

Aplicación del análisis de sensibilidad de un modelo hidrodinámico en la determinación de la relevancia de procesos físicos y forzamientos externos en las corrientes del embalse Punchiná (Antioquia)*



Carlos Alejandro Escobar Sierra, PhD.

Magíster en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos
Universidad Nacional (Medellín) y Doctor en Costas, Alemania
Docente Departamento de Ingeniería Civil
Universidad EAFIT
carloses@eafit.edu.co

Jesús Alberto Pérez Mesa, Esp.

Ingeniero Mecánico, Universidad EAFIT.
Especialista en Economía, Universidad de Los Andes
Docente Departamento de Ingeniería Civil
Universidad EAFIT
jperez@eafit.edu.co

Recepción: 22 de enero de 2009 | Aceptación: 02 de agosto de 2009

* Esta investigación fue desarrollada dentro del marco del proyecto Punchiná, "Sedimentación en embalses, Evaluación de alternativas aplicadas al manejo de sedimentos, Caso Punchiná, Fase I". Los autores quieren agradecer a la Universidad EAFIT por financiar el proyecto. De igual manera, al departamento de Instrumentación de la Central San Carlos por facilitar la información de niveles, caudales de afluentes y efluentes en el embalse. Así mismo, a la estudiante de Ingeniería Liliana Velásquez por su participación en la edición de las figuras.

Resumen

En el artículo se presenta un análisis de sensibilidad a un modelo hidrodinámico frente a un grupo de procesos físicos y forzamientos externos, de los cuales se asume inicialmente que afectan el comportamiento del flujo en el embalse Punchiná. La base del análisis es una metodología para determinar la variación espacial de la sensibilidad a los procesos considerados, que posibilita evaluar el efecto en la hidrodinámica debido a los afluentes, efluentes, viento y corrientes de densidad, precisando las áreas donde son dominantes y su grado de influencia. Se consideraron dos escenarios, el embalse en su nivel máximo y en su nivel medio, donde se evidenció el efecto que tiene la operación del embalse en su estratificación térmica. Se hizo clara la relevancia de los tributarios principales en el comportamiento hidrodinámico del embalse, en particular en zonas menos profundas, y cómo se debilita esta influencia en las zonas más profundas.

Sensitivity analysis of a hydrodynamic model to determine the relevance of physical processes and external forcings on the currents of the Punchiná reservoir (Antioquia)

Abstract

This paper presents a sensitivity analysis on a hydrodynamic model in relation to a number of physical processes and external forcings which were initially assumed to have some influence on the characteristics of the flows in the Punchiná Reservoir. This analysis was based on a methodology that defines the spatial variation of the sensitivity for the involved processes, quantitatively indicating where and to what degree they are relevant inside the interest area.

The effect on the hydrodynamics of the reservoir due to the tributaries, outlets, wind, and density currents was determined, indicating the areas where they are predominant and the degree of impact on each. This analysis was taken into consideration under two scenarios: the reservoir at its maximum and at its mean water level, where the effect on temperature stratification can be seen due to the operation of the reservoir. Additionally, the impact that the main tributaries have on the behavior of the hydrodynamics in the reservoir was made clear, particularly in shallow areas as well as the weakening of the impact in deep areas.

Palabras clave

Modelación hidrodinámica
Embalse Punchiná
Análisis de sensibilidad
Sensibilidad espacial
Procesos físicos

Key words

Hydrodynamic modeling
Punchiná reservoir
Sensitivity analysis
Spatial sensitivity
Physical processes

Introducción



El embalse Punchiná sirve a la central hidroeléctrica de San Carlos, una de las principales proveedoras de energía del sistema interconectado eléctrico colombiano. Tiene una capacidad instalada de 1.240 MW, lo cual denota la importancia del embalse en el país y la necesidad de contribuir a su sostenibilidad. Un aspecto de relevancia en la sostenibilidad de un embalse es el manejo de sus sedimentos, a través del cual se busca establecer un equilibrio en el sistema que evite o postergue su colmatación.

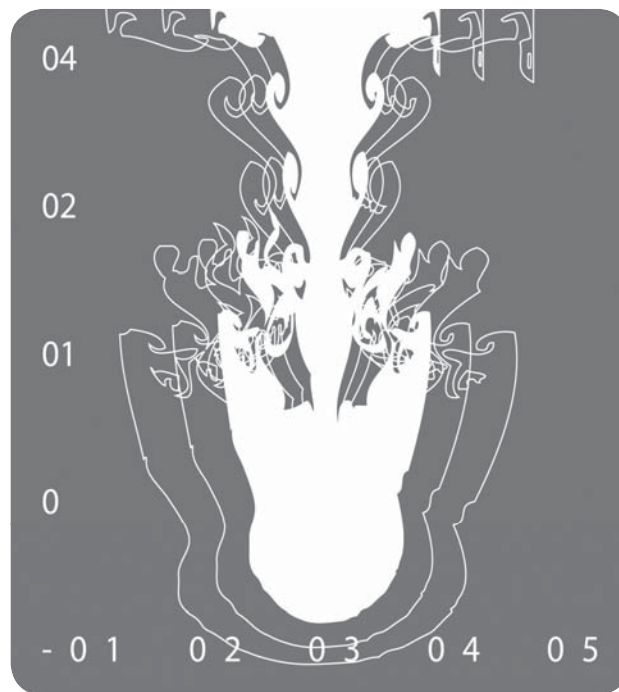
La eficacia de una metodología para el manejo de los sedimentos en un embalse (*“flushing”*, *“sluicing”*, dragado, etc.) depende de las características propias de este (morfología, hidrología, sedimentos, clima, hidrodinámica, la presa, obras de descarga, operación, etc.). Por consiguiente, implementar a la ligera alguna de estas metodologías no garantiza necesariamente un resultado óptimo y eventualmente puede conllevar a situaciones indeseadas (colapso de taludes, pérdida infructuosa de agua, daño de estructuras o alteración de su funcionamiento, por ejemplo) que generan temor y reserva al momento de tomar decisiones.

En tal sentido, sería clave poder anticipar a través de un modelo matemático la respuesta que tendría un embalse a alguna de las medidas para restablecer el equilibrio dinámico de sus sedimentos; no solo en la predicción de su eficiencia sino también en la anticipación de consecuencias que este procedimiento puede

desencadenar. Un modelo matemático basado en procesos que acople simultáneamente los módulos de hidrodinámica, transporte de sedimentos y evolución morfológica permitiría lograr este objetivo, tal como lo plantea Ghoreishi (2007). En el trabajo que refleja este artículo se da un primer paso en la construcción de ese complejo sistema de modelación, el cual se limita a la modelación hidrodinámica del embalse. Esta modelación hace parte de la fase inicial del proyecto “Sedimentación en embalses. Evaluación de alternativas aplicadas al manejo de sedimentos. Caso Punchiná, Fase I”, financiado por la Universidad EAFIT.

