



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

MODELACIÓN DEL DELTA DE SEDIMENTO EN UN EMBALSE QUE PRESENTA RÁPIDAS FLUCTUACIONES DE NIVEL

Inés Maryorie Perea Mesa. I.C

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

Medellín, Colombia

2013

MODELACIÓN DEL DELTA DE SEDIMENTO EN UN EMBALSE QUE PRESENTA RÁPIDAS FLUCTUACIONES DE NIVEL

I.C. Inés Maryorie Perea Mesa

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería-Recursos Hidráulicos

Director:

Ph.D. Francisco Mauricio Toro Botero

Línea de Investigación:

Hidráulica e Hidrodinámica

Grupo de Investigación:

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos

Medellín, Colombia

2013

Hace algún tiempo volé erráticamente por la vida; para mí fortuna, hoy tengo dos motores que me ayudan a mover: “mis amados hijos”, una brújula que me orienta: “mi paciente esposo” y un norte muy claro “la familia”. En estas páginas la materialización de una de las tantas metas en esta nueva ruta de vuelo.

Inés Perea

Agradecimientos

El autor agradece a Empresas Públicas de Medellín la disposición de la información requerida para la ejecución de los alcances del presente trabajo; de manera especial a los ingenieros Paula Correa y Winston Cuellar por su diligencia y oportuna atención a las solicitudes realizadas.

Al Comité Técnico del Programa “Estudio de las condiciones ambientales de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín” por su concepto favorable a la realización de este trabajo.

Al profesor Mauricio Toro por su confianza y apoyo. Por la fe en que esta labor Titánica pudiera completarse, porque nunca escuche un no se puede de su boca.

A mi familia, en especial a Yuly Perea, Mery Mesa y Fanny Mesa por haberme sustituido en mis labores maternas, en los días más duros.

A mi esposo Agustín Moreno por su amor incondicional, su acompañamiento y apoyo. Por no haberme permitido desistir de la meta.

A Pi- Épsilon Ingeniería de Consulta Especializada, en especial a los ingenieros Eduardo Lopera y Marco Paz, por haber entendido el propósito y la necesidad de concluir lo empezado y a Aura Arias, Adriana Barrientos, Alejandro Becerra, Andrés Vélez, Alexandra Álvarez y Ricardo Hernández por su apoyo moral y sus buenos consejos.

Resumen

En este trabajo se estudió el delta fluvial de sedimento en el embalse Porce II, localizado en el departamento de Antioquia, Colombia, mediante el análisis de información hidrológica, batimétrica, sedimentológica y operativa disponible, y la implementación del modelo unidimensional de frontera móvil - GSTARS4 V.1.

Se estudiaron escenarios reales y sintéticos generando tendencias de algunos procesos asociados a la formación del delta fluvial, observándose que a ciertos umbrales de nivel del agua en el embalse junto con el ingreso de crecientes de cierta magnitud, el frente avanza de manera más significativa que durante las mayores rachas de descenso del nivel del agua registradas en el mismo durante el periodo analizado en condiciones promedias de caudal del río Porce. Lo anterior es el principal condicionante de la posición y cota del punto de pivote del delta más allá de los niveles más frecuentes de operación del embalse.

Palabras clave: embalse, delta, fluctuación de nivel, modelación numérica, sedimentación, operación de embalses, punto de pivote.

Abstract

The present study investigated the sediment river delta in Porce II reservoir, located in the department of Antioquia, Colombia, by analyzing hydrological, bathymetric, sedimentological and operations available data, and the implementation of one-dimensional moving boundary model - GSTARS4 V.1.

Real and synthetic scenarios were studied, generating some trends about processes associated with the river delta formation, showing that beyond certain thresholds of water level in the reservoir together with the increasing inflows of some magnitude, the front moves faster than during the largest batches of water level fall recorded in the reservoir during the period analyzed in terms of the average flow of the Porce river. This is the main determinant of the position and height of the pivot point of the delta levels even more than the most frequent reservoir operation levels.

Keywords: Reservoir, Delta, water level fluctuation, numerical modeling, sedimentation, reservoir operation, pivot point.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XVII
Introducción	1
1. Proceso de sedimentación en un embalse	7
1.1 Introducción	7
1.2 Descripción general de los procesos asociados.....	7
1.3 Sedimento que ingresa a un embalse	11
1.4 Eficiencia de atrapamiento y compactación del material sedimentado.....	16
1.5 Distribución del sedimento al interior de un embalse, modelos empíricos y numéricos	18
2. Modelación numérica unidimensional de la sedimentación en un embalse	23
2.1 Tránsito de caudal a través de un embalse.....	24
2.1.1 Tránsito hidrológico	24
2.1.2 Tránsito hidráulico	25
2.2 Tránsito de sedimentos en un embalse	30
2.2.1 Transporte de sedimentos en condiciones de no equilibrio	32
2.2.2 Capacidad de transporte del sedimento cohesivo	33
3. Caso de estudio	37
3.1 Generalidades	37
3.2 Información disponible	38
4. Métodos	47
4.1 Análisis de la información disponible	47
4.2 Simulación numérica	49
4.2.1 Definición del propósito de la modelación, alcance y metodología	49
4.2.2 Construcción del modelo, sensibilidad y calibración	49
4.2.3 Verificación del modelo	50
4.2.4 Simulación predictiva	51
5. Análisis de la información previa disponible	53
5.1 Estudios relacionados.....	53
5.2 Información batimétrica.....	56

5.2.1	Zonas de depósito y de erosión	56
5.2.2	Estudio del “thalweg” y de las secciones transversales.....	59
5.2.3	Curvas cota-área de embalse y cota-volumen embalsado	64
5.3	Información hidrológica y operativa	67
5.4	Sedimentos	73
5.4.1	Sedimento que ingresa al embalse	73
5.4.2	Distribución granulométrica del sedimento depositado	75
5.5	Temperatura del agua	78
6.	Modelación numérica	81
6.1	Configuración del modelo.....	81
6.1.1	Parámetros hidrodinámicos	81
6.1.2	Parámetros de los sedimentos.....	83
6.2	Análisis de sensibilidad	88
6.3	Calibración	93
6.4	Validación de la calibración	97
6.5	Simulación de casos	100
6.5.1	Eventos de ascenso y descenso de nivel.....	100
6.5.2	Eventos de creciente y el papel del nivel del agua en el embalse sobre las características del delta fluvial	104
7.	Conclusiones y recomendaciones	109
7.1	Sobre el proceso de sedimentación.....	109
7.2	Sobre el modelo	110
7.3	Recomendaciones.....	110
	Bibliografía	112

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Representación esquemática de algunos procesos que pueden influir en la sedimentación en un embalse (Mays, 1999; Tundisi y Tundisi, 2011; U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)	8
Figura 1-2: Pates del delta fluvial en un embalse, modificado de (García, 2008)	9
Figura 1-3: Formación del delta fluvial en el lago Mead (García, 2008)	10
Figura 2-1: Representación del uso de los tubos de corrientes por el modelo GSTARS (Yang y Simões, 2008)	26
Figura 2-2: Representación de una hidrógrafa mediante series de paso de caudal constante y duración finita (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006) 27	27
Figura 2-3: Subdivisiones de un tramo de río y de embalse en el modelo GSTARS4 (Yang y Ahn, 2011)	29
Figura 3-1: Ubicación general embalse Porce II	38
Figura 3-2: Estaciones hidrométricas.....	40
Figura 3-3: Mapa raster batimetría año 2001	42
Figura 3-4: Mapa raster batimetría año 2004	42
Figura 3-5: Mapa raster batimetría año 2007	43
Figura 3-6: Estaciones de muestreo Programa Embalses UNAL-UdeA	44
Figura 5-1: Transeptos realizados desde la entrada del río Porce has el sitio de presa (Turbidez, FTU), adaptado de (Largo, 2011)	55
Figura 5-2: Estimación zonas de depósito y erosión entre las batimetrías de los años 2001 y 2004	57
Figura 5-3: Estimación zonas de depósito y erosión entre las batimetrías de los años 2004 y 2007	57
Figura 5-4: Elevación del “thalweg” del río Porce en la zona del embalse Porce II ..	60

Figura 5-5:	Cambios temporales de la elevación del “thalweg” de la quebrada La Cancana en la zona del embalse Porce II	61
Figura 5-6:	Cambios temporales de la elevación del “thalweg” de la quebrada Guaduas en la zona del embalse Porce II	61
Figura 5-7:	Localización de las secciones transversales a lo largo del eje del perfil longitudinal del embalse Porce II	62
Figura 5-8:	Comparación de secciones transversales, a) entrada del río Porce en el embalse, y b) aguas arriba de la confluencia con la quebrada La Cancana.	63
Figura 5-9:	Comparación de secciones transversales, a) zona de transición aguas arriba de la confluencia con Guaduas, y b) zona aguas abajo confluencia con Guaduas.	63
Figura 5-10:	Comparación de secciones transversales, confluencias a) aguas arriba quebrada La Cancana, y b) aguas abajo quebrada La Frijolera.	64
Figura 5-11:	Curvas cota - área y cota – volumen embalse Porce II de acuerdo con las batimetrías de los años 2001, 2004 y 2007	65
Figura 5-12:	Curvas cota - área y cota – volumen quebrada Guaduas de acuerdo con las batimetrías de los años 2001, 2004 y 2007	66
Figura 5-13:	Curvas cota - área y cota – volumen quebrada La Cancana de acuerdo con las batimetrías de los años 2001, 2004 y 2007	66
Figura 5-14:	Histogramas variación del nivel del agua en el sitio de presa en rachas de días consecutivos período Junio 2001- Diciembre 2008	69
Figura 5-15:	Curva de duración de niveles del agua medidos en el sitio de presa.....	70
Figura 5-16:	Hidrología y operación del embalse Porce II durante el periodo 01/Jun/2001 – 30/Sept/2004	71
Figura 5-17:	Hidrología y operación del embalse Porce II durante el periodo 01/Oct/2004 – 24/Nov/2007	71
Figura 5-18:	Histograma distribución de frecuencia caudales medios diarios de entrada al embalse registrados en la estación El Diamante 01/Jun/2001 – 31/Dic/2007	73
Figura 5-19:	Correlaciones caudal líquido-caudal sólidos en suspensión río Porce sector embalse Porce II	75
Figura 5-20:	Variación espacial del diámetro D50 del sedimento superficial del lecho en el período 2010-2012	77

Figura 5-21:	Variación temporal del tamaño D50 del material de sedimento superficial del lecho del embalse.....	77
Figura 5-22:	Aproximación al ciclo anual de la temperatura del agua del río Porce empleando los registros de las estaciones El Diamante y El Mango	79
Figura 5-23:	Datos temperatura del agua estación E8 proyecto Embalses UNAL-UdeA Abril 2010 – Mayo 2012.....	79
Figura 6-1:	Granulometrías del material del lecho valoradas en la calibración del modelo	84
Figura 6-2:	Diagramas de dispersión muestreo Monte Carlo contrastados contra el error en el volumen sedimentado en el período Junio/2001-Septiembre/2004	92
Figura 6-3:	Gráficas de sensibilidad regional empleando el error en el volumen sedimentado en el período Junio/2001-Septiembre/2004.....	92
Figura 6-4:	Perfil del “thalweg” del embalse simulado entre 01/Junio/2001 al 30/Septiembre/2004, calibración	93
Figura 6-5:	Comparación de secciones transversales batimétricas y simuladas, calibración	95
Figura 6-6:	Simulación del D50 del material del lecho del embalse, calibración.....	97
Figura 6-7:	Perfil del thalweg del embalse simulado entre 01/Octubre/2004 al 24/Noviembre/2007, validación	98
Figura 6-8:	Comparación de secciones transversales batimétricas y simuladas, validación	99
Figura 6-9:	Volúmenes erosionados y sedimentados eventos de ascenso del nivel del agua	101
Figura 6-10:	Volúmenes erosionados y sedimentados eventos de descenso del nivel del agua	101
Figura 6-11:	D50 simulados del material del lecho en el “thalweg” en la zona del delta fluvial hacia el final de diferentes eventos de ascenso (arriba) y descenso (abajo) del nivel del agua	103
Figura 6-12:	Caudales medidos cada 30 minutos y promedio diario en la estación El Diamante en el período 21/04/2012 – 07/05/2012.....	105
Figura 6-13:	Simulación de la evolución del perfil del thalweg en el evento de creciente valorado para diferentes niveles del agua bajos en el embalse en el día antes del pico de creciente	106

Figura 6-14: Evolución del tamaño D50 por el “thalweg” en el evento de creciente valorado para diferentes niveles del agua en el embalse de medios a altos en el día antes del pico de creciente 107

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Funciones de transporte de sedimento implementadas en GSTARS4 y su tipo (B=carga de lecho, BM=carga material del lecho). Modificada de (Yang and Ahn, 2011)	15
Tabla 1-2: Clasificación de la operación el embalse (Ahn, 2011)	17
Tabla 3-1: Información hidrológica y operativa	40
Tabla 3-2: Información aforos de caudal y de sedimentos en suspensión	41
Tabla 3-3: Información de las campañas de medición de variables Programa Embalses UNAL-UdeA	44
Tabla 5-1: Volúmenes sedimentados obtenidos de las batimetrías de los años 2001, 2004 y 2007 por diferencia de los mapas de redes irregulares de triángulos (TIN)	58
Tabla 5-2: Volúmenes de almacenamiento total	67
Tabla 5-3: Distribución de frecuencias: variación de niveles medios diarios del agua período Junio 2001- Diciembre 2008 entre dos días consecutivos	68
Tabla 5-4: Diez mayores eventos de descenso y ascenso del nivel del agua en el período Junio 2001 – Diciembre 2008	69
Tabla 5-5: Datos faltantes series de niveles del agua en la presa, y de caudales de entrada y de salida al embalse	72
Tabla 5-6: Criterios de agrupamiento de registros en la construcción de la curva de transporte de sedimentos en suspensión	74
Tabla 6-1: Valores de masa específica seca empleados en la ecuación de estimación de la densidad de los sedimentos depositados	85
Tabla 6-2: Granulometría estimada del sedimento que ingresa al embalse por el río Porce	94
Tabla 6-3: Caudales máximos y mínimos en el período 2001-2012, estación El Diamante	104

Introducción

Los embalses son elementos fundamentales en el aprovechamiento de los recursos hídricos a nivel mundial, ya que permiten modular el suministro de agua para diferentes usos. Sin su presencia grandes cantidades de agua dulce llegarían a los océanos sin uso económico alguno y, en el caso de la generación hidroeléctrica, sería necesario un uso mayor de combustibles de origen fósil para compensar la ausencia de los mismos (Jiménez et al., 2005).

Son diversos los problemas que se producen tanto aguas arriba como aguas abajo de una presa relacionados con la forma como se depositan y movilizan los sedimentos al interior de un embalse, entre los más importantes se mencionan los siguientes:

- a) La obstaculización de las compuertas y aceleración de los procesos abrasivos en la maquinaria hidráulica con su consecuente efecto sobre el incremento de los costos de mantenimiento.
- b) El favorecimiento de la recurrencia de inundaciones y disminución de la utilidad para navegación por acumulación excesiva de sedimentos en la región del delta.
- c) La afectación del flujo de nutrientes, alterando directamente la ecología y balance de especies en el embalse, y
- d) La reducción drástica o total del volumen útil de almacenamiento (García, 2008; Morris y Fan, 1997; Vischer y Hager, 1998).

Al abordar el estudio de la sedimentación en un embalse surgen diferentes interrogantes al respecto, ¿qué cantidad de sedimento llega y de qué tipo?, ¿dónde se deposita?, ¿cómo se mueve dentro del cuerpo de agua?, ¿qué volumen útil se pierde y en cuánto tiempo?, ¿qué soluciones existen para abordar el problema?.

En la literatura especializada no se evidencian estudios referentes a la distribución espacial y temporal de sedimentos en embalses colombianos, a los procesos asociados a esta dinámica y su posible relación con las restricciones operativas de dichos sistemas. Esta carencia se da bien sea por inexistencia de estos estudios, o derivada del hecho de la no masificación de los resultados por considerarse información estratégica para las empresas generadoras que tal vez contratan este tipo de estudios ratificando esto el gran desconocimiento que de este tipo de cuerpos de agua tenemos en nuestro país y el carácter fragmentado de la poca información disponible (Roldán y Ramírez, 2008).

En el caso Colombiano se encontraron publicaciones recientes que tratan las etapas iniciales del estudio de la sedimentación en el embalse Punchiná enfocadas en el estudio de los procesos físicos dominantes como insumo para un posterior estudio de la sedimentación (Escobar y Pérez, 2011; Escobar, 2010), pero no se encontraron resultados finales de este último aspecto.

Igualmente trabajos realizados en los embalses Porce II (Largo, 2011), Riogrande II (Franco, 2011) y La Fe (Román, 2011) han expuesto elementos relacionados con su funcionamiento físico exponiendo algunas hipótesis sobre procesos relacionados con la sedimentación en los mismos (entrada de corrientes de turbiedad a los embalses), sin embargo al estar dichos estudios enfocados en la estructura térmica no profundizó al respecto.

Sumado a lo anterior, se tiene como elemento generalizado en Latinoamérica la escasa información hidrológica y, especialmente sedimentológica asociada a los embalses (Jiménez et al., 2005), situación que es especialmente latente en Colombia ya que en las estaciones hidrométricas donde se afora sedimento generalmente se mide la carga en suspensión pero no la carga de fondo (Ochoa, 2011), lo que dificulta la implementación de modelos numéricos complejos para el estudio de la sedimentación en embalses donde dicha fracción gruesa sea de importancia. Esto último puede darse en los casos donde el volumen de embalse no es muy grande (entre 10^8 m^3 y 10^{10} m^3) y las extracciones de agua son muy frecuentes, caso en el cual es posible que el delta de sedimento grueso ocupe gran parte del embalse y el mismo, sí constituya la principal causa de pérdida de capacidad de almacenamiento (Sánchez, 1996).

Adicional a las características particulares que pueda presentar la hidroclimatología y los suelos en el trópico colombiano y por ende el comportamiento físico, químico y biológico de los embalses (Roldán y Ramírez, 2008), es fundamental en la evolución de los procesos de sedimentación relacionado con el uso de estos almacenamientos para generación hidroeléctrica; lo que depende de la forma como opera el mercado eléctrico Colombiano.

Independientemente de la hidrología, las operaciones en la bolsa pueden desencadenar eventos de generación (particulares o generalizados en ciertas épocas y embalses) que ocasionan fuertes y rápidas variaciones en los niveles del agua en el almacenamiento, con todos los efectos que se puedan derivar en el mediano y largo plazo en la vida útil de estos cuerpos de agua, de manera especial en lo referente a la sedimentación que es un tema aún por estudiar en nuestro medio.

Desde el punto de vista práctico uno de los aspectos más importantes en el problema de la sedimentación es determinar la ubicación del sedimento dentro del embalse así como su evolución a través del tiempo, dado que aunque en el proceso de diseño se tiene en cuenta un volumen para almacenar dichos sedimentos, muchas veces es rebasado con la consecuente pérdida de volumen útil incluso a niveles de colmatación total (Sánchez, 1996; Yang, 2003).

El estudio de estos aspectos se ha llevado a cabo empleando diversos métodos empíricos y semi-empíricos (Julien, 2010; Sánchez, 1996), modelos físicos (Morris y Fan, 1997) y modelos numéricos (Toniolo, 2009; U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006), siendo comunes los primeros en etapas de diseño con la desventaja de su corto espacio de aplicación pues el mismo se ve restringido a las condiciones en las cuales fueron creados, y que por lo general difieren de las condiciones reinantes en los sitios de aplicación de los mismos.

La modelación física y numérica basada en procesos se ha empleado en mayor forma en labores de toma de decisiones en el manejo del sedimento al interior del embalse ya en la etapa de funcionamiento, y la primera también en las etapas de diseño de estructuras hidráulicas relacionadas como las descargas de fondo. Al respecto se tienen diversas experiencias reportadas en la literatura especializada del uso de modelos en 1, 2 y 3

dimensiones en diferentes partes del mundo y para diferentes configuraciones de desarrollos hidráulicos, que han mostrado la pertinencia de los mismos para el estudio de procesos físicos relacionados con la sedimentación en embalses (Ahn, 2011; Campos, 2001; González et al., 2005; Goodwill et al., 1995; Kostic y Parker, 2003a; Masis-Jimenez y Fukuoka, 2002).

Referente al tipo de modelo a emplear, se ha expuesto como limitante para su uso en casos prácticos modelos como los 3-D debido en gran parte al excesivo volumen de información que éstos requieren para su calibración y validación. Esta situación favorece que en la mayoría de los casos se utilicen y consideren suficientes los resultados derivados del uso de modelos 1-D, por la simplicidad en sus formulaciones y los pocos requerimientos computacionales lo que los hace adecuados para simulaciones en períodos largos de tiempo. En términos de resultados verificados, se ha concluido que los modelos 1-D representan adecuadamente procesos complejos de transporte y depositación al interior de un embalse cuando puede asumirse la condición de unidimensionalidad en la solución del problema (Abood et al., 2009; Çaliskan, 2008; Morris y Fan, 1997; Tarela y Méndez, 2001; Toniolo, 2009).

A partir de los elementos antes expuestos se planteó como interrogante guía en el caso del caso de estudio abordado en esta investigación (embalse Porce II) lo siguiente: ¿Cómo afecta el cambio rápido de nivel de la superficie libre del agua la evolución del delta en el embalse Porce II?

Como hipótesis de trabajo se plantea la siguiente: “Si en el embalse Porce II se presentan importantes y frecuentes variaciones del nivel del agua producidas por grandes extracciones y afluencias, entonces la fracción gruesa del sedimento que conforma el delta avanzará con el frente del mismo hacia la presa con variaciones importantes en la tasa de avance y, por ende, en la posición del punto de pivote, especialmente en condiciones de nivel bajo del agua”.

La validación de la hipótesis anterior se buscará mediante el cumplimiento del siguiente objetivo general: “Evaluar el papel de las fuertes y recurrentes variaciones del nivel del agua en la evolución espacio-temporal del delta de sedimento al interior del embalse Porce II”, a través del cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

-
- Reproducir mediante un modelo matemático unidimensional los principales procesos físicos asociados a la formación del delta de sedimento en un embalse.
 - Identificar las relaciones más significativas entre aspectos hidrológicos y operativos del embalse con la evolución geométrica longitudinal del delta de sedimento.
 - Predecir la posible respuesta del delta de sedimento ante escenarios hidrológicos y operativos probables en el embalse.

Metodológicamente se abordó la solución del problema partiendo de un análisis exhaustivo de la información batimétrica, hidrológica, operativa y de estudios antecedentes relacionados, que apoyó la implementación de un modelo matemático unidimensional de frontera móvil ampliamente validado para la modelación de procesos de sedimentación en embalses con configuraciones complejas (GSTARS4). La aplicación del modelo se hará conjuntamente con un método de muestreo Monte Carlo como punto inicial para el análisis de sensibilidad y calibración (metodología GLUE - Generalized Likelihood Uncertainty Estimator).

Este trabajo pretende ser un punto de referencia a nivel nacional en lo concerniente al comportamiento del sedimento al interior de un embalse, que apoye futuros estudios y maniobras operativas que tengan que ver con la movilización del sedimento depositado mediante procedimientos como el flushing (lavado del sedimento) o de dragado.

1. Proceso de sedimentación en un embalse

1.1 Introducción

La sedimentación en un embalse es un proceso complejo ya que depende de diversos elementos climáticos, hidrológicos, hidrodinámicos, operativos, geológicos y morfológicos de las cuencas aportantes, los cuales controlan diversos factores que impactan directamente en mayor o menor grado el proceso de sedimentación (en su eficiencia de atrapamiento y la distribución del sedimento depositado en su interior). Entre dichos factores se encuentran la estratificación térmica, la forma, dimensiones y tipologías especiales del embalse, la fisicoquímica del sedimento, las características de las crecientes que ingresan, los movimientos periódicos del agua (seiches) y algunos permanentes (causados por las entradas de los afluentes principales y tributarios), la posición y régimen de operación de las estructuras de vertimiento, captación y descarga de fondo, la presencia de macrófitas flotantes o enraizadas o de vegetación que no fue retirada antes del proceso de llenado que capturan sedimento y adicionan rugosidad al medio, entre otros (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006; Vischer y Hager, 1998). Un esquema de lo antes mencionado se expone en la **Figura 1-1**.

El estudio de los procesos asociados a la sedimentación en embalses se ha abordado por diversos métodos de origen empírico, estadístico y de modelación numérica, los cuales se presentan de forma breve en los siguientes párrafos haciendo especial énfasis en los elementos teóricos que se emplearon en este trabajo.

1.2 Descripción general de los procesos asociados

Cuando se construye una presa cerrando el curso natural de un río, se crea un embalsamiento de agua en el cual un tributario pierde su velocidad de flujo y la carga de sedimento que trae consigo comienza a depositarse. El material más grueso lo hace

primero formando como resultado un delta fluvial mientras que los sedimentos finos (limos y arcillas) con bajas velocidades de sedimentación son transportados al interior del embalse formando depósitos de fondo que pueden llegar hasta la presa (Julien, 2010; Kostic y Parker, 2003b; Morris y Fan, 1997).

En la **Figura 1-1** se presenta un esquema adaptado de (Mays, 1999; Tundisi y Tundisi, 2011; U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006) para representar esquemáticamente algunos de los procesos que de manera más frecuente influyen en los patrones de depositación y erosión en un embalse.

