto trazado en dirección N-S a través del embalse, cercano al antiguo thalweg del río. Adicionalmente, para estudiar si las plumas de PyE y ByS alcanzan la zona de presa en el tiempo de simulación, se siguió la evolución temporal en un punto específico cercano a la presa (C3), de otro trazador inyectado simultáneamente en los dos afluentes naturales.

La Figura 7 muestra instantes de tiempo de la evolución del trazador que se tomaron los días 3, 7 y 14 de mayo de la segunda campaña. Se observa cómo la pluma de PyE no avanza mucho más allá de la presa de Los Salados, siendo la pluma absorbida principalmente por la captación y adquiriendo características de una corriente intrusiva. El día 7 de mayo coincide con el mayor nivel en esa campaña, luego de que ingresaron dos crecientes de  $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  y  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Figura 8a<sub>1</sub>) y es cuando se observa el mayor alcance de la pluma hacia la presa en el cuenco sur. Posterior a las crecientes, la

pluma tiene un avance menor y limitado en el cuenco norte, alcanzando sólo la presa Los Salados. Así, el desarrollo de la pluma dentro del sistema parece ser forzado, ya que la captación impide su dinámica natural, y el alcance de la pluma hasta el cuenco sur, depende de caudales principalmente producto de crecientes.

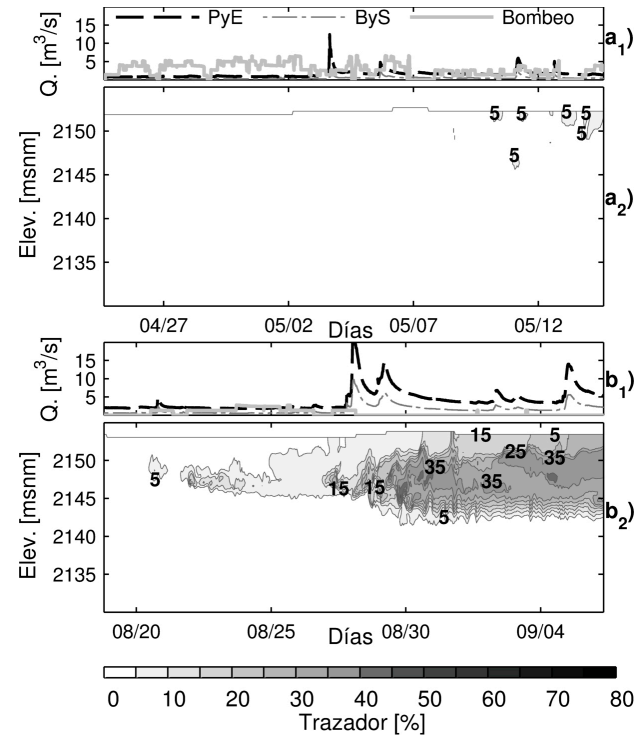
Las dos plumas de los bombeos del río Pantanillo, aunque más diluidas, se conservaron mayoritariamente en los primeros 10 m de profundidad, moviéndose horizontalmente en dirección del cuenco norte hacia la compuerta y cerca al tope de la presa de Los Salados.



**Figura 7.** Evolución de un trazador inerte inyectado en (a) PyE, (b) P. Sum, y (c) P. Sup. La captación es el bloque gris que sale desde el fondo a la superficie aproximadamente a 0.7 km. La antigua presa Los Salados es el obstáculo en gris ubicado aproximadamente a 1.2 km

En la Figura 8 se observa la evolución temporal en C3 del trazador inyectado por los afluentes naturales. En la segunda campaña, cuando la suma de los caudales medios de ByS y PyE no fue mayor a  $2,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , el trazador alcanzó la zona de la presa después de 16 días (Figura 8a<sub>2</sub>), posterior al inicio de las crecientes. El alcance del trazador fue muy diluido, con valores que no superaron el 5% de la concentración en el afluente, debido la baja magnitud de las crecientes ( $<10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) y al bombeo constante ( $\sim 4,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Al contrario, en la tercera campaña (Figura 8b<sub>2</sub>) la pluma alcanzó la zona de presa muy temprano en la simulación (a los 2 días),

debido a un mayor caudal medio de ambos afluentes ( $\sim 3,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) y al bombeo disminuido y poco constante ( $\sim 1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Luego de las crecientes del 28 de agosto en PyE y ByS ( $>10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), aumentó el caudal medio, el bombeo se suspendió, y se observó un aumento abrupto en la concentración, con valores que alcanzaron el 40% de la concentración en el afluente.



**Figura 8.** Evolución temporal de la concentración en C3 de un trazador inyectado simultáneamente en PyE y ByS.

Así, en los períodos simulados rara vez las plumas de los afluentes naturales alcanzan la zona de presa, cuando éstos presentan caudales bajos y del orden del caudal medio ( $\sim 2,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), y existe al mismo tiempo un aporte importante del bombeo ( $\sim 4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). En cambio, si el caudal es mayor y hay poco aporte del bombeo, los afluentes naturales alcanzan la presa, intensificado con la entrada de las crecientes.

### 5. CONCLUSIONES

En la presente investigación se encontró que en un embalse neotropical pequeño las variaciones hidrológicas estacionales de los afluentes naturales y de la operación condicionan los cambios estacionales de la estructura térmica.



Teniendo presente la relativa constancia en el intercambio de calor entre la interface agua-atmósfera a través del año, se pudo inferir que el cambio de concavidad en los perfiles de temperatura entre los 5 m y 14 m de profundidad en la primera campaña, el gradiente a 14 m de profundidad y el enfriamiento progresivo desde la primera a la cuarta campaña, no pueden ser explicados solamente por forzantes atmosféricos y sugieren una fuente de calor diferente, la cual se demostró en esta investigación, fue producto de los afluentes naturales y de la operación del bombeo. Los perfiles de conductividad mostraron también el mayor gradiente a los 14 m en la primera y segunda campaña y su desaparición a partir de la tercera campaña.

En la primera y segunda campaña se observó que la pluma de PyE fue absorbida por la captación, y probablemente lo mismo sucedió con la pluma de ByS. La pluma proveniente del bombeo viajó de manera intrusiva hacia la torre de captación, homogenizando el perfil de temperatura entre los 5 m y 14 m, y posiblemente inhibiendo el intercambio vertical entre la superficie y el fondo. La relación del tiempo de residencia del embalse ( $\sim 28$  días y estimado como la relación entre el volumen útil,  $\sim 12 \text{ Mm}^3$ , y el caudal extraído,  $\sim 5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) y el tiempo de residencia de la pluma ( $\sim 11.5$  días, asumiendo que la pluma del bombeo se mueve entre 5 y los 14 m, y que se expande por todo el embalse, con un volumen  $\sim 4 \text{ Mm}^3$ ), es 40% aproximadamente, lo que indica que la pluma se remueve mucho más rápido que en otros sectores del embalse. Probablemente las zonas profundas en el cuenco sur se mantienen muy quietas en temporadas de estiaje y deben permanecer allí por largos periodos de tiempo.

En la tercera y cuarta campaña el aumento del caudal natural, sumado a la ausencia del bombeo, permitió la homogenización vertical de los perfiles de temperatura con la respectiva pérdida del gradiente presente a los 14 m, debido al alcance de los afluentes naturales hacia el cuenco sur. Probablemente el agua del fondo es remplazada por aguas frías producto de las crecientes, favoreciendo así la mezcla vertical.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Al Centre for Water Research (CWR), Western Australia University, por facilitar el modelo ELCOM. A Empresas Públicas de Medellín (EPM) por proveer la información y cofinanciar el proyecto de investigación. Al Grupo GAIA, GDCON y LimnoBase de la

Universidad de Antioquia y PARH de la Universidad Nacional de Colombia. Finalmente a todos los participantes del proyecto “Embalses EPM”.

## REFERENCIAS

- [1]. Imberger, J. and Patterson, J. C., *Physical Limnology*. Advances in Applied Mechanics 27th ed., Vol. 27, pp. 303-475. Academic Press – Elsevier, 1989.
- [2]. Wüest, A., and Lorke, A., *Small-Scale Hydrodynamics in Lakes*. Annual Review of Fluid Mechanics, 35(1), pp. 373-412, 2003.
- [3]. Lewis JR., W. M. *Tropical Limnology*. Annual Review of Ecology and Systematics, 18, 159-184 eds. Annual Reviews, 1987
- [4]. Lewis JR., W. M. *Tropical Lakes: How Latitude Makes a Difference*. Perspectives in tropical limnology, pp. 43-64. SPB Academic, 1996.
- [5]. Boehrer, B. and Schultze, M., *Stratification of Lakes*. Reviews of Geophysics, 46(2), 2008.
- [6]. Lewis JR., W. M. *Temperature, Heat, and Mixing in Lake Valencia, Venezuela*. Limnology and oceanography, 28(2), pp. 273–286, 1983.
- [7]. Marquez, G. C. y Guillot, G. M., *Ecología y Efecto Ambiental de Embalses*. Bogotá: Posgrado en Gestión Ambiental - Universidad Nacional de Colombia, 2001.
- [8]. Tavera, R. and Martínez-Almeida, V., *Atelomixis as a Possible Driving Force in the Phytoplankton Composition of Zirahuén, a Warm Monomictic Tropical Lake*. Hydrobiologia, 533(1-3), pp. 199-208, 2005.
- [9]. Merino-Ibarra, M., Monroy-Ríos, E., Vilaclara, G., Castillo, F. S., et al, *Physical and Chemical Limnology of a Wind-Swept Tropical Highland Reservoir*. Aquatic Ecology, 42(3), pp. 335-345, 2007.
- [10]. Gunkel, G. and Casallas, J., *Limnology of an Equatorial High Mountain Lake - Lago San Pablo, Ecuador: The Significance of Deep Diurnal Mixing for Lake Productivity*. Limnologica, 43, pp. 33-43, 2002.
- [11]. González, E. J., Ortaz, M., Peñaherrera, C. and De Infante, A. *Physical and Chemical Features of a Tropical Hypertrophic Reservoir Permanently Stratified*. Hydrobiologia, 522(1-3), pp. 301-310, 2004.
- [12]. Talling, J. F. and Lemoalle, J., *Ecological dynamics of tropical inland waters*. Cambridge Univ. Press, 1998.

- [13]. Roldán, G., y Ramírez, J. J., Fundamentos de Limnología Neotropical. 2nd ed., p. 440. Medellín, Universidad de Antioquia, 2008.
- [14]. Hodges, B. and Dallimore, C. J., Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM, v2.2 Science Manual. Centre for Water Research, Univ. Western Australia. Perth: CWR - Centre for Water Research. 2006.
- [15]. Villegas, B., Toro, B. M. and Vélez, J., Definición de los Tamaños Óptimos de malla e intervalo de Cálculo en un Modelo Numérico. Aplicación al caso del Embalse Porce II. Dyna., (147), 2005.
- [16] Román-Botero, R., Caracterización Espacio Temporal de la Estructura Térmica de un Embalse Tropical poco Profundo, Abastecido Parcialmente por Bombeo [MSc Thesis]. Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [17]. Macintyre, S. and Melack, J. M., Mixing Dynamics in Lakes Across Climatic Zones. (E. L. Gene, Ed.) Encyclopedia of Inland Waters. Oxford: Academic Press - Elsevier. 2009.