



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Caracterización espacio temporal de la estructura térmica de un embalse tropical poco profundo, abastecido parcialmente por bombeo

Ricardo Román Botero

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

Medellín, Colombia

2011

Caracterización espacio temporal de la estructura térmica de un embalse tropical poco profundo, abastecido parcialmente por bombeo

Ricardo Román Botero

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería de los Recursos Hidráulicos

Director:

Ph.D., Evelio Andrés Gómez Giraldo

Codirector:

Ph.D., Francisco Mauricio Toro Botero

Línea de Investigación:

Calidad de Aguas

Grupo de Investigación:

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos (PARH)



Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2011

A mis padres...

A mi vida...

A mis anhelos...

Agradecimientos

El mayor agradecimiento es a Dios y a la vida, no lo dudo y nunca lo haré, por permitir que me embarcara en ésta tarea que duró más de lo imaginado, que me trajo n^a retos, sueños y problemas, pero al mismo tiempo, y más importante, n[∞] felicidades. Gracias destino!!!

Disciplina, paciencia y enfoque, tres palabras que incorporé explícitamente a mi vida desde que mi primo Felipe Botero las escribió en un simple mensaje, y sin dudarlo las sentí como mi filosofía de vida. Gracias a él por permitir que las use ahora como parte de mi existir.

Si bien agradecer parece fácil, realmente no lo es, pues son muchas las personas, momentos y circunstancias que se prestan para que un proyecto salga adelante y se pueda concluir exitosamente (o tal vez... no). Posiblemente recordarlos a todos y cada uno de esos instantes es más difícil que el hecho de concluir ésta tesis. No obstante, es evidente que ciertas personas e instituciones resaltan, es inevitable, y es allí donde centré mi atención. De antemano, pido disculpas por aquellos que olvidé mencionar, están ciertamente en mis pensamientos y cada palabra que escribí en ésta tesis fue gracias a su motivación, sea cual fuere que haya sido.

A mis padres (Luz Elena B. y Orlando R.) -Mi inspiración... Mi orgullo... Lo que soy-

Mi familia: mi hermana (Carolina R.), mis tías (Olga Lucía B. y Lucía R.) y mi primo más cercano (Felipe B.) -Mi dedicación...-

Viviana B. -Mi presente... Mi futuro... Mi destino...-

Daniel L. y Juan F. -La Jauría... Mis amigos... Jueces de mis opiniones...-

Andrés G., Mauricio T., M. Victoria V. -Mis maestros... Mis guías...-

Embalses «Team» (PARH, GAIA, GDCON, LimnoBase) -En cada momento de tertulia, discusión y encuentro, todo un gusto para mi...-

Al grupo PARH y todos mis grandes amigos del posgrado (Son muchos para nombrarlos) -hicieron de esta difícil tarea algo más ameno y fácil...-

EPM -Gracias por su apoyo-

CWR- Por facilitar el modelo ELCOM-

A los Jurados: Ph.D Javier Vidal Hurtado (University of California, Santa Barbara) y Ph.D John Jairo Ramírez (Universidad de Antioquia) - Por sus enormes contribuciones al mejoramiento del trabajo-

A todos aquellos que me ayudaron de una y de otra forma, pues son demasiados los aportes y sin la ayuda de ellos, estos resultados nunca serían posibles.

A mis amigos ajenos a este cuento -por los momentos en que me hicieron olvidar de todo...-

A quien olvide - es cuestión de pensamiento...-

GRACIAS

Resumen

Se investigó la evolución espacial y temporal de la estructura térmica y los procesos de transporte del embalse tropical La Fe, un embalse ubicado en el municipio de El Retiro-Antioquia-Colombia, cerca de la línea ecuatorial ($\sim 6^\circ\text{N}$), mediante información recolectada en campo en el año 2010 y con ayuda de un modelo hidrodinámico (ELCOM). El embalse recibe fuentes naturales y aportes de agua mediante un sistema de bombeo en los 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 en el año se presentó condiciones climáticas de El Niño, transición y La Niña. Así, los cambios observados de enfriamiento progresivo y de forma en la estructura térmica, obedecieron principalmente a las condiciones hidrológicas de los ríos y de la operación del sistema de bombeo. Se observó que en el sistema es difícil identificar una estructura vertical bien definida del epilimnio, metalimnio e hipolimnio, y al contrario, los gradientes verticales de temperatura fueron débiles y continuos en casi toda la columna de agua, con sólo algunos valores altos de la frecuencia de flotabilidad en ciertas profundidades. Se advirtió que los cambios en los flujos de calor y las variables climáticas a escala intra-diaria condicionan los procesos de mezcla superficial, los cuales fueron debidos principalmente a mecanismos de enfriamiento convectivo y oscilaciones de la masa de agua del epilimnio. Se descubrió que por efecto de la operación y por una barrera antrópica ubicada en el sector central del embalse, éste es dividido horizontal y verticalmente en dos cuerpos de agua. El cuerpo norte está dominado por la dinámica de las plumas de entrada por los afluentes naturales y la captación, mientras en el cuerpo sur por la pluma del agua importada.

Palabras claves: limnología física, limnología tropical, estructura térmica, embalse La Fe.

Abstract

We investigated the spatial and temporal evolution of the thermal structure and tropical physical processes of La Fe Reservoir, a reservoir located in municipality of El Retiro-Antioquia-Colombia, near the Ecuador ($\sim 6^\circ$ N), using field data collected in 2010 and with the help of hydrodynamical model (ELCOM). The reservoir receives contributions from natural sources and water through a pumping system during periods of drought. We found no marked influence of annual cycle in atmosphere-lake heat fluxes, although the year saw weather of El Niño, transition, and La Niña. Thus, the observed changes in a progressive cooling and the thermal structure are mainly due to the hydrological conditions of rivers and the operation of the pumping system. We observed that in the system is difficult to identify a well epilimnion, metalimnion and hypolimnion vertical structure, and instead, the vertical temperature gradients are observed over most of the water column with somehow larger buoyancy frequency values at particular depths. It was noted that changes in heat flow and climate variables at intra-daily cycle conditional surface mixing processes, which were mainly due to convective cooling and oscillations of the mass of water in the epilimnion. It was found that the effect of the operation and an anthropogenic barrier located in the central sector of the reservoir, it is divided horizontally and vertically in two bodies of water. The body north is dominated by the dynamics of the natural tributaries input and withdrawal water, while in the south by the imported water.

Keywords: physical limnology, tropical limnology, thermal structure, La Fe reservoir,

Contenido

	Pág.
Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVII
Introducción	1
Preguntas de investigación	5
Hipótesis	5
Objetivos	5
1. Marco teórico	7
1.1 Generalidades de la estratificación térmica.....	7
1.2 Ecuaciones Fundamentales del Movimiento	9
1.3 Procesos de mezcla.....	12
1.4 La modelación hidrodinámica como herramienta en el estudio de los procesos de transporte	16
2. Descripción de la región y área de estudio	19
2.1 Generalidades del embalse La Fe	19
2.2 Variabilidad climática en la región.....	23
3. Metodología	25
3.1 Campañas de campo	25
3.1.1 Variables climatológicas	25
3.1.2 Variabilidad espacio-temporal del viento	26
3.1.3 Afluentes	26
3.1.4 Efluentes	26
3.1.5 Variables Físicas en el interior del cuerpo de agua.....	27

3.2	Descripción de la información y los muestreos	28
3.3	Actividades de modelación numérica	31
3.3.1	Modelo ELCOM.....	31
3.3.2	Selección de la malla horizontal y número de capas en la vertical.	32
3.3.3	Calibración.....	32
3.3.4	Validación.....	33
3.3.5	Escenarios de simulación.....	33
4.	Resultados.....	35
4.1	Resultados de las campañas de campo.....	35
4.1.1	Información climatológica y flujos de calor.....	35
4.1.2	Variabilidad espacial del viento.....	40
4.1.3	Transparencia del agua, profundidad Secchi.....	43
4.1.4	Características físicas de los afluentes	44
4.1.5	Comportamiento espacial de las variables físicas al interior del cuerpo de agua.	46
4.1.6	Comportamiento temporal de la temperatura en el sistema	58
4.2	Análisis unidimensional desacoplado de los forzantes.....	62
4.2.1	Importancia relativa del viento y los flujos de calor en la profundidad de la zona de mezcla.	62
4.2.2	Ciclo diario de la temperatura del afluente y la profundidad de intrusión de la corriente de densidad.....	69
4.2.3	Campo cercano del chorro de Pantanillo Sumergido y su nivel de flotabilidad neutra.....	74
4.3	Actividades de Modelación Numérica	76
4.3.1	Selección de la malla horizontal, vertical e intervalo de tiempo de cálculo	76
4.3.2	Calibración del modelo.....	78
4.3.3	Validación del modelo.....	87
4.3.4	Identificación de procesos de transporte.....	89
5.	Discusión y conclusiones.....	95
6.	Sumario.....	103
7.	Recomendaciones	105
Bibliografía.....		107

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Zona de estudio y localización de las estaciones de medición de EPM.....	20
Figura 2-2: Batimetría del año 2008 del embalse La Fe (EPM, 2009) Ubicación de los principales afluentes, estructuras de entrada y salida de agua. Secciones transversales en la antigua presa Los Salados.....	21
Figura 2-3: Esquema de localización y distribución de las tuberías Pantanillo 1 (Pantanillo Sumergido) y Pantanillo 2 (Pantanillo Superficial) (Modificado de EPM (2010)).	22
Figura 2-4: Torre de captación (tomada de Ortega A. & Restrepo S. (2010)).....	23
Figura 2-5: Ciclo M.M de (a) precipitación de la estación La Fe, (b) caudal natural estimado en la cola del embalse, (c) caudal captado y (d) caudal bombeado.	24
Figura 3-1: Lugares de medición de los perfiles de temperatura, turbidez y conductividad medidos en (a) primera campaña, (b) segunda campaña y, (c) tercera campaña.	28
Figura 3-2: Localización de las estaciones de muestreo estáticas y lugares de instalación de instrumentos.	29
Figura 4-1: Precipitación, caudales y niveles del año 2010.....	36
Figura 4-2: Variables climatológicas medidas para la estación ubicada en torre para las tres campañas de campo.....	37
Figura 4-3: Temperatura superficial del agua y cobertura de nubes en las tres campañas de campo.....	38
Figura 4-4: Intercambios de calor con la atmósfera durante las tres campañas.....	40
Figura 4-5: Magnitud de la velocidad y dirección del viento de las estaciones fija y dinámica, en la primera campaña de campo.	41
Figura 4-6: Magnitud de la velocidad y dirección del viento de las estaciones fija y dinámica, y mediciones puntuales en la segunda campaña de campo.	41

Figura 4-7:	Magnitud de la velocidad y dirección del viento en la estación fija y mediciones puntuales en la tercera campaña de campo.....	41
Figura 4-8:	Histograma de la diferencia entre la magnitud del viento medida en la estación fija y en la estación dinámica durante (a) la primera y (b) la segunda campaña.	42
Figura 4-9:	Profundidad del disco Secchi en el embalse en (a) primera campaña, (b) segunda campaña y (c) tercera campaña.	44
Figura 4-10:	Temperatura, conductividad y turbidez medida en los afluentes.	45
Figura 4-11:	Perfiles de temperatura, frecuencia de flotabilidad, conductividad y turbidez en cuatro lugares característicos del embalse La Fe.....	46
Figura 4-12:	Localización de los transectos longitudinales N-S a través del embalse. Los círculos rojos son ubicación de los perfiles medidos el mismo día, los verdes un día después	48
Figura 4-13:	Perfiles de temperatura e interpolación en transectos longitudinales durante (a) la primera, (b) segunda y (c) tercera campaña. La línea horizontal roja en los perfiles señala un gradiente fuerte. Las líneas horizontales blancas en las interpolaciones muestran los límites de la zona de compuertas.....	50
Figura 4-14:	Perfiles de conductividad e interpolación en transectos longitudinales durante (a) la primera, (b) segunda y (c) tercera campaña. La línea horizontal roja en los perfiles señala un gradiente fuerte. Las líneas horizontales blancas en las interpolaciones muestran los límites de la zona de compuertas.	51
Figura 4-15:	Perfiles de turbidez e interpolación en transectos longitudinales durante (a) la primera, (b) segunda y (c) tercera campaña. La línea horizontal roja en los perfiles señala un gradiente fuerte. Las líneas horizontales blancas en las interpolaciones muestran los límites de la zona de compuertas.	52
Figura 4-16:	Localización de transectos en dos de las campañas de muestreo. Ubicación de la cadena de termistores en torre y presa.....	53
Figura 4-17:	Perfiles e interpolación espacial de (a) temperatura, (b) conductividad y (c) turbidez, a lo largo de un transecto longitudinal por antiguo thalweg del Afluente PyE. Segunda campaña. Las líneas horizontales blancas en las interpolaciones muestran los límites de la zona de compuertas.....	55
Figura 4-18:	Perfiles e interpolación espacial de (a) temperatura, (b) conductividad y (c) turbidez a lo largo de un transecto atravesando el bombeo sumergido. Primera campaña	56
Figura 4-19:	Perfiles e interpolación espacial de (a) temperatura, (b) conductividad y (c) turbidez, a lo largo de un transecto circular en torre de captación. Primera campaña.	

Las líneas horizontales blancas en las interpolaciones muestran los límites de la zona de compuertas.	57
Figura 4-20: Perfiles de temperatura medidos en el nictemeral en la estación LFE06 de (a) primera campaña, (b) segunda campaña y (c) tercera campaña	58
Figura 4-21: (a) Temperatura ambiente, de la superficie y de los afluentes, (b) magnitud y dirección del viento, (c) precipitación y caudales del Afluyente PyE, Afluyente ByS, Q. captado y bombeado, y (d) contornos de temperatura de la cadena de termistores ubicada cerca de presa.	60
Figura 4-22: (a) Magnitud y dirección del viento, (b) Temperatura ambiente y temperatura superficial del agua, (c) contornos de temperatura de la cadena de termistores ubicada cerca de presa y (d) contornos de temperatura de la cadena de termistores ubicada en torre.	61
Figura 4-23: Longitud de Monin-Obukhov durante (a) primera, (b) segunda y (c) tercera campaña.	65
Figura 4-24: Definición del fetch.	66
Figura 4-25: (a) Magnitud y (b) dirección del viento promediadas cada 3 horas, (c) número de Wedderburn (escala logarítmica), (d) número del Lago (escala logarítmica), y (e) perfil característico de temperatura durante la primera campaña.	67
Figura 4-26: (a) Magnitud y (b) dirección del viento promediadas cada 3 horas, (c) número de Wedderburn (escala logarítmica), (d) número del Lago (escala logarítmica), y (e) perfil característico de temperatura durante la segunda campaña.	67
Figura 4-27: (a) Magnitud y (b) dirección del viento promediadas cada 3 horas, (c) número de Wedderburn (escala logarítmica), (d) número del Lago (escala logarítmica), y (e) perfil característico de temperatura durante la tercera campaña.	68
Figura 4-28: Caudal y temperatura de los afluentes naturales, y temperatura del embalse en el sitio de Presa (extrapolada hasta el fondo). Las líneas negra y cian del último panel indican la profundidad de nivel neutro de los afluentes ByS y PyE respectivamente, sólo en función de la temperatura del afluente y del embalse.	71
Figura 4-29: Nivel de intrusión de la pluma en el perfil de temperatura característico de (a) primera campaña y (b) segunda campaña, según diferentes temperaturas del Afluyente PyE registrados en el ciclo diurno.	73
Figura 4-30: Ubicación de la pluma y temperatura final del chorro luego de que el momentum inicial fue disipado, en perfiles característicos de temperatura cerca al bombeo en (a) primera campaña y (b) segunda campaña. Las flechas indican el descenso de la pluma una vez cesa el momentum del chorro. La línea azul punteada representa la superficie del agua.	75

Figura 4-31:	Contornos temporales de temperatura simulados con diferente malla horizontal en a) LFE3, b) LFE7 y c) LFE6.....	77
Figura 4-32:	Perfiles de temperatura del último día de simulación, para diferente resolución en el dominio vertical.....	78
Figura 4-33:	Malla seleccionada: (a) configuración horizontal y (b) capas en la vertical.	79
Figura 4-34:	Lluvia de la estación Palmas (verde) y estación la Fe (azul). Caudal estimado del Afluente PyE y Afluente ByS. Balance de masa: nivel medido y simulado en (a) segunda campaña y (b) tercera campaña.	81
Figura 4-35:	Esquema conceptual de la modelación del chorro sumergido en ELCOM	82
Figura 4-36:	Perfiles medidos y simulados en los 7 puntos estáticos del primer día de muestreo de la segunda campaña.	83
Figura 4-37:	Perfiles medidos y simulados en los 7 puntos estáticos del segundo día de muestreo de la segunda campaña.	84
Figura 4-38:	Contornos temporales de temperatura simulados con dos dominios verticales en la estación LFE06	85
Figura 4-39:	Perfiles de Temperatura, conductividad, turbidez, y trazador inerte en dos lugares del cuenco sur cercano en a) cercano a la presa y b) al bombeo.	86
Figura 4-40:	Perfiles medidos y simulados en los 7 puntos estáticos del tercer día de muestreo de la tercera campaña.	87
Figura 4-41:	Perfiles medidos y simulados en los 7 puntos estáticos del cuarto día de muestreo de la tercera campaña.	87
Figura 4-42:	Contorno temporal de la temperatura en la zona de presa (LFE06). Las líneas negras representan el centro de cada compuerta.	89
Figura 4-43:	Evolución en un transecto longitudinal N-S de un trazador inerte inyectado en (a) Afluente PyE, (b) Afluente ByS, (c) Pantanillo Sumergido y (d) Pantanillo Superficial. Las líneas blancas horizontales son el nivel de la compuerta superior (compuerta 3) y las líneas grises de la intermedia (compuerta 2). La captación es el bloque gris que sale desde el fondo a la superficie y la antigua presa Los Salados es el obstáculo en gris ubicado aproximadamente a 1.2 km.	91
Figura 4-44:	Evolución temporal de la concentración de trazador en LFE06, inyectado desde los Afluentes naturales en (a) segunda campaña y (b) tercera campaña.	92
Figura 4-45:	Evolución de la temperatura en la capa superficial y en un transecto en dirección norte-sur. La línea negra trazada en la capa superficial indica el transecto longitudinal. Los vectores de dirección del viento de color rojo indican la dirección en las	

tres últimas horas, y el azul en la actual. Las líneas blancas en el perfil longitudinal indican los niveles de las compuertas.	94
Figura 5-1: Transporte de masa promedio en el embalse La Fe en a) Período seco y b) período lluvioso.....	99

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Estaciones y otros registros suministrados por EPM.	23
Tabla 3-1: Instrumentos utilizados y localización de las mediciones.	30
Tabla 4-1: Diferencia de densidad entre el agua superficial del embalse, y la densidad del afluente, especificada por cada variable.....	70
Tabla 4-2: Factores de transposición	80

Introducción

El creciente interés mundial por un óptimo manejo racional y sostenible de los recursos naturales ha llevado a que se valoren más los criterios ambientales en las decisiones que se toman en torno al manejo de los diferentes sistemas de recursos hídricos como los embalses. En la actualidad, la operación óptima de los embalses no sólo obedece a factores de disponibilidad del recurso hídrico, si no que incluye aspectos de calidad según el uso que éste preste.

La dinámica de los procesos biológicos y químicos, agentes fundamentales en la calidad del agua, depende, entre otros, de los procesos de transporte, y éstos a su vez, de la variabilidad espacial y temporal de los agentes forzantes. La acción del viento, los flujos de calor atmosféricos, afluentes y efluentes naturales y antrópicos energizan procesos físicos que influyen en la dinámica de la estructura térmica y en la calidad del agua, ya que influye en el intercambio, transporte y mezcla de nutrientes a través de la columna del agua (e.g. Imberger & Patterson, 1989). Los numerosos procesos de transporte y mezcla, como las ondas superficiales, las ondas internas, las corrientes de densidad, la extracción selectiva, las corrientes convectivas, el mezclado por difusión doble, entre otros, interactúan modificando constantemente sus características y así, las condiciones ambientales. Por lo tanto, es muy importante entender y caracterizar los procesos de transporte para comprender de manera integral el funcionamiento del ecosistema lacustre.

En Colombia hay un relativo desconocimiento sobre la dinámica de los procesos de transporte en los sistemas lénticos, e incluso, ésta afirmación podría generalizarse al conocimiento de los sistemas del neotrópico¹, teniendo en cuenta que no son cuantiosos los estudios realizados con el propósito de entender la dinámica de los procesos físicos y de transporte. Algunos estudios realizados en ambientes lénticos del neotrópico donde se discute la importancia de los procesos físicos en la calidad del agua pueden ser consultados en Lewis Jr., (1983, 1987), Horn et al. (2001), Barbosa & Padiśák (2002), MacIntyre et

¹ Definido en Roldán & Ramírez (2008) como la región en el continente americano comprendida entre los 20° de latitud norte y los 20° de latitud sur.

al. (2002), Laval et al. (2005), Tavera & Martínez-Almeida (2005), Vergara N. & Ramírez (2005), Anis & Singhal (2006), Villalobos (2006), Merino-Ibarra et al. (2007), MacIntyre & Melack (2009), Okely et al. (2010), entre otros. Brazil y México son los países que lideran la investigación en ésta área, y sin embargo, a pesar de su celeridad en la región neotropical respecto a los otros países, sus principales publicaciones limnológicas están basadas en investigaciones de tipo ecológica y biológica tradicional, al igual que en los restantes países del neotrópico. La anterior afirmación puede constatarse en importantes trabajos como los realizados por Esteves (1998), Marquez & Guillot (2001), Melo et al. (2006), Roldán & Ramírez (2008), Roldán (2009), Alcocer & Bernal-Brooks (2010), quienes realizaron una substancial recopilación de algunos de los principales estudios limnológicos realizados en ésta región del continente Americano.

Según Roldán & Ramírez (2008) la limnología de aguas continentales colombianas ha sido una ciencia tratada principalmente desde los años noventa, con algunos estudios anteriores a la década e importantes para el desarrollo de la misma. Sin embargo, el alcance de los estudios en los lagos, ciénagas y embalses ha sido esencialmente biológico y químico, y al igual que en otros países del neotrópico, las conclusiones entorno a la relación con los procesos de transporte es tratada de manera especulativa. No obstante, en investigaciones poco conocidas como las de Villegas (2004), Fernández J. (2006), Ramos (2007), Marín (2008) y Ortega A. et al. (2010), enmarcadas dentro de tesis de pre y posgrado, y desarrolladas en los embalses colombianos Porce II y Riogrande II, se estudió, con ayuda de modelos numéricos, la dinámica de la estructura térmica ante diferentes forzantes y en algunos de esos estudios se infirió las posibles consecuencias en la calidad del agua debido a la dinámica de los procesos de transporte. Con base en los resultados de esas investigaciones se observa y reconoce una vez más la importancia que tiene caracterizar los procesos de transporte en los embalses colombianos, con el designio de conocer de manera integral la dinámica de los demás procesos biológicos y químicos.

Teniendo en cuenta lo anterior, nace el propósito de ésta investigación, la cual se desarrolló en el marco del proyecto interinstitucional “*Estudio de la Problemática Ambiental de tres embalses de EPM*” desarrollado entre Empresas Públicas de Medellín (EPM), la Universidad de Antioquia y la Universidad Nacional de Colombia, con el objetivo de entender espacial y temporalmente la evolución de la estructura térmica y los procesos de transporte en el embalse La Fe. El presente estudio se enfocó en caracterizar de forma general la estructura térmica en los períodos climáticos, realizando mediciones in situ de variables físicas en el cuerpo del agua y caracterizando los agentes forzantes, naturales y antrópicos. Así mismo, se complementó la discusión de las observaciones realizadas en campo con números adimensionales, modelos matemáticos y un modelo numérico hidrodinámico, que ayudaron a comprender los principales procesos físicos y finalmente describir su dinámica general.

Al igual que en muchos de los embalses colombianos, la calidad del agua del embalse La Fe ha sido estudiado con información escasa y principalmente bajo enfoques netamente químicos y biológicos (e.g. Ramírez & Machado, 1982; Sierra R. & Ramírez, 2000; R. A. Vargas & Ramírez, 2002; UdeA, 2002, 2005; Ramírez et al., 2005) y algunos morfológicos (Hernani T. & Ramírez, 2002), siendo notoria la ausencia de un análisis orientado a la dinámica de los procesos físicos. Excepciones como el estudio desarrollado por Vergara N. & Ramírez (2005), quienes analizaron la posibilidad de surgencia de aguas del metalimnio con ayuda de números adimensionales y con información de un solo perfil de temperatura a escala mensual, revela lo poco que se conoce sobre los procesos de transporte en el sistema.

La presente investigación pretende profundizar en el conocimiento general de la dinámica de la estructura térmica y de los procesos de transporte en el embalse La Fe, y así, se espera que los análisis y resultados se conviertan en un insumo base que ayude en la comprensión de la dinámica de otros procesos que afectan la calidad del agua.

Preguntas de investigación

¿Cuáles son los principales procesos de transporte que rigen la dinámica de la estructura térmica en el embalse La Fe?

¿De qué manera los forzantes externos y los procesos físicos al interior de la masa de agua afectan la estructura térmica del embalse La Fe?

Hipótesis

Dado que los flujos de calor atmosféricos, el viento, las plumas de los afluentes y la operación son importantes en la dinámica de la estructura térmica de los embalses, la variabilidad de los procesos de transporte en el embalse La Fe refleja las escalas temporales de variación de los forzantes.

Objetivos

Objetivo general

Caracterizar y describir la variación espacio-temporal de la estructura térmica del embalse La Fe y los procesos de transporte predominantes.

Objetivos Específicos

- Caracterizar el régimen hidrológico y climático y la variabilidad de los forzantes naturales y antrópicos.
- Analizar y describir la estructura térmica y los procesos de transporte en función del régimen climático, plumas afluentes y efluentes, régimen de bombeo, operación del sistema, con base a mediciones de variables físicas realizadas en campo, efectuadas durante un período que abarque diferentes condiciones hidro-climáticas.
- Ampliar la resolución espacio-temporal en la descripción de la estructura térmica y los procesos de transporte, mediante un modelo numérico calibrado y validado, de tal forma que permita inferir el efecto de los principales agentes forzadores en la dinámica del cuerpo de agua.

1. Marco teórico

El marco teórico presentado en esta investigación se divide en dos temáticas; en primer lugar se presenta la descripción general de los principales procesos de transporte y mezcla que influyen en la estratificación, y finalmente una reseña sobre la importancia del uso de modelos numéricos en el estudio de los procesos de transporte en cuerpos lénticos. El enfoque del presente capítulo pretende dar una descripción general de los procesos de transporte, no obstante, el lector interesado puede consultar en las diferencias referencias citadas para mayor detalle en la descripción física y matemática de los procesos.

1.1 Generalidades de la estratificación térmica

En lagos y embalses la estratificación térmica se debe inicialmente al calentamiento suministrado por la radiación solar, cuando esta domina el mezclado generado por el ímpetu del viento y del flujo de entrada y salida del sistema. La fracción de radiación de onda corta recibida del sol y la radiación de onda larga emitida por las nubes y los gases atmosféricos calienta el sistema, mientras la evaporación, el calor sensible y la radiación desde la superficie con frecuencia lo enfrían. La dinámica de la estratificación y la mezcla no sólo varía estacionalmente de acuerdo a los períodos de lluvia y verano, sino a cambios en las condiciones meteorológicas en escalas cortas de tiempo del orden de horas. Aunque el intercambio de energía lago-atmósfera es fundamental en la estratificación, la dinámica de los restantes agentes naturales, como el viento y los afluentes, modifican las características de la estratificación impuesta por los flujos de calor.

En los períodos de verano las capas superficiales de un sistema léntico están sometidas a intensa actividad térmico-mecánica debido al viento y los flujos de calor, y poseen la característica de ser bien mezcladas (zona del epilimnio). Debajo de esta zona se produce un alto gradiente vertical de temperatura y densidad, donde evoluciona una franja muy dinámica de transición con profundidad variable que depende de muchos procesos de mezcla al interior del sistema, llamada metalimnio. La energía proveniente desde la superficie es consumida a través de la columna de agua, en procesos físicos, químicos y biológicos, lo que impide su alcance a zonas profundas, generando una zona de mayor densidad, denominada hipolimnio. Una vez comienzan las estaciones frías (otoño e

invierno), los sistemas tienden al mezclado completo de la columna de agua, debido al enfriamiento en las capas superficiales.

El tipo de estratificación anteriormente descrito es característico de lagos poco profundos de las zonas templadas cálidas, y de acuerdo a Hutchinson (1957) es denominado monomíctico caliente, estratificado en verano y mezclado completamente en invierno. Sin embargo, sólo es un ejemplo de los muchos y diferentes patrones de estratificación que ocurren en los lagos de diferentes latitudes y alturas sobre el nivel del mar. Mayor información sobre patrones y formas de estratificación en lagos de diferentes latitudes puede ser consultado en detalle en Bohrer & Schultze (2008) para lagos de zonas templadas, Lewis Jr. (1983, 1987) en lagos tropicales y Gibson (2004) en lagos ubicados en climas polares.

Según Lewis Jr. (1987, 1996) los sistemas tropicales se diferencian de los sistemas en latitudes templadas principalmente por dos razones: la diferencia entre la irradiación mínima y máxima anual y el efecto de la fuerza de Coriolis. Así, mientras en el trópico bajo (cercano al 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 mayor en las latitudes altas (~90%). Además, la duración efectiva de la irradiación en el día, en el transcurso del año, es prácticamente constante en el trópico bajo, a diferencia de las latitudes templadas, donde puede cambiar hasta por 3 horas en una latitud cercana a los 30°. El efecto Coriolis en los lagos fuera del trópico afecta modificando la dirección de los vientos y así la capacidad efectiva de ellos para la mezcla. Finalmente, la respuesta en el cuerpo de agua ante esos dos forzantes de primer orden son los cambios de la temperatura en toda la profundidad y así, la estabilidad, y la fuerza efectiva del viento necesaria para la mezcla. Como consecuencia a los cambios entre la irradiación mínima y máxima a través de las latitudes, se ha encontrado 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.

Lewis Jr. (1996) advierte que en los lagos tropicales bajos también hay temporadas de mezcla total, contrario a lo que intuitivamente se podría esperar debido a la constancia en la irradiación estacional. En muchos casos la temporada donde ocurre el mezclado coincide con el período de invierno (e.g. Lewis Jr., 1983; Marquez & Guillot, 2001; Tavera & Martínez-Almeida, 2005; Merino-Ibarra et al., 2007), lo que implica que es la caída en la irradiación, o la entrada de los ríos con temperaturas frías, sumado a la estratificación suave, los responsables en la mezcla total. En otros casos se ha observado que la mezcla coincide con el período seco y ésta es generalmente explicada por la acción de los vientos fuertes, los cuales suministran la energía necesaria para la homogenización de la temperatura a través de la columna del agua (e.g. Gunkel & Casallas, 2002; Villalobos, 2006 o Talling 1969, 1990 en Lewis, 1996). No obstante, sí se ha observado que algunos sistemas se mantienen establemente estratificados durante todo el año, a pesar de la

existencia de los períodos de invierno y verano, con una zona de mezcla restringida a los primeros metros (e.g. González et al., 2004; Marquez & Guillot, 2001), como es el caso del embalse La Fe, donde se ha reportado éste tipo de comportamiento (Vergara N. & Ramírez 2005; Roldán & Ramírez, 2008). Los diferentes patrones de mezcla y estratificación se han observado en todas las latitudes del trópico y a través de la altura sobre el nivel del mar, y no existe un patrón común que los explique. Así, siguiendo las conclusiones de Lewis (1987,1996), y de estudios como el de Marquez & Guillot (2001) en embalses colombianos, los patrones de estratificación en los sistemas del trópico, ubicados a diferentes alturas sobre el nivel del mar, no pueden explicarse tan sólo como función de las temperaturas del aire y del agua, si no a otros como el viento, la hidrología, las características de los afluentes, entre otros, y también su periodicidad e intensidad.

Para Lewis Jr. (1987), MacIntyre et al. (2002) y MacIntyre & Melack (2009) los sistemas tropicales exhiben una mezcla diurna más dinámica y profunda que en los lagos en zonas templadas, debido a la menor diferencia en temperatura entre la superficie y el fondo y que los cambios en los flujos de calor intra-diario es mayor, principalmente en el flujo de calor latente, lo cual permite que el trabajo necesario para la profundización de la zona de mezcla debido al esfuerzo del viento y al enfriamiento superficial sea menor.

En los embalses de todas las latitudes existen además otros agentes forzadores de tipo antrópicos que influyen de manera notable la evolución de la estructura térmica: aducción, bombeo, trasvases, etc. Según la frecuencia con que se realiza la operación del sistema, las características físicas de los afluentes antrópicos y la cantidad de energía transmitida, la dinámica espacio-temporal de la estructura térmica varía significativamente.

Los mecanismos que afectan la dinámica de los procesos de transporte y así las estructura térmica en los lagos y embalses son muchos, y pueden ser difícil de caracterizar individualmente, pues entre ellos existe una gran interacción que abarca todas las escalas espaciales y temporales. En la presente revisión se presentan los procesos de transporte más generales, y por lo tanto, se le recomienda al lector interesado seguir trabajos como los realizados por Fischer et al. (1979), Imberger & Hamblin (1982), Imberger & Patterson (1989), Imboden & Wüest (1995), García (1996), Martin & McCutcheon (1999) o Wüest & Lorke (2003, 2009), donde se presenta la descripción física y matemática de muchos de los posibles procesos físicos que ocurren en un cuerpo léntico.

1.2 Ecuaciones Fundamentales del Movimiento

La evolución de la estructura térmica y los procesos de transporte pueden ser explicados en función de las ecuaciones del movimiento, pues el calor y la masa que llegan desde las fuentes se propagan a través del sistema, siguiendo los principios básicos del movimiento de un fluido a través de un medio.

Las leyes básicas en el movimiento y transporte están representadas por las ecuaciones de conservación de masa, momentum, energía térmica y masa de constituyentes, entendiendo constituyentes como contaminantes u otras sustancias de relativa importancia. Al realizar el planteamiento físico-matemático de la dinámica del flujo en una parcela de material bajo acción de las fuerzas a las que está sometido, teniendo presente consideraciones de isotropía del medio y flujo en régimen no permanente, se obtienen las conocidas ecuaciones gobernantes del movimiento, ecuaciones de Navier-Stokes (pueden ser consultadas en Cohen & Kundu, 2007).

La solución de las ecuaciones fundamentales es tema actual de investigación, dada la complejidad de desarrollar soluciones analíticas debido a su no linealidad. Por lo tanto, se han propuesto diferentes metodologías para encontrar de manera aproximada una solución, principalmente utilizando métodos numéricos y aprovechando las ventajas computacionales. Entre las metodologías más comunes se encuentran: *Direct Numerical Simulation* (DNS), *Large Eddy Simulation* (LES), y *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS). Mientras que en el método DNS se trata de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes sin el uso de modelos de turbulencia, LES y RANS los implementa mediante el concepto de “Eddy Viscosity” o viscosidad turbulenta (para mayor detalle ver Marvin & Huang, 1998; Celik, 2005)

Según Hodges (2009), RANS es generalmente el método más utilizado en modelación hidrodinámica de lagos y embalses. Está basado en el concepto de promedio temporal y promedio ensamblado para describir el flujo medio y las fluctuaciones turbulentas y hace uso de la técnica de descomposición de Reynolds. A continuación se presentan las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando la notación de suma de Einstein.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1.2-1)$$

$$\frac{Du_i}{DT} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_j} + g_i \frac{\rho'}{\rho_0} + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho_0 \langle u_i' u_j' \rangle \right) \quad (1.2-2)$$

$$\frac{DC_i}{DT} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial C_i}{\partial x_j} - \langle C' u_j' \rangle \right) \pm C_{(FyS)} \quad (1.2-3)$$

$$\frac{DT_i}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T_i}{\partial x_j} - \langle T' u_j' \rangle \right) \pm T_{(FyS)} \quad (1.2-4)$$

$$\rho = \rho(T, C_n, S) \quad (1.2-5)$$

donde u_i es la componente de la velocidad del flujo medio en dirección i , p la presión del flujo medio, g_i la componente de la gravedad, ρ la densidad del flujo medio, ρ_0 la densidad de referencia, μ la viscosidad dinámica, C_i la concentración del constituyente, T_i temperatura, D coeficiente de difusión molecular, k es la difusividad térmica, $C_{(FyS)}$ y $T_{(FyS)}$

fuentes o sumideros del constituyente o temperatura, C_n sólidos suspendidos, S sólidos disueltos, y los términos con apóstrofe son las fluctuaciones turbulentas de velocidad, densidad, temperatura y constituyente. La ecuación (1.2-1) representa la conservación de masa a través de un volumen de control, considerando variaciones insignificantes de la densidad. La ecuación (1.2-2) es el cambio en la cantidad de movimiento (aceleración local y convectiva) debido a diferencias de presión, fuerzas de flotabilidad, fuerzas viscosas y otras fuentes. La ecuación (1.2-3) describe el transporte de un elemento constitutivo y la ecuación (1.2-4) el transporte de la energía térmica. La ecuación (1.2-5) es la densidad en función de la temperatura, sólidos disueltos y los sólidos suspendidos (la densidad debido a la temperatura y los sólidos disueltos se calcula con base a una función de estado²).

Cada uno de los términos en la ecuación (1.2-2), como se indicó anteriormente, son fuerzas actuando en el sistema, por ejemplo, el segundo término del lado derecho de la igualdad; $g \cdot (\rho'/\rho_0)$, representa las fuerzas de flotabilidad. La fuerza de flotabilidad se entiende como la fuerza relativa que resulta de la diferencia entre el peso propio de la parcela de fluido y el empuje ejercido por el fluido circundante y puede ser expresada en términos de la frecuencia de flotabilidad N^2 , ecuación (1.2-6). Los términos con apóstrofes hacen referencia al flujo medio turbulento y son evaluados en el método RANS mediante el uso de la viscosidad turbulenta, la cual es un parámetro que depende de las condiciones del flujo. Este parámetro es muy estudiado en la actualidad, y su estimación se realiza mediante métodos directos como suponerlo constante en todo el proceso, o variable en el flujo (e.g. García, 1996; Toro 1998).

$$N^2 = \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (1.2-6)$$

La frecuencia de flotabilidad, o frecuencia *Brunt-Väisälä*, cuantifica la frecuencia con que oscilará una partícula en un fluido estratificado, luego de ser movida verticalmente de su nivel de equilibrio, e indica el grado de estratificación de la columna de agua. Si $N^2 > 0$, la columna de agua se considera estable, si no, las partículas de fluido iniciarán movimientos inducidos por la fuerza de flotabilidad, en búsqueda de su posición de equilibrio de flotabilidad neutra. Entre más alta y positiva es la frecuencia de flotabilidad, mayor es la restricción en el intercambio vertical de sustancias, debido a que inhibe los movimientos verticales.

²En este trabajo se utilizó la ecuación de estado de la UNESCO - (UNESCO, 1981)

1.3 Procesos de mezcla

La mezcla en cuerpos lénticos es el resultado de movimientos caóticos o turbulentos del agua y es esencial describir las fuerzas que la generan, ya que la dinámica de la estructura térmica depende fundamentalmente de estos procesos. En lagos y embalses la mezcla es producto de tres principales fuentes: caudales afluentes, caudales efluentes, y transferencia de energía a través de la interface lago-atmósfera debida al efecto del viento, flujos de calor y rotación de la tierra.

- Efecto del Viento

El viento transfiere momentum y energía cinética turbulenta capaz de generar movimiento de las masas de agua y mezcla en el sistema. En principio energiza las capas superficiales formando ondas progresivas superficiales, y posteriormente activa procesos de transporte dentro del cuerpo del agua como ondas internas, flujos convectivos, circulación horizontal de las masas de agua, etc.

La energía transferida genera turbulencia en la capa superficial, y es transportada hacia las capas más profundas mezclando el sistema desde la superficie hasta la profundidad donde la energía cinética turbulenta es disipada. Adicionalmente, puede generar movimientos verticales convectivos debido a la masa de agua que evapora, y así el enfriamiento de la superficie, activando movimientos térmicos y por lo tanto la mezcla producto de ellos. Éste proceso sucede principalmente en la zona superficial de mezcla, y fue descrito por Imberger (1985) como uno de los principales mecanismos en la formación y profundización de la zona de mezcla diaria, junto al enfriamiento producto de la pérdida de calor (e.g. Spigel et al., 1986; Monismith & MacIntyre, 2009).

El esfuerzo del viento no solo genera perturbaciones de menor escala en la capa de mezcla, también es importante en procesos al interior, básicamente debido a generación de ondas internas. Dependiendo de la magnitud del viento la superficie del agua se inclina, adquiriendo diferentes elevaciones en las fronteras del sistema, lo cual es denominado “*setup*”. Mientras el viento permanezca por una duración prolongada, y si el sistema está estratificado, capas de diferente densidad se inclinan (por diferencia de presión) en direcciones opuestas entre capas adyacentes. Una vez que la intensidad del viento cese y el cuerpo trate de recuperar su posición de equilibrio, comienza un movimiento oscilatorio de ondas estacionarias o “*seiches*” debido a la inercia en el movimiento y que la energía potencial que originalmente adquirió, se convirtió en energía cinética. Aunque la superficie libre rápidamente vuelva a su estado de cuasi-equilibrio, debido a la mayor fuerza de flotabilidad entre la interfaz lago-atmósfera (en este caso la frecuencia de flotabilidad N es muy alta), las capas debajo de la superficie empiezan a oscilar debido a una estratificación continua (e.g. Mortimer, 1952). El efecto de capas de diferente densidad en el metalimnio hace que las ondas de mayor escala transformen su energía en ondas internas de menor

escala como ondas solitarias, ondas Kevin Helmholtz, ondas forzadas, entre otros (e.g. Cohen & Kundu, 2007; Boegman, 2009), las cuales producen inestabilidades y generan turbulencia que finalmente ayuda al mezclado vertical.

Si el *setup* debido al viento es lo suficientemente importante, y la amplitud de las ondas internas también, es posible que aguas provenientes de otros estratos con diferentes características, por ejemplo del hipolimnio, temporalmente alcancen capas superficiales. Este efecto, denominado surgencia, trae consigo mezcla que uniformiza la temperatura del sistema.

El viento es seguramente el principal forzante, pues está presente en la mayoría de los procesos de transporte; activa patrones de circulación y dispersión en la superficie transportando masas de agua de diferente calidad entre distintas zonas (e.g. Podsetchine & Schernewski, 1999; Rueda et al., 2005; Ramos, 2007; Rueda & Vidal, 2009), energiza el movimiento de ondas internas que trasladan sustancias a través de la columna de agua (e.g. Hodges et al., 2000; Appt et al., 2004; Anohin et al., 2006; Boegman, 2009), mezcla en la superficie generando transporte vertical de sustancias (e.g. Imboden & Wüest, 1995; Monismith & MacIntyre, 2009), entre muchos otros. En Imberger & Patterson (1989) se encuentra una buena descripción de la física de estos procesos.

- Mezclado convectivo

Si la superficie del agua se enfría, en ausencia de viento significativo, la densidad del agua superficial se vuelve más densa generando una estratificación inestable, y posteriormente se inducen movimientos térmicos que mezclan y profundizan la capa superficial. Imberger (1985) analizó la formación de la capa de mezcla diurna debido a la convección y describió detalladamente este proceso.

- Flujos de entrada

Cuando los ríos se encuentran con un cuerpo de agua, usualmente se observan diferencias en temperatura, salinidad y turbidez. Esa diferencia hace que el flujo de entrada, el cual puede ser más o menos denso que el agua de la superficie, siga una trayectoria particular dentro del cuerpo de agua. El momentum inicial del flujo de entrada empuja parte del agua retenida hasta que es sustancialmente disipado por las fuerzas cortantes del fondo y por el gradiente de presión a través de la interface de la masa de agua. Si la energía cinética turbulenta no es suficiente para generar una mezcla total a medida que el momentum inicial se disipa, el afluente fluirá hacia una capa con igual densidad en el cuerpo de agua y se moverá a lo largo de ésta, definiéndose entonces direcciones preferenciales de flujo conocidas como corrientes superficiales, intrusivas y de fondo.

Las corrientes superficiales se dan debido a que el afluente es menos denso que la capa superficial, por lo tanto, una vez se halla disipado parte de la energía cinética disponible

en la frontera rio-agua, la fuerza de flotabilidad inducirá que el fluido sea transportado en las capas superficiales menos densas. El incremento en la elevación de la superficie del agua generará inestabilidad hidrostática y tenderá rápidamente a esparcirse en la superficie. En Imberger & Patterson (1989) y Martin & McCutcheon (1999) se puede consultar diferentes metodologías para la estimación de la forma y el desarrollo de las corrientes superficiales. Si la densidad del flujo de entrada es mayor que la densidad de la superficie, la fuerza de flotabilidad hará que el afluente se sumerja y viaje hacia el fondo, denominada corriente de fondo. En el proceso se caracterizan dos formas de mezcla importantes: la primera es debido a la alta turbulencia generada por la disipación de la energía al interactuar dos cuerpos con diferentes velocidades, donde domina la energía debido al gradiente de velocidad y se da al inicio, antes de que el río se sumerja, en un lugar conocido como como “*plunge point*”, y es donde ocurre la mayor mezcla (Alavian et al., 1992)

El segundo se debe a la discontinuidad que existe entre las superficies, el cual produce incorporación o atrapamiento de aguas tranquilas hacia las aguas turbulentas de la pluma, conocido como “*entrainment*”, sugerido por Ellison & Turner (1959), el cual depende de las fuerzas de inercia y de flotabilidad de la pluma dentro del medio, y de la fricción de la superficie del fondo (en Fernandez & Imberger (2006) se puede consultar diferentes formulaciones para cuantificar el atrapamiento). Baines (2001) demostró que existe además otro mecanismo de mezcla similar al atrapamiento, pero contrario, donde es la pluma quien incorpora agua hacia el sistema, definido como “*detrainment*”, y depende también de los mismas características del atrapamiento.

Mientras el afluente intrusivo fluye hacia el fondo a través del agua embalsada, eventualmente la estratificación restringe su movimiento, en ese punto la fuerza de flotabilidad es neutral y la dirección del movimiento se vuelve preferiblemente horizontal a través de una capa de densidad semejante, la pluma es denominada corriente intrusiva. Una vez el agua fluya por dicha capa, rápidamente la energía será disipada por los esfuerzos cortantes. Imberger & Patterson (1989) mostraron que este tipo de flujos se pueden tratar con las técnicas numéricas diseñadas para la extracción selectiva.

Diferentes estudios han mostrado que en los embalses las corrientes de gravedad adoptan principalmente la forma de corrientes intrusivas, debido a las características de los afluentes (temperatura, conductividad y turbidez), lo cual los hace mucho más densos que el agua superficial del embalse (e.g. Ford & Johnson, 1983; Alavian et al., 1992; Gu et al., 1996; Dallimore et al., 2001; Ahlfeld et al., 2003; Fernandez & Imberger, 2006; Vidal, 2006; Chung et al., 2009; Rueda & MacIntyre, 2010). Caso contrario pasa con las corrientes superficiales, donde son realmente pocos los estudios en lagos y embalses en que se ha reportado este tipo de patrón de la pluma (e.g. Vidal, 2006).

- Flujos de salida

El flujo de salida de un fluido estratificado de un lago o embalse es influenciado fuertemente por la fuerza de flotabilidad, ya que inhibe los movimientos verticales. Cuando las compuertas son abiertas súbitamente, la presión instantáneamente activa patrones de flujo radial hacia la salida. Sin embargo, la convergencia radial cerca al punto de salida distorsiona rápidamente la termoclina, permitiendo desplazamientos verticales irregulares. Debido a la fuerza de flotabilidad, se inicia un conjunto de ondas internas que se propagan hacia afuera, ajustando las isotermas a una posición horizontal, cerca al punto de salida. El flujo radial colapsa, convirtiéndose en un flujo tipo chorro, cuyo espesor característico es la zona de extracción, y el campo de flujo es denominado extracción selectiva. Debido a la propagación de ondas internas hacia el exterior de la zona de convergencia, y la turbulencia generada, no sólo se observan cambios en la termoclina en inmediaciones de la zona de extracción, si no también cambios significativos en la estructura lejos de dicha zona.

A medida que se capta agua de un embalse y se desarrolla la zona de extracción (cuyo tamaño y forma dependen de la tasa de descarga, la localización de la salida, la batimetría del embalse y la estratificación del agua), la distribución de la velocidad del agua varía desde un punto de máxima velocidad, localizado en cercanías de la estructura de retiro, hasta un punto de velocidad cero que delimita la zona de influencia de la zona de extracción (e.g. Anohin et al., 2006). En Fischer et al. (1979), Imberger & Patterson (1989), Ma et al. (2008) o Martin & McCutcheon (1999) se puede consultar diferentes metodologías para estimar la zona de extracción y las características de la extracción selectiva.

- Chorro Sumergido

En el embalse La Fe existe un tipo de proceso de transporte que afecta los patrones de mezcla, denominado chorro sumergido, no muy común en los sistemas lénticos, y que se espera afecte sustancialmente el comportamiento espacio-temporal de la estructura térmica. Según Fischer et al. (1979) un chorro sumergido (o “jet”) es una descarga de fluido desde un mecanismo con un orificio o ranura, que se encuentra dentro de un cuerpo del mismo fluido o similar, y el cual es eyectado en cualquier dirección con momentum inicial y fuerzas de flotabilidad, siendo principalmente el momentum quien domina su dinámica. Una vez el chorro sale de la fuente, el cual puede tomar diferentes direcciones de acuerdo al grado de inclinación de la fuente, el momentum inicial es disipado debido a la acción de la fuerza de gravedad (si éste es eyectado en una dirección contraria a la acción de la gravedad) y debido a procesos de mezcla producto de la incorporación de agua del medio circundante hacia ella, de forma análoga que en los procesos de mezcla de las plumas intrusivas. Finalmente, cuando el momentum inicial es disipado totalmente, la

pluma se incorpora al sistema en el nivel de flotabilidad neutro, favoreciendo la mezcla en el sistema.

El comportamiento físico anteriormente descrito es denominado campo cercano del chorro, donde las propiedades y características del chorro como la velocidad, el diámetro y los constituyentes, cambian siguiendo un comportamiento tipo Gaussiano. Luego de que la pluma fue incorporada en el nivel de flotabilidad neutro, la dinámica de la pluma sigue un comportamiento dominado por los procesos de transporte propios en el sistema, generados por la acción del viento, los afluentes, ondas internas, etc., y es denominado campo lejano del chorro.

A pesar de que éste tipo de proceso físico no es muy común en los lagos y embalses, y generalmente se presenta cuando existe la necesidad de importar agua de otras fuentes (e.g. Abid, 2001; Ahlfeld et al., 2003), sí es muy común encontrarlo en sitios de disposición de aguas servidas como en el océano (e.g. Smith, 1999; Lye & Sharp, 2002; Liu et al., 2006; Marti et al., 2011), y también debido a mecanismos físicos de mezcla inducida (o artificial), los cuales utilizan el mismo concepto de mezcla del chorro para romper una fuerte estratificación y así cambiar las condiciones ambientales del sistema (e.g. Brookes et al., 2008; Morillo et al., 2009; Lewis et al., 2010). El principio físico en que se basa la mezcla inducida es el mismo del chorro sumergido, con la diferencia de que el mecanismo que produce el chorro no eyecta agua importada de otras fuentes, si no que aprovecha el agua del sistema que está por debajo de éste y lo eyecta hacia arriba (o hacia abajo, en cuyo caso utiliza el agua que está por encima del mecanismo). En Fischer et al. (1979), Jones et al. (1996) o Kikkert (2006) se puede encontrar una amplia descripción de éste proceso en diferentes ambientes acuáticos.

1.4 La modelación hidrodinámica como herramienta en el estudio de los procesos de transporte

La importancia de la modelación hidrodinámica en el contexto de los procesos de transporte se puede resumir en varios aspectos: caracterización de las escalas no representadas espacio-temporalmente por carencia de instrumentación, análisis de sensibilidad a variables que son difícil de medir o presentan incertidumbre, evaluación de hipótesis causa-efecto y, finalmente, predicción de escenarios.

Con base en los resultados de un modelo hidrodinámico que prediga adecuadamente la física del sistema en estudio, se pueden aclarar ideas y conceptos que nacen a partir del análisis de los datos de campo, o que se tiene como hipótesis antes de realizar el estudio. También sirve para tomar decisiones en cuanto a la forma de cómo debe realizarse la instrumentación futura, y cuál es el lugar adecuado dentro del sistema para realizar las mediciones in situ, y por lo tanto, caracterizar adecuadamente el proceso físico que se esté estudiando o desee estudiar. La predicción de escenarios futuros con ayuda de un modelo

hidrodinámico es una importante herramienta en la toma de decisiones, ya que los resultados sirven como apoyo en el momento de tomar las medidas adecuadas en la mitigación de impactos de un ecosistema bajo condiciones actuales, y bajo posibles escenarios futuros considerados críticos a corto y mediano plazo.

Para Hodges (2009) “la modelación hidrodinámica es el arte y la ciencia de la aplicación de las ecuaciones de conservación de momentum, continuidad, y transporte, utilizadas para representar la evolución de la velocidad, densidad y sustancias constitutivas”. Por lo tanto, para la selección de un modelo se debe tener muy claro el problema que se desee solucionar, la complejidad del fenómeno, los resultados que se deseen de él, la información disponible y muchos otros factores de vital importancia que definitivamente condicionarán la veracidad de los resultados. En Martin & McCutcheon (1999) se presenta una descripción muy detallada de algunos factores y las características que deben ser tenidos en cuenta para una elección de un modelo acorde al problema que se desee estudiar. Además se detalla, paso a paso, como debe ser el proceso de modelación una vez se haya elegido o concebido el modelo.

En el mundo son muchos los modelos disponibles que sirven para la modelación de procesos de transporte en 1D, 2D y 3D. En Hodges (2009) se resume, desde el año 1990 hasta el 2009, los principales modelos existentes que se encuentran citados en la literatura. Entre los modelos más utilizados en el mundo se encuentra el modelo tridimensional ELCOM (*Estuary, Lake and Coastal Ocean Model*), modelo utilizado en la presente investigación. ELCOM es un modelo que ha sido aplicado exitosamente en una extensa variedad de proyectos en golfos, estuarios, lagos y embalses de todas las latitudes, incluyendo el trópico, tanto para el apoyo en estudios de investigación, como para resolver problemas prácticos de Ingeniería. En la sección 3.3.1 se muestra una breve descripción del modelo.

2. Descripción de la región y área de estudio

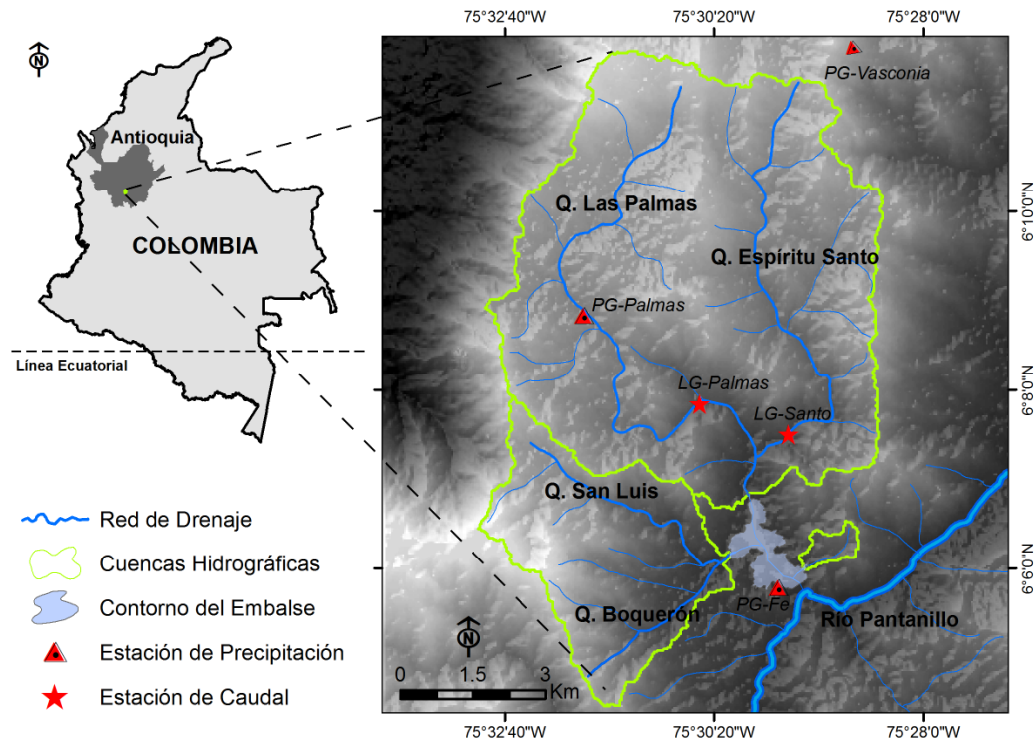
Se presenta a continuación una descripción general de la región de estudio, su climatología, la batimetría del embalse y detalles específicos importantes en las estructuras de entrada y salida de caudal en el sistema.

2.1 Generalidades del embalse La Fe

El embalse La Fe se encuentra ubicado en el Municipio de El Retiro, al oriente del departamento de Antioquia - Colombia, en las coordenadas 75° 30' 15" Oeste y 06° 06' 50" Norte (Figura 2-1). Es un embalse de carácter multipropósito, destinado principalmente para el abastecimiento de agua potable, y adicionalmente en generación de energía hidroeléctrica y recreación. Las aguas captadas son conducidas hasta la planta de tratamiento La Ayurá, con una capacidad de $9.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, para el abastecimiento de agua potable. Adicionalmente, el agua derivada se aprovecha para la generación de energía mediante una minicentral de 18 MW de capacidad instalada (EPM, 2005).

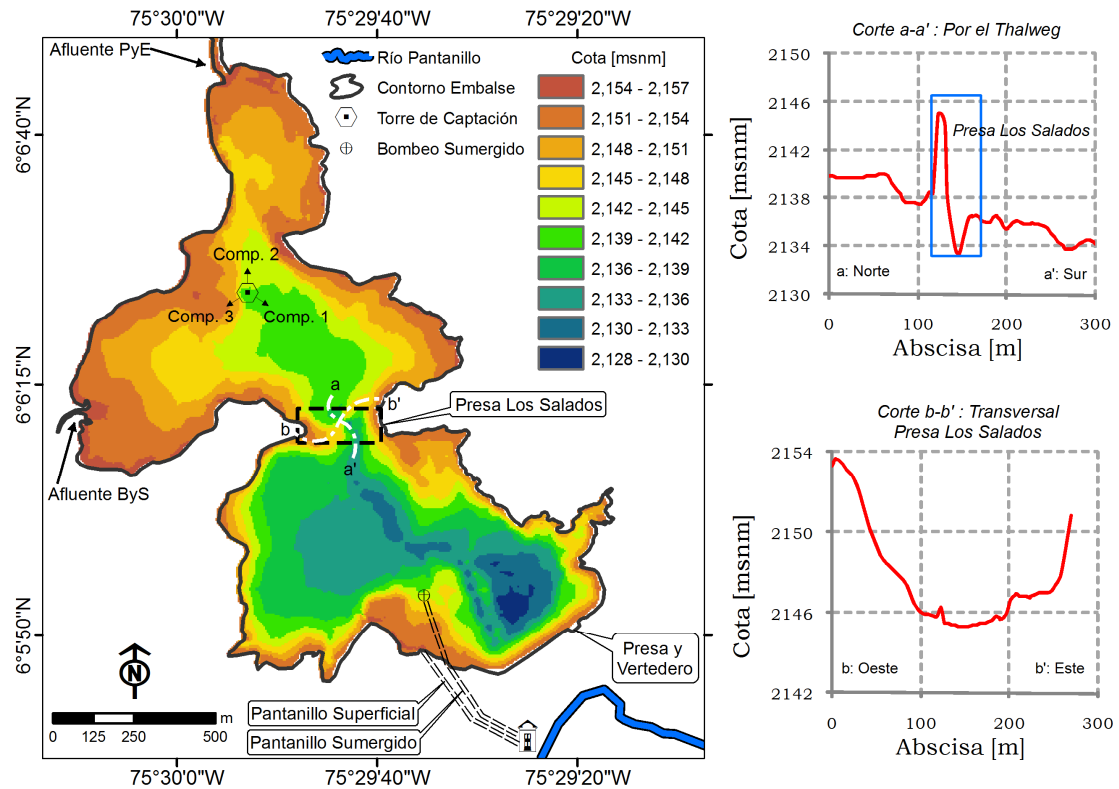
Al embalse lo abastecen afluentes que llegan naturalmente por gravedad y aguas importadas de otras cuencas mediante un sistema de bombeo. Los principales afluentes naturales son las quebradas Las Palmas, Espíritu Santo, Boquerón, San Luis y Potreritos (este último desemboca en la quebrada San Luis). Las dos primeras confluyen al norte, un kilómetro aguas arriba de la entrada al embalse, en un solo afluente denominado en adelante *Afluente PyE*. Al Oeste del embalse confluyen las quebradas Boquerón y San Luis, 0.3 km aguas arriba del embalse, afluente que será designado *Afluente ByS*. Finalmente, las aguas importadas de los ríos Buey, Piedras y Pantanillo, bombeadas desde el río Pantanillo, alimentan el embalse en períodos de estiaje (Figura 2-2 y Figura 2-3). Existen otras afluencias de menor importancia que no contribuyen significativamente al caudal total que ingresa al embalse, debido a que sus áreas de drenaje son insignificantes comparadas con las áreas de los afluentes principales.

Figura 2-1: Zona de estudio y localización de las estaciones de medición de EPM.



El embalse La Fe está localizado en una zona de alta montaña, de topografía circundante poco encañonada y es el resultado de dos fases de construcción; la primera fase fue finalizada en 1967 y la segunda fase, motivada por una ampliación, en 1974. En la primera fase el proyecto fue denominado embalse Los Salados, formado por una pequeña presa de gravedad y posteriormente inundado en la segunda fase, dando lugar al actual embalse La Fe (EPM, 2009). La antigua presa Los Salados está localizada 0.8 km aguas arriba de la actual presa La Fe, representa una división batimétrica que divide el sistema en dos cuencos, ya que genera un estrechamiento del cuerpo en su forma horizontal y modifica el perfil altimétrico a través del thalweg del antiguo cauce. El cuenco norte, donde tributan los principales afluentes naturales y se encuentra la torre de captación, tiene un área de 0.68 km², es el cuenco menos profundo con una profundidad promedio de 7.0 m y una profundidad máxima de 18.2 m. En el cuenco sur, sector de la presa y caracterizado por recibir las aguas del bombeo del río Pantanillo, el embalse tiene un área 0.65 km², profundidad promedio de 14.7 m y máxima de 27.0 m. El cuenco norte se caracteriza por ser una zona panda de alta depositación de sedimentos, debido a la entrada de los afluentes, la barrera que genera la presa Los Salados y la aducción de la captación que reduce el transporte de sedimentos de los afluentes hacia la presa (EPM, 2009)

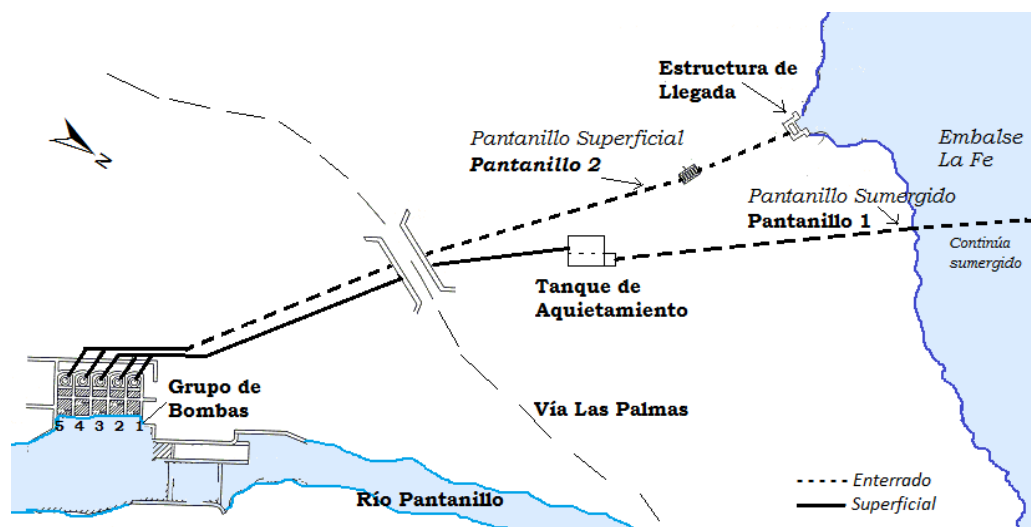
Figura 2-2: Batimetría del año 2008 del embalse La Fe (EPM, 2009) Ubicación de los principales afluentes, estructuras de entrada y salida de agua. Secciones transversales en la antigua presa Los Salados.



El sistema de bombeo que abastece al embalse consta de aguas importadas desde los ríos Buey, Piedras y Pantanillo. Este último recibe las aguas de los dos primeros y es finalmente quien abastece al embalse mediante dos tuberías de impulsión. El sistema que importa las aguas del río Pantanillo consta de 5 bombas, denominadas individualmente grupos, de las cuales las tres primeras alimentan la tubería de impulsión Pantanillo 1 y las dos restantes la tubería de impulsión Pantanillo 2 (Integral, 1972). La tubería de Impulsión Pantanillo 1, de diámetro 1.5 m y 411 m de longitud, descarga inicialmente el agua conducida en un tanque de carga (o aquietamiento) con el objetivo de evitar las fluctuaciones de presión sobre las bombas, debido a las variaciones del nivel en el embalse. De este tanque se deriva finalmente una conducción de 1.20 m de diámetro y 285 m de longitud, que entrega sumergida las aguas del bombeo al interior del embalse. La tubería de impulsión Pantanillo 2, enterrada en la mayoría de su trayecto, con un diámetro interior de 1.35 m y una longitud de 480 m, llega a una estructura superficial de aquietamiento, a partir de la cual se entrega al embalse mediante un canal superficial.

La Figura 2-2 y la Figura 2-3 muestran esquemas de la localización de cada tubería de impulsión y la forma como entregan al embalse. Para efecto de referencia a través de este documento, el sistema que entrega el agua de forma sumergida al embalse se denominará *Pantanillo Sumergido* y el lugar específico dentro del embalse donde se produce la descarga³ se denominará *Bombeo Sumergido*. De igual forma, el sistema que entrega superficial se designará *Pantanillo Superficial*.

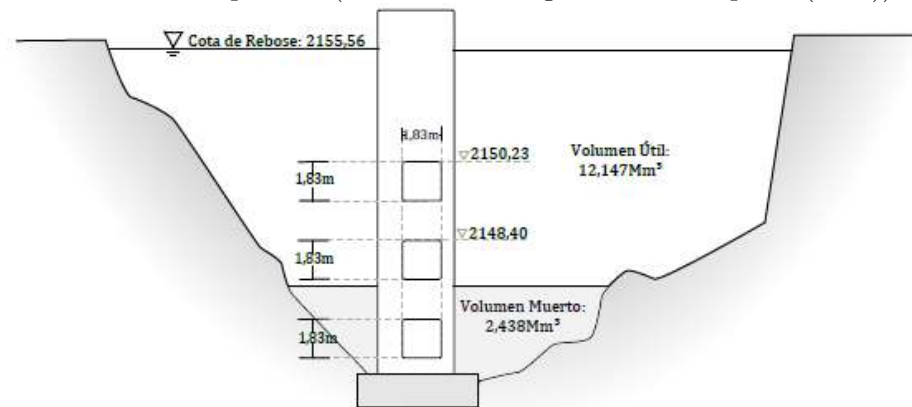
Figura 2-3: Esquema de localización y distribución de las tuberías Pantanillo 1 (Pantanillo Sumergido) y Pantanillo 2 (Pantanillo Superficial) (Modificado de EPM (2010)).



La torre de captación, de tipo superficial, se ubica en el cuenco Norte a unos 750 m aguas abajo de la desembocadura del Afluente PyE. Posee tres compuertas deslizantes de sección rectangular de 0.91 x 1.83 m y cuyos centros están a 6.2 m (compuerta 3), 10.7 m (compuerta 2) y 15.2 m de profundidad (compuerta 1) respecto a la cota de rebose del vertedero (2155.5 msnm) (Figura 2-4). La compuerta 3 está orientada en dirección WSW, la compuerta 2 en dirección N y finalmente la compuerta 1, actualmente inhabilitada por acumulación de sedimentos (Escuba, 1997; López A., 2004; EPM, 2009) en dirección ESE (Figura 2-2). El agua captada entra a la torre captación de sección circular de 2.8 m de diámetro interior, para ser transportada inmediatamente por el túnel de conducción, de 8.6 km de longitud y sección en forma de herradura de 3 m², hasta la planta La Ayurá.

³El lugar aproximado de la descarga se conoció con base a las campañas de campo. No se pudo establecer el lugar específico donde descarga la tubería, ni la forma de la estructura de llegada dentro del embalse.

Figura 2-4: Torre de captación (tomada de Ortega A. & Restrepo S. (2010)).



2.2 Variabilidad climática en la región

Empresas Públicas de Medellín (EPM) tiene instrumentada la región con estaciones de medición de precipitación en algunas de las cuencas que drenan de manera natural al embalse y estaciones de medición de caudal en una de ellas. Además, cuenta con información del caudal bombeado, caudal captado y los niveles del embalse. La Tabla 2-1 resume los principales aspectos de las estaciones y de la información suministrada de operación; la Figura 2-1 muestra la localización de las estaciones.

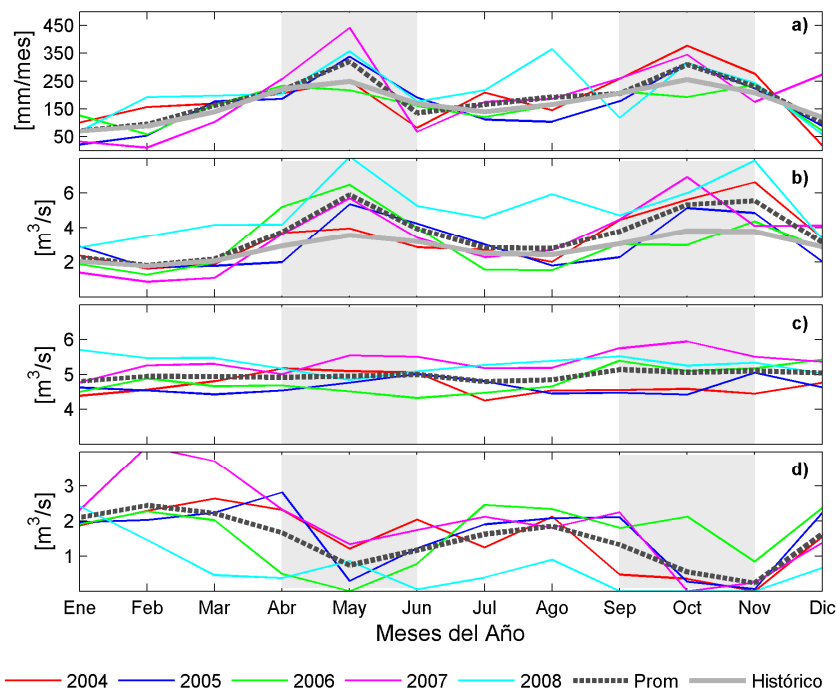
Tabla 2-1: Estaciones y otros registros suministrados por EPM.

Nombre Asociado	Nombre	Código	Tipo de Variable		Resolución
PG-Vasconia	Vasconia	2308024	PG	Caudal	15 minutos
PG-La Fe	La Fe	2308021	PG	Caudal	15 minutos
PG-Palmas	Las Palmas	2308023	PG	Caudal a	15 minutos
LG-Palmas	RN-36 Las Palmas	2308938	LG	Precipitación	15 minutos
LG-Santo	RN-37 Espíritu Santo	2308939	LG	Precipitación	15 minutos
Captación	Ayurá 24"	No aplica	--	Caudal	15 minutos
	Ayurá 36"	No aplica	--	Caudal	15 minutos
Bombeo	Pantanillo 1	No aplica	--	Caudal	15 minutos
	Pantanillo 2	No aplica	--	Caudal	15 minutos
Vertimiento	Vertimiento	No aplica	--	Volumen	día
Nivel	Nivel	No aplica	--	Cota	15 minutos

De las estaciones de medición se contó con información del año 2010 y desde el año 2004 hasta el año 2008. Además, del informe final del último sondeo batimétrico realizado en el embalse (EPM, 2009), se conoció el ciclo mensual multianual (*M.M*) histórico en la climatología y en la operación del sistema. En la Figura 2-5 se presenta el ciclo *M.M* a través del año de las diferentes variables.

El ciclo M.M de la precipitación, los caudales afluentes y efluentes, desde los años 2004 a 2008 y el promedio, fue estimado en el presente estudio. La precipitación M.M se estimó con la información de la estación La Fe, ubicada sobre la presa, y el caudal en la cola del embalse se calculó siguiendo la metodología de rendimiento hidrológico, con base en las estaciones de caudal y las áreas de drenaje de los afluentes principales. El ciclo M.M histórico de precipitación (basado en polígonos de Thiessen) y del caudal histórico en la cola del embalse fue obtenido de EPM (2009). No se contó con información M.M histórica de los caudales captados y caudales bombeados.

Figura 2-5: Ciclo M.M de (a) precipitación de la estación La Fe, (b) caudal natural estimado en la cola del embalse, (c) caudal captado y (d) caudal bombeado.



El comportamiento M.M a través del año de la precipitación y del caudal es bimodal, con dos períodos de máximas lluvias y caudales entre los meses de abril a mayo y septiembre a noviembre (sombreados en gris) y períodos de menor intensidad entre diciembre y marzo y entre julio y agosto, siguiendo el paso de la zona de convergencia intertropical a través del país. El comportamiento M.M entre los años 2004 y 2008 de las estaciones restantes de precipitación y de caudal (no mostrado) siguen el mismo patrón, lo que implica que en la región de estudio la variabilidad mensual es igual. Se destaca además que el caudal bombeado es mayor en los períodos de menor precipitación, cuando hay déficit en los aportes naturales al embalse, y que el caudal captado en general casi no cambia manteniendo un valor promedio de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Metodología

La metodología en que se desarrolló la presente investigación tuvo dos componentes principales: 1) recopilación de información secundaria y realización de campañas de campo que permitieron, mediante la descripción conjunta, entender las características principales de los diferentes procesos de transporte y, 2) mediante la simulación numérica, con un modelo tridimensional calibrado, se investigaron las escalas espacio-temporales no caracterizadas en las mediciones y se validaron algunas hipótesis causa-efecto, obtenidas de las observaciones de campo.

3.1 Campañas de campo

Se realizaron tres campañas de campo en el año 2010, cada una de cinco días continuos, durante los meses de marzo, mayo y agosto, con el objetivo de capturar la variabilidad estacional y conocer el comportamiento espacio-temporal en los diferentes períodos climatológicos. Para caracterizar los procesos de transporte dentro del embalse se midieron temperatura, turbidez y conductividad, y se midieron las variables que permiten calcular los agentes forzantes que aportan la energía térmica y mecánica al sistema, las cuales serán descritas a continuación.

3.1.1 Variables climatológicas

Para estimar los flujos de calor atmosféricos se realizaron mediciones de magnitud y dirección del viento, humedad relativa, temperatura del aire y presión atmosférica en intervalos de 10 minutos en la primera y segunda campaña, y de 15 minutos en la tercera, registradas con una estación climatológica portátil instalada en la torre de captación, 12 m de altura respecto a la superficie del agua⁴.

⁴La altura efectiva de la estación dependerá del nivel actual del embalse. Sin embargo, éste varió sólo 1.5 m, entre las tres campañas de campo

3.1.2 Variabilidad espacio-temporal del viento

Con el propósito de estudiar el efecto de la orografía en los vientos locales, y así la influencia espacio-temporal del viento en la estructura térmica y en el campo de velocidades del sistema, se ubicó una estación portátil adicional en las dos primeras campañas. En la primera campaña se dispuso cerca de la presa y en la segunda campaña en una península ubicada en la parte sur del embalse. Las mediciones de la magnitud y dirección del viento fueron reforzadas con mediciones puntuales dentro del cuerpo de agua con un anemómetro portátil en las tres campañas. La estación instalada en torre de captación se denominó estación fija, y la adicional estación dinámica.

3.1.3 Afluentes

Dada la importancia de la densidad y el caudal del afluente en la estructura térmica y en el desarrollo de las plumas a través del embalse, se midieron temperatura, conductividad y turbidez en todos los afluentes. En Pantanillo Sumergido, donde no se pudo medir directamente, se supuso la temperatura y concentración de sustancias igual a lo reportado en Pantanillo Superficial. En las dos primeras campañas las mediciones se realizaron de manera eventual, entre las ocho de la mañana y las seis de la tarde, a través de los cinco días de la campaña de campo, dado que no se tenía la instrumentación necesaria para registrar continuamente. En la tercera campaña se instalaron sensores de temperatura de registro continuo, en una resolución de 15 minutos. Sin embargo, en esta campaña no se midieron turbidez y conductividad.

EPM realiza la medición del caudal en sólo una de las cuencas que drenan naturalmente al embalse y lo hace varios kilómetros aguas arriba de la entrada al embalse, por lo que el caudal de entrada al sistema debió ser estimado mediante modelos de rendimiento hidrológico. El caudal de entrada de Pantanillo Sumergido y Pantanillo Superficial es medido y suministrado por EPM.

3.1.4 Efluentes

La información recolectada se concentró en el caudal de salida del sistema, tanto de la torre de captación, como de los vertimientos. El caudal de salida reportado por EPM es el total acumulado, y, en torre de captación, el caudal de salida depende del control que EPM hace de las válvulas de las tuberías que entregan a la planta de tratamiento La Ayurá.

3.1.5 Variables Físicas en el interior del cuerpo de agua

La metodología de muestreo al interior del sistema se basó en la caracterización espacial y temporal de las variables que afectan la densidad del agua, como la temperatura, la turbidez y la conductividad, mediante perfiles verticales en todo el dominio espacial, siguiendo un patrón específico de acuerdo al proceso de transporte que se deseaba identificar. Las mediciones fueron hechas con un perfilador CTD (*Conductivity, Temperature and Depth*) con una resolución de 8 Hz, permitiendo realizar un perfil en un tiempo muy corto, del orden de dos minutos, y logrando por lo tanto medir un grupo de varios perfiles, en diferentes lugares del embalse, en cortas duraciones de tiempo. Con el CTD también se pudo capturar la variabilidad temporal en un punto específico del embalse, realizando la medición del perfil en diferentes tiempos.

Con el fin de describir las plumas de los afluentes naturales, se realizaron transectos longitudinales a lo largo del thalweg y transectos transversales. En la captación se realizaron transectos circulares y transectos longitudinales, desde los afluentes hacia ella. De manera similar se procedió para observar la dinámica del bombeo sumergido mediante transectos en sus cercanías. Se realizaron además mediciones distribuidas espacialmente para describir el comportamiento general en todo el sistema. Transectos longitudinales a través de todo el embalse, desde las colas hasta la presa, permitieron caracterizar zonalmente el sistema.

Para estudiar la variabilidad estacional de las variables físicas a través de los diferentes períodos climáticos, se establecieron 7 puntos de muestreos fijos o estáticos, los cuales se ubicaron en lugares de interés, respecto a los diferentes procesos que se deseaban identificar. Además, se realizó un muestreo nictemeral por cada campaña, con el objetivo de describir el comportamiento de la temperatura en el ciclo diurno.

Como se mencionó con anterioridad, en la tercera campaña se utilizaron sensores adicionales de medición continua de temperatura, que fueron ubicados en los afluentes y en el cuerpo principal del embalse. Se instaló uno por cada afluente al embalse; en PyE, ByS y Pantanillo Superficial y se diseñaron dos cadenas de termistores que fueron localizadas en la zona más profunda y en la torre de captación. La cadena de termistores en la zona profunda tuvo 13 sensores, a 0.75, 1.55, 2.25, 3.00, 3.75, 4.50, 5.25, 6.00, 7.25, 9.00, 11.00 y 13.00 m de profundidad. En la torre de captación la cadena de termistores tuvo 5 sensores a 1.55, 2.25, 3.00, 4.50 y 5.25 m de profundidad.

En la Figura 3-1 se muestra la ubicación de los lugares de muestreo, de las tres campañas, donde se midieron los perfiles de temperatura, conductividad y turbidez. En la Figura 3-2 se muestra la localización de medición al interior del cuerpo de agua en los puntos estáticos, en los afluentes y la ubicación donde se instalaron los diferentes instrumentos de