En este estudio se enfatiza en una de las fases que comprende la construcción de un modelo hidrodinámico: análisis de sensibilidad a procesos físicos y forzamientos externos. Para este fin, se hizo uso de la plataforma de modelación numérica de flujos y fenómenos de transporte existente, denominada Delft3D y desarrollada por WL | Delft Hydraulics. En consecuencia, se propone una metodología que permite identificar dónde y en qué grado son relevantes los distintos procesos que intervienen en el área de interés. De esta manera, los recursos disponibles para mejorar la predicción del comportamiento hidrodinámico del embalse se podrán dirigir en primera instancia a obtener mayor información de los factores realmente significativos.

En la literatura existente se encuentran diversos análisis de sensibilidad a modelos hidrodinámicos en cuerpos de agua estratificados (Villegas, Toro & Velez, 2005; Díaz, 2005; Montoya y Toro, 2006). Tales estudios tienen como objetivo general conocer el comportamiento global



del modelo numérico y su respuesta a cambios inducidos en algunos parámetros físicos y numéricos (Toro, 2004). Adicionalmente, se puede inferir la incertidumbre en los resultados del modelo si se conoce el rango de variación del parámetro más sensible. En esencia, el análisis de sensibilidad debe proveer criterios de juicio objetivos para el desarrollo de las fases subsecuentes de calibración y validación requeridas en la construcción del modelo (Saltelli, Tarantola & Campolongo, 2000).

El análisis de sensibilidad propuesto en este artículo se caracteriza por su componente espacial, donde se hace énfasis en determinar la variación de la sensibilidad en la totalidad del área de estudio, sin limitarse a un número de puntos de control o representativos. Adicionalmente, la metodología sugerida permite determinar cuantitativamente la relevancia en la hidrodinámica de un determinado proceso y su peso relativo respecto a los demás. Por consiguiente, a través de este procedimiento es posible alertar con anticipación al desarrollo de las fases de calibración y validación del modelo sobre la necesidad de obtener información más detallada (mejor resolución espacio-temporal) de algunos procesos o parámetros respecto a otros.

1. Área de estudio

El embalse Punchiná está localizado en el noroeste de Colombia, sobre el ramal central de la cordillera de los Andes, en la cuenca del río Guatapé, a unos 80 km al oriente de la ciudad de Medellín (figura 1). El embalse se sitúa en la cota 750 msnm, latitud 6° 14' Norte y longitud 74° 52' Oeste. El proyecto hidroeléctrico tiene una caída media neta de 554 m (<http://www.isagen.com.co>) y un caudal promedio de 143 m³/s (Gómez y Mejía, 1984). La capacidad del embalse es 58 Mm³ aproximadamente y aporta al sistema interconectado eléctrico nacional un promedio de 1.240 MW.

En general, la dinámica de las corrientes en el embalse se debe a varios procesos, tales como el aporte de sus tributarios principales y secundarios, las corrientes de densidad, el viento y los efluentes.

Los efluentes son afectados en gran medida por las reglas de operación del embalse, demandas energéticas y disponibilidad del líquido. La tasa anual de acumulación de sólidos es de 0,94 Mm³, según el informe de sedimentación del embalse (Interconexión Eléctrica S. A. (ISA), 1989). El clima de la cuenca del río Guatapé se clasifica como subtropical con precipitación promedio anual de 3.000 mm y temperatura media de 25 °C; se caracteriza por una estación seca de 3 a 4 meses al inicio del año y una lluviosa los meses restantes (Gómez y Mejía, 1984).

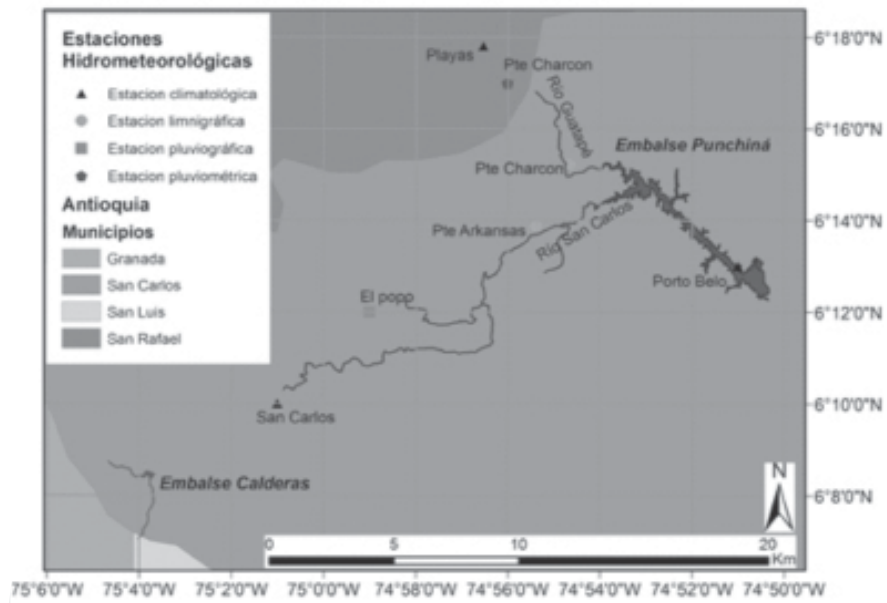
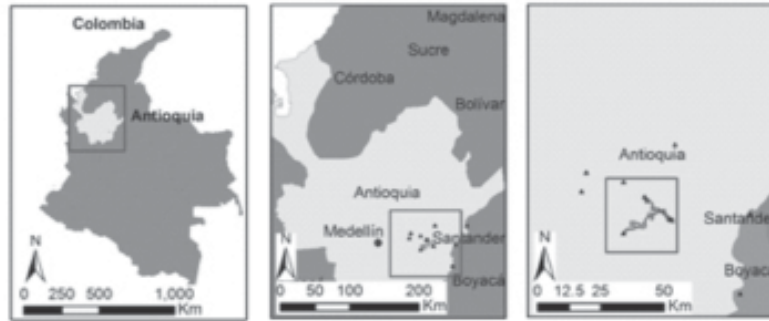
2. Forzamientos hidrometeorológicos

2.1 Afluentes

Los ríos Guatapé y San Carlos son los dos afluentes principales del embalse Punchiná. Las estaciones limnigráficas Puente Charcón y Puente Arkansas, ubicadas respectivamente a 2 y 2,5 km aguas arriba del embalse, registran los caudales de estas corrientes (figura 1). La figura 2 presenta los aportes de ambos ríos y su relación con el nivel del embalse en el año 2006. En este periodo se registró un caudal mínimo, medio y máximo en el río Guatapé de 5,6 m³/s, 120,8 m³/s y 230,3 m³/s, respectivamente (el río Guatapé es regulado en el embalse Playas, localizado en los municipios de San Rafael y San Carlos). Análogamente, se observaron en el río San Carlos las siguientes descargas: 5,2 m³/s, 16,7 m³/s y 117,3 m³/s. Las simulaciones hidrodinámicas se realizaron con los caudales medios observados en 2006. Estos son muy cercanos a los caudales medios multianuales reportados por Gómez y Mejía (1984).

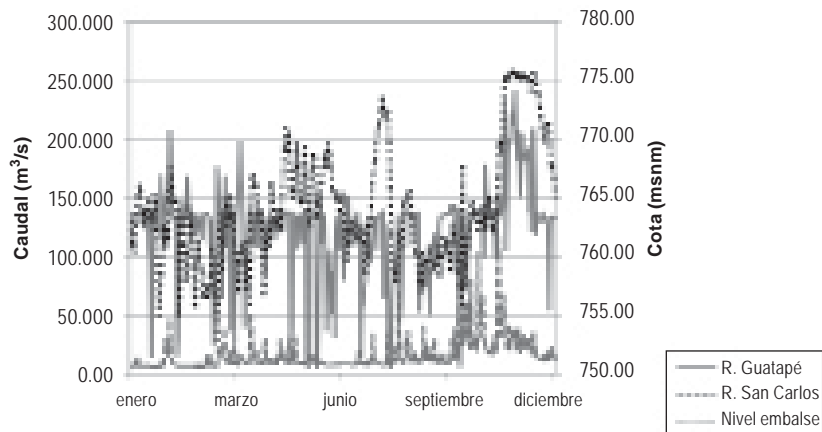
El aporte total de otros tributarios de menor orden, Q_{trib} , tales como el de las quebradas La Llore, Santa Elena, La Negra y La Villa, se definió indirectamente a través de un balance de masas (ecuación 1). Luego, el aporte total resultante se distribuyó en estos tributarios de acuerdo con el área de sus cuencas (tabla 1), en las cuales se asumió el mismo rendimiento.

Figura 1. Área de estudio



Fuente: elaboración propia

Figura 2. Nivel del embalse Punchiná y descarga de tributarios principales- Año 2006

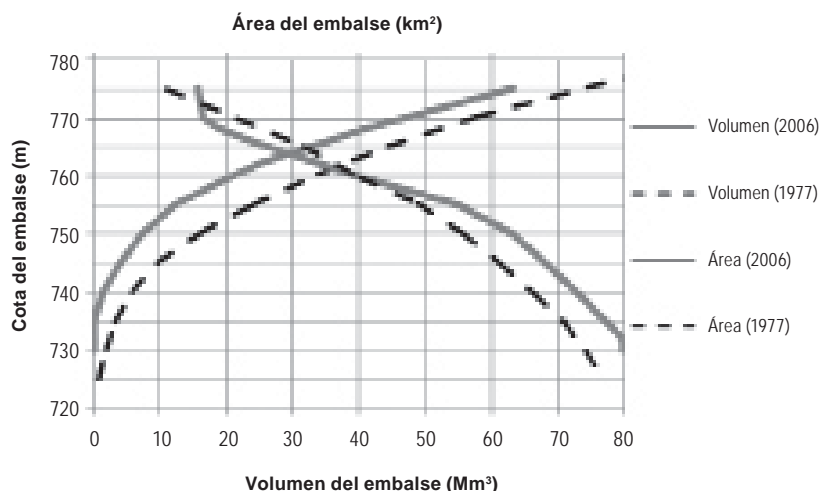


Fuente: elaboración propia.

$$Q_{Trib} = \left(\frac{V_{final} - V_{inicial}}{\Delta t} \right) - Q_{San\ Carlos} - Q_{Guatape} + Q_{Vertedero} + Q_{Turbinado} \quad (1)$$

Los volúmenes inicial ($V_{inicial}$) y final (V_{final}) se definen de acuerdo con los niveles registrados en el embalse y la curva característica elevación-volumen actualizada al año 2006 (figura 3). El caudal del vertedero ($Q_{Vertedero}$) y el caudal turbinado ($Q_{Turbinado}$) se definen a partir de la curva de descarga del vertedero y de los volúmenes turbinados para el año 2006 (véase la sección 2.2 efluentes).

Figura 3. Volumen y área del embalse



Fuente: elaboración propia

El aporte neto de agua al embalse debido a otros factores como precipitación, evaporación, acuíferos, escorrentía, etc. quedan incluidos en el modelo hidrodinámico propuesto a través de los aportes de los tributarios menores (Q_{trib}). En consecuencia, es posible que el aporte de estos tenga diferencias considerables con respecto al real.

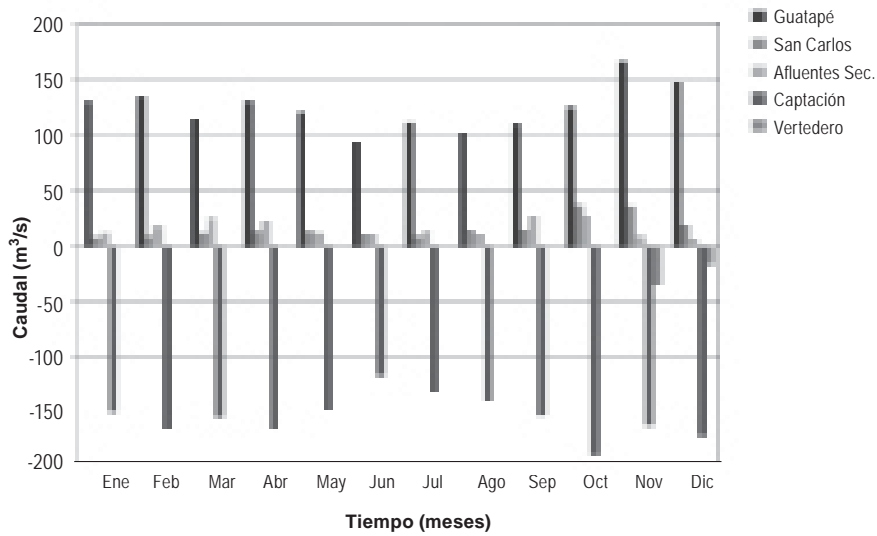
Tabla 1. Aportes tributarios menores del embalse Punchiná (2006)

Tributario	Área [km²]	Q_{medio} (m³/s)
Quebrada La Llore	10,2	4,1
Quebrada Santa Elena	5,9	2,3
Quebrada La Negra	13,3	5,2
Quebrada La Villa	3,3	1,3

Fuente: elaboración propia.

La figura 4 presenta el resultado del balance de masas para el año 2006 con una resolución temporal mensual.

Figura 4. Afluentes y efluentes medios mensuales en Punchiná- Año 2006



Fuente: elaboración propia

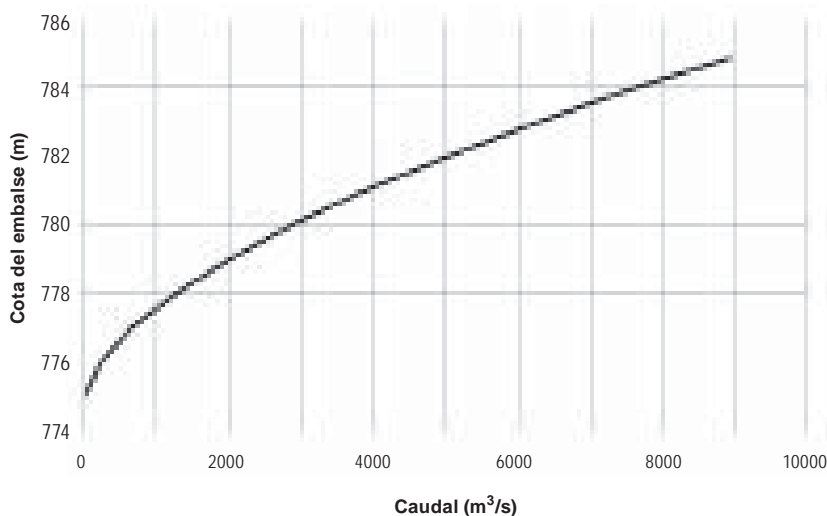
2.2 Efluentes

El valor medio del caudal diario turbinado para el periodo 2006 es de 151 m³/s. En esta fase del estudio se desprecia la variabilidad temporal de este efluente y se considera en las simulaciones su valor medio. El caudal turbinado se modela como un sumidero en el interior del dominio de cálculo; este evacúa el agua a través de las tomas ubicadas

entre las cotas 742 y 746,4 msnm (simulaciones 3D) o asumiendo una evacuación uniforme en la vertical (simulaciones 2Dh).

La descarga a través del vertedero constituye otro de los efluentes principales del embalse. La cresta del vertedero se encuentra en la cota 775 msnm y su funcionamiento se modela por medio de la relación Q vs h que lo caracteriza (figura 5).

Figura 5. Curva de descarga del vertedero



Fuente: (Integral S. A., 1977)

2.3 Viento

El esfuerzo de dragado ejercido por el viento podría afectar el flujo y la estratificación térmica en el embalse. Este esfuerzo se define por la siguiente expresión cuadrática comúnmente usada:

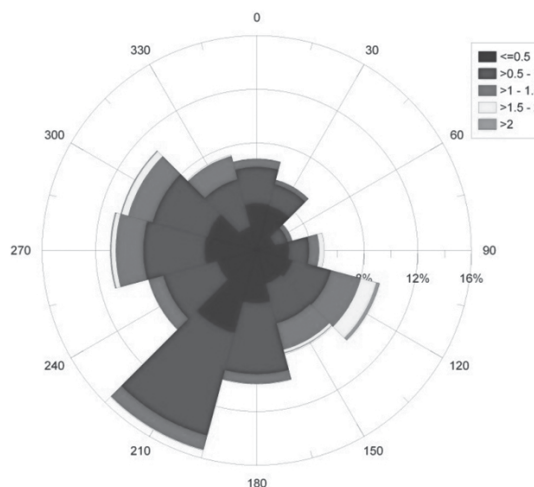
$$|\bar{\tau}_s| = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (2)$$

Donde, ρ_a es la densidad del aire, C_d es el coeficiente de dragado del viento y U_{10} es la velocidad del viento a 10 m sobre la superficie libre. El coeficiente de dragado del viento se especifica de acuerdo con el planteamiento de Smith y Banke (1975), de tal forma que se refleje un incremento de la rugosidad en la superficie libre del agua al incrementarse la velocidad del viento.

A través del proyecto Reanalysis (Kalnay, Kanamitsu *et al.*, 1996) se obtienen los registros de velocidad del viento en la zona del embalse, los cuales se presentan en la figura 6. En esta rosa de vientos se observa que las velocidades raramente exceden los 2,5 m/s y su mayor probabilidad se asocia con vientos provenientes del suroeste (16% aproximadamente). Vientos en las direcciones restantes presentan probabilidades de ocurrencia similares (8-10%) con excepción de la dirección este y noreste que muestran las mínimas ocurrencias.

La magnitud de la velocidad del viento en el periodo 2006-2007 tuvo un valor máximo, medio y mínimo de 2,8 m/s, 0,7 m/s y 0,0 m/s, respectivamente. El modelo hidrodinámico considera el efecto del viento a través de su magnitud media de 0,7 m/s en dirección suroeste. Se anota que la información proveniente del proyecto Reanalysis presenta una pobre resolución espacial en el área de estudio, lo cual puede conllevar a discrepancias con respecto a los datos reales. Lo anterior se asume aceptable en esta fase de desarrollo del modelo hidrodinámico, donde se pretende identificar los procesos que son relevantes y que deben monitorearse con precisión para el desarrollo de las fases subsecuentes.

Figura 6. Rosa de vientos para el área de estudio (2006-2007)



Fuente: elaboración propia

2.4 Corrientes de densidad

La estratificación térmica da origen a corrientes de densidad que afectan el patrón de circulación y su variabilidad espacio-temporal. Este fenómeno resulta por la influencia de la temperatura en la densidad del agua, la cual se calcula a través de la ecuación de estado propuesta por Eckart (1958) o la UNESCO (1981). El modelo resuelve la ecuación de advección-difusión en 3D para describir el transporte de calor.

El flujo total de calor en la interfase aire-agua se define a partir de la relación:

$$Q_{tot} = Q_{sn} + Q_{an} - Q_{br} - Q_{ev} - Q_{co} \quad (3)$$

Donde, Q_{sn} es la radiación solar neta incidente (onda corta), Q_{an} es la radiación atmosférica neta incidente (onda larga); Q_{br} es la radiación del cuerpo de agua (onda larga), Q_{ev} es flujo de calor debido a la evaporación y Q_{co} es el flujo turbulento de calor.

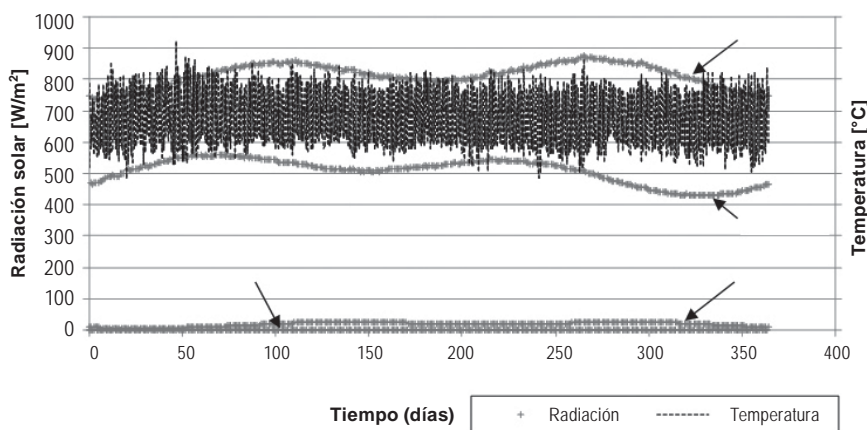
Los términos en la ecuación 3 se definen a través de la metodología propuesta por Octavia, Jirka y Harleman (1977). Para ello se requiere el conocimiento de la humedad relativa, la temperatura del aire, la velocidad del viento, la cobertura de

nubes y la radiación solar (onda corta) con cielo despejado en el área objeto de discusión. Estas variables se describen para la zona del embalse en las figuras 7 y 8, según el proyecto Reanalysis (Kalnay, Kanamitsu *et al.*, 1996).

La variación temporal de la temperatura, humedad relativa y radiación de onda corta se define a

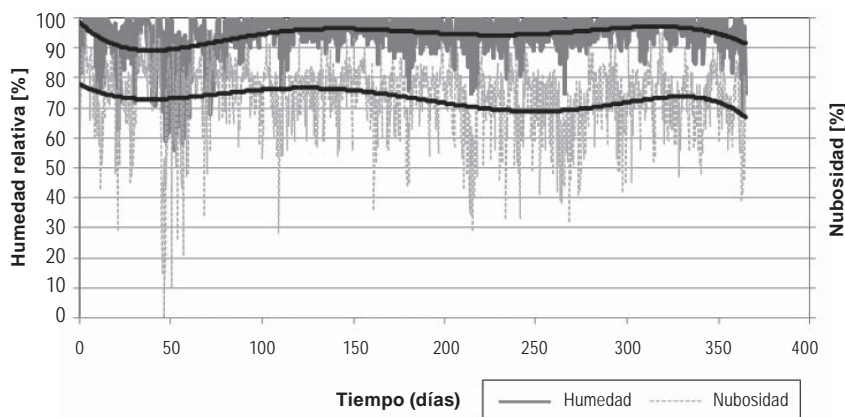
través de su variación “típica” en un periodo de 24 horas. Esta variación se determinó con los valores promedios de dichas variables durante 2006, para los datos existentes a las 0, 6, 12 y 18 horas (tabla 2). Valores intermedios en los intervalos de seis horas se determinan por interpolación lineal. La cobertura de nubes se definió en un 73%, lo cual corresponde a su valor medio durante el año 2006.

Figura 7. Radiación solar y temperatura en el área de estudio (2006)



Fuente: elaboración propia

Figura 8. Humedad relativa y nubosidad en el área de estudio (2006)



Fuente: elaboración propia

Tabla 2. Ciclo diario típico de variables climáticas (2006)

Hora	0:00	06:00	12:00	18:00
Temperatura (°C)*	21,2	20,4	26,8	23,9
Humedad relativa (%)	93,0	97,7	96,7	91,0
Radiación solar (W/m ²)	0,0	17,2	815,3	507,7

* Datos del proyecto Reanalysis se desfasan 4°C para mejorar el ajuste con la temperatura media de la región.

Fuente: elaboración propia.

3. Morfología

Este estudio obtuvo los datos de la batimetría del embalse Punchiná para el año 2006 de las mediciones realizadas dentro del programa de asesorías y capacitaciones que la Universidad EAFIT (Área de Ciencias del Mar) presta a la empresa de servicios públicos ISAGEN. Se trabajó con el objetivo de implementar nuevas tecnologías que posibiliten mediciones más exactas para cuantificar el volumen de los embalses.

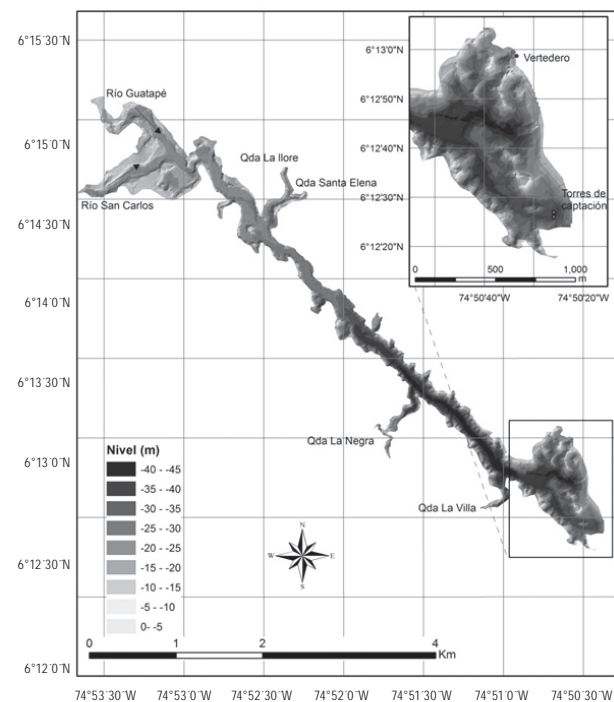
Estas campañas de medición integraron las señales de un DGPS y una ecosonda ELAC, con operación a 200 kHz por medio del *software* HYPACK (*Hydrographic Software Packages*), del cual se obtiene en tiempo real el posicionamiento de la lancha y la profundidad del embalse. Los recorridos realizados permitieron obtener profundidades con una densidad aproximada de un dato cada 10 m. La campaña se realizó con el embalse lleno para permitir una mayor cobertura espacial de las mediciones.

La figura 9 describe las principales características batimétricas del embalse Punchiná. En su forma alargada pueden encontrarse los canales de algunos tributarios, pequeñas islas, zonas someras y taludes laterales empinados que conforman su compleja batimetría. La ubicación de las desembocaduras de los tributarios, las torres de captación y el vertedero de crecientes están indicados en la figura. Las profundidades máximas de la zona de estudio están al sureste y pueden alcanzar los 45 m. Al noroeste en las desembocaduras de los ríos Guatapé y San

Carlos se tienen profundidades de 9 y 14,5 m, respectivamente.

Las simulaciones hidrodinámicas realizadas en este estudio cubrieron cortas escalas temporales que oscilaron entre una y dos semanas (adicionales al periodo de calentamiento del modelo). Por tal consideración, los cambios batimétricos fueron despreciados. Aunque se anota que en esta corta escala temporal pueden presentarse cambios morfológicos considerables, debidos a un eventual deslizamiento de los taludes laterales.

Figura 9. Batimetría del embalse Punchiná (2006)



Fuente: elaboración propia

4. Modelo hidrodinámico

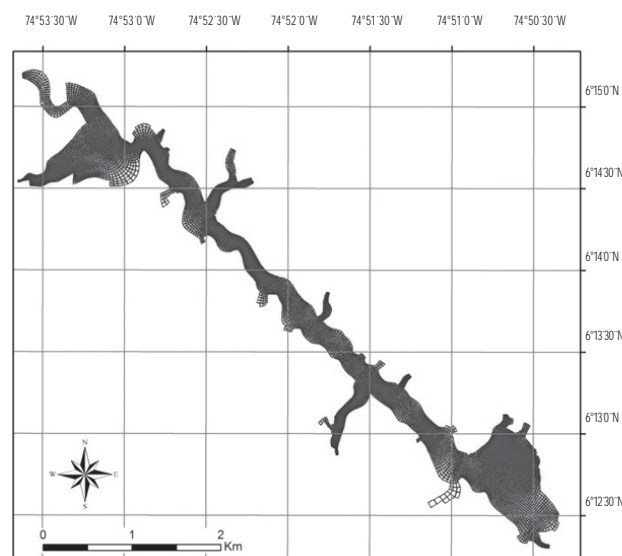
En la determinación del flujo no estacionario en el embalse Punchiná se usó la plataforma de modelación Delft3D, desarrollada por WL | Delft Hydraulics en Holanda (Roelvink y Van Banning, 1994). La posible estratificación térmica del embalse exige la construcción de un modelo 3D que permita considerar su existencia y la variabilidad espacio-temporal de las corrientes. El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Navier Stokes sobre una malla curvilínea en combinación con un apropiado grupo de condiciones iniciales y de frontera que resultan del forzamiento debido a factores meteorológicos, térmicos, descarga de ríos y efluentes. Este modelo incluye las fluctuaciones turbulentas a través de los esfuerzos de Reynolds, definidos por medio del modelo de cierre de turbulencia k-e (Uittenbogaard, van Kester & Stelling, 1992).

La solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas requiere la discretización espacial del área de estudio. Con este fin se superpone sobre el dominio de cálculo una malla de aproximadamente 11.500 celdas, con tamaños que oscilan entre 5 y 60 m (figura 10). En las simulaciones 3D, la dirección vertical se discretiza a través de una malla con sistema coordenado tipo sigma (Phillips, 1957), donde las capas están limitadas por dos planos, de los cuales uno se aproxima a la superficie libre del agua y el otro a la topografía del fondo. El número de capas en la vertical es constante para la totalidad del área de estudio. En este modelo se consideraron 10 capas, de las cuales las cinco capas más superficiales tienen un espesor equivalente al 5% de la profundidad total y las cinco restantes al 15%.

La integración temporal usada por el esquema de solución numérica (método "Cyclic") se basa en el método ADI (Alternating Direction Implicit). Este esquema no impone restricciones al intervalo temporal de cálculo (Stelling & Leendertse, 1991). Por consiguiente, en las simulaciones realizadas se consideró un intervalo temporal igual a un minuto,

procurando que el número de Courant no exceda un valor de 10 y con ello no afectar la calidad de la solución (WL | Delft Hydraulics, 2006).

Figura 10. Malla de cálculo para el embalse Punchiná



Fuente: elaboración propia

5. Relevancia de los procesos físicos en la hidrodinámica del embalse

En el embalse Punchiná interviene un número de procesos que alteran en mayor o menor grado las características hidrodinámicas. Cuantificar el efecto individual de cada uno de esos procesos es el propósito fundamental de este trabajo. Se considerarán, entre otros, el efecto de la descarga de afluentes (tributarios principales y secundarios), efluentes (captación y vertedero), factores atmosféricos y las corrientes de densidad (temperatura).

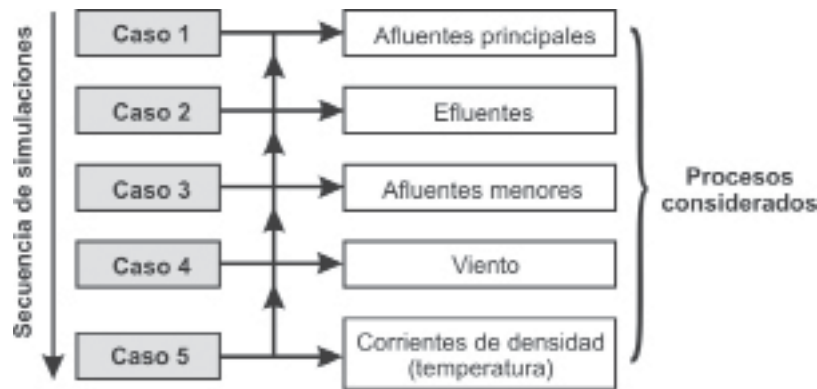
La determinación de la relevancia de cada uno de los procesos y forzamientos del flujo en el embalse implica la definición de escenarios en los cuales los datos de entrada del modelo sean lo más representativos posible. De esta manera se pretende evitar que la relevancia de un

determinado proceso sea afectada por una condición anómala o con bajos periodos de retorno y se cree así una desigualdad artificial entre los diferentes procesos.

5.1 Metodología

Cada uno de los procesos considerados en las simulaciones hidrodinámicas se incluye secuencialmente en el sistema de modelación siguiendo un orden predeterminado. La primera simulación o caso incluye solo un proceso, la segunda adiciona un nuevo proceso y las simulaciones subsecuentes introducen de uno en uno los procesos restantes, de tal forma que la simulación final considere la totalidad de los procesos físicos mencionados (figura 11).

Figura 11. Secuencia de procesos simulados en el embalse Punchiná



Fuente: elaboración propia

Ahora, definir la influencia que tiene cada uno de los procesos físicos en la hidrodinámica del embalse conduce a considerar su efecto en las corrientes. Por tanto, se utiliza la magnitud de la velocidad como parámetro de referencia. Se anota que el análisis anterior se repitió para las dos condiciones siguientes: 1) nivel máximo de operación (775 msnm) y 2) nivel medio multianual de operación ($\approx 768,5$ msnm). Lo anterior implica la imposición de un balance entre los afluentes y efluentes que restrinja la variación del nivel del agua.

Al comienzo se parte de un estado en el cual la velocidad es nula para todo el embalse. Luego, a medida que se incluye paulatinamente cada uno de los procesos considerados en la secuencia de simulaciones, se determina la diferencia en las velocidades medias del flujo entre dos simulaciones consecutivas. Esta diferencia refleja el efecto o aporte hidrodinámico del hasta entonces último proceso incluido en el modelo. Finalmente, se

determina la relevancia espacial de cada proceso, calculando en cada una de las celdas del dominio, la relación entre el aporte individual de un proceso a la velocidad media del flujo y la velocidad media determinada en el caso final, el cual incluye el aporte de todos los procesos considerados, tal como se indica a continuación, a través del coeficiente de variación local CV_L :

$$CV_L = \frac{abs|v_i - v_{i-1}|}{v_f} \quad (4)$$

Donde, v_i es la variable de referencia sobre la cual se quiere determinar la sensibilidad del modelo; en este caso la velocidad media del flujo, v_{i-1} , es la variable de referencia en la simulación o caso previo y v_f es la variable de referencia en el caso final.

Por su posible estratificación térmica, las simulaciones hidrodinámicas en el embalse Punchiná requieren una modelación 3D. Sin embargo, en los primeros tres casos de la secuencia de

simulaciones (figura 11) se aprovecha el hecho de que aún no se incluyen procesos que afecten la distribución uniforme de temperatura en el embalse y por ende se utiliza un modelo 2Dh (resultados integrados en la vertical) con lo cual se reduce el costo computacional del estudio. Este aspecto determinó el orden como se introdujeron los procesos en la secuencia de simulaciones adoptada. Para verificar la confiabilidad de las simulaciones 2Dh se realizó una comparación entre los resultados de un modelo 3D y uno 2Dh, con el resultado de pequeñas diferencias de las corrientes en algunas zonas del embalse (figura 17).

6. Resultados y discusión

Las figuras 12 a 16 permiten apreciar el efecto de los afluentes (tributarios principales y secundarios), los efluentes (captación y vertedero), factores atmosféricos y la estratificación térmica en la hidrodinámica del embalse para a) el nivel máximo de operación (izquierda) y b) el nivel medio multianual de operación (derecha). La escala de grises representa la relevancia espacial de cada proceso, donde el color negro (valor numérico 1) indica un predominio absoluto del proceso y el color blanco (valor numérico 0), por el contrario, sugiere que el proceso tiene un efecto despreciable en la magnitud de las corrientes.

Figura 12. Relevancia de los afluentes principales en la hidrodinámica del embalse



Fuente: elaboración propia

Figura 13. Relevancia de la captación en la hidrodinámica del embalse



Fuente: elaboración propia

Figura 14. Relevancia de los tributarios menores en la hidrodinámica del embalse



Fuente: elaboración propia

Figura 15. Relevancia del viento en la hidrodinámica del embalse



Fuente: elaboración propia

Figura 16. Relevancia de las corrientes de densidad y el flujo 3D en la hidrodinámica del embalse



Fuente: elaboración propia

Esas mismas figuras (12 a 16) determinan las regiones del embalse donde predomina cada uno de los procesos y forzamientos externos considerados, así como su grado de influencia en la magnitud de las corrientes (escala de 0 a 1). Nótese allí su carácter cuantitativo, la cobertura espacial y la interrelación entre los diferentes procesos estudiados. Estos permiten, respecto a un análisis de sensibilidad tradicional, incrementar la calidad y cantidad de información disponible con el fin de llevar a cabo, de una forma eficiente, las etapas posteriores de calibración y validación del modelo, utilizando los recursos disponibles en la obtención de información realmente significativa.

Así, en la figura 12 se observa el importante efecto que tiene la descarga de los afluentes principales, ríos Guatapé y San Carlos, en la magnitud de las corrientes del embalse. Estos afluentes son los responsables principales de la velocidad del flujo en la zona norte del embalse, exceptuando pequeñas zonas aledañas al cauce principal del río San Carlos. El predominio de estos afluentes se extiende hacia el sur hasta alcanzar profundidades de 30 m, donde el incremento en la sección hidráulica genera una reducción importante de las velocidades. Allí, donde las velocidades del flujo son muy bajas y el poder de mezcla se aminora, empiezan a tener un efecto relativo notorio las corrientes debidas a los gradientes de temperatura (figura 16).

En la figura 13 se muestra el efecto de incluir en las simulaciones un sumidero donde se ubican las torres de captación (efluente). De este modo se produce el direccionamiento de las corrientes hacia las torres y por ende se altera la magnitud y dirección del flujo en esta zona. El sumidero explica casi en un 100% la magnitud de las corrientes en sus inmediaciones; sin embargo, este predominio se debilita gradualmente al alejarse de las torres de captación, concentrando su influencia en un radio aproximado de un kilómetro.

El dragado que ejerce el viento en la superficie de un cuerpo de agua puede inducir corrientes, afectar el esparcimiento de sustancias, alterar mecanismos de mezcla, generar oleaje, etc. En particular, este estudio hace referencia al efecto del viento en la magnitud de las corrientes, lo cual en el embalse Punchiná resulta ser pequeño con respecto al efecto que tienen otros procesos (figura 15). Obviamente, es de esperarse que un incremento o disminución de la magnitud del viento (o de otra variable) genere un cambio en la relevancia que tiene este parámetro en las corrientes del embalse.

En general, los resultados que se observan en las figuras que se analizan (12 a 16) fueron obtenidos para unas condiciones “típicas” del embalse Punchiná en el año 2006. Por tanto, bajo condiciones hidrometeorológicas extremas o atípicas es probable que la relevancia de ciertos procesos presente discrepancias significativas con respecto a la establecida en este artículo. También es necesario anotar que la velocidad de las corrientes en el embalse es el parámetro de referencia utilizado y en consecuencia se deben interpretar los resultados obtenidos; es decir, se define la influencia de un proceso físico por su aporte a la magnitud de las velocidades. No obstante, la metodología propuesta permitiría abarcar otras áreas de estudio o modelos matemáticos, siempre y cuando se modifique el parámetro de referencia convenientemente.

En la experiencia realizada, las simulaciones hidrodinámicas de los tres casos iniciales fueron

2Dh (figura 11) y la simulación de los dos casos finales fueron 3D (debido a la posible estratificación térmica y el dragado del viento en la capa superficial). Por consiguiente, al determinar la relevancia de las corrientes de densidad y el viento se incluyeron también aspectos que son solo atribuibles al cambio entre un modelo 2Dh y uno 3D. Este efecto es notorio en las curvas, donde el modelo 2D no permite calcular adecuadamente los flujos espirales que allí se presentan. También se apreció este efecto en las zonas pandas con flujo muerto (áreas aledañas a la desembocadura del río San Carlos y al vertedero) y en la desembocadura de tributarios, donde el cálculo de flujos secundarios y resistencia al flujo varía de acuerdo con el modelo que se utilice (figura 17).

Finalmente, hay que subrayar que los resultados de este estudio provienen del análisis de sensibilidad de un modelo hidrodinámico. En consecuencia, no se hizo énfasis en la comparación de estos

resultados con mediciones in situ, con estudios hidrodinámicos previos o con cualquier otro tipo de referencia (por demás escasos o inexistentes) que permitan de algún modo determinar las bondades del modelo.

Figura 17. Relevancia de la modelación 3D en la hidrodinámica del embalse Punchiná, nivel máximo (izq.) y nivel medio (der.)



Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Bajo condiciones hidrometeorológicas medias o “típicas” en el embalse Punchiná, y de acuerdo con los resultados del análisis de sensibilidad que se realizó, se llega a las conclusiones que se enuncian a continuación.

Las características morfológicas del embalse con su entrada estrecha y alargada conduce a que la descarga de los tributarios principales (río Guatapé y San Carlos) sea predominante en la hidrodinámica del embalse, con una alta influencia en aproximadamente 6,5 de los 8 km modelados. Este predominio se disipa gradualmente de Norte a Sur, hasta prácticamente desaparecer en la zona aledaña a la captación. Se destaca un hecho: la reducción en el nivel del agua conduce a una mayor penetración de los tributarios y de su influencia en la zona sur del embalse (figura 12).

La influencia del sumidero ubicado en las torres de captación tiene una relevancia muy localizada y afecta las corrientes en un radio inferior a un kilómetro. La cobertura espacial de esta influencia no cambió sustancialmente con la reducción del nivel del embalse, aunque fue de mayor intensidad en este último caso (figura 13). Resultados similares se obtuvieron al situar el sumidero en el vertedero de crecientes (no se publican estos resultados con el fin de compactar esta edición).

Para las condiciones estudiadas, el efecto del viento en la generación de corrientes en el embalse es pequeño. Lo anterior se debe a que la velocidad del viento es relativamente baja y a que el embalse presenta una forma alargada y estrecha que solo expone un área pequeña al dragado de este (figura 15).

No obstante, se indica que el viento es una de las variables que influye en el flujo de calor del embalse y por ende en las corrientes de densidad, las cuales no son despreciables. Los tributarios menores presentan igualmente un pequeño efecto en las corrientes del embalse. Su predominio se reduce a sus cauces respectivos y generan un cambio en las corrientes del cuerpo principal del embalse menor al 5% (figura 14).

La estratificación térmica del embalse afecta principalmente la zona de aguas profundas, con una influencia en las corrientes entre el 30% y el 70%. Estase hace notoria para profundidades mayores de 30 m. Por tanto, es mayor su efecto en los últimos 4 km al sur del embalse, particularmente si se opera con un nivel alto. La operación del embalse en su nivel medio incrementa la energía cinética y la penetración de los tributarios principales en el embalse, lo cual facilita los procesos de mezcla que conducen a una reducción en el grado de estratificación (figura 16).

Para mejorar la predicción hidrodinámica en el embalse Punchiná a través del modelo propuesto se requiere el desarrollo de las fases subsecuentes de calibración y validación. Allí se debe hacer énfasis en el registro sistemático de las variables que, dada su relevancia en las corrientes del embalse, determinan el flujo de calor (humedad relativa, temperatura del agua y aire, velocidad del viento, cobertura de nubes, radiación solar), los caudales de los tributarios principales y los volúmenes turbinados.

Bibliografía

Atkinson, E. (1996). "The feasibility of flushing sediment from reservoirs", *TDR Project R5839, Rep. OD 137*. HR Wallingford, UK.

Díaz, H. M. (2005). "Modelación hidrodinámica y calidad para el embalse del Muña". Tesis de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes, Bogotá.

Eckart, C. (1958). "Properties of water. Part II, The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures", *American Journal of Science*, 256. pp. 225-240.

Ghoreishi, S. (2007). "Three-dimensional numerical simulation of sediment flushing from Reservoirs". Ph.D. Thesis, University of Science and Technology of Lille, 131 pp.

Gómez, A. y O. Mejía. (1984). "Proyecto hidroeléctrico de San Carlos", *Revista SAI*, 1(5). pp. 5-17.

INTEGRAL S. A. (1977). "Presa de Punchiná, curvas de calibración del embalse, vertedero, conductos y estaciones de aforos (material cartográfico)", *Proyecto hidroeléctrico de San Carlos*, Medellín: Interconexión eléctrica S.A. (ISA).

Interconexión Eléctrica S.A. (ISA). (1989). "Informe de sedimentación Embalses Punchiná- San Lorenzo y Calderas", Medellín, 100 p.

Kalnay, E.; M. Kanamitsu *et al.* (1996). "The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project", *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77. pp. 437-470.

Montoya, L. J. y M. Toro. (2006). "Calibración de un modelo hidrodinámico para el estudio de los patrones de circulación en el Golfo de Urabá, Colombia", *Avances en Recursos Hidráulicos*, 13. pp. 37-54.

Octavia, K. A. H.; Jirka, G. H. & Harleman, D. R. F. (1977). "Vertical heat transport mechanisms

in lakes and reservoirs”. Report no 227. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

Phillips, N. A. (1957). “A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting”, *Journal of Meteorology*, 14. pp. 184-185.

Roelvink, J. A. & G. K. F. M. Van Banning. (1994). “Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics”, Verwey, Minns, Babovic & Maksimovic (eds.): *Hydroinformatics*, 94. Balkema, Rotterdam, pp. 451-455.

Saltelli, A.; Tarantola, S. & Campolongo, F. (2000). “Sensitivity analysis as an ingredient of modeling”, *Statistical Science*, 15., pp. 1-20.

Smith, S. D. & E. G. Banke. (1975). “Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed”, *Quart. J. R. Met. Society*, 101., pp. 665-673.

Stelling, G. S. & J. J. Leendertse. (1991). “Approximation of convective processes by cyclic ACI methods”. Proceeding 2nd ASCE. Conference on Estuarine and Coastal Modelling, Tampa.

Toro, F. (2004). “Sistemas de soporte de decisiones para la creación de modelos numéricos hidrodinámicos”, *Revista EIA*, 2., pp. 53-65.

Uittenbogaard, R. E.; van Kester, J. A. Th.M. & Stelling, G. S. (1992). “Implementation of three turbulence models in 3D-TRISULA for rectangular grids”, *Report Z81*, Delft Hydraulics.

UNESCO. (1981). “The practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater 1980”. Tenth report of the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards (JPOTS), *Technical papers in marine science*, 36. Sidney, B. C., Canada: UNESCO.

Villegas, B.; Toro, M. y Vélez, J. (2005). “Definición de los tamaños óptimos de malla e intervalo de cálculo en un modelo numérico: aplicación al caso del embalse de Porce II”, *Dyna*, 147., pp. 23-32.

WL | Delft Hydraulics. (2006). “Delft3D-FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments”, *User Manual*. Delft, 644 p.