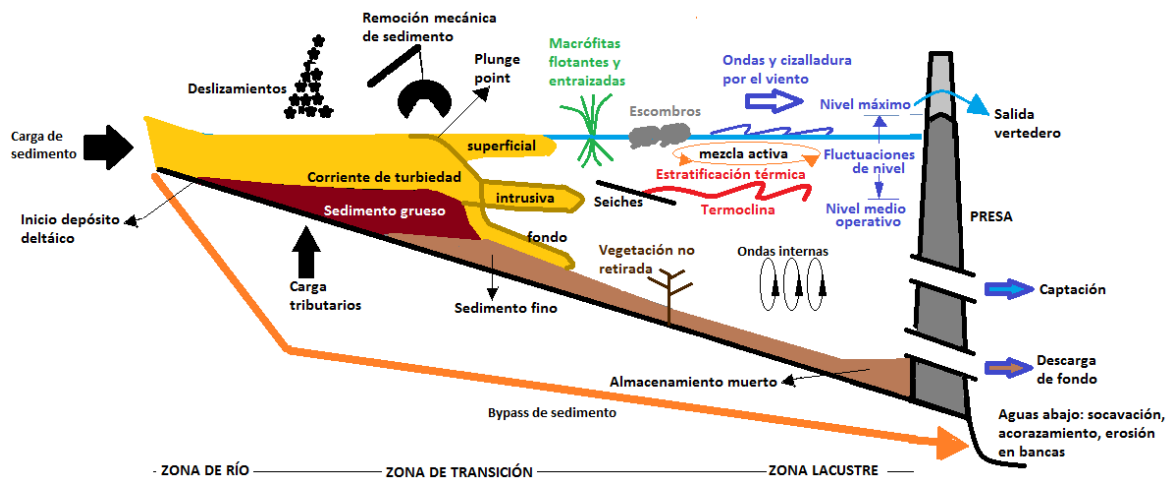


Figura 1-1: Representación esquemática de algunos procesos que pueden influir en la sedimentación en un embalse (Mays, 1999; Tundisi y Tundisi, 2011; U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)

El depósito de fondo puede ser ubicado en el embalse de tres formas dependiendo del grado de estratificación del cuerpo de agua. Variaciones de densidad ocasionadas por diferencias de temperatura o concentración de sedimentos pueden ocasionar que el tributario entre en el embalse como una corriente de turbiedad superficial, intrusiva o de fondo (**Figura 1-1**), desde la cual se precipita el sedimento hacia el fondo (García, 2008). En algunos casos dichas corrientes no llegan a formarse produciendo en el vaso una condición de turbidez generalizada (Sánchez, 1996). Algunos autores exponen que en

embalses profundos el principal mecanismo de transporte de sedimentos son las corrientes de turbiedad (Althaus y De Cesare, 2006).

Los deltas generalmente conforman longitudinalmente tres zonas (**Figura 1-2**): a) un depósito de baja pendiente conformado por la carga de fondo y la fracción gruesa de la carga en suspensión (gravas y arenas principalmente) depositadas fluvialmente casi inmediatamente de forma horizontal agradando el lecho (topset), b) un depósito que conforma un frente de pendiente pronunciada (cara del delta o foreset) el cual mediante avalanchas avanza progresivamente hacia aguas más profundas, siendo denominado el punto de intersección entre las pendientes del topset y del foreset como punto de pivote, y c) un depósito de fondo conformado por sedimentos finos (limos y arcillas) cuyas formas de transporte fueron anteriormente mencionadas (García, 2008).

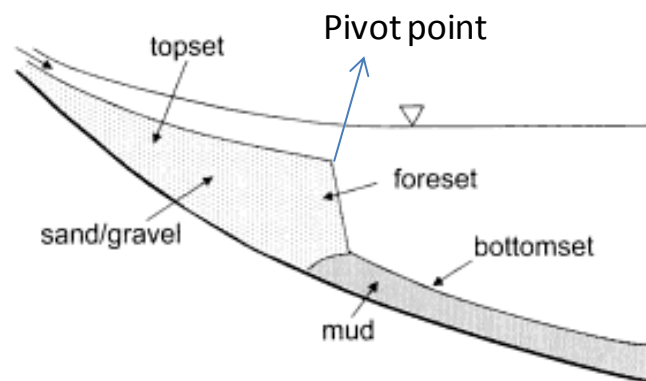


Figura 1-2: Partes del delta fluvial en un embalse, modificado de (García, 2008)

Uno de los más claros ejemplos del anterior esquema se observa en la **Figura 1-3** el cual expone la historia de la sedimentación del lago Mead entre los años 1936 a 1948 (presa Hoover sobre el río Colorado, Estados Unidos). En esta figura se resalta el hecho de que la máxima pendiente del foreset es cercana a los 1° , y que la interfaz foreset-bottomset define claramente una frontera en movimiento (García, 2008).

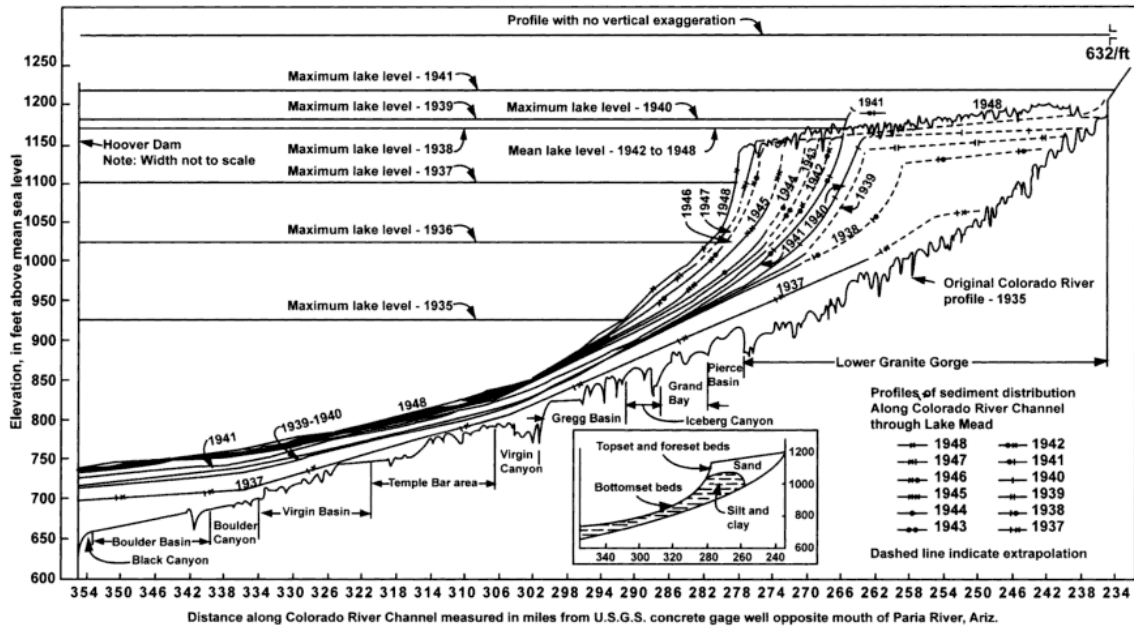


Figura 1-3: Formación del delta fluvial en el lago Mead (García, 2008)

Sobre los elementos que componen el delta fluvial ciertos autores proponen que la localización del punto de pivote depende principalmente de la operación del embalse y de la pendiente del canal en la zona del delta (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006), que el frente del delta (foreset) avanza a una velocidad proporcional a la tasa de llegada de la carga de fondo al punto de pivote (García, 2008), y que el delta se mueve hacia el interior del embalse según las características de las crecientes y la variación de los niveles en el vaso ya que el sedimento será “retrabajado” principalmente en niveles bajos del agua en el embalse y en crecientes importantes de sus afluentes (Sánchez, 1996).

Existen propuestas para estimar la pendiente del topset en función de la pendiente de la corriente (Julien, 2010) y del foreset en función de la pendiente del primero (Sánchez, 1996). Sin embargo, otros autores reportan que dichas relaciones empíricas no son nada exactas (Morris y Fan, 1997) fundamentándose en el argumento de que los deltas fluviales conformados por material grueso desarrollan pendientes muy diferentes a deltas conformados por materiales más finos independiente de la pendiente original del cauce.

1.3 Sedimento que ingresa a un embalse

El flujo de sedimento que ingresa a un embalse es función de factores como la cantidad e intensidad de la lluvia, el tipo de suelo y formación geológica, la cobertura y uso del suelo, la topografía, la red de drenaje (densidad, forma, tamaño, pendiente, alineamiento), la escorrentía, la mineralogía y granulometría del sedimento y las características hidráulicas de los canales (Yang, 2003).

La cantidad de sedimento que ingresa a un embalse puede estimarse a partir de diferentes procedimientos, tales como a) la medición directa dentro del embalse (batimetrías) cuya periodicidad depende de las características hidrológicas, geológicas y operativas del embalse, b) el aforo del transporte de sedimento en las corrientes de entrada (en suspensión y de fondo) con la posibilidad de su compatibilización con ecuaciones existentes para cuantificar sedimento transportado (por ejemplo las expuestas en la **Tabla 1-1**), y c) el empleo de modelos hidrológicos predictivos de erosión a nivel de cuenca que permiten evaluar el impacto de cambios futuros en las cuencas aportantes o en las corrientes (Sánchez, 1996).

Cuando existen en un punto determinado de un río y en un período de tiempo dado mediciones de caudal y del sedimento en suspensión, es posible emplear la denominada curva de transporte (curvas caudal líquido-concentración de sedimentos en suspensión) con el fin de estimar el sedimento transportado en los períodos en donde solo se poseen registros continuos de caudal, generalmente empleándose una relación del tipo potencial (ecuación (1.1)).

$$(1.1) \dots\dots\dots C_S = aQ_W^B$$

Donde C_S es la concentración del sedimento en suspensión, Q_W el caudal líquido de la corriente, y a y b son respectivamente el coeficiente y el exponente de la curva ajustada (Hu et al., 2011; Restrepo, 2005).

Aunque algunos autores presentan curvas de transporte de sedimento considerando la descarga de sedimentos en suspensión (Q_S) como variable dependiente en lugar de la concentración de sedimento obteniendo mejores ajustes (Ochoa, 2011), dicha relación

puede considerarse estadísticamente espuria (García, 2008) ya que el caudal líquido aparece en ambos ejes proporcionando un mejor ajuste aparente dado que la descarga de sedimentos se calcula como el producto entre Q_w y C_s (Morris y Fan, 1997).

Diversos autores han expuesto que el uso de curvas de transporte de sedimento subestima la carga de sedimento dadas las importantes dispersiones que generalmente exponen los datos producto de las variaciones en el suplemento de sedimento por efectos estacionales, condiciones antecedentes en las cuencas, y diferencias en la disponibilidad de sedimento al inicio o al final de una creciente (histéresis) (Asselman, 2000; Hu et al., 2011), por lo que se ha afirmado que estas curvas capturan la tendencia de los datos pero no reproducen la variabilidad natural de la concentración de sedimentos (Restrepo, 2005).

Para considerar lo anterior se han empleado diversos métodos como el uso de curvas ajuste diferentes a la potencial específicamente curvas polinomiales de segundo y tercer grado (Horowitz, 2003), en conjunto con agrupaciones y regresiones al interior del conjunto de datos total para diferentes períodos de tiempo y estaciones del año (Hu et al., 2011; Wang et al., 2008), condiciones de El Niño/Oscilación del Sur (Duque Marín et al., 2006) y rangos de caudales (Morris y Fan, 1997).

Igualmente, se han desarrollado propuestas para mejorar la capacidad de predicción de la curva de regresión potencial. Ejemplos de ello son la creación de un factor de corrección basado en el error estándar de la ecuación de regresión (Ferguson, 1986), método que ha sido ampliamente utilizado y estudiado desde su formulación pero se ha reportado que en algunos casos provoca sobreestimación en las cargas calculadas (García, 2008). En el caso en donde se presenta histéresis se ha propuesto un factor de corrección que considera la inclinación de las ramas ascendentes y descendentes de las hidrógrafas en eventos de creciente simples (Eder et al., 2010), y otras propuestas que consideran la introducción en la curva de transporte de factores que toman en cuenta la disminución de sedimentos en diferentes períodos climáticos y los cambios inter e intra anual de sedimentos (Restrepo, 2005).

Sobre el uso de las curvas de transporte en la estimación de concentraciones de sedimentos en suspensión a partir de series de tiempo de caudal, debe tenerse en cuenta que por lo general los aforos corresponden a condiciones instantáneas de concentración de sedimento y de caudal, y que al aplicar relaciones $C_s - Q_w$ a series de caudales medios diarios podría subestimarse la concentración de sedimentos hasta en un 50% en corrientes donde los cambios diarios de caudal no reflejen los picos de descarga (Morris y Fan, 1997).

Sobre la cantidad de sedimento que aportan las cuencas al cuerpo de agua existen diversos métodos predictivos, algunos de ellos basados en la modelación de la erosión mediante ecuaciones empíricas de regresión múltiple como la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE en su sigla en inglés) y su revisión posterior (RUSLE) (Mamede, 2008; Morris y Fan, 1997). Otros métodos se fundamentan en la teoría de la Potencia Unitaria de la Corriente (Unit Stream Power) modificada para la estimación de tasas de erosión (Yang, 2003), y también se cuenta con diversos modelos numéricos físicamente basados que tienen la capacidad de estimar la pérdida de suelo en una cuenca y su tránsito a través de la red de drenaje hasta un sitio de interés como el CASC2D-SED de Colorado State University (Julien y Rojas, 2002), el modelo TETIS de la Universidad Politécnica de Valencia (Montoya, 2008), y el modelo SWAT del USDA Agricultural Research Service (Neitsch et al., 2005).

En Colombia en las estaciones hidrométricas donde se desarrollan aforos tanto de agua como de sedimento generalmente solo se mide el sedimento transportado en suspensión y no el transportado por el fondo (o carga de lecho), razón por la cual este último se estima indirectamente como un porcentaje de los sedimentos en suspensión con valores propuestos del 10% al 20% para ríos de llanura y hasta del 50% para ríos de montaña (Ochoa, 2011; Posada y Montoya, 2000).

Diversas ecuaciones han sido desarrolladas para estimar la carga de fondo y la carga de material de fondo, valorando con ellas como capacidad de transporte la cantidad de sedimento que podría ingresar a un embalse. Estas ecuaciones se basan, en datos de laboratorio, de campo y combinaciones de ambos y en todos los casos con una gran componente empírica, siendo uno de los principales inconvenientes para su adecuada

aplicación la falta de información en las corrientes de datos de carga de fondo que permitan valorar qué expresión se ajusta de mejor forma al caso de estudio (García, 2008). En la **Tabla 1-1** se exponen algunas de dichas expresiones las cuales se encuentran incluidas en el modelo GSTARS4 el cual es la base de este trabajo.

Tabla 1-1: Funciones de transporte de sedimento implementadas en GSTARS4 y su tipo (B=carga de lecho, BM=carga material del lecho). Modificada de (Yang y Ahn, 2011)

ECUACIÓN	TIPO	RANGO VALIDEZ	FUENTE
DuBoys (1879)	B	-	-
Meyer-Peter and Muller (1948)	B	Ancho del canal 0.15m - 2m	(García, 2008)
		Profundidad del agua 0.01 m-1.2m	(García, 2008)
		Pendiente línea de energía 0.04%-2%	(García, 2008)
		Diámetro de la partícula 0.40mm-30mm	(García, 2008)
		Diámetro cincuenta 2.0mm-32mm	(U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)
Laursen (1958)	BM	Diámetro de la partícula 0.011mm-4.08mm	(Maza y García, 1996)
		Diámetro cincuenta 0.0625mm-2mm	(U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)
Laursen modificado por Madden (1993)	BM	-	-
Toffaletti (1969)	BM	Profundidad del agua 0.05m-15.24m	(Maza y García, 1996)
		Diámetro de la partícula 0.30mm-0.93mm	(Maza y García, 1996)
		Diámetro cincuenta 0.25mm-32mm	(U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)
Engelund y Hansen (1972)	BM	Diámetro de la partícula 0.19mm-0.93mm	(García, 2008)
		Número de Reynolds asociado a la velocidad cortante y al diámetro cincuenta $Re \geq 12$	(Maza y García, 1996)
		Método para arenas con diámetro cincuenta mayores a 0.15mm	(Maza y García, 1996)
		Diámetro cincuenta 0.0625mm-2mm	(U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)
Ackers y White (1973)	BM	Diámetro de la partícula 0.040mm-4.94mm	(García, 2008)
		Diámetro cincuenta 0.0625mm-2mm	(U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)
Ackers y White (HR Wallingford, 1990)	BM	Diámetro de la partícula 0.040mm-28.0mm	(Maza y García, 1996)
		Número de Froude ≤ 0.8	(Maza y García, 1996)
Yang (1973) + Yang (1984) Yang (1979) + Yang (1984)	BM	Diámetro de la partícula 0.063mm-2.0mm	(García, 2008)
		Diámetro de la partícula 0.063mm-2.0mm	(García, 2008)
		Diámetro de la partícula 150mm-1710mm	(Maza y García, 1996)
		Ancho del canal 0.134m - 532m	(Maza y García, 1996)
		Profundidad del agua 0.01m-15.20m	(Maza y García, 1996)
		Pendiente línea de energía 0.0043%-2.79%	(Maza y García, 1996)
		Caudales $0.076\text{m}^3/\text{s}$ - $13000\text{m}^3/\text{s}$	(Maza y García, 1996)
Diámetro cincuenta 0.0625mm-32mm	(U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)		
Parker (1990)	B	Diámetro de la partícula 18.0mm-28.0mm	(García, 2008)
Yang et al. (1996)	BM	-	-
Ashida y Michiue (1972)	BM	-	-
Tsinghua University (IRTCES, 1985)	BM	Específica para eventos de flushing de sedimentos en embalses chinos	(Yang y Ahn, 2011)

1.4 Eficiencia de atrapamiento y compactación del material sedimentado

No todo el sedimento que ingresa a un embalse se deposita en su interior, parte del mismo alcanza a ser evacuado por las estructuras de captación, vertimiento y descarga de fondo. La relación entre la cantidad de sedimento depositado y el total del sedimento que ingresó al embalse se denomina eficiencia de atrapamiento, y depende principalmente de la velocidad de caída de las partículas de sedimento, la morfometría del embalse, la tasa del flujo a través del mismo y la posición de las estructuras de salida (Toniolo y Schultz, 2005; Yang, 2003).

La evaluación de la eficiencia de atrapamiento en embalses se ha desarrollado a partir de modelos empíricos y numéricos. De los primeros se destacan por su uso difundido a nivel mundial en etapas de diseño, los métodos basados en las curvas de Churchill y de Brune. La primera relaciona la eficiencia de atrapamiento con la razón entre el tiempo de retención del agua y su velocidad media al interior del embalse (denominado índice de sedimentación del embalse), mientras que la curva de Brune relaciona el sedimento atrapado con el cociente entre volumen de capacidad total y el caudal de entrada medio anual (Julien, 2010; Morris y Fan, 1997; Sánchez, 1996).

La curva de Churchill es adecuada para pequeños embalses en zonas semi-áridas mientras que la curva de Brune se recomienda para grandes almacenamientos (Yang, 2003). Esta última ha sido modificada con una nueva ecuación de regresión para acoger sedimentos con mayores diámetros a los considerados en la propuesta original mejorando el desempeño del método para dicho tipo de sedimentos (Jothiprakash y Garg, 2008).

Modelos numéricos unidimensionales también han sido empleados para evaluar la eficiencia de atrapamiento y su relación con la posición de las estructuras de salida, teniendo en cuenta tanto la formación y progresión del delta fluvial, como la existencia de corrientes de turbiedad y su llegada hasta la presa (Toniolo y Schultz, 2005; Toniolo, 2009; Toniolo et al., 2007).

La densidad del material depositado en términos de la masa seca por unidad de volumen se usa para convertir el sedimento que ingresó al embalse de masa a volumen y viceversa cuando se trata de estimar la producción de sedimento de una cuenca. Para el sedimento grueso con tamaños superiores a los 0.1 mm el peso específico seco de la mezcla permanece prácticamente constante, mientras que para las fracciones finas (limos y arcillas) su peso específico seco varía con el tiempo debido a la tasa de consolidación del material, a la exposición al aire (ciclos de secado), a la forma como se opera el embalse, el espesor del depósito, y a la textura y tamaño de las partículas de sedimento (Julien, 2010; Yang, 2003).

En los casos en que no se cuenta con mediciones al interior del embalse del peso específico seco del material depositado es factible emplear propuestas de origen empírico ampliamente reportadas en la literatura especializada, las cuales parten de clasificar la operación del embalse en cuatro tipos (**Tabla 1-2**). Una vez se ha definido el número de operación del embalse la densidad inicial del sedimento depositado puede ser estimada empleando la ecuación (1.2) donde W_0 es el peso específico seco inicial (kg/m^3); p_c , p_m y p_s son los porcentajes de arcilla, limo y arena respectivamente del sedimento entrante, y W_c , W_m y W_s son los pesos específicos secos iniciales de la arcilla, el limo y la arena respectivamente (Ahn, 2011; Yang, 2003), los cuales se encuentran disponibles en tablas con valores recomendados (Julien, 2010; Morris y Fan, 1997).

Tabla 1-2: Clasificación de la operación el embalse (Ahn, 2011)

Numero de operación	Operación del embalse
1	Sedimento siempre sumergido o casi sumergido
2	Vaciado del embalse de normalmente moderado a considerable
3	Embalse normalmente vacío
4	Sedimentos del lecho del río

La ecuación (1.3) propone un método para estimar la densidad del sedimento del embalse después algún tiempo de operación, donde W_T es el peso específico seco de una mezcla de material después de T años de operación, y K es un factor de

consolidación (kg/m^3) tabulado según el tipo de operación del embalse y el material (arena, limo, arcilla) y que se estima en el caso de una mezcla de sedimento a través de la suma de los valores de K para cada fracción de sedimento ponderados por su porcentaje dentro de la mezcla (Julien, 2010; Yang, 2003).

$$(1.2) \dots\dots\dots W_0 = W_C * p_C + W_m * p_m + W_S * p_S$$

$$(1.3) \dots\dots\dots W_T = W_0 + 0.4343 * K * \left(\frac{T - \ln(T)}{T - 1} - 1 \right)$$

Se recomienda utilizar la anterior metodología de forma separada en la zona riverina y en el cuerpo principal del embalse (zona transicional y lacustre), pues la primera zona se clasifica fácilmente con un número de operación 4 mientras que la porción restante puede tomar alguno de los números especificados (Ahn, 2011).

1.5 Distribución del sedimento al interior de un embalse, modelos empíricos y numéricos

En la literatura especializada se han encontrado básicamente dos líneas para estimar la distribución del sedimento que se deposita al interior de un embalse en un período de tiempo. Una línea basada en la simulación numérica del proceso de sedimentación que emplea modelos en una, dos y tres dimensiones dependiendo de la complejidad y características específicas del embalse (o cadena de embalses), y otra que emplea métodos empíricos.

El método empírico de Área-Reducción fue desarrollado por el U.S. Bureau of Reclamation en el año de 1960 con base en medidas de 30 embalses con capacidades entre los $1.36 \text{Hm}^3 - 38547 \text{Hm}^3$ con revisión posterior en 1962. Considera en su estructura que la distribución del sedimento al interior de un embalse que depende de: 1) la operación del cuerpo de agua, 2) la textura y tamaño del sedimento, 3) la forma del embalse y 4) el volumen de sedimento depositado en el embalse.

Este método emplea en su desarrollo una serie de curvas de distribución del sedimento (cuatro) que dependen de la clasificación del embalse (tipo lago, de planicie de inundación o de pie de montaña, de colina, o de cañada) y de la clase de operación del mismo (sedimento sumergido, moderadamente vaciado, considerablemente vaciado y normalmente vacío) (Sánchez, 1996; U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006; Yang, 2003).

Anterior al método Área-Reducción se desarrolló el método Área-Incremento pero la experiencia del U.S. Bureau of Reclamation demostró que el mismo no tenía la capacidad de representar la heterogeneidad que se presentaba en el modelo de sedimentación de los embalses de una ubicación a otra; solución que se logró mediante la inclusión de las curvas de distribución del sedimento y el desarrollo del método Área-Reducción (Morris y Fan, 1997).

La desventaja de los métodos empíricos radica principalmente en su corto rango de aplicación, pues los mismos se ven restringidos a las condiciones en las cuales fueron recreados que, por lo general, son disímiles a las predominantes en los sitios en los cuales se desean aplicar.

Como alternativa para obviar las limitaciones de los métodos empíricos se ha desarrollado y difundido en gran medida el uso de modelos numéricos (matemáticos) basados en procesos, los cuales posibilitan tanto la reproducción de situaciones observadas en campo como la prueba de hipótesis sobre escenarios probables o extremos que no han sido medidos o que no han ocurrido aún en el embalse en estudio. Este hecho los convierte en una poderosa herramienta de apoyo tanto a la gestión como a la investigación teórica y aplicada.

Las experiencias del uso de modelos numéricos son amplias en la literatura por lo que se expondrán brevemente algunas de ellas que se estima son de interés presentar en este trabajo. El detalle matemático se expondrá en numerales posteriores exclusivamente para los modelos hidrológicos e hidráulicos empleados en esta investigación.

El modelo HEC-6 fue empleado en el lago Mead (Presa Hoover, Estados Unidos de América) para modelar el avance del delta de sedimentos, y logró capturar de forma adecuada la forma y evolución del delta fluvial pero no logró reproducir el comportamiento del depósito de fondo pues el modelo no considera el efecto del transporte de sedimento por efecto de corrientes de densidad (Spalletti y Brea, 2005).

Situación similar se reporta para aplicaciones del modelo unidimensional SOBEK (Sloff, 1997). En ambos casos el transporte de sedimento a causa de las corrientes de densidad era uno de los procesos dominantes en el proceso de sedimentación que escapaba al alcance de los modelos empleados.

Observando la limitación antes descrita común en los modelos comerciales y públicos unidimensionales que tienen la posibilidad de emplearse en el estudio de la sedimentación en embalses (González et al., 2005), se han generado una serie de importantes contribuciones al modelamiento unidimensional transitorio de este tipo de fenómenos considerando conjuntamente el depósito fluvial y la acción de las corrientes de turbiedad (actuando éstas específicamente como corrientes de fondo), que han mostrado desde la reproducción de situaciones de laboratorio tener gran potencial para capturar la complejidad de fenómeno de sedimentación incluida la eficiencia de atrapamiento. Sin embargo no se encontró una comparación exhaustiva contra casos a escala real (García, 2008; Kostic y Parker, 2003a; Toniolo, 2009; Toniolo et al., 2007).

Mención especial merece la modelación cuasi-bidimensional disponible en el modelo GSTARS v.4.0, el cual a partir de la teoría de tubos de corriente, disipación de energía mínima y potencia unitaria de la corriente, logra estimar la variación transversal en procesos de erosión-sedimentación (transferencia de sedimento entre tubos), y ha mostrado en su versión más reciente la capacidad de modelar cuerpos de agua con configuraciones complejas y procesos de flushing de sedimento en cadenas de embalses considerando simulaciones en estados cuasi-permanente y transitorio (Ahn, 2011).

En los casos en donde el área mojada varía significativamente en función del nivel del agua, en donde la topografía sea irregular con grandes secciones y donde se presenten procesos alternos de secado y mojado ocasionado por sequías o la operación del

embalse, deberán preferirse modelos bi o tridimensionales (Campos, 2001; Masis-Jiménez y Fukuoka, 2002).

Se destaca la capacidad reportada de modelos bidimensionales promediados en la profundidad para reproducir de forma adecuada el desarrollo de corrientes de densidad al interior de embalses (Mohammadnezhad y Shamsai, 2007), y los inconvenientes reportados en la aplicación de modelos tridimensionales ocasionados por la gran exigencia de información de soporte que requieren. Ejemplos de ello se tienen en la aplicación del modelo noruego SSIIM y en la gran incertidumbre que encerraron las simulaciones de flushing de sedimento que con él fueron realizadas en un embalse Costarricense atribuido la calidad de los datos del sedimento de entrada y de la cohesión de los mismos, elementos que mostraron grandes efectos en los resultados finales (Hoven, 2010). Igualmente el uso del modelo Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC) en el embalse Tahtali en Izmir (Turquía) reportó importantes problemas en su aplicación debidos a la escasa capacidad que se tuvo en dicho trabajo de medir correctamente los vientos dada la configuración topográfica de la zona que circunda el embalse (Çaliskan, 2008).

2. Modelación numérica unidimensional de la sedimentación en un embalse

Muchos de los modelos de transporte de sedimento empleados en ingeniería de ríos son unidimensionales especialmente si son requeridas simulaciones en períodos largos de tiempo. Su uso se ha visto favorecido pues generalmente requieren menos cantidad de información de campo para su calibración y validación, sus soluciones son más estables y requieren menos tiempos computacionales. Aunque estos modelos no tienen la capacidad de simular fenómenos locales bi o tridimensionales, ellos pueden predecir efectivamente volúmenes y cantidades promedias en un tramo como velocidades del flujo, fricción en el lecho y concentraciones de sedimentos (Yang y Simões, 2008).

Existen diversas propuestas de modelos unidimensionales con la capacidad de simular la sedimentación en un embalse. Entre aquellos que cuentan con variados y múltiples casos de validación se destacan el modelo HEC-6 (Morris y Fan, 1997; Spalletti y Brea, 2005) y la versión más reciente (v4.1) del HEC-RAS (Beebo y Bilal, 2012) (que incluyó las capacidades del HEC-6 en lo referente a sedimentos), el modelo europeo SOBEK (Sloff, 1997), el modelo Danés MICKE 11 (Eizel-Din et al., 2010), el modelo SRH-1D (Sedimentation y River Hydraulics - One Dimensional model) del US Department of Interior Bureau of Reclamation (Russell et al., 2010), y la familia de modelos GSTARS (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation) en sus versiones 1D, 1.0, 2.0, 2.1, 3.0 y 4.0 (Sadek, 2012; Saenyi, 2003; Shooshtari et al., 2010; Simões y Yang, 2008; Tagavifar y Adib, 2010; Valizadegan et al., 2009).

Se destaca el GSTARS en su última versión (v.4.0 desarrollada por el Hydroscience and Training Center de Colorado State University) (Yang y Ahn, 2011), ya que adicional a las capacidades específicas para la simulación de embalses que tenía en su versión 3.0 se le incluyeron nuevos desarrollos que le permiten realizar simulaciones hidrodinámicas en estado transitorio, desarrollar intercambios de agua y de sedimento con tributarios,

considerar variaciones espaciales de la densidad del sedimento, manejar flujos con altas cargas de sedimento, nuevas opciones para la gradación del sedimento en la frontera aguas arriba, y nuevos elementos para considerar transporte de sedimento en estado de no-equilibrio. Todo, lo anterior le ha proporcionado a este modelo una gran habilidad para simular embalses con configuraciones físicas y operativas complejas, con especial énfasis en la evaluación de procesos de flushing de sedimento (Ahn, 2011).

En los siguientes numerales se exponen diferentes aspectos relacionados con la modelación numérica unidimensional del tránsito de caudales y sedimentos al interior de un embalse con énfasis en los fundamentos teóricos del modelo hidrodinámico unidimensional GSTARS4 el cual fue la base del presente estudio.

2.1 Tránsito de caudal a través de un embalse

El tránsito de caudales es un procedimiento que busca determinar el tiempo y la magnitud del caudal en un punto de un sistema empleando hidrogramas conocidos o supuestos en uno o más sitios aguas arriba. Si el flujo es una creciente se conoce como tránsito de crecientes, mientras que cuando el tránsito se realiza de forma agregada (en función únicamente del tiempo para un sitio específico) se conoce algunas veces como tránsito hidrológico, y cuando se hace de forma distribuida en el sistema se conoce como tránsito hidráulico (Chow y Maidment, 1994). En los numerales siguientes se exponen elementos característicos de dichas metodologías que fueron empleados en este trabajo.

2.1.1 Tránsito hidrológico

El tránsito de piscina nivelada es un método para calcular el hidrograma de flujo de salida de un embalse con una superficie de agua horizontal, dado su hidrograma de entrada y sus características de almacenamiento-caudal de salida. En este método, la entrada $I(t)$, la salida $Q(t)$ y el almacenamiento $S(t)$ se relacionan por la ecuación de conservación de masa (ecuación (2.1)), que se integra en un intervalo de tiempo Δt dado y reorganizando se obtiene la expresión (2.2) (forma de diferencia finita) donde los valores del flujo de entrada al inicio y al final de j -ésimo intervalo son I_j e I_{j+1} respectivamente, los

correspondientes valores de caudal de salida son Q_j y Q_{j+1} , y $S_{j+1} - S_j$ es el cambio de almacenamiento en el intervalo de tiempo dado si la variación de los caudales de entrada y de salida es aproximadamente lineal (Chow y Maidment, 1994; Subramanya, 2009). El tránsito hidrológico es más simple en embalses que en ríos pues las relaciones almacenamiento-descarga para sus estructuras de salida (tuberías, orificios y vertederos) es independiente del caudal de entrada (Bedient et al., 2007).

$$(2.1) \dots\dots\dots \frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t)$$

$$(2.2) \dots\dots\dots \left(\frac{2S_{j+1}}{\Delta t} + Q_{j+1} \right) = (I_j + I_{j+1}) + \left(\frac{2S_j}{\Delta t} - Q_j \right)$$

Los resultados de este método deben de tomarse con cautela pues el asumir la condición de superficie libre horizontal se ajusta de mejor forma a un embalse tipo lago que a un embalse encañonado, ya que el remanso en este último puede superar la hipótesis de horizontalidad.

2.1.2 Tránsito hidráulico

El tránsito hidráulico de caudales a través de un embalse parte en el caso de modelos unidimensionales centrados en procesos longitudinales de la representación geométrica del mismo mediante secciones transversales al sentido preferencial del flujo, pudiendo ser la separación de dichas secciones regular o no. Esta representación del cuerpo de agua ha sido mejorada mediante la inclusión en algunos modelos de la posibilidad de trabajar con un número dado de tubos de corriente, proporcionándoles la capacidad de acercarse de una mejor forma a definir características hidráulicas particulares presentes en cierta parte de la sección (Yang, 2008).

Por definición una línea de corriente es una línea conceptual donde el vector de velocidad del fluido es tangente a cada punto en ella y en cada instante de tiempo; los tubos de corriente son tubos conceptuales cuyas paredes son definidas por líneas de corriente donde el caudal de agua es constante a lo largo del tubo pues el fluido no

traspasa las fronteras del mismo, y la velocidad a lo largo del tubo de corriente es inversamente proporcional al área de la sección transversal del mismo (**Figura 2-1**).

Luego el uso de estos tubos permite definir características hidráulicas específicas que posibilitan evaluar condiciones de erosión o depositación a lo ancho de cada sección transversal. Por lo anterior los modelos que basan su funcionamiento en estos tubos son denominados por algunos autores como cuasi-bidimensionales aunque es necesario aclarar que ellos no tienen la capacidad de evaluar corrientes secundarias ni sobre elevación del flujo en curvas (Yang y Simões, 2008; Yang, 2003).

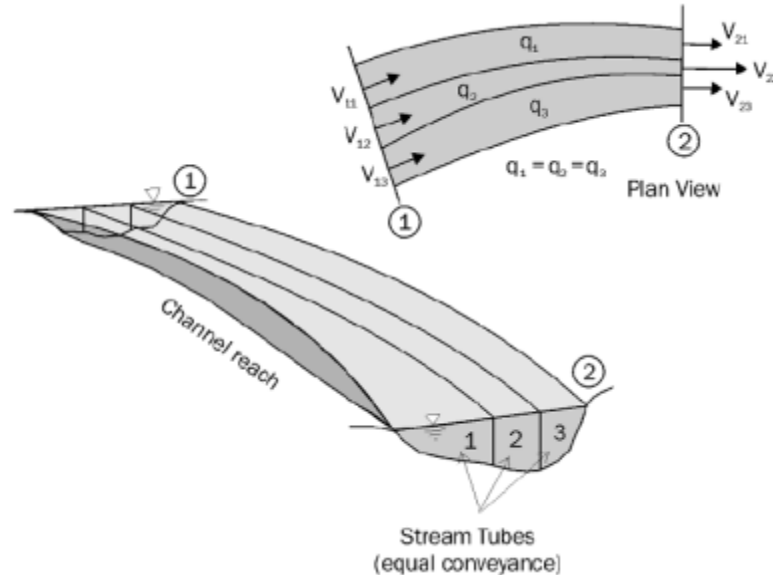


Figura 2-1: Representación del uso de los tubos de corrientes por el modelo GSTARS (Yang y Simões, 2008)

- Cálculo en flujo permanente

En el caso del cálculo en flujo permanente se soluciona la denominada ecuación de energía (ecuación (2.3)). Esta ecuación es válida si la pendiente del fondo del canal es pequeña (menor al 5%) siendo posible asumir la distribución hidrostática de presiones. Los cálculos se desarrollan en un estado cuasi-permanente del flujo ya que no se emplea

un caudal constante en el tiempo sino una serie de pasos en las hidrógrafas donde en cada uno de ellos se desarrolla el cálculo en flujo permanente (**Figura 2-2**).

$$(2.3) \dots\dots\dots z + Y + \alpha_v \frac{V^2}{2g} = H$$

Donde z es la elevación del lecho, Y la profundidad del agua, V la velocidad del flujo, α_v el coeficiente de distribución de la velocidad, H la elevación de la línea de energía por encima del datum, y g la aceleración de la gravedad

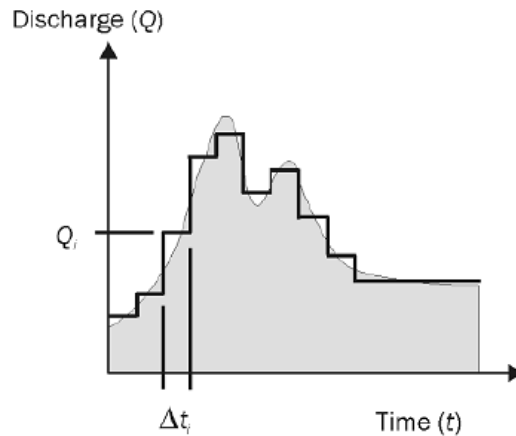


Figura 2-2: Representación de una hidrógrafa mediante series de paso de caudal constante y duración finita (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006)

La ecuación (2.3) se resuelve por ensayo y error mediante el método del paso estándar (Julien, 2002) el cual es común en diversos paquetes computacionales, donde en dicho proceso iterativo la profundidad inicial se estima mediante la ecuación (2.4).

$$(2.4) \dots\dots\dots Z = \check{Z} - \frac{H - \check{H}}{1 - \check{F}_r (1 \mp 0.5 C_L) \mp \frac{3\check{h}_f}{2R}}$$

Donde Z es la elevación de la superficie del agua, Fr el número de Froude, R el radio hidráulico, h_f las pérdidas por fricción, C_L el coeficiente de pérdida de energía, y los

elementos \check{Z} , \check{H} , \check{F}_r , \check{R} y \check{h}_f corresponden a los valores calculados desde las suposiciones iniciales del proceso iterativo (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006).

Para el caso específico de un embalse se han implementado ciertas modificaciones al método del paso estándar, pues el caudal en una sección se estima mediante un factor de peso promedio entre el caudal de entrada y el de salida del embalse (el caudal que transita por cada sección transversal en un embalse varía espacialmente en el sentido del flujo) (Yang y Ahn, 2011), donde dicho factor de peso para cada sección transversal se ha asumido como el área superficial del embalse correspondiente a cada sección transversal de la representación geométrica del mismo (**Figura 2-3**), de forma general lo anterior se expone en la ecuación (2.5).

$$(2.5) \dots \dots \dots Q_j = Q_{in} - (Q_{in} - Q_{out}) \sum_{k=1}^N a_k$$

Donde a_k corresponde a la relación A_k/A_{res} , siendo A_k el área superficial del embalse asociada a la sección k , A_{res} es el área total del embalse, Q_{in} el caudal de entrada, Q_{out} el caudal de salida, y Q_j el caudal en una sección j dada. El nivel en la presa se estima mediante el método de la piscina nivelada antes mencionado (Yang y Ahn, 2011).

- Cálculo en flujo transitorio

En el caso particular del modelo GSTARS4, para los cálculos hidráulicos en flujo transitorio se emplea el esquema numérico desarrollado en el modelo SRH-1D (un esquema implícito incondicionalmente estable) (Huang y Greimann, 2010), el cual básicamente resuelve las ecuaciones de conservación de masa en flujo unidimensional (ecuación (2.6)) y la ecuación de momentum (ecuación (2.7)), donde A_d es el área inefectiva de la sección transversal, q_{lat} el caudal por unidad de longitud del canal, t el tiempo, x la longitud en la dirección del flujo, A el área de la sección transversal, β es el coeficiente de distribución de la velocidad, Z la elevación de la superficie libre del agua, S_f la pendiente de la línea de energía definida por la ecuación (2.8), y K el factor de transporte (Yang y Ahn, 2011).

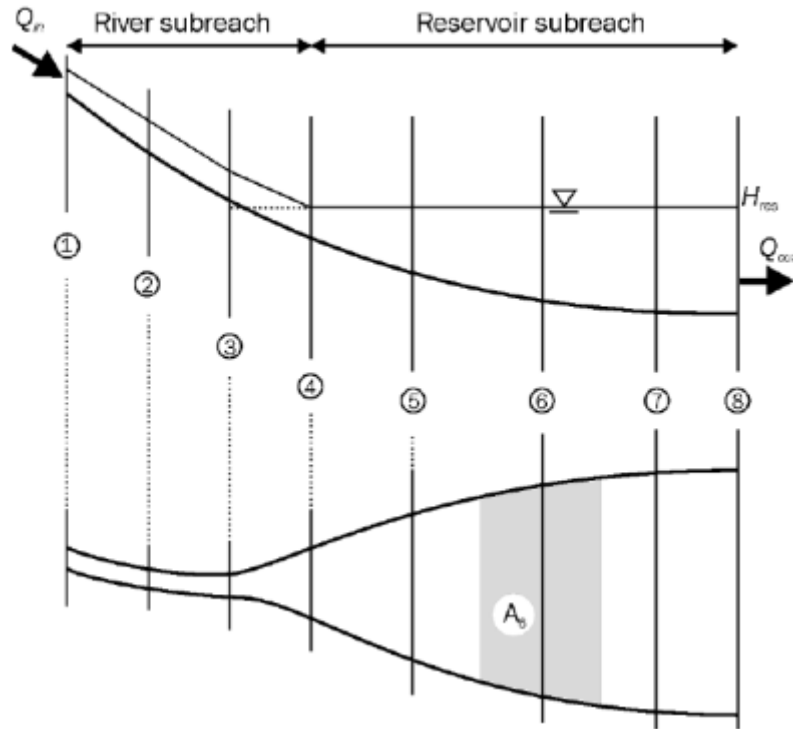


Figura 2-3: Subdivisiones de un tramo de río y de embalse en el modelo GSTARS4 (Yang y Ahn, 2011)

$$(2.6) \dots \dots \dots \frac{\partial(A+A_d)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat}$$

$$(2.7) \dots \dots \dots \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(\beta Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial z}{\partial x} = -gAS_f$$

$$(2.8) \dots \dots \dots S_f = \frac{Q|Q|}{K^2}$$

El factor de transporte K (L^3T^{-1}) puede ser estimado empleando las formulaciones de Manning (ecuación (2.9)), Chezy (ecuación (2.10)) o Darcy-Weisbach (ecuación (2.11)), donde n , C y f representan los coeficientes de rugosidad de Manning, Chezy y Darcy-Weisbach respectivamente.

$$(2.9) \dots\dots\dots Q = K S_f^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} \right) S_f^{\frac{1}{2}}$$

$$(2.10) \dots\dots\dots Q = K S_f^{\frac{1}{2}} = \left(C A R^{\frac{1}{2}} \right) S_f^{\frac{1}{2}}$$

$$(2.11) \dots\dots\dots Q = K S_f^{\frac{1}{2}} = \left(\left(\frac{8gR}{f} \right)^{\frac{1}{2}} A \right) S_f^{\frac{1}{2}}$$

2.2 Tránsito de sedimentos en un embalse

El cálculo del tránsito de sedimento al interior de un embalse tiene como base la ecuación de conservación de masa de sedimento, la cual en flujo unidimensional en estado transitorio toma la forma de la ecuación (2.12), donde η es el volumen de sedimento en una unidad de volumen de la capa del lecho (uno menos la porosidad); A_d =volumen del sedimento del lecho por unidad de longitud; A_s =volumen de sedimento en suspensión en la sección transversal por unidad de longitud; Q_s =descarga volumétrica de sedimento; y q_{lat} =flujo de sedimento entrante lateral (Yang, 2008).

$$(2.12) \dots\dots\dots \frac{\partial Q_s}{\partial x} + n \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{\partial A_s}{\partial t} - q_{lat} = 0$$

Para resolver la ecuación (2.12) modelos como el GSTARS4 emplean un esquema de diferencias finitas desacoplado que soluciona primero la hidráulica y con dichos resultados desarrolla el tránsito de sedimento y la estimación de los cambios en la elevación del lecho.

El cambio en el volumen del lecho debido a depositación o erosión (ΔA_d) se obtiene mediante la ecuación (2.13) donde T es el ancho superior de la superficie del agua, Z el cambio en la elevación del lecho (positiva agradación y negativa socavación), i el índice de la sección transversal, y a, b y c son constantes que satisfacen la relación $a+b+c=1$, al respecto valores que el modelo GSTARS4 asume por defecto como $a=c=0.25$ y $b=0.5$ (composición del perímetro mojado del tramo incluyendo con mayor peso la sección i y con igual peso a las secciones aguas arriba y aguas debajo de la misma). Sin embargo,

es posible asumir otros valores, por ejemplo si $a=c=0$ y $b=1$ implica que el perímetro mojado de la sección i es igual al de todo el tramo, y si $b=c=0.5$ y $a=0$ se tendrá un mayor peso aguas abajo del tramo (Yang y Ahn, 2011).

$$(2.13) \dots \Delta A_d = (aT_{i-1} + bT_i + cT_{i+1})\Delta Z_i$$

A partir de la ecuación (2.13) y la ecuación (2.12) se obtiene la ecuación (2.14) que permite calcular el cambio de la elevación del lecho en una sección i para cada fracción k de sedimento considerada en cada uno de los tubos de corriente utilizados, donde $Q_{s,i,k}$ es la descarga volumétrica de sedimento calculada para cada fracción de tamaño k en la sección i , y Δx_i la distancia entre las secciones i e $i+1$ (Yang y Ahn, 2011).

$$(2.14) \dots \Delta Z_{i,k} = \frac{\Delta t q_{lat}(\Delta x_i + \Delta x_{i-1}) + 2(Q_{s,i-1,k} - Q_{s,i,k})}{n_i (aT_{i-1} + bT_i + cT_{i+1})(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})}$$

La formulación anterior está sujeta a criterios de estabilidad numérica si se usan para su solución métodos numéricos explícitos, los cuales consideran la condición de equilibrio de Courant-Friedrichs-Lewy - CFL en su sigla en inglés la cual evalúa mediante el uso las ecuaciones (2.15), (2.16) para flujo transitorio y (2.17) para flujo permanente, donde β es $5/3$ si se usa la ecuación de Manning, Fr es el número de Froude, η es uno menos la porosidad, V la velocidad media del flujo, C_v la concentración del sedimento en suspensión por volumen (incluida la carga por lavado), b es el coeficiente específico en un sitio para la determinación de la relación entre el caudal y el transporte de sedimento (mediciones indican que $3 < b < 7$), y C_{eu} es la velocidad de la onda cinemática computacional de los cambios del lecho con una simulación en flujo transitorio (Ahn, 2011).

$$(2.15) \dots |C_{eu}| \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

$$(2.16) \dots C_{eu} = -\frac{bVC_v}{n} * \frac{(\beta-1)}{1-(\beta-1)^2 Fr^2}$$

$$(2.17) \dots C_{eu} = \frac{bVC_v}{n} * \frac{1}{1-Fr^2}$$

2.2.1 Transporte de sedimentos en condiciones de no equilibrio

Es una práctica común el asumir que la carga del material de fondo es igual a la capacidad de transporte de sedimento del flujo, condición conocida como transporte en condición de equilibrio. Sin embargo, en el caso de un embalse donde el efecto de retraso del flujo tanto espacial como temporal es de importancia el transporte de sedimento se realiza en una condición de no-equilibrio (Ahn, 2011).

Modelos especializados en la simulación de procesos de sedimentación en embalses como el GSATR4 han considerado dicha situación mediante la inclusión de formulaciones como la expuesta en la ecuación (2.18) para cada fracción de sedimento no cohesivo considerada (partículas con tamaños superiores a las 62.5 μm), donde C_i es la concentración de sedimento transportado en la sección transversal i , $C_{t,i}$ la capacidad de transporte de sedimento calculada para la sección i desde formulaciones como las presentadas en la **Tabla 1-1**, q la descarga de flujo por unidad de ancho, Δx la distancia entre secciones transversales, ω_m la velocidad de caída de una partícula en un flujo cargado de sedimento, y α el factor de recuperación adimensional.

En el caso de que las velocidades de sedimentación sean grandes debido al tamaño del sedimento, el segundo y tercer término del lado derecho de la ecuación (2.18) serían numéricamente poco significativos tendiendo los resultados a una condición de transporte en equilibrio. Esta es la razón por la cual aunque dicha formulación fue desarrollada originalmente para transporte de sedimento en suspensión se considera funciona de forma razonable en la simulación de la carga del material del lecho (Yang, 2008; Yang y Simões, 2008).

$$(2.18) \dots C_i = C_{t,i} + (C_{i-1} - C_{t,i-1}) \exp\left[-\frac{\alpha\omega_m\Delta x}{q}\right] + (C_{t,i-1} - C_{t,i}) \left[-\frac{q}{\alpha\omega_m\Delta x}\right] \left[1 - \exp\left(-\frac{\alpha\omega_m\Delta x}{q}\right)\right]$$

Un elemento importante en los cálculos en un esquema de transporte en condición de no equilibrio es el Δx , pues se ha encontrado que los efectos de la condición de no equilibrio

varían con la distancia computacional empleada para una misma condición hidráulica y de tamaños del sedimento (Yang y Simões, 2008).

El valor de α para un grupo de sedimento de tamaño k es función de la velocidad media del flujo, de la velocidad cortante y de su velocidad de caída. Aunque existen aproximaciones empíricas para estimar su valor a partir de resultados de experimentos en laboratorio (Ahn, 2011), mediante calibración de relaciones entre α y el tamaño de sedimento k como la expuesta en la ecuación (2.19) (Yang y Marsooli, 2010) (donde ε y ξ son los parámetros calibrados característicos de un sitio), y recomendaciones puntuales de valores de 0.25 para depositación y 1.0 para erosión (Han, 1980), no hay un consenso sobre qué valor debería utilizar un modelador para diferentes condiciones de flujo y de sedimento (Ahn, 2011), razón por la cual su estimación se ha realizado como parte del proceso de calibración de los modelos donde ha sido empleado (Yang y Ahn, 2011).

(2.19)...
$$\alpha_k = \frac{\varepsilon}{d_k \xi}$$

Dado que las partículas de sedimento de mayor tamaño poseen velocidades de caída mayores y es más difícil que sean resuspendidas por acción de la turbulencia, sus correspondientes valores de α son pequeños en comparación a los de las partículas más finas sobre las cuales el efecto de la condición de no equilibrio es mayor (Yang y Marsooli, 2010).

2.2.2 Capacidad de transporte del sedimento cohesivo

El transporte del sedimento cohesivo al interior de un embalse es un problema de difícil solución, ya que el mismo no depende solo de las propiedades de sus partículas sino también de las condiciones del medio como el pH, la salinidad, temperatura, composición mineral, contenido orgánico y diversos procesos biológicos. La gran cantidad de parámetros involucrados y su particularidad asociada a un sitio específico, sumado a un deficiente entendimiento de los procesos involucrados, hace que su implementación en

modelos numéricos sea poco difundida (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006).

Modelos como el GSTAR4 emplean el método de Ariathuari – Krone para el transporte de sedimentos cohesivos a partir de los esfuerzos para erosión en masa (τ_{cr1}) y de partículas (τ_{cr2}) de limos y arcillas.

La ocurrencia de erosión o depositación es controlada por el valor del esfuerzo cortante en el lecho (τ_b), cuando el mismo no supere un umbral crítico dado para los tamaños que componen el limo y la arcilla (τ_{cd}), éste se depositará.

En la familia de modelos GSTARS se emplea la integración de la expresión (2.20) para representar dicha depositación de forma separada para limos y arcillas, donde C es la concentración promediada en la profundidad, h la profundidad del agua, ω_s la velocidad de sedimentación de las partículas (donde se tiene en cuenta una sedimentación en condición sin sedimentos o con una concentración alta de los mismos, y procesos de floculación), y P es el parámetro que representa la probabilidad de depositación según la ecuación (2.21)(Yang y Ahn, 2011; Yang y Simões, 2008).

$$(2.20) \dots\dots\dots \frac{dC}{dt} = - \frac{P\omega_s C}{h}$$

$$(2.21) \dots\dots\dots P = \begin{cases} 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} & \text{cuando } \tau_b < \tau_{cd} \\ 0 & \text{cuando } \tau_b \geq \tau_{cd} \end{cases}$$

En el caso de sedimento cohesivo, dos valores de umbral de erosión pueden definirse: la erosión superficial o erosión por partículas (τ_{cr2}) que se refiere a la condición en que las partículas individuales o agregados comienzan a ser removidos de la superficie de un lecho de sedimento cohesivo y la erosión de masa (τ_{cr1}) que ocurre a valores más altos de esfuerzo de cizallamiento y se caracteriza por la movilización de aglutinaciones grandes de sedimento del lecho.

El umbral o condición crítica para el movimiento del sedimento sin cohesión puede estimarse utilizando la relación lineal entre el esfuerzo cortante del lecho (τ_b) y tamaño de grano propuesta por Julien (1995). Se sugiere igualmente un valor de 0.785 veces el D50 promedio en mm como un valor razonable, siempre y cuando se cumpla que el $D_{50} > 0.3$ mm (Morris y Fan, 1997)

El umbral para erosión superficial τ_{cd} puede estimarse a partir de la ecuación (2.22, donde ρ_{wb} representa la densidad húmeda del sedimento para mezclas de arena y limos. Los valores de los coeficientes 0.883, 0.2 y 0.05 obedecen a las recomendaciones de Hwang y Mehta, 1989 (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006).

$$(2.22) \dots \tau_{cd} = 0.883 * (\rho_{wb} - \rho_a)^{0.2} + 0.05$$

3. Caso de estudio

3.1 Generalidades

El embalse de Porce II se encuentra localizado en el nordeste del departamento de Antioquia a los 6°47'09"Norte y 75°06'51"Oeste (X=884487.24, Y=1'242164.76, origen Bogotá) (**Figura 3-1**), en los municipios de Amalfi, Gómez Plata y Yolombó (Empresas Públicas de Medellín, 2008).

El principal afluente del embalse es el río Porce cuya cuenca al sitio de la presa posee un área de drenaje de aproximadamente 3020 km². Adicionalmente confluyen al embalse una serie de quebradas siendo las más importantes en términos de su área de drenaje la quebrada Guaduas (12.88 km²) y la quebrada La Cancana (42.19 km²) (**Figura 3-1**) (Empresas Públicas de Medellín, 2005)

El embalse inició su llenado el 19 de Febrero de 2001 con un volumen total inicial de 272.06 Mm³ (111.38 Mm³ de volumen útil y 160.68 Mm³ de volumen muerto). A Julio de 2002 su volumen estimado fue de 231.16 Mm³ con una pérdida de volumen de 40.9 Mm³ (de los cuales 15.2 Mm³ corresponden al volumen útil) y en este último año el área del espejo de agua fue estimada en 9.31 km² (Empresas Públicas de Medellín, 2005).

La presa es del tipo mixta en Concreto Compactado con Rodillo (CCR) y en tierra que acoge parte de la de concreto hacia la margen derecha. El vertedero se encuentra adosado a la presa y es controlado por cuatro compuertas radiales de 11 m de ancho por 14 m de altura, las cuales en conjunto tienen la capacidad de evacuar 5960 m³/s. El nivel de la cresta del vertedero es el 911.40 m con un nivel de operación normal de 922.70 m, un nivel del azud de la captación de 900.40 m y un nivel máximo operativo de 924.50 m, (Empresas Públicas de Medellín, 2008).

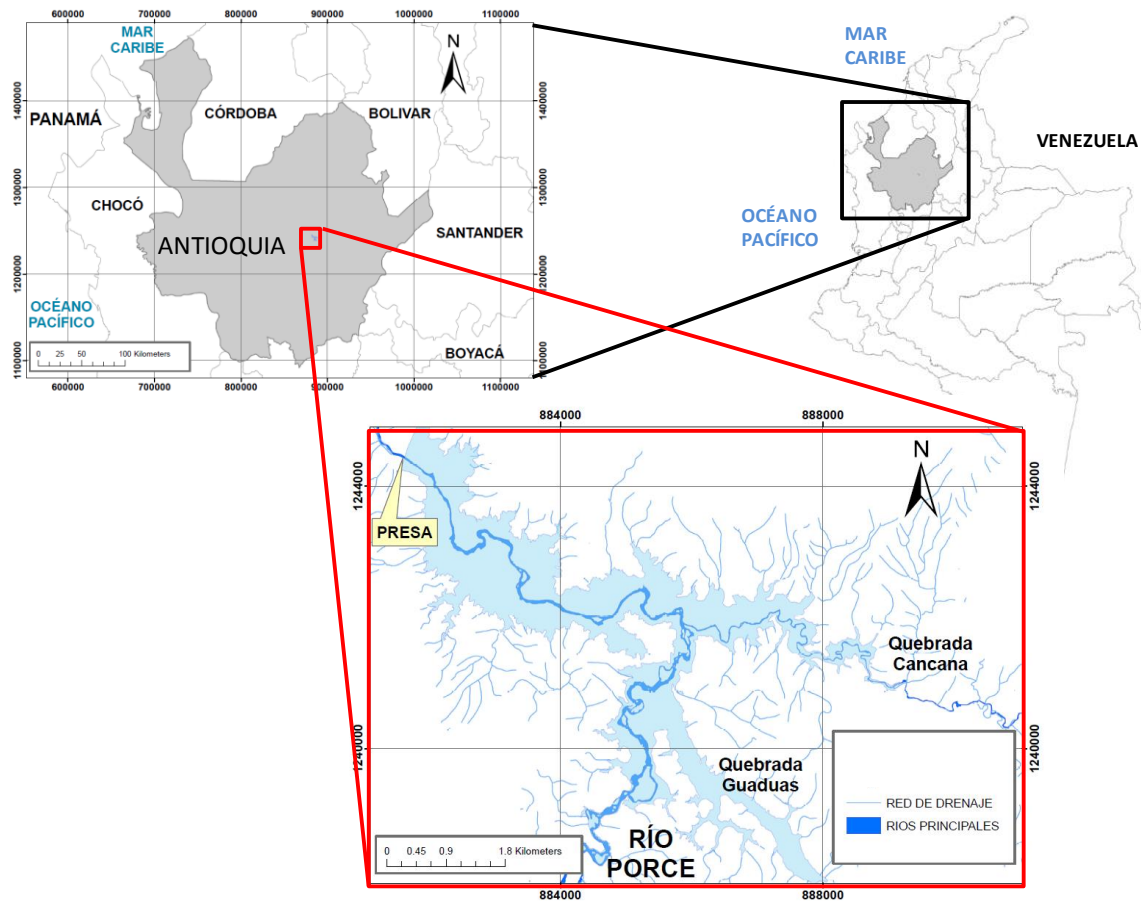


Figura 3-1: Ubicación general embalse Porce II

El agua captada en la presa es de uso exclusivo para generación hidroeléctrica mediante la central Porce II, la cual posee una capacidad instalada efectiva de 405 MW (tres unidades Francis generadoras de 135 MW que utilizan, cada una, un caudal de 67.7 m³/s) (Empresas Públicas de Medellín, 2008, 2005).

3.2 Información disponible

Para el desarrollo de la presente investigación se contó con información batimétrica, hidrológica y operativa del embalse suministrada por Empresas Públicas de Medellín, y la información de las campañas de campo realizadas entre los años 2010 y 2012 para el

programa de investigación “Estudio de las condiciones ambientales de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico”, desarrollado de forma conjunta por diversos grupos de investigación de la Universidad de Antioquia y el posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, en convenio con Empresas Públicas de Medellín.

En la **Tabla 3-1** se presenta la información climatológica, hidrológica y operativa empleada en este estudio con su respectiva resolución temporal y períodos disponibles. De las estaciones de medición usadas, la estación limnigráfica PP-2-A El Diamante localizada sobre el cauce principal del río Porce 9 km aguas arriba de la entrada al embalse (**Figura 3-2**), y ante la ausencia de tributarios de importancia en dicho recorrido fue considerada como la que representa los principales caudales afluentes al embalse. En esta estación se cuenta, igualmente, con registros de aforos de sedimento en suspensión como se presenta en la **Tabla 3-2**.

La estación PP2, El Mango, actualmente ubicada en la presa, registra los niveles del agua en el embalse y diferentes parámetros climatológicos. Esta estación funcionaba antes del llenado del embalse directamente sobre el cauce principal del río Porce (**Figura 3-2**), y en ella se tiene la información histórica de aforos de sedimento en suspensión consideradas en este estudio (**Tabla 3-2**).

Empresas Públicas de Medellín cuenta con registros históricos de sedimentos en suspensión en otras estaciones sobre el río Porce, además de las antes mencionadas (RMS – 15 Gabino, PP-1 Bodega Vieja, y La Salada), sin embargo, se emplearon solo los registros de El Diamante y de El Mango ya que se consideró que la primera es representativa de la producción de carga en suspensión de la cuenca hasta la entrada en el embalse, y la segunda posee información adicional de los afluentes que además del río Porce llegan directamente al embalse.

Tabla 3-1: Información hidrológica y operativa

VARIABLE	ESTACIÓN o SITIO	Resolución	período (AAAA/MM/DD)
Caudales de entrada río Porce	PP-2A-EL DIAMANTE	diaria	2001-2008
		30 minutos	2009/11/01 - 2012/05/31
Caudales descarga Porce II	Descarga Porce II	diaria	2001-2008
		30 minutos	2009/11/01 - 2010/06/29
Caudal turbinado		Horario	2010/01/01 - 2010/12/31
		diaria	2011/01/01 - 2012/04/30
Caudal vertido	Vertedero	diaria	2010/01/01 - 2010/12/31 2011/01/01 - 2011/12/31
Niveles sitio de presa	El Mango	diaria	2001-2008
		30 minutos	2009/11/01 - 2012/05/31

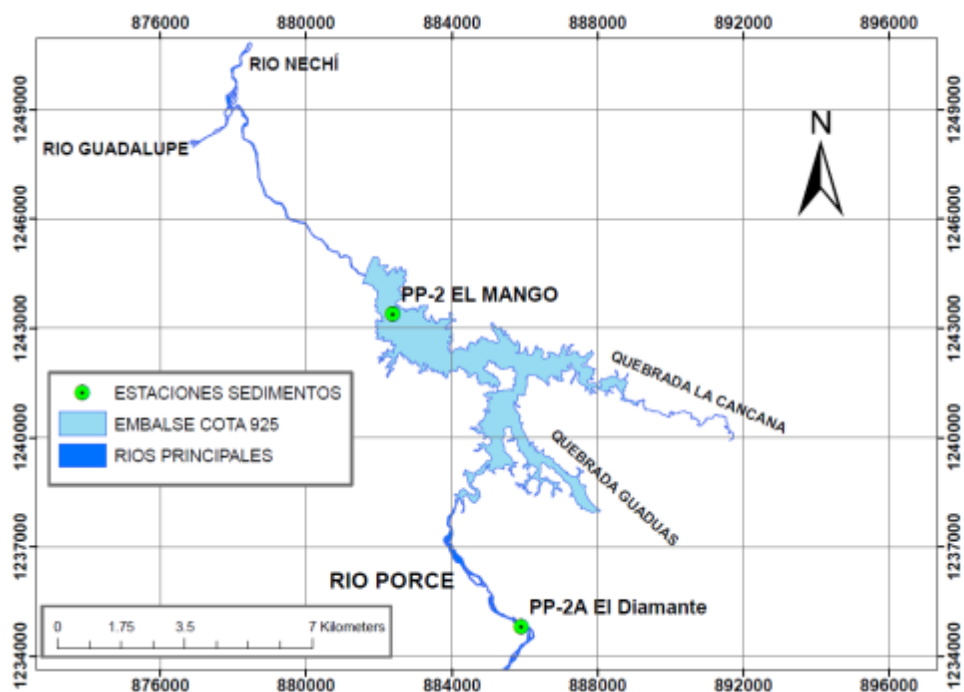
**Figura 3-2:** Estaciones hidrométricas

Tabla 3-2: Información aforos de caudal y de sedimentos en suspensión

ESTACIÓN	PERÍODO	Nº DE AFOROS	VARIABLES
PP2-EL MANGO	1989-2000	103	Nivel del agua, caudal, concentración de sedimentos, ancho, profundidad media, radio hidráulico, temperatura
PP2A EL DIAMANTE	1995-2010	72	Hasta el año 2005 (Nivel del agua, caudal, concentración de sedimentos, ancho, profundidad media, radio hidráulico, temperatura), posteriormente solo caudal y concentración de sedimentos

Se dispuso de información batimétrica de los años 2001 (levantada a junio del 2001 y complementada en una pequeña zona en julio del 2002), 2004 (finalizada hacia el mes de septiembre) y 2007 (realizada entre el 17 de Octubre y el 24 de Noviembre) (**Figura 3-3**, **Figura 3-4** y **Figura 3-5**, respectivamente), realizada con un sistema de sondeo batimétrico conformado por un equipo de posicionamiento global – GPS, una ecosonda digital y un microcomputador portátil dotado con un software especializado (Empresas Públicas de Medellín, 2005).

En las figuras antes mencionadas los modelos digitales fueron construidos con la zona de información común entre ellas para facilitar comparaciones posteriores entre batimetrías ya que en cada uno de los períodos de medición se presentan variaciones en su extensión debidos principalmente al nivel del embalse y a la presencia de parches de macrófitas, que en conjunto o individualmente impidieron el acceso a todos los sitios del embalse cada vez.

Mención especial merece la batimetría del año 2007, ya que presentaba vacíos en tres zonas del cuerpo principal del embalse debido a la presencia de plantas macrófitas flotantes que no permitieron el levantamiento de puntos (óvalos negros en la **Figura 3-5**), estos baches fueron complementados con información batimétrica del año 2004 para dar continuidad a la interpolación de los modelos digitales, en la construcción del modelo hidráulico se tuvo especial cuidado de no incluir puntualmente en el mismo secciones transversales obtenidas en dichas zonas.

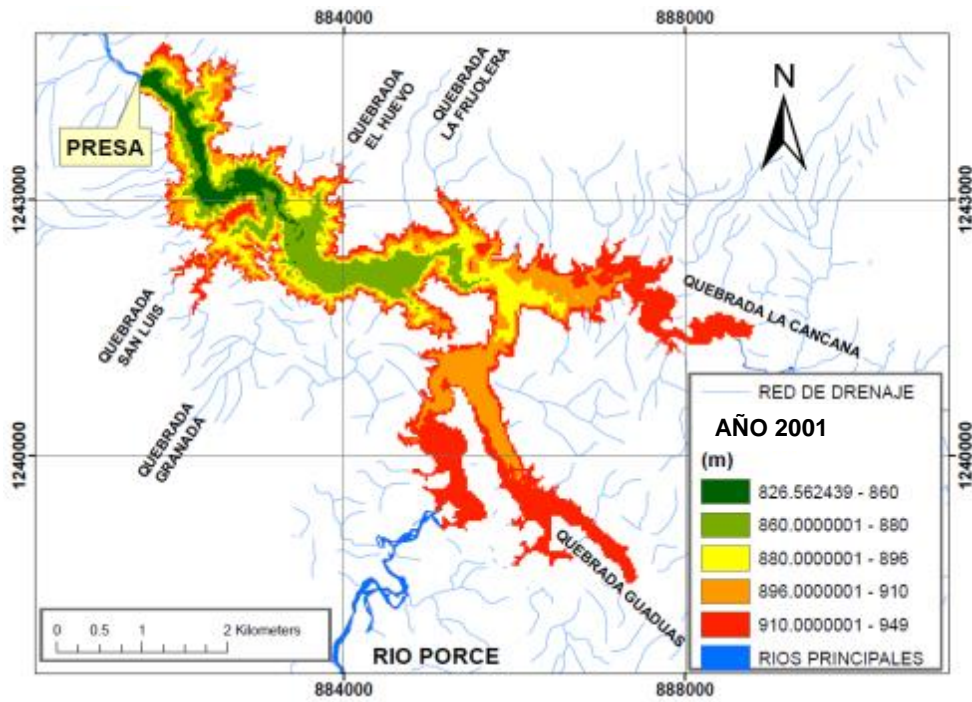


Figura 3-3: Mapa raster batimetría año 2001

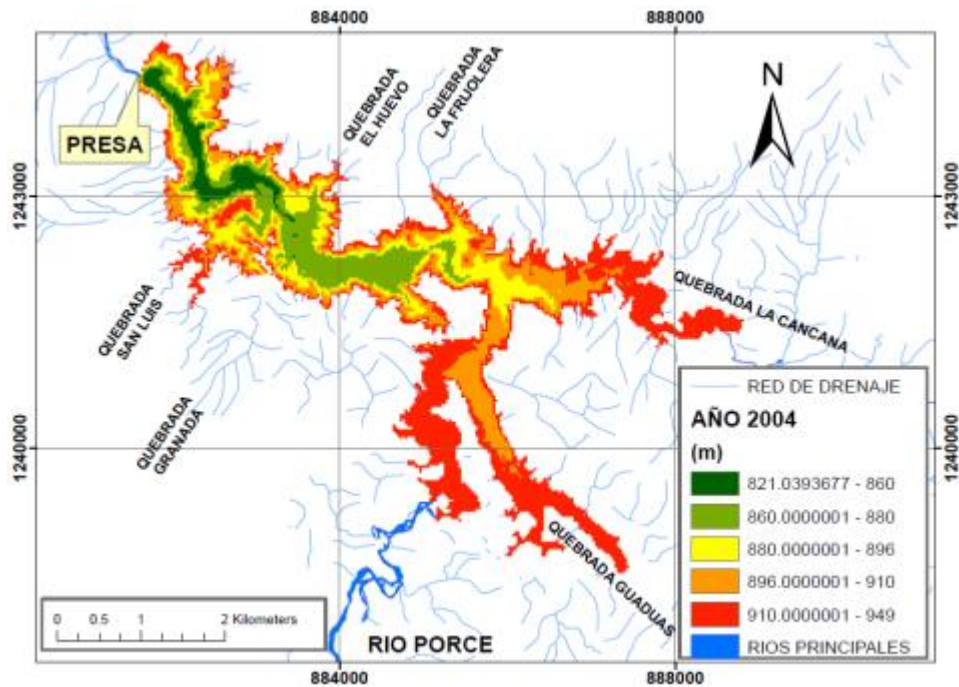


Figura 3-4: Mapa raster batimetría año 2004

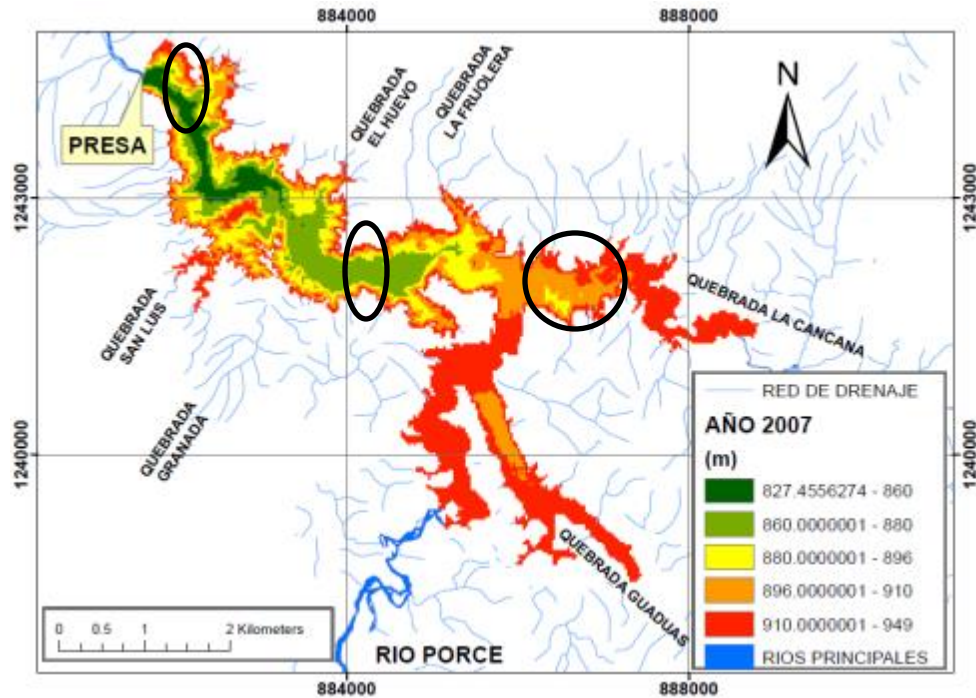


Figura 3-5: Mapa raster batimetría año 2007

Adicionalmente, se contó con curvas de nivel cada 5 m de la zona circundante al embalse, esta información conjuntamente con las batimetrías, permitieron generar modelos topográficos que incluyeron el conjunto embalse – zonas aledañas, que fueron insumo en la generación de secciones transversales del cañón completo para la modelación hidráulica, permitiendo con ello evaluar niveles del agua superiores a los representados por los dominios de las batimetrías.

Del programa de investigación “Estudio de las condiciones ambientales de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico”, se obtuvo información de la temperatura a lo largo de la columna de agua y de la granulometría superficial de fondo del embalse levantada durante ocho campañas en 12 estaciones de muestreo localizadas en la zona del río Porce y en las quebradas La Cancana y Guaduas (**Figura 3-6**), cuyos períodos de medición se presentan en la **Tabla 3-3**.

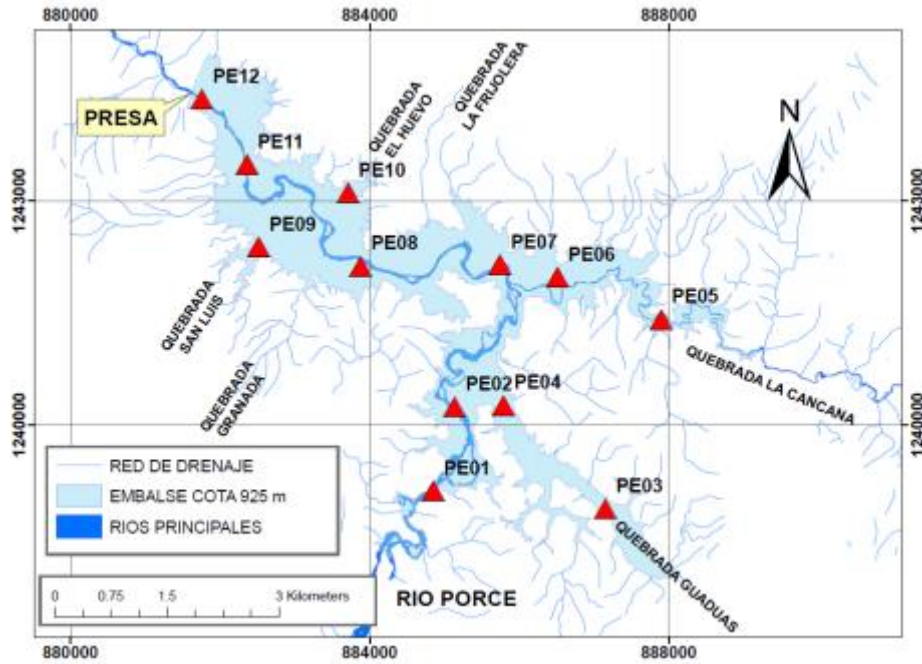


Figura 3-6: Estaciones de muestreo Programa Embalses UNAL-UdeA

Tabla 3-3: Información de las campañas de medición de variables Programa Embalses UNAL-UdeA

IDENTIFICACIÓN	PERÍODO
Campaña 1	Abril 12 a 16 de 2010
Campaña 2	Julio 13 a 16 de 2010
Campaña 3	Noviembre 29 a diciembre 3 de 2010
Campaña 4	Abril 4 a 8 de 2011
Campaña 5	Agosto 29 a septiembre 2 de 2011
Campaña 6	Noviembre 21 a 25 de 2011
Campaña 7	Febrero 6 a 9 de 2012
Campaña 8	Mayo 14 a 18 de 2012

Las muestras granulométricas fueron tomadas en campo y procesadas en laboratorio por personal de la Universidad de Antioquia participante en el proyecto de investigación antes mencionado. En la toma de muestras se empleó una draga tipo Ekman – Birge (adecuada para lechos blandos) conformada por una cubeta extractora con capacidad para penetrar hasta 0.2 m en el sedimento. A estas muestras les fue determinada su composición granulométrica usando los procedimientos establecidos en las normas ASTM-D421-85 y ASTM-D422-63 y clasificados granulométricamente de acuerdo con el Unified Soil Classification System (Universidad de Antioquia y Universidad Nacional de Colombia, 2011).

Las temperaturas del agua junto con otras variables fisicoquímicas fueron tomadas por personal de la Universidad Nacional de Colombia participante en el proyecto de investigación antes indicado, con un perfilador tipo CTD el cual posee una tasa de adquisición de datos de 8 Hz (8 datos por segundo).

4. Métodos

4.1 Análisis de la información disponible

Se partió de la recopilación y del análisis de la información existente de batimetrías, caudales (afluentes y efluentes), niveles del agua en el sitio de presa, temperatura del agua, historial de la concentración de sedimentos en suspensión que ingresan al embalse y la distribución de tamaños del material superficial de lecho del embalse.

Con el fin de valorar el patrón de sedimentación al interior del embalse en su sentido longitudinal y transversal, así como los volúmenes sedimentados y las variaciones en la capacidad del mismo, se realizó un análisis temporal conjunto de la evolución del “thalweg”, de las secciones transversales y de las curvas cota-volumen tanto del río Porce como de sus afluentes Guaduas y La Cancana.

Los elementos necesarios para desarrollar lo anterior fueron obtenidos mediante el uso de la información batimétrica disponible (representada como TIN - Triangular Irregular Networks), en conjunto con el programa HEC-GEORAS para extracción de la información desde el modelo digital del terreno, y del HEC-RAS empleado en la optimización del número de puntos mínimo en las secciones para representar correctamente las mismas.

Los volúmenes sedimentados entre las temporadas en las que existen mediciones batimétricas junto con sus áreas de depósito y erosión, fueron estimados mediante la diferencia entre modelos digitales del terreno empleando la herramienta “TIN Difference” del toolbox 3D Analyst de Arcgis. Se definieron los polígonos donde un modelo digital estaba sobre, por debajo o a igual cota que el otro, estableciendo para dichas áreas los volúmenes correspondientes a cada caso.

Los datos faltantes en los registros hidrológicos y operativos en el embalse fueron complementados empleando el método de la piscina nivelada (numeral 2.1.1), al igual que la curva cota-volumen construida para el embalse con la batimetría 2001 para complementar los registros en el período 2001-2002, la curva obtenida de la batimetría 2004 para complementar el período 2003-2005, y la curva de la batimetría 2007 para llenar los faltantes entre los años 2006-2007.

Las series temporales resultantes fueron analizadas mediante el uso de histogramas de frecuencia como herramienta descriptiva de las mismas. Estos análisis buscan estudiar la magnitud y tasa de variación del nivel del agua en la presa.

Para estimar la carga de sedimento en suspensión que ingresa al embalse se empleó la relación caudal líquido - concentración de sedimento en suspensión evaluada mediante el ajuste de una curva de transporte de sedimento (ver numeral 1.3), utilizando la información de aforos líquidos y sólidos de las estaciones El Mango y El Diamante, bajo la hipótesis de que la primera representa el sedimento acarreado por el río Porce hacia la zona del embalse incluyendo el aporte de las corrientes que tributan directamente al lago, y la segunda sólo la carga de sedimento del río Porce sin los tributarios.

La distribución de tamaños de material superficial del lecho (entre los 0.10 m a 0.20 m al interior del lecho) en el cuerpo principal del embalse (cañón del río Porce) y en los otros tributarios mayores (quebradas Guaduas y La Cancana), se obtuvo de las muestras recogidas entre los años 2010-2012 en las campañas del Programa Embalses UNAL-UdeA (Universidad Nacional, Universidad de Antioquia). La ubicación de las estaciones de muestreo y los períodos correspondientes se presentaron en el numeral 3.2.

Ante la falta de información granulométrica en el embalse en los períodos en donde se realizaron los levantamientos batimétricos (años 2001, 2004 y 2007), se asumió ésta a partir de las distribuciones granulométricas mencionadas en el párrafo anterior, descritas a través de sus diámetros característicos (D10, D16, D50, D84 y D90), forma de las curvas granulométricas, y distribución espacial y temporal mediante diagramas de cajas y bigotes.

Igualmente se analizaron los datos de temperatura del agua empleando la información obtenida mediante el uso del perfilador CTD (Conductivity, Temperature, and Depth en su sigla en inglés) en las campañas y ubicaciones relacionadas en la **Tabla 3-3** y en la **Figura 3-6**, junto con la información histórica de temperatura de los afloros de sedimento en suspensión de las estaciones El Mango y El Diamante.

4.2 Simulación numérica

Como base para la simulación numérica se empleó el protocolo propuesto en (Morris y Fan, 1997) complementado en algunos de sus aspectos como se expone a continuación.

4.2.1 Definición del propósito de la modelación, alcance y metodología

Con base en el análisis de la información disponible, se definieron los objetivos del estudio que guiaron las actividades de modelación. En esta actividad se identificaron elementos como las restricciones en la información y se definieron las herramientas a utilizar, con la premisa de no adicionar complejidad de forma innecesaria al problema.

4.2.2 Construcción del modelo, sensibilidad y calibración

El modelo se construyó con la información batimétrica disponible, igualmente se impusieron las condiciones de frontera y los forzantes correspondientes a partir de la información de series de tiempo de variables operativas, de caudales (afluentes y efluentes) y del sedimento que ingresa al embalse y que conforma el lecho del mismo.

Como función de valoración del ajuste del modelo a los datos medidos se empleó el parámetro estadístico RMSE (Root Mean Square error en su sigla en inglés) aplicado a las cotas del thalweg definidas según las secciones transversales empleadas y al volumen total sedimentado al final del período de simulación numérica. Se seleccionó dicho estadístico dado su uso generalizado en procesos de calibración de diversos modelos hidráulicos e hidrológicos (Francés et al., 2007) así como en aplicaciones previas del GSTAR (Ahn, 2011).

El RMSE se valoró en el caso del thalweg en tres zonas del embalse, correspondientes a la entrada del río, a la zona del frente del delta y la zona cercana a la presa e igualmente, teniendo en cuenta todo el perfil, esto con el fin de evaluar el grado de ajuste en cada zona y su peso en la valoración total del error de ajuste.

El proceso de análisis de sensibilidad (a los parámetros numéricos y físicos del modelo y a algunos forzantes) se apoyó en el uso de la metodología GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimator) implementada en el programa de libre acceso para labores investigativas MCAT (Monte Carlo Analysis Tools) (Wagener et al., 2004), utilizando como base para el muestreo una función de distribución de probabilidad uniforme ante el desconocimiento de la función específica tanto de los parámetros del modelo como de los forzantes (Rankinen et al., 2006; Shen et al., 2011).

La sensibilidad de cada parámetro se analizó parcialmente usando los conceptos del análisis generalizado de sensibilidad (Camacho, 2006), en conjunto con diagramas de dispersión en los cuales los parámetros individuales de cada realización de Monte Carlo se graficaron contra los valores de la función objetivo (o la medida de confiabilidad representada por los valores de RMSE antes mencionados).

Partiendo del análisis de sensibilidad, se realizaron experimentos numéricos variados con el fin de estimar los parámetros y ajustes a los forzantes finales necesarios para obtener una calibración satisfactoria en términos de las medidas del error de ajuste antes mencionadas.

4.2.3 Verificación del modelo

Los parámetros del modelo obtenidos durante el proceso de calibración fueron verificados con el fin de evaluar si el modelo tiene la capacidad de representar el prototipo de forma confiable empleando un grupo de datos independiente al utilizado en el proceso de calibración. La valoración del grado de ajuste se realizó con la medida de error antes mencionada.

4.2.4 Simulación predictiva

El modelo calibrado y verificado se empleó en la simulación de ciertos eventos hidrológicos extremos pertenecientes al historial del embalse considerandos en conjunto con diferentes situaciones operativas relacionadas con el nivel del agua (mayores eventos registrados de ascenso y descenso), con el fin de evaluar la variación geométrica de la estructura del delta fluvial de sedimento, específicamente en lo concerniente al desplazamiento del punto pivote y a las pendientes del “foreset” y del “topset” según el esquema expuesto en la **Figura 1-2**.

5. Análisis de la información previa disponible

5.1 Estudios relacionados

En lo referente a la hidrodinámica del embalse Porce II existen una serie de estudios precedentes que corresponden a tres tesis de maestría en el área de Ingeniería de Recursos Hidráulicos y un trabajo de grado en Ingeniería Civil realizados por estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, trabajos que han sido enfocados a la modelación tridimensional y unidimensional de los procesos físicos dominantes en el embalse con énfasis en el entendimiento de la estructura térmica del mismo.

Los primeros trabajos (años 2004 y 2007) se enfocaron en el estudio de la estructura térmica del embalse Porce II a través de la implementación del modelo hidrodinámico tridimensional ELCOM en un ambiente de información escasa. La primera de las investigaciones (Villegas, 2004) permitió el establecimiento de una metodología apropiada y sistemática para la realización del análisis de sensibilidad y de calibración del modelo y aunque la metodología mostró suficiencia y pertinencia, la investigación no contó con el apoyo de información de campo adecuada que permitiera obtener resultados concluyentes respecto a la estructura térmica y el movimiento del agua al interior del embalse. Se destaca entre las hipótesis expuestas por el autor al finalizar su estudio, el importante papel que los ciclos de llenado y vaciado del embalse tienen en la dinámica térmica de las capas inferiores del embalse, pues dichas variaciones en la temperatura hacia el fondo podría influir en el transporte de los sedimentos entrantes al embalse vía los cambios en la densidad del agua que se puedan dar, y su influencia en la velocidad de sedimentación de las partículas.

Partiendo de elementos identificados en el estudio anterior, se logró una mejora en los resultados del modelo ELCOM y en el entendimiento del efecto del viento en la estructura térmica del embalse al estudiar más a fondo el papel del viento teniendo en cuenta su

forma distribuida, variante en el tiempo, en el cuerpo de agua (Ramos, 2007). Pese a lo anterior, se mantuvieron las limitaciones de información de campo por lo cual solo se logró la calibración del modelo y no fue factible validar el mismo en condiciones diferentes a las de calibración. Este estudio expuso en sus conclusiones finales el importante efecto que los ciclos diarios de radiación y del viento tienen en la estructura térmica, especialmente este último en los períodos de estiaje.

Empleando el modelo unidimensional DYRESM se desarrolló un análisis de sensibilidad del modelo a diferentes forzantes y parámetros del mismo (Correa, 2010; Ortega et al., 2010), estudio que mostró la importancia de la temperatura del río Porce en la estructura térmica del embalse y la gran sensibilidad que este modelo mostró a esta variable.

Los trabajos antes expuestos no trataron de forma específica elementos relacionados con el movimiento del agua al interior del embalse, o con la forma como se comportan los afluentes al ingresar al cuerpo de agua en conjunto con los materiales por ellos transportados, tanto por la calidad de la información que tuvieron disponible como por el alcance de los trabajos.

Intensivos muestreos de campo con adquisición de información climatológica en diversos puntos del embalse, empleando también un perfilador tipo CTD con una tasa de adquisición de información de 8 datos por segundo de diversas variables entre ellas temperatura, conductividad, profundidad y turbidez con una resolución espacial en la vertical del orden de los 0.1 m, apoyaron el trabajo de (Largo, 2011) quien estudió con estos datos y con el uso del modelo ELCOM la variación espacio-temporal de la estructura térmica del embalse Porce II. Del trabajo anterior se destacan, para esta investigación, los elementos relacionados con la entrada del río Porce al embalse, identificados a través de la turbidez medida en campo.

Como se observa en la **Figura 5-1** (Largo, 2011) se aprecian diferentes situaciones del ingreso del río Porce al embalse representadas a través de mediciones de campo de la turbidez del agua. Los transectos (de la zona del río a la izquierda hacia la presa a la derecha) muestran al río entrando como una corriente de fondo que rápidamente se torna intrusiva entre los 20-40 metros de profundidad.

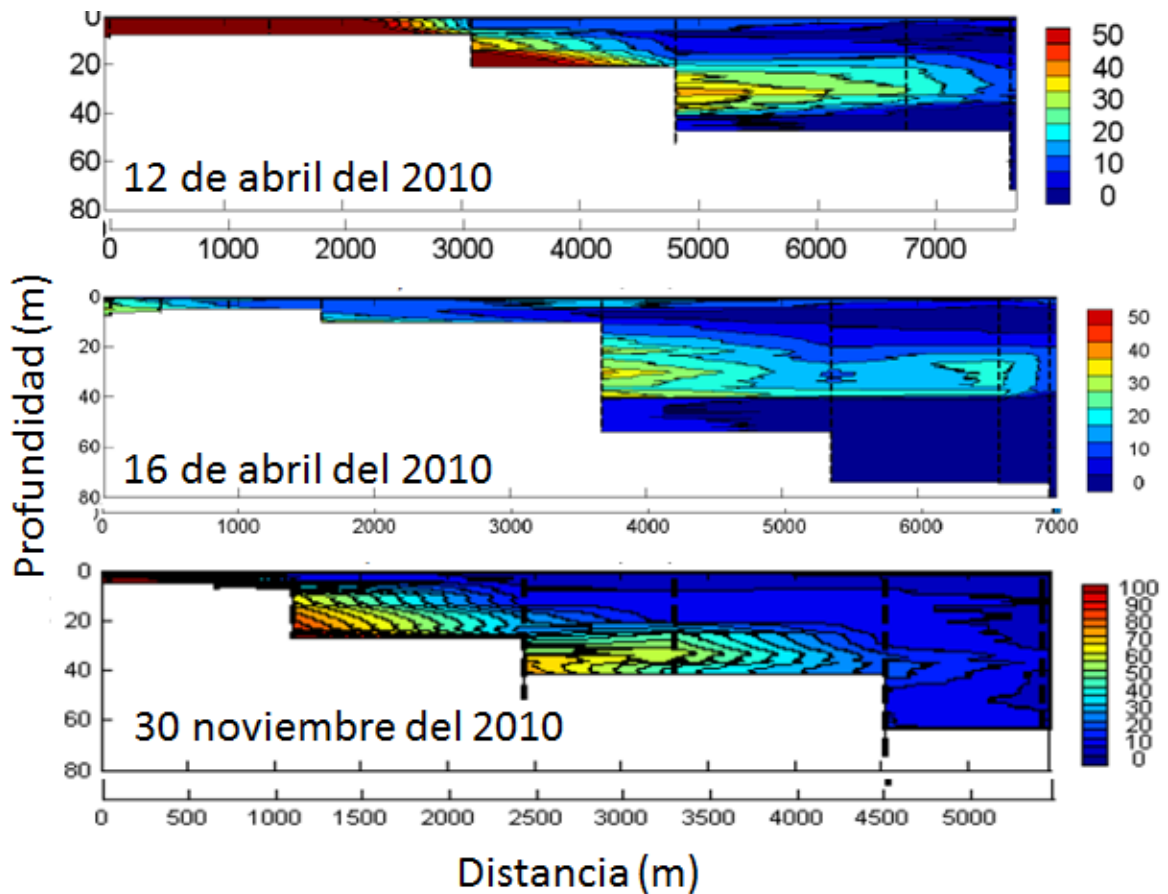


Figura 5-1: Transeptos realizados desde la entrada del río Porce has el sitio de presa (Turbidez, FTU), adaptado de (Largo, 2011)

Se observa también junto a la presa la presencia de valores de turbidez similares a los del dominio de la pluma en todos los casos presentados, aunque los valores a la entrada del embalse son diferentes en cada ocasión con valores de FTU de 50, 30 y 100 respectivamente.

La explicación puede estar en un eficiente proceso de sedimentación evidenciado durante las campañas de campo (12 de abril, 16 de abril y 30 noviembre del 2010), que produjo la depositación de un volumen significativo de la carga en suspensión en la zona riverina y de transición disminuyendo la turbidez del agua en la zona hacia la presa. Este hecho, se suma a la disminución en la concentración de sólidos suspendidos por efecto del atrapamiento por parte de la pluma del río del agua del embalse que la circunda y que posee una menor turbidez. Adicionalmente, la similitud en la turbidez en la presa expone

la posibilidad de que una gradación de material fino en suspensión está llegando hasta el muro de la presa de forma reiterada en el tiempo.

5.2 Información batimétrica

5.2.1 Zonas de depósito y de erosión

El proceso de sedimentación se observó extenso y uniforme en el periodo 2001–2004 en la zona de entrada del río Porce hasta aguas abajo de la confluencia con la quebrada La Cancana, e igualmente sobre ésta y la quebrada Guaduas (**Figura 5-2**); hacia el tramo medio del embalse la sedimentación se asoció en mayor medida al alineamiento del anterior cauce del río, y no se observó un proceso marcado de sedimentación en el sitio de presa.

Para el período 2004–2007 se evidenciaron procesos de removilización del material previamente depositado a la entrada del río Porce siguiendo el anterior cauce del mismo hasta aguas arriba de su confluencia con la quebrada Guaduas; igual proceso se observó en los cañones de las quebradas Guaduas y La Cancana especialmente en esta última (**Figura 5-3**). Sin embargo, se conserva la zona de depositación enmarcada por los sitios de confluencia con las quebradas antes mencionadas, y se aprecia un incremento en el área de depositación hacia aguas abajo de la quebrada La Frijolera, que puede estar asociado a aportes de dicha quebrada (en inspección de campo se observó que esta quebrada transporta una importante cantidad de material grueso) o al material grueso que se movilizó de la zona aguas arriba y que fue depositado en dicha área.

Para las zonas identificadas en las figuras antes mencionadas se calcularon los volúmenes de depósito y de erosión entre los años de las batimetrías, resultados que se presentan en la **Tabla 5-1**.

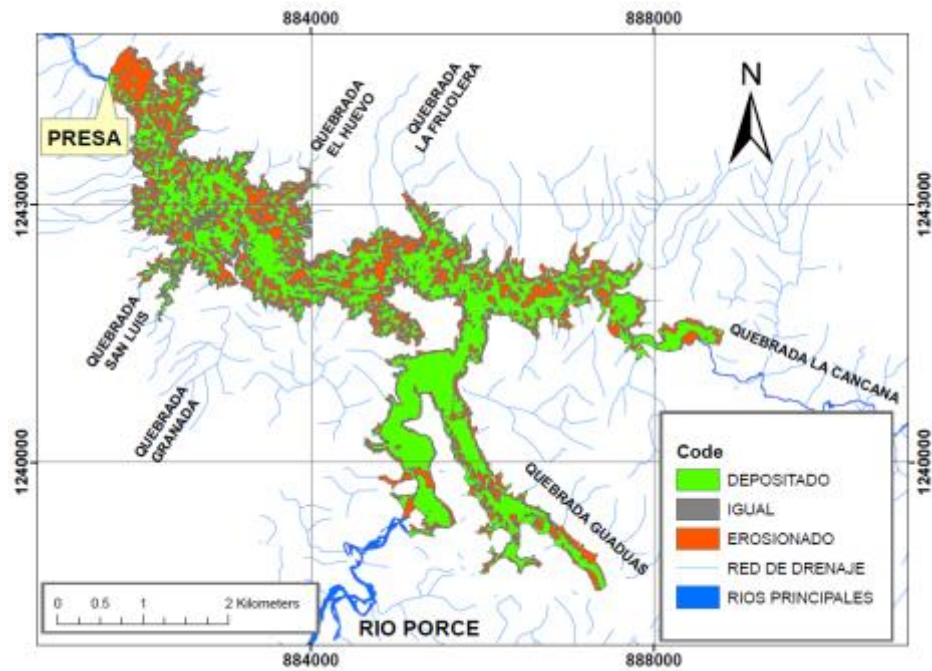


Figura 5-2: Estimación zonas de depósito y erosión entre las batimetrías de los años 2001 y 2004

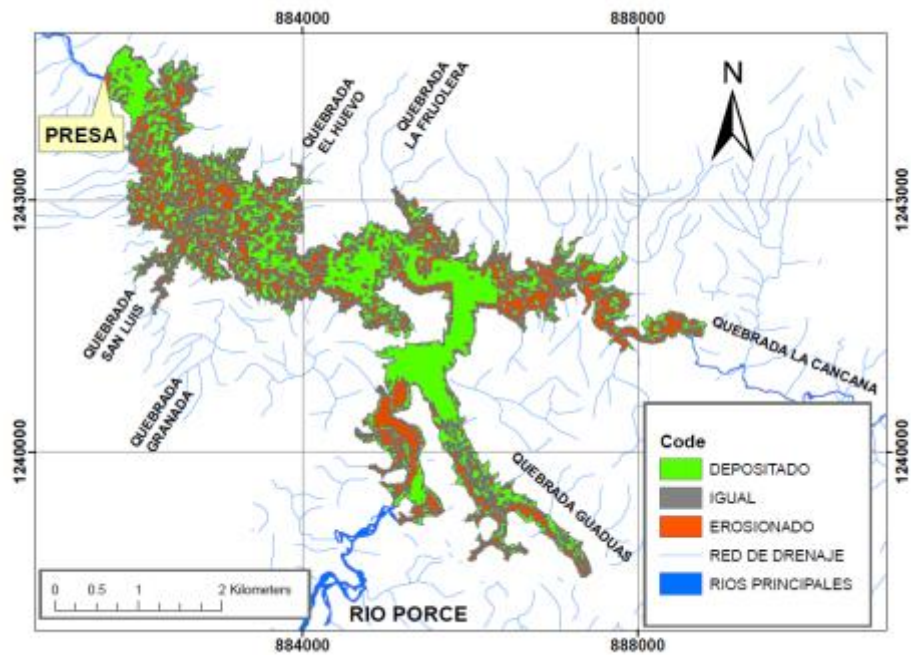


Figura 5-3: Estimación zonas de depósito y erosión entre las batimetrías de los años 2004 y 2007

Considerando que lo erosionado en un período de tiempo al interior del embalse debió ser depositado mayoritariamente dentro de él, se observa que el valor neto del volumen depositado por acción del sedimento que ingresó por tributarios (volumen depositado menos volumen erosionado) es similar en ambos períodos en el embalse total.

Adicionalmente se apreció que la contribución del volumen neto depositado en los brazos es del orden del 17.8% del total en el período 2001-2004 pero no expone mayor variación en el período 2004-2007.

Si se acepta que la mayor proporción del sedimento que se deposita en la zona inicial del embalse lo aporta el río Porce, lo mencionado anteriormente puede indicar que al inicio de la vida del embalse el sedimento se depositó fluvialmente agradando la zona comprendida entre la entrada del río Porce hasta las confluencia de las quebradas Guaduas y La Cancana, ingresando sedimento del río Porce hacia las parte bajas del cañón conformado por las quebradas, cerca de la confluencia, contribuyendo mayoritariamente a la sedimentación de los brazos de los dos afluentes antes mencionados. Dado que la pendiente del depósito fluvial hacia aguas arriba (topset) tiende a estabilizarse en el tiempo, dicha contribución hacia los brazos cesó y, en cambio, se incrementó el avance del delta hacia el interior del embalse.

Tabla 5-1: Volúmenes sedimentados obtenidos de las batimetrías de los años 2001, 2004 y 2007 por diferencia de los mapas de redes irregulares de triángulos (TIN)

ZONA	PERÍODO	EROSIÓN		DEPÓSITO		NETO DEPOSITADO POR TRIBUTARIOS
		Vol (Mm ³)	%	Vol (Mm ³)	%	Vol (Mm ³)
TOTAL EMBALSE	2001-2004	7.2206	100.00	15.4928	100.00	8.27
	2004-2007	6.2019	100.00	14.9787	100.00	8.78
BRAZOS CANCANA+GUADUAS	2001-2004	2.6177	36.25	4.0940	26.43	1.48
	2004-2007	2.7464	38.04	2.7380	18.28	-0.0084

5.2.2 Estudio del “thalweg” y de las secciones transversales

De acuerdo con la **Figura 5-4** donde se presenta la evolución longitudinal del thalweg del depósito de sedimentos para los años 2001, 2004 y 2007; el patrón longitudinal de sedimentación del río Porce responde al modelo general del delta fluvial expuesto en la **Figura 1-2**, identificándose con claridad el punto de pivote, el (“foreset”) y el “topset” del delta. Sin embargo, el denominado “bottomset” o depósito asociado a los sedimentos más finos aguas abajo del frente del delta hasta la presa no se aprecia de forma clara en las dos primeras batimetrías (años 2001 y 2004), mientras en el año 2007 se observa ya un depósito especialmente hacia la presa, mostrando que de la fracción del sedimento que ingresa al embalse por el río Porce (arenas, limos) la gran mayoría se queda en el delta fluvial y solo aquella fracción correspondiente a los sedimentos muy finos viaja hacia la presa formando depósitos menores frente a la magnitud de los presentes en el delta.

Se observó que la zona de inicio del “topset” la pendiente del mismo fue del 0.19% en el año 2004 y del 0.08% en el año 2007, con cotas del punto de pivote de 910.96 m y 912.25 m respectivamente, y pendientes del frente del delta de 1.92% y 2.47%, siendo el punto de pivote el elemento que presentó variaciones importantes desplazándose hacia la presa aproximadamente 500 m en la zona comprendida entre las confluencias de las quebradas Guaduas y Cancana entre los años 2004 y 2007 a una tasa aproximada de 157.89 m/año (**Figura 5-4**).

Los anteriores valores exponen relaciones “pendiente del foreset / pendiente del topset” de 10.105 y 30.875 para los años 2004 y 2007 respectivamente. Estos valores son superiores al 6.5 empleado como referente para embalses de Estados Unidos (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006), pero cercanos a valores expuestos por Kokpinar et al. (2010), quienes expresan que es difícil establecer rangos del comportamiento de este tipo de relaciones por el gran número y la naturaleza de variables que interfieren en la formación del delta, pues el lago Mead posee valores de hasta 100.

Kokpinar et al.(2010) también hablan de velocidades de avance del delta variables, con valores reportados entre 50 m/año a 200 m/año, rango que acoge la tasa antes mencionada para el embalse Porce II.

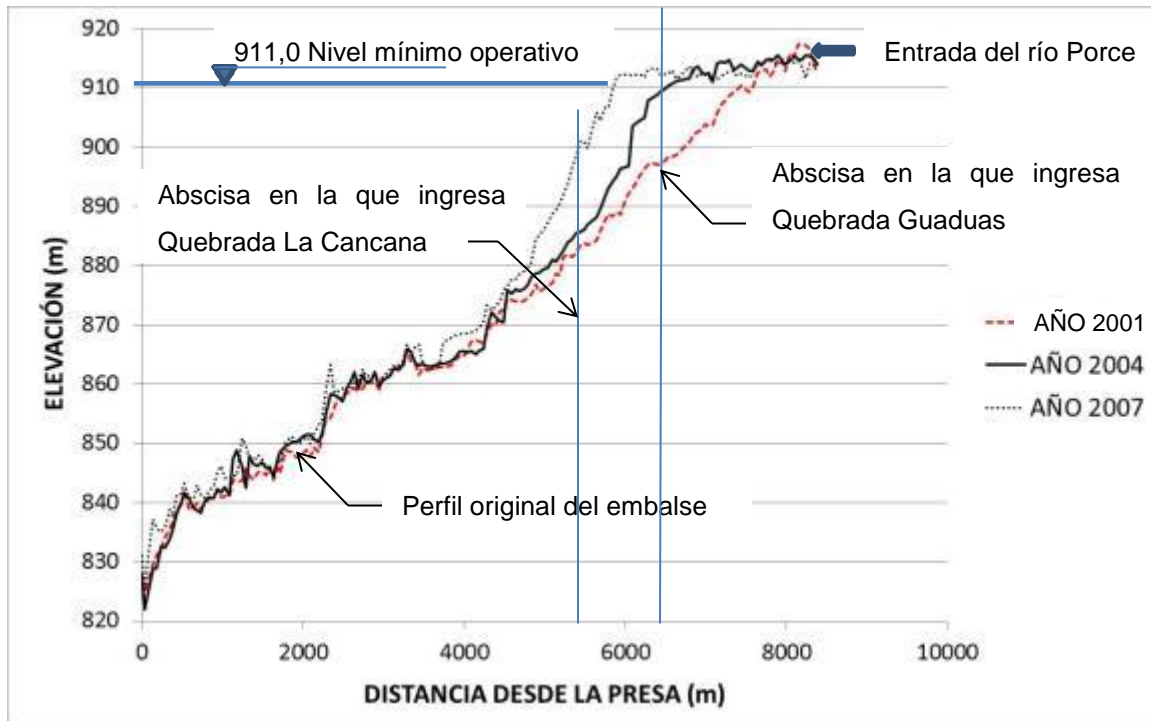


Figura 5-4: Elevación del “thalweg” del río Porce en la zona del embalse Porce II

Sobre los patrones de sedimentación longitudinales de los brazos correspondientes a las quebradas La Cancana y Guaduas (**Figura 5-5** y **Figura 5-6**), se observó, en principio, que existen problemas asociados a la interpolación del TIN en dichas zonas en la información del año 2001, ya que se presentan irregularidades en los perfiles de las líneas del “thalweg” que no pueden asociarse al proceso de sedimentación.

En La Cancana se observa en el tramo aguas arriba el proceso de depositación de forma marcada entre los años 2001 y 2004, pero entre los años 2004 y 2007 no se evidencian cambios en el nivel del “thalweg” (**Figura 5-5**), asociado posiblemente a que el material depositado en este último período fue movilizado hacia el río Porce antes de la toma de los datos batimétricos del año 2007.

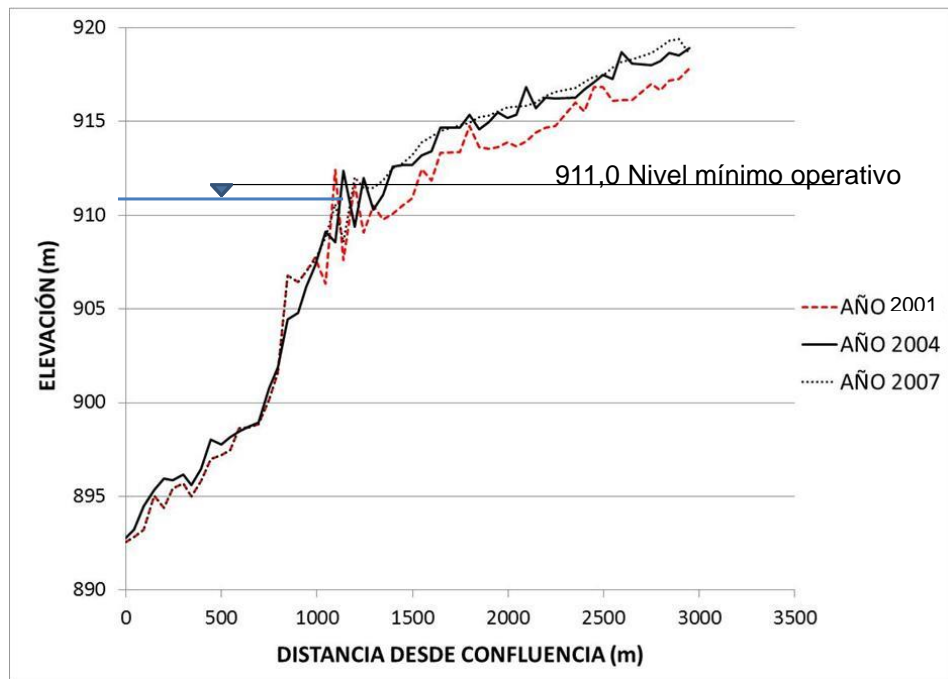


Figura 5-5: Cambios temporales de la elevación del “thalweg” de la quebrada La Cancana en la zona del embalse Porce II

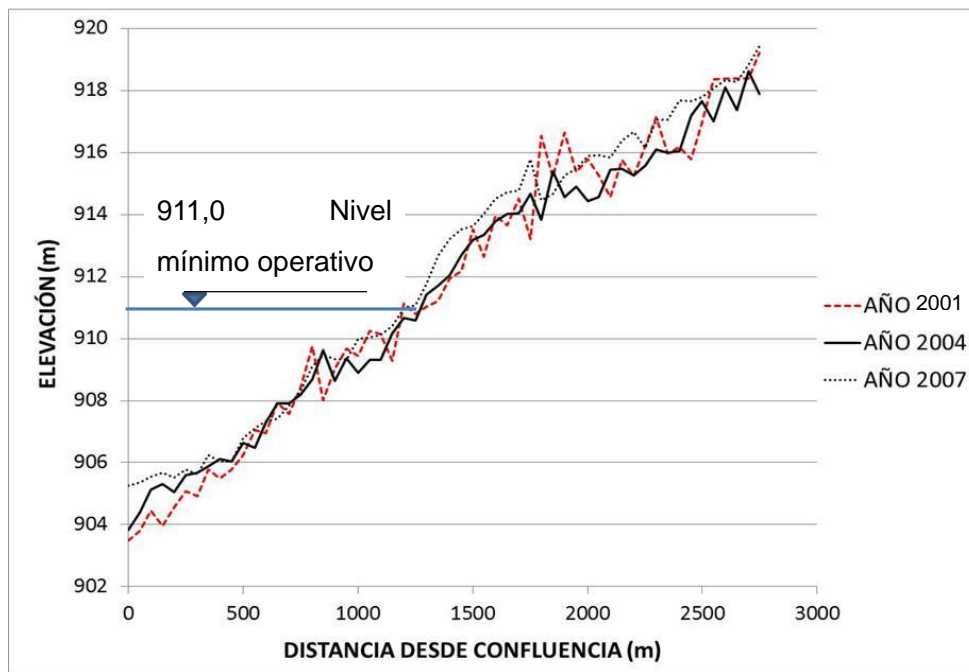


Figura 5-6: Cambios temporales de la elevación del “thalweg” de la quebrada Guaduas en la zona del embalse Porce II

En la quebrada Guaduas es más evidente el problema que se asocia a la interpolación o a los datos en sí. Sin embargo, entre los años 2004 y 2007, a diferencia de lo que ocurre en La Cancana se aprecia agradación del lecho en el tramo superior a la cota mínima operativa del embalse (**Figura 5-6**).

A lo ancho del embalse los patrones de sedimentación se presentan a través de seis secciones transversales (**Figura 5-7**) las cuales muestran, en general, el proceso de agradación constante entre la entrada del río Porce y la confluencia de la quebrada La Cancana con un llenado uniforme a lo ancho de las secciones.

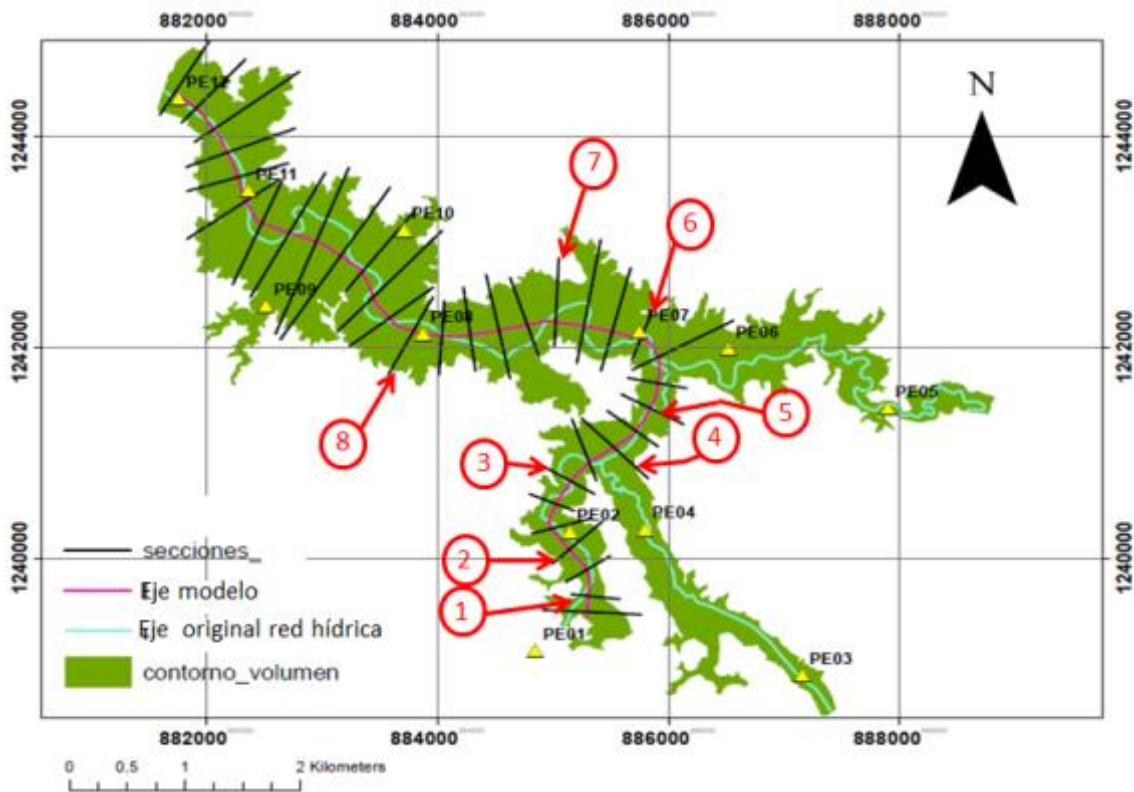


Figura 5-7: Localización de las secciones transversales a lo largo del eje del perfil longitudinal del embalse Porce II

Las variaciones menores en la elevación del lecho en secciones entre la uno y la tres (**Figura 5-8** y **Figura 5-9**) y la agradación importante aguas arriba de La Cancana (incremento en el nivel del lecho hasta de 20 m, sección cinco **Figura 5-10**) apreciadas al

comparar las batimetrías de los años 2004 y 2007, muestra el avance del frente del delta hacia la zona de La Cancana con cambios menores en la zona más próxima a la entrada del río Porce, donde en secciones como la cuatro se aprecia la tendencia del río a transitar hacia al margen derecha por donde fluía su cauce original.

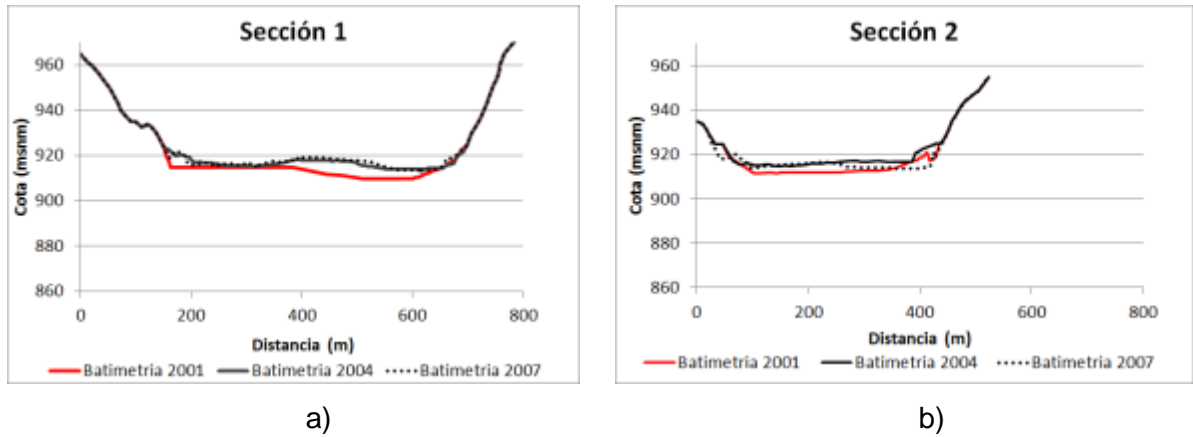


Figura 5-8: Comparación de secciones transversales, a) entrada del río Porce en el embalse, y b) aguas arriba de la confluencia con la quebrada La Cancana.

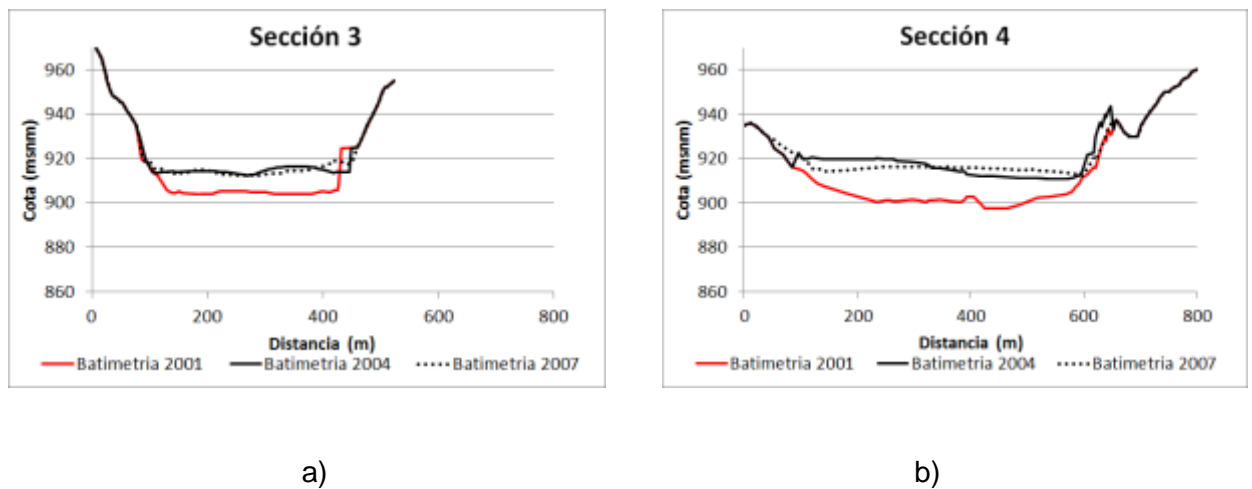


Figura 5-9: Comparación de secciones transversales, a) zona de transición aguas arriba de la confluencia con Guaduas, y b) zona aguas abajo confluencia con Guaduas.

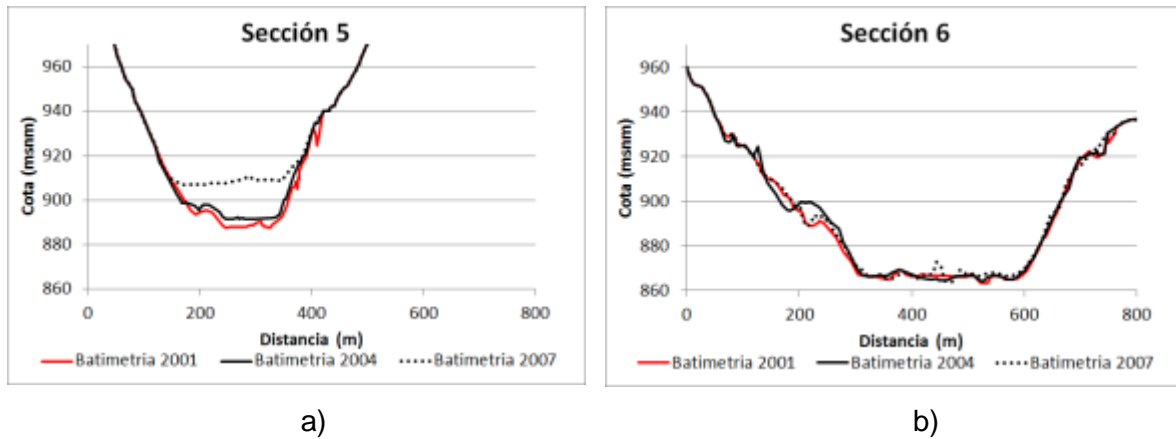


Figura 5-10: Comparación de secciones transversales, confluencias a) aguas arriba quebrada La Cancana, y b) aguas abajo quebrada La Frijolera.

En comparaciones del nivel del lecho realizadas por Largo (2011) empleando los datos de campo del año 2010 se evidencia que el frente del delta ya ha superado la zona de confluencia de la quebrada La Cancana ubicándose a la altura de la sección seis con incrementos del nivel del lecho entre los 7 m y los 15 m.

5.2.3 Curvas cota-área de embalse y cota-volumen embalsado

Para cada batimetría se determinó por medición en el plano de curvas interpoladas (cada cinco metros) desde los modelos digitales construidos para cada levantamiento batimétrico disponible, el área de espejo de agua a una cota del embalse y su correspondiente volumen de almacenamiento calculado este por el método prismoidal (Morris y Fan, 1997). Los volúmenes obtenidos fueron comparados entre ellos para determinar de manera referencial la reducción de capacidad de almacenamiento en el embalse derivada del proceso de sedimentación.

Al observar el embalse completo (cañón del río Porce y todos sus afluentes) se apreciaron variaciones en su volumen por encima de la cota 900 especialmente en el período 2004-2007 (**Figura 5-11**), mientras que en el brazo de la quebrada Guaduas la

variación se evidencia hacia el año 2007 en la zona de la confluencia (menores cotas, **Figura 5-12**), y en el brazo de la quebrada Cancana es evidente una pérdida de volumen uniforme entre los años 2001 y 2004, con una disminución en el volumen hacia la confluencia en el período 2004-2007 (**Figura 5-13**).

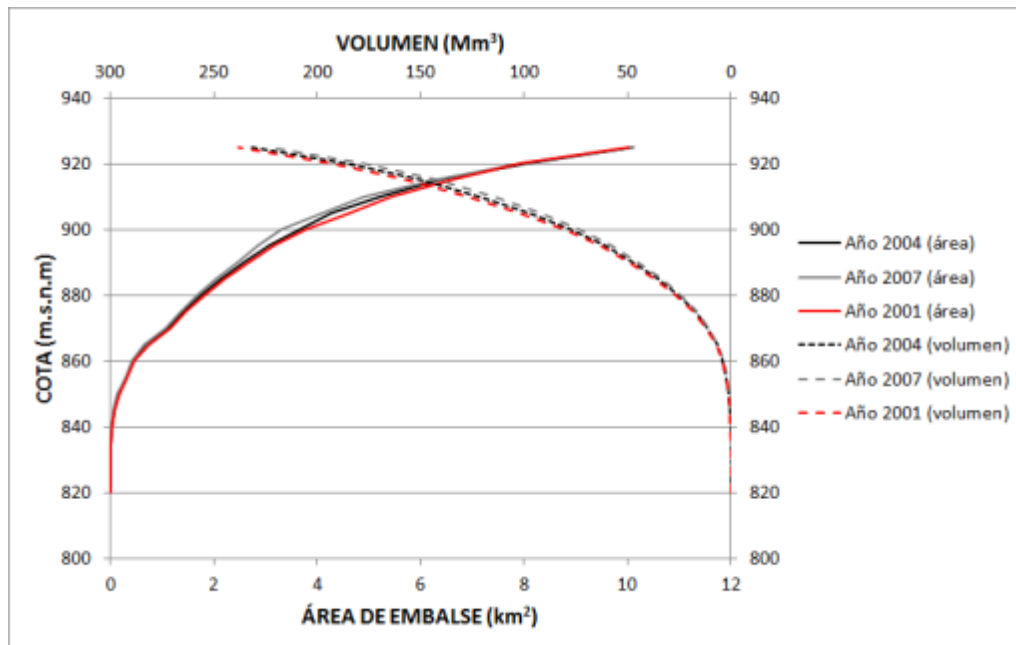


Figura 5-11: Curvas cota - área y cota – volumen embalse Porce II de acuerdo con las batimetrías de los años 2001, 2004 y 2007

Los valores de la **Tabla 5-2** representan las magnitudes de volumen del embalse en cada una de las tres batimetrías disponibles estimados hasta la cota 924.50 m (nivel máximo operativo), donde se valoró la participación de las quebradas Guadua y La Cancana en el volumen total embalsado. Se observó que en términos de volumen las quebradas Guaduas y Cancana aportan cerca del 11% del total en los distintos períodos, con un pérdida del volumen total en el período 2001-2004 de 6.71 Mm³ y de 8.52 Mm³ entre 2004-2007; las diferencias de los valores anteriores con los netos presentados en la **Tabla 5-1** son de 1.56 Mm³ y 0.26 Mm³, respectivamente, y pueden deberse a la resolución de las curvas de nivel con las cuales se construyeron las curvas cota-volumen (cada cinco metros) en conjunto con el método de cálculo, pues se captura mayor detalle al operar entre modelos digitales del terreno que entre curvas de nivel.

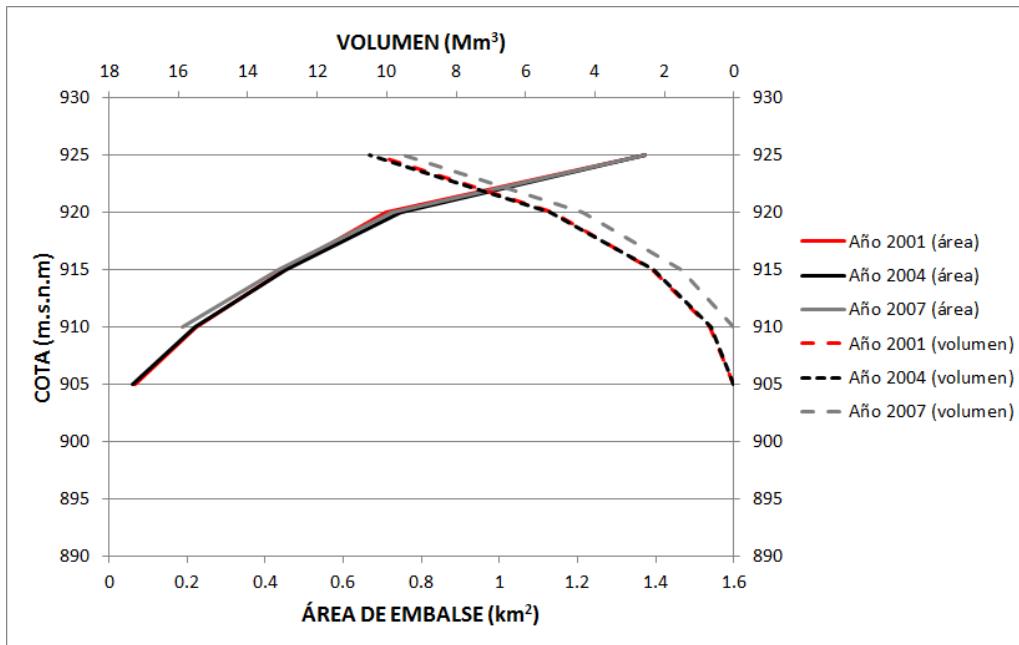


Figura 5-12: Curvas cota - área y cota - volumen quebrada Guaduas de acuerdo con las batimetrías de los años 2001, 2004 y 2007

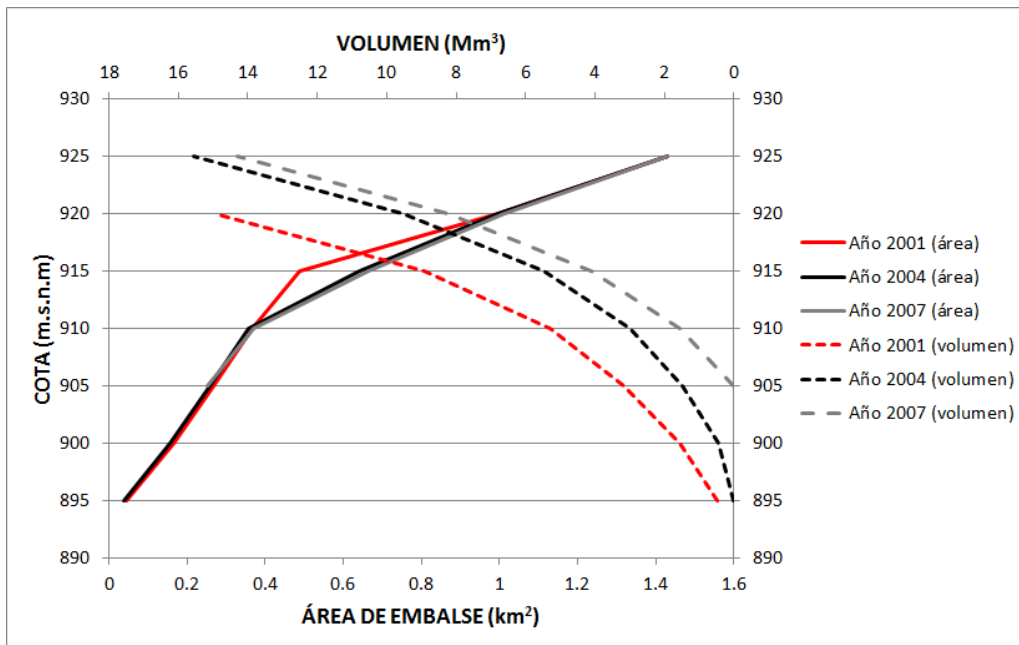


Figura 5-13: Curvas cota - área y cota - volumen quebrada La Cancana de acuerdo con las batimetrías de los años 2001, 2004 y 2007

Tabla 5-2: Volúmenes de almacenamiento total

Volumen embalsado a cota 924.50	2001		2004		2007	
	Vol (Mm ³)	%	Vol (Mm ³)	%	Vol (Mm ³)	%
Volumen total	233.66	100.00	226.95	100.00	218.43	100.00
Volumen Q.La Cancana	14.95	6.40	15.55	6.85	14.31	6.55
Volumen Q.Guaduas	10.31	4.41	10.48	4.62	9.53	4.36

5.3 Información hidrológica y operativa

A partir de la serie de niveles medios diarios del agua medidos en el sitio de presa en el período 01/Jun/2001 a 31/Dic/2008, se estimó la serie de variación del nivel entre dos días consecutivos y su correspondiente distribución de frecuencias (**Tabla 5-3**). Se encontró que los niveles mostraron variaciones de un día a otro entre 3.27 m de ascenso y 3.89 m de descenso del nivel (valores extremos), con el mayor porcentaje de las variaciones en el rango de los 1 m de descenso y 1 m de ascenso (77.5 % de los datos)

Un análisis similar en el mismo período de tiempo anterior se realizó calculando las rachas de días consecutivos donde se presentaron eventos de ascensos y descensos del nivel del agua, encontrándose ascensos del nivel del agua de hasta de 10.55 m en 9 días consecutivos con una variación del volumen de agua almacenado 74.23 Mm³ (ascenso a una razón de 1.17 m/día del 22/Ago/2007 al 30/Ago/2007, caudal medio diario de ingreso de 193 m³/s y 67.5 m³/s de salida), y descensos de hasta de 10.35 m en 15 días consecutivos (0.69 m/día) del 14/Jun/2006 al 28/Jun/2006, donde hubo una variación de aproximadamente 78.37 Mm³ en el volumen de agua almacenado (35.87% del volumen del embalse al año 2007 según la **Tabla 5-2**) con un caudal de salida promedio de 234.62 m³/s.

En la **Tabla 5-4** se presentan los diez mayores eventos, tanto de ascenso como de descenso del nivel del agua en el sitio de presa. Al observar la magnitud de dichos valores en un estudio de frecuencias de todas las rachas de cada tipo, se observa que eventos de descenso con dichas magnitudes se han presentado menos del 2.9% de las veces y los de ascenso menos del 4.0% de las veces (**Figura 5-14**). En la misma tabla se observa adicionalmente que el 81.9% de los eventos de descenso del nivel del agua en

la presa, en rachas de diferentes días, están entre los 0-4 metros de variación, y el 82.6% de los eventos de ascenso se encuentran en el mismo rango.

Tabla 5-3: Distribución de frecuencias: variación de niveles medios diarios del agua período Junio 2001- Diciembre 2008 entre dos días consecutivos

Dato			Punto medio	ancho	frecuencia	%	Acumulado	
	<						frecuencia	%
-3.50	<	-3.00	-3.25	0.50	1	0.0	1	0.0
-3.00	<	-2.50	-2.75	0.50	0	0.0	1	0.0
-2.50	<	-2.00	-2.25	0.50	11	0.4	12	0.4
-2.00	<	-1.50	-1.75	0.50	33	1.2	45	1.6
-1.50	<	-1.00	-1.25	0.50	257	9.3	302	10.9
-1.00	<	-0.50	-0.75	0.50	492	17.8	794	28.7
-0.50	<	-0.00	-0.25	0.50	542	19.6	1336	48.2
0.00	<	0.50	0.25	0.50	718	25.9	2054	74.2
0.50	<	1.00	0.75	0.50	395	14.3	2449	88.4
1.00	<	1.50	1.25	0.50	235	8.5	2684	96.9
1.50	<	2.00	1.75	0.50	79	2.9	2763	99.7
2.00	<	2.50	2.25	0.50	4	0.1	2767	99.9
2.50	<	3.00	2.75	0.50	2	0.1	2769	100.0
3.00	<	3.50	3.25	0.50	0	0.0	2769	100.0
3.50	<	4.00	3.75	0.50	1	0.0	2770	100.0

Los anteriores elementos exponen al embalse Porce II como un cuerpo de agua que presenta rápidas fluctuaciones de nivel ya sea por eventos de generación (descenso) o por eventos hidrológicos (ascenso), aunque esto último también se asocia con la generación.

La serie de caudales medios diarios del río Porce medida aguas arriba del embalse Porce II en la estación hidrométrica El Diamante (ubicación **Figura 3-2**) en conjunto con los niveles medios diarios de la superficie libre del agua se presentan para el período Junio 2001 – Septiembre 2004 en la **Figura 5-16** y para el período Octubre 2004 – Diciembre 2007 en la **Figura 5-17**, donde se enfatizan dichos períodos pues fueron los empleados en las labores de calibración y verificación del modelo de sedimentación aquí empleado.

El denominado caudal de salida no incluye las descargas de fondo o el caudal saliente a través del vertedero, solo el caudal turbinado.

Tabla 5-4: Diez mayores eventos de descenso y ascenso del nivel del agua en el período Junio 2001 – Diciembre 2008

Descenso del nivel del agua (m)	Días consecutivos en la racha de descenso	Tasa de descenso (m/día)	Ascenso del nivel del agua (m)	Días consecutivos en la racha de ascenso	Tasa de ascenso (m/día)
10.35	15	0.69	10.55	9	1.17
9.40	11	0.85	10.25	11	0.93
9.00	14	0.64	9.68	13	0.74
8.66	9	0.96	8.98	11	0.82
8.30	10	0.83	8.95	11	0.81
7.69	18	0.43	8.59	9	0.95
7.35	12	0.61	8.44	10	0.84
7.29	8	0.91	8.00	6	1.33
7.22	10	0.72	7.79	8	0.97
7.05	11	0.64	7.66	7	1.09

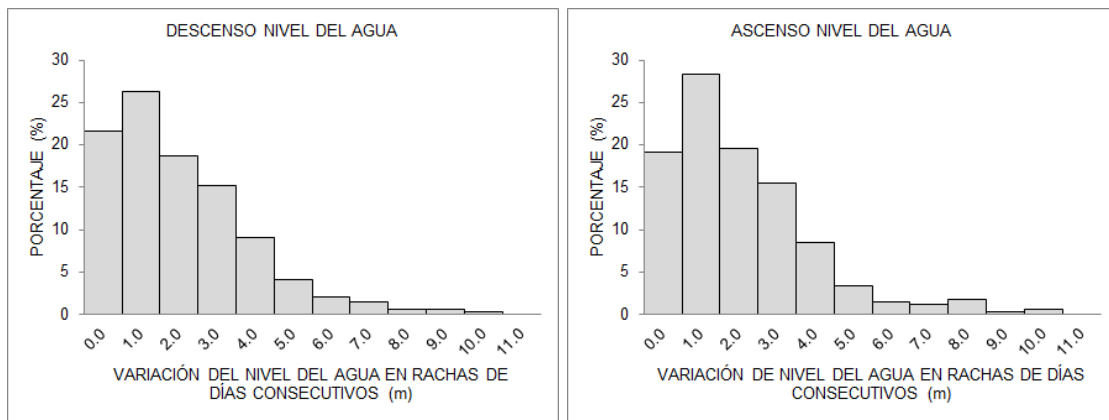


Figura 5-14: Histogramas variación del nivel del agua en el sitio de presa en rachas de días consecutivos período Junio 2001- Diciembre 2008

En cuanto al avance de la posición del punto de pivote, a partir de las batimetrías de los años 2004 y 2007 se estimó un avance del mismo del orden de los 157.89 m/año, con cotas de 910.96 m hacia el año 2004 y de 912.25 m hacia el año 2007.

Según diversos autores cuando la posición del punto de pivote depende fuertemente de la operación del embalse la cota de dicho punto puede presentar un valor similar o comparable al nivel de operación más frecuente (Morris y Fan, 1997; U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006), al observar los valores de las cotas del punto de pivote en las curvas de duración del nivel del agua construidas para cada período de tiempo de análisis (**Figura 5-15**), se observó que la cota 910.96 m es excedida o igualada el 100 % de las veces entre los años 2001 y 2004 mientras que la cota 912.25 m lo es el 99.91 % entre los años 2004 y 2007, luego es factible que otros factores adicionales al nivel de operación más frecuente como las crecientes, estén contribuyendo al establecimiento de la cota y tasa de avance del punto de pivote.

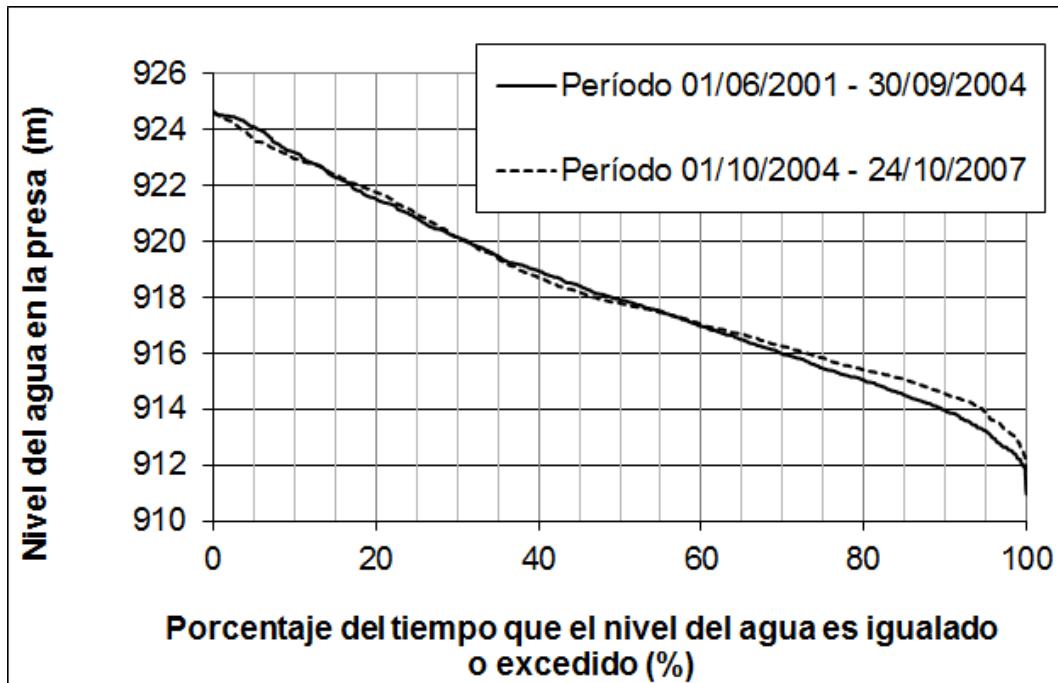


Figura 5-15: Curva de duración de niveles del agua medidos en el sitio de presa

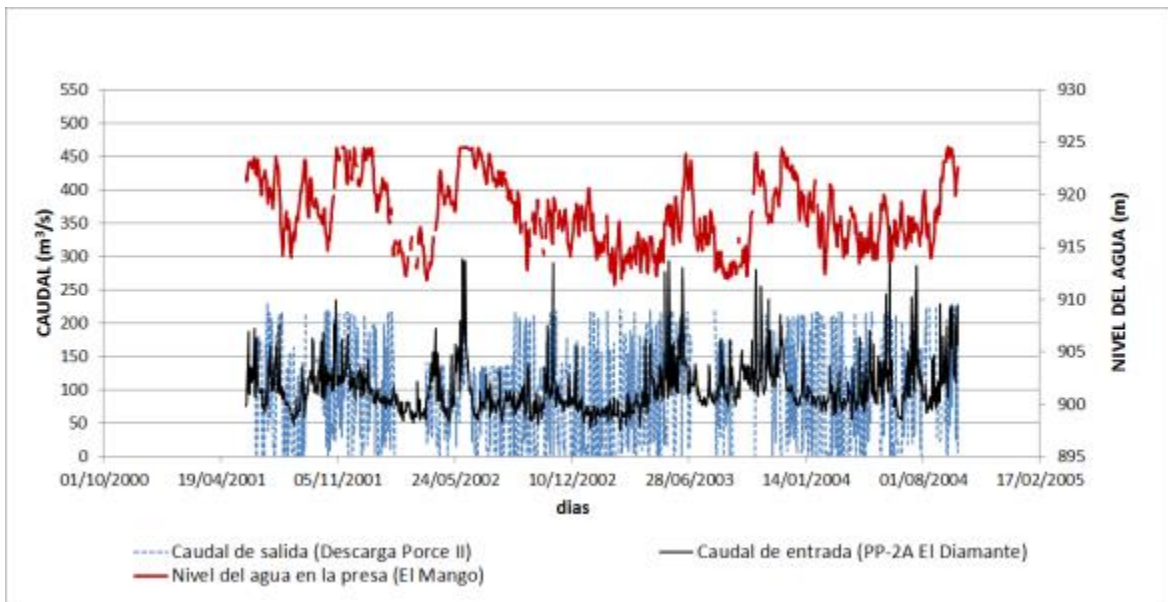


Figura 5-16: Hidrología y operación del embalse Porce II durante el periodo 01/Jun/2001 – 30/Sept/2004

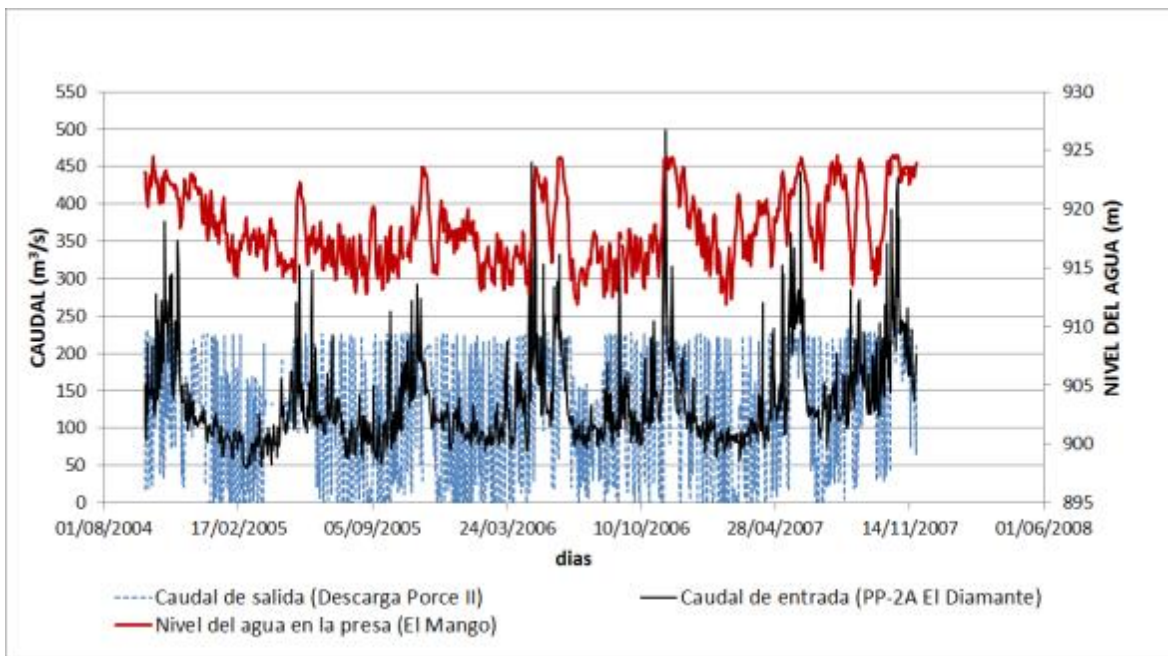


Figura 5-17: Hidrología y operación del embalse Porce II durante el periodo 01/Oct/2004 – 24/Nov/2007

En los períodos de tiempo antes especificados no se encontraron datos faltantes en los registros medios diarios de los caudales en la estación hidrométrica El Diamante (**Tabla 5-5**), mientras que en los caudales de descarga del embalse se tuvieron los mayores faltantes en los registros de los caudales del primer período, al igual que los datos del nivel en la presa.

Tabla 5-5: Datos faltantes series de niveles del agua en la presa, y de caudales de entrada y de salida al embalse

VARIABLE	Caudal de entrada (PP-2A El Diamante)		Caudal de salida (Descarga Porce II)		Nivel del agua en la presa (El Mango)	
	01/06/2001 - 30/09/2004	01/10/2004 - 24/11/2007	01/06/2001 - 30/09/2004	01/10/2004 - 24/11/2007	01/06/2001 - 30/09/2004	01/10/2004 - 24/11/2007
Total datos	1218	1150	1009	1104	1164	1141
Datos faltantes	0	0	209	46	54	9
% faltantes	0.00%	0.00%	17.16%	4.00%	4.43%	0.78%
Valor máximo	345.90	499.1	227.20	239.8	924.57	924.61
Valor mínimo	39.06	46.89	0.00	0	911.36	911.87

Los datos faltantes fueron complementados a través de la implementación del método de la piscina nivelada como herramienta de balance hídrico en el embalse en los términos descritos en el numeral 2.1.1. Dicho procedimiento no logró resultados apropiados en lo referente a los caudales de salida pues para lograr conservar el balance requería caudales en la descarga muy superiores a los históricamente registrados en las series operativas (no mayores a los 240 m³/s), sin embargo, se adoptaron sus resultados para complementar los vacíos en la serie de niveles en la presa por la reducida cantidad de los mismos, porque se presentaron faltantes generalmente solo en períodos de un día, y porque los resultados obtenidos se apreciaron apropiados para el comportamiento que presentaba la serie temporal en el tramo donde se realizaron las complementaciones.

De la serie de caudales medios diarios registrados en la estación El Diamante cabe mencionar que el 81.17% de los registros se ubican entre los 60 m³/s y los 140 m³/s y solo el 1.2% de los registros son mayores a los 300 m³/s (**Figura 5-18**). Esta serie posee

un caudal medio diario en el período 01/Jun/2001 – 31/Dic/2007 de aproximadamente $117.85 \text{ m}^3/\text{s}$, e igualmente se destaca que en este período se presentaron eventos ENSO El Niño entre Abril del 2002 y Marzo del 2003, y entre Septiembre 2004 y Febrero 2005, que se evidencian en temporadas de caudales bajos en dichos período del orden o inferiores a los $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

En general se observa que en el período estudiado los caudales obedecen a las dos temporadas de lluvia (Abril-Mayo y Octubre-Noviembre) y a las dos temporadas secas (Diciembre-Febrero y Junio-Agosto) que se presentan en la zona centro Colombiana.

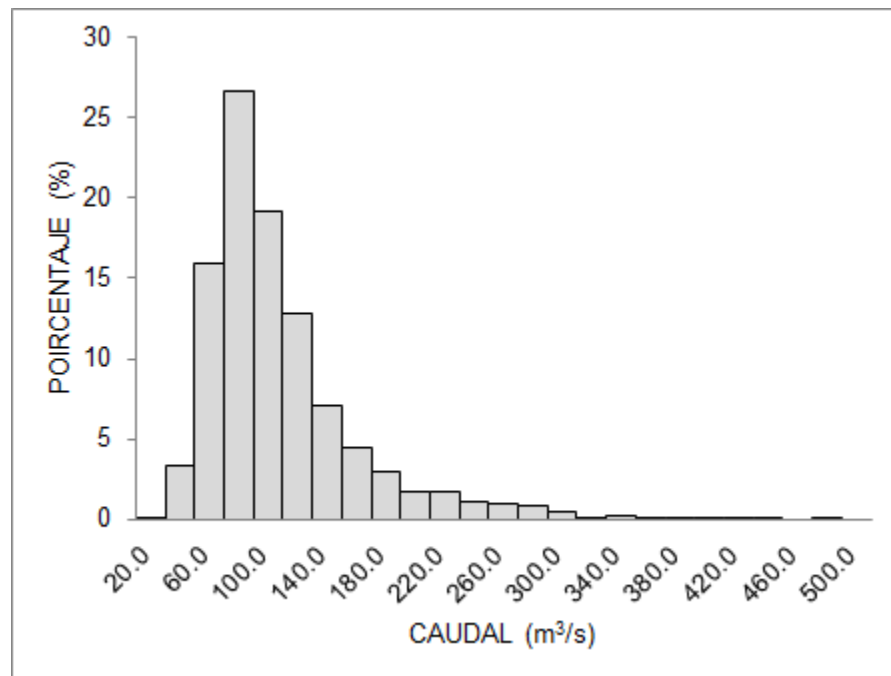


Figura 5-18: Histograma distribución de frecuencia caudales medios diarios de entrada al embalse registrados en la estación El Diamante 01/Jun/2001 – 31/Dic/2007

5.4 Sedimentos

5.4.1 Sedimento que ingresa al embalse

Se construyó la curva de transporte de los sedimentos suspendidos a partir de la información disponible de caudal líquido y concentración de sedimentos en suspensión

de las estaciones El Mango y El Diamante (**Tabla 3-2**). Se probaron diferentes alternativas para agrupar los registros en busca del mejor ajuste a una relación potencial según períodos de registro, el estado del fenómeno ENSO, el ciclo bimodal de la hidrología Colombiana y diferentes rangos de caudal (aunque los resultados de este último no se muestran por sus resultados deficientes). Entre las diferentes alternativas los mejores resultados se obtuvieron (teniendo como criterio el coeficiente de determinación de la regresión) agrupando los registros en dos períodos de tiempo (1989-1999 y 2000-2010) (**Tabla 5-6** y **Figura 5-19**).

El inconveniente con los datos empleados es que no se contó con la granulometría del material en suspensión aforado y tampoco con el aforo de la carga de fondo ni su granulometría, por lo que los resultados de la regresión no corresponden a la carga total de sedimento que ingresa al embalse. Además, los aforos del sedimento en suspensión no corresponden a condiciones de creciente y se asocian más con caudales instantáneos que con los medios diarios.

Tabla 5-6: Criterios de agrupamiento de registros en la construcción de la curva de transporte de sedimentos en suspensión

CRITERIO	COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN
Años (1989-2010)	0.6278
Años (1989-1999)	0.7617
Años (2000-2010)	0.7757
ENSO (El Niño)	0.5992
ENSO (La Niña)	0.0546
ENSO (No ENSO)	0.2583
VERANO	0.4122
INVIERNO	0.3046

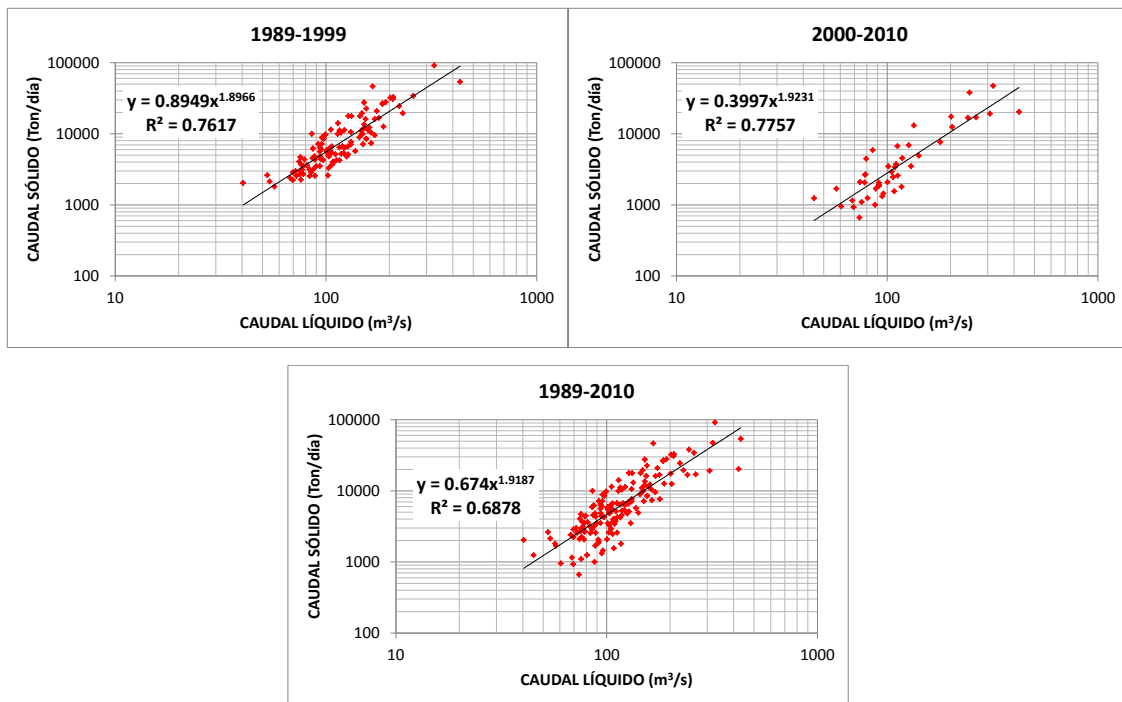


Figura 5-19: Correlaciones caudal líquido-caudal sólidos en suspensión río Porce sector embalse Porce II

5.4.2 Distribución granulométrica del sedimento depositado

A partir de las muestras del sedimento superficial tomadas por el Programa de Investigación Embalses UNAL-UdeA en doce estaciones al interior del embalse (**Figura 3-6**) y en ocho campañas entre Abril del año 2010 y Mayo del año 2012 (**Tabla 3-3**), se construyeron las curvas granulométricas para cada estación de las cuales se extrajeron algunos diámetros característicos del sedimento (D10, D16, D50, D84 y D90). No se dispuso de granulometría del sedimento que pasa el tamiz 200 (limos y arcillas) solo su peso dentro de la muestra.

Del análisis del tamaño D50 del sedimento se observó que espacialmente no se aprecia un gradiente en el sentido longitudinal del embalse acorde con la reducción de la velocidad del flujo a medida que el mismo transita por el cuerpo de agua (en su orden estaciones E1 en la entrada del río Porce, E2, E7, E8, E11 y E12 en la presa, **Figura 3-6**), ya que los menores valores se encontraron en las estaciones ubicadas desde la

entrada del río Porce (estaciones E1 y E2) hasta la zona del frente del delta (estación E7), mientras que hacia la presa el D50 presenta los mayores valores y se comporta más como lo hacen los tributarios Guaduas (estaciones E3 y E4) y La Cancana (estaciones E5 y E6), como se muestra en la **Figura 5-20**.

Temporalmente sobre el eje del río Porce los mayores rangos de variación del D50 se presentaron en Abril del 2010 y Abril del 2011 y en Noviembre del mismo año, mientras que en Agosto del 2011 y en Febrero y Mayo del 2012 la distribución de este diámetro característico fue uniforme en el cuerpo de agua (**Figura 5-21 a**). La variación encontrada se considera de importancia pues muestra cambios de gradación desde las arenas gruesas hasta las más finas.

Dicho comportamiento no se asocia a una condición hidrológica específica del río Porce, ya que en las cuatro primeras campañas (mayor rango de variación) la condición antecedente fue de caudales medios a bajos (del orden de los 200 m³/s o inferiores), en comparación con Noviembre del 2011 donde se presentaron crecientes en las semanas anteriores al muestreo con magnitudes entre los 400 m³/s y los 500 m³/s. Similarmente, en las granulometrías con menor variación del D50 como la de febrero del 2012 el caudal de las semanas anteriores fue del orden de los 100 m³/s, comparados con un comportamiento similar en Mayo del mismo año donde se presentaron en las semanas previas al muestreo picos de creciente entre los 450 m³/s a 864 m³/s.

En las estaciones ubicadas sobre los afluentes o asociados a ellos se apreció un comportamiento similar para los meses de Agosto del 2011 y Febrero y Mayo del 2012 al encontrado sobre el eje del río Porce al interior del embalse (**Figura 5-21 b**), donde se observó además que los mayores diámetros en los afluentes se presentaron en los muestreos donde en el eje del río Porce se observó un mayor rango de variación del D50.

En la fracción gruesa del sedimento (tamaños D84 y D90) se aprecia el mismo comportamiento descrito para el D50 en el cañón del río Porce y en sus tributarios tanto espacial como temporalmente por lo que se obvian las figuras correspondientes. En las fracciones finas (D10 y D16) se observó un comportamiento uniforme en el espacio entre

las estaciones E8 y la presa (estación E12), pero no fue posible asociar este comportamiento con el de las estaciones ubicadas aguas arriba de las mismas debido a que dichos tamaños se encontraban en la fracción pasa tamiz 200 y no se realizó gradación de estas fracciones.

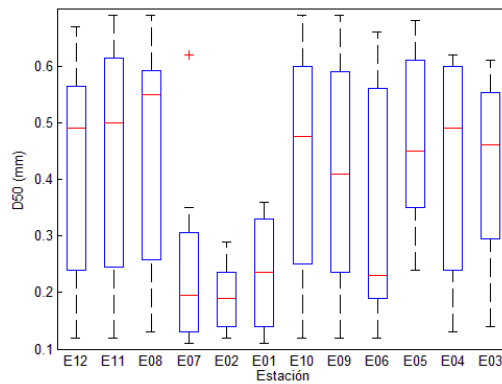
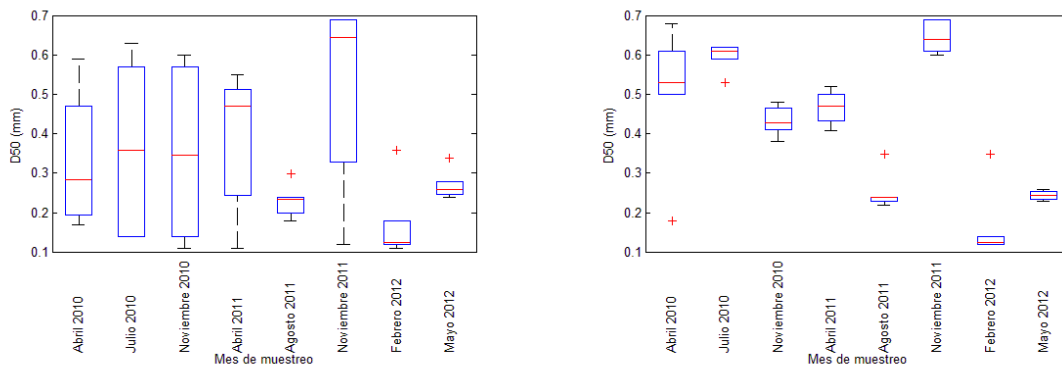


Figura 5-20: Variación espacial del diámetro D50 del sedimento superficial del lecho en el período 2010-2012



a) Eje del río Porce (estaciones E1, E2, E7, E8, E11 y E12)

b) Afluentes (estaciones E3, E4, E5, E6, E9, E10)

Figura 5-21: Variación temporal del tamaño D50 del material de sedimento superficial del lecho del embalse

De acuerdo con lo observado en las granulometrías antes mencionadas, aproximadamente el 75% del material muestreado corresponde a arenas finas y medias (sedimento no cohesivo, incluso arenas gruesas) y el 25 % a limos y arcillas (sedimento

cohesivo), siendo el límite considerado entre ambas clasificaciones el diámetro de partícula correspondiente a 0.0625 mm (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006).

5.5 Temperatura del agua

A partir de los registros históricos de 135 campañas de aforo líquido y de sedimento en suspensión en donde se midió la temperatura del agua en las estaciones El Diamante y El Mango (en su ubicación antes del llenado del embalse, **Figura 3-2**), se construyó una aproximación al ciclo anual de la temperatura del agua del río Porce (**Figura 5-22**). Se observó que el rango de variación en los datos disponibles más alto es para los meses de Julio y Octubre y el menor rango para Enero y Noviembre, con un valor medio anual estimado de 22.56 °C.

Ya en el cuerpo principal del embalse hacia la estación de muestreo E8 del programa Embalses UNAL-UdeA (**Figura 3-6**), se observó en ocho campañas de muestreo entre Abril del 2010 y Mayo del 2012 el comportamiento de la temperatura del agua que se muestra en la **Figura 5-23** (con referencia al fondo del embalse). Se evidencia la estratificación de la columna de agua ya reportada en estudios anteriores (Largo, 2011; Ramos, 2007), una marcada diferencia entre la temperatura de la superficie y la registrada en los estratos inferiores, con un valor medio de temperatura en el período de tiempo antes mencionado de 22.32 °C en los primeros 40 m de profundidad.

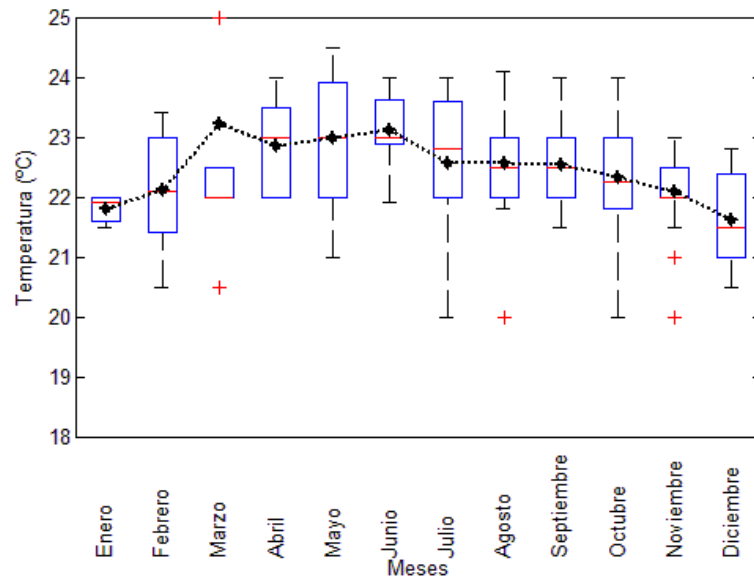


Figura 5-22: Aproximación al ciclo anual de la temperatura del agua del río Porce empleando los registros de las estaciones El Diamante y El Mango

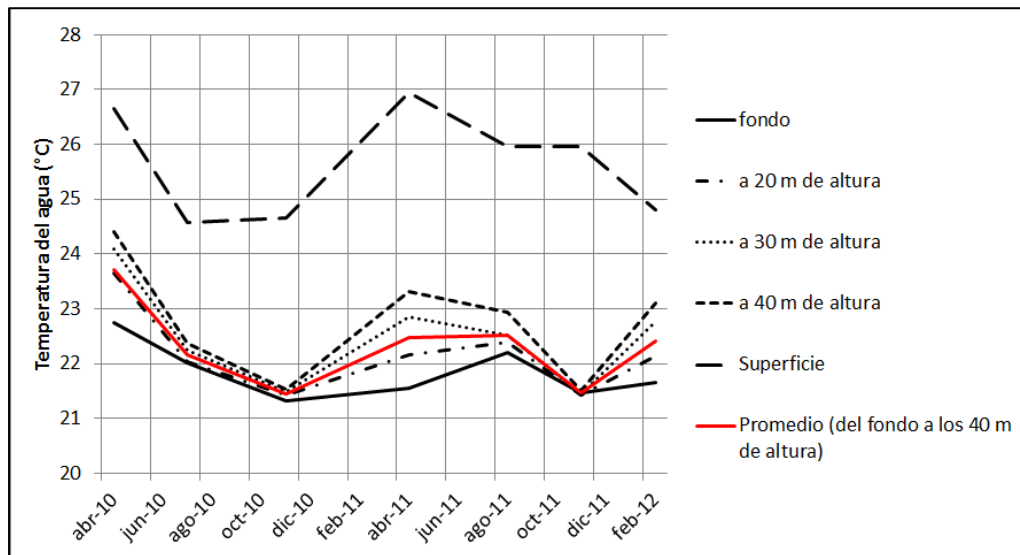


Figura 5-23: Datos temperatura del agua estación E8 proyecto Embalses UNAL-UdeA Abril 2010 – Mayo 2012

6. Modelación numérica

6.1 Configuración del modelo

Como herramienta numérica para modelar la evolución del delta fluvial del embalse Porce II se empleó el modelo unidimensional GSTARS4 (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation) en su versión 1.0 desarrollado por el Hydroscience and Training Center de Colorado State University (Yang y Ahn, 2011), cuyas generalidades fueron descritas en el numeral 2.

Para la implementación del modelo a este caso particular fue necesario emplear información referente a la geometría del embalse, a su batimetría, a la hidrología y a la operación, así como del sedimento que ingresa y se ha depositado al interior del mismo. A continuación se exponen algunos criterios que detallan el proceso de selección de los valores empleados en el modelo.

6.1.1 Parámetros hidrodinámicos

- Espaciamiento y número de secciones

La geometría del embalse se representó mediante secciones transversales al sentido preferencial del flujo (**Figura 2-3**), secciones separadas aproximadamente 250 m con el fin de tener una resolución espacial suficiente para capturar los cambios en la zona del delta fluvial, que como se mencionó anteriormente se han desarrollado en distancias del orden de los 600 m a 700 m de longitud.

El volumen conjunto de los brazos de las quebradas Guaduas y La Cancana se tuvo en cuenta en la configuración geométrica del embalse dado que representa aproximadamente el 11% del volumen total (**Tabla 5-1**).

Para ello el GSTAR4 emplea la expresión (6.1) donde Vol es el volumen del agua del tributario, h la elevación de la superficie del agua, h_m la elevación del lecho del tributario en la confluencia, y v_1 y v_2 son los coeficientes del tributario los cuales fueron obtenidos para cada quebrada mediante regresión a partir de sus correspondientes curvas cota-volumen.

$$(6.1) \dots \dots \dots Vol = v_1(h - h_m)^{v_2}$$

- Coeficientes de rugosidad

Para los cálculos de la resistencia del flujo se seleccionó la formulación de Manning. Un rango de valores factibles para el coeficiente de rugosidad a emplear se obtuvo a partir de los valores de D50 calculados para el sedimento superficial del fondo del embalse a partir de la información de las 8 campañas de medición en las 12 estaciones de muestreo localizadas al interior del embalse de acuerdo con lo descrito en el numeral 5.4.2, empleando la ecuación de Strickler del año 1923 ($n=0.047 D50^{1/6}$) (French, 2007) obteniéndose valores en el rango de 0.02 a 0.05.

Los coeficientes finalmente empleados fueron seleccionados al interior del proceso de calibración realizado, pues la anterior formulación solo proporciona la rugosidad del grano y no incluye la correspondiente a las formas del lecho ni a elementos sumergidos, como en este caso la vegetación no retirada de las márgenes.

- Condición de frontera

El GSTAR 4 proporciona tres alternativas en lo referente a la condición de frontera en la hidrodinámica para simular un embalse según se utilice una condición de flujo transitorio o de flujo cuasi-uniforme: a) empleando las hidrógrafas de entrada y de salida de caudal para estimar el nivel del agua en el embalse, y b) utilizando la serie de caudales de descarga en el sitio de presa y los niveles del agua en el mismo sitio o dichos niveles junto con los caudales de ingreso al embalse.

Dado que se encontró gran cantidad de datos faltantes en la serie de caudales de la descarga del embalse (**Tabla 5-5**) y no fue factible reconstruir los mismos empleando el

método de la piscina nivelada no se realizó la modelación en flujo transitorio, por lo cual se empleó como condición de frontera la serie de niveles del agua medidos en la actual estación El Mango (presa) en conjunto con la serie de caudales del río Porce medidos en la estación El Diamante en resolución diaria siguiendo el esquema presentado en la **Figura 2-2..**

- Tubos de corriente

Según se mostró en la **Figura 5-8** a la **Figura 5-10** el embalse ha depositado el sedimento de una manera uniforme a lo ancho de la sección, por lo que se consideró adecuado emplear un solo tubo de corriente como lo describen algunos casos de aplicación del modelo presentados en (Yang y Ahn, 2011).

6.1.2 Parámetros de los sedimentos

- Granulometría

Como se mencionó en el numeral 3.2 no se contó con información de la distribución granulométrica del sedimento que ha ingresado al embalse, por tal razón se determinó un rango probable de dicha granulometría a partir de la información del sedimento superficial muestreado entre el año 2010 y el año 2012 en las estaciones referenciadas en la **Figura 3-6**, específicamente con las estaciones de muestreo ubicadas en el eje del río Porce.

Como se refirió en el numeral 5.4.1 no se encontró una tendencia o patrón de variabilidad de los tamaños de las fracciones de sedimentos considerados en este estudio a lo largo del eje del embalse, acorde a la pérdida de capacidad de transporte del flujo a medida que el mismo transita por el lago. Por esto se emplearon en la estimación de la granulometría del sedimento entrante al embalse los datos solo de las estaciones E1, E2 y E7 las cuales acogen la zona de entrada del río y el frente del delta fluvial (zona de interés).

Se trabajó con 6 fracciones de tamaño que incluyen desde limos y arcillas (0.004 mm a 0.07 mm) hasta arena gruesa o grava muy fina (0.83 mm a 1.0 mm). Las granulometrías de referencia presentadas en la **Figura 6-1** fueron obtenidas a partir de la punteada en rojo (granulometría 5), la cual corresponde a los valores promedios de los porcentajes de

cada fracción de las estaciones antes mencionadas; excepto sus valores extremos los cuales corresponden a los tamaños máximo y mínimo de los datos disponibles en las mismas. Las restantes 9 curvas se generaron partiendo de la promediada más o menos los rangos de variabilidad de cada fracción. Estas diez curvas se exploraron en el proceso de calibración desarrollado.

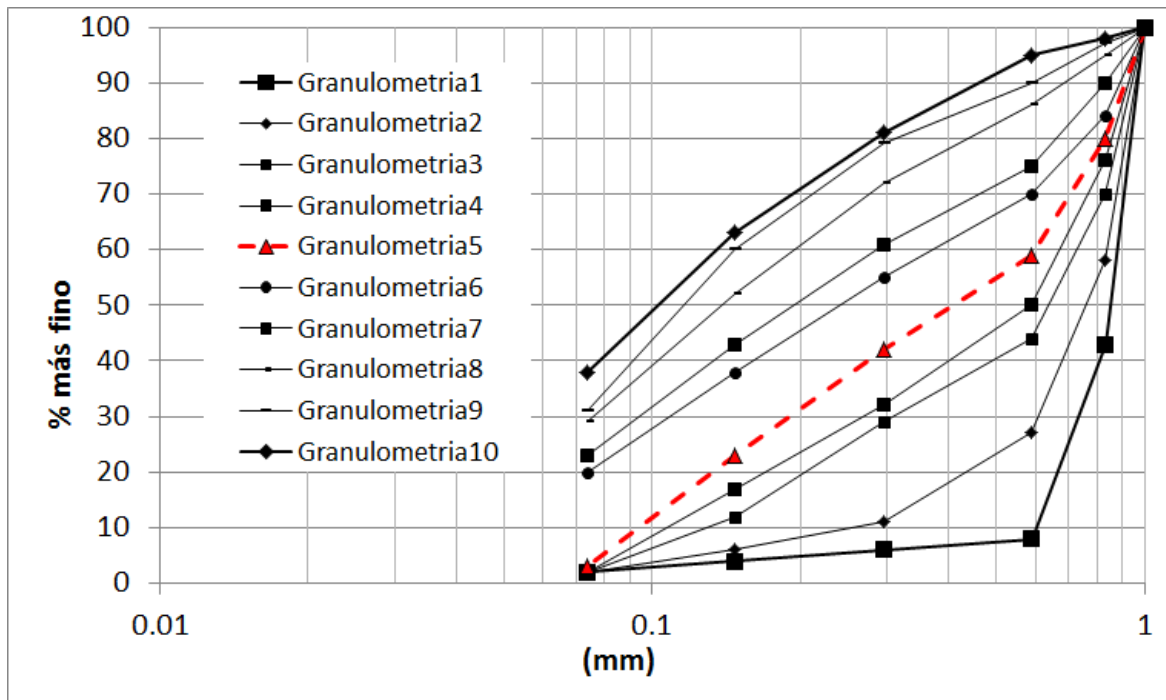


Figura 6-1: Granulometrías del material del lecho valoradas en la calibración del modelo

- Peso específico de las fracciones de sedimento

Debido a la falta de mediciones de la densidad de los sedimentos depositados en el embalse, se empleó como herramienta para su estimación la metodología expuesta en el numeral 1.4.

Se clasificó la operación del embalse en dos de las cuatro categorías que se presentan en la **Tabla 1-2**: tipo 4 para los sedimentos del lecho del río, y tipo 2 para operación que considera desembalses periódicos de moderados a considerables en el embalse.

Los valores de densidad según el tipo de fracción de sedimento empleados se presentan en la **Tabla 6-1** según las densidades referencia encontradas en (Julien, 2010; Morris y Fan, 1997), valores que fueron empleados en la ecuación (1.2) para obtener valores factibles de la densidad de los sedimentos depositados.

Tabla 6-1: Valores de masa específica seca empleados en la ecuación de estimación de la densidad de los sedimentos depositados

OPERACIÓN	MASA ESPECIFICA SECA INICIAL (kg/m ³)		
	Arcillas	Limos	Arenas
2	561	1140	1550
4	961	1170	1550

La ecuación (1.3) fue empleada para involucrar el efecto de consolidación sufrida por el volumen de sedimentos depositados en el período 2001 – 2004 como condición de inicio de la validación de resultados en el período 2004 – 2007.

Los valores mínimos de la densidad calculados para las diferentes fracciones de sedimentos muestreados en el embalse están del orden de 647 kg/m³, los valores promedios de 1231 kg/m³ y los máximos de 2299 kg/m³; que de acuerdo con los valores tabulados de Geiger, 1963 (Julien, 2010; Morris y Fan, 1997) corresponden en su orden a arcillas, mezclas de arena y grava pobremente gradadas y mezclas en diferentes proporciones de arcillas, limos y arenas finas.

- Ecuación de Transporte de sedimentos

Los cálculos de transporte requirieron la selección de las ecuaciones de cálculo a emplear entre las presentadas en la **Tabla 1-1**. Dada la gradación obtenida de la información disponible en el embalse (0.0625 mm – 2.0 mm), se consideró que mínimo 5 de las 14 ecuaciones disponibles en el modelo podrían emplearse en el modelo de transporte y depositación de sedimentos.

Se seleccionaron ecuaciones del grupo de las denominadas “de transporte de material de fondo” como corresponde a Laursen (1958), Engelund y Hansen (1972), Yang (1973) y

Yang (1979) complementada con el método de gravas (1984). Además de la ecuación de Duboys (1879) del grupo de carga de fondo.

Criterios adicionales de selección obedecieron a las características del flujo y condiciones del sedimento asumidas a partir de los datos disponibles relacionadas con el D50, rango de caudales, número de Froude, ancho y profundidad de las secciones de acuerdo con los criterios consignados en la **Tabla 1-1**.

- Parámetros de transporte de sedimentos cohesivos

Debido a la presencia de fracción fina del orden del 25% en peso en las muestras del sedimento del lecho (numeral 5.4.2), se empleó en el modelo simultáneamente a la ecuación de transporte de material de fondo seleccionada el método de Ariathuari – Krone para el cálculo del transporte de los sedimentos cohesivos (arcillas y limos) (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006; Yang y Ahn, 2011).

Los parámetros requeridos por esta ecuación incluyeron los umbrales de corte para depositación de arcillas y limos, los de erosión de partículas y masa para limos y arcillas, la pendiente de la curva de tasa de erosión y la tasa de erosión, cuando el esfuerzo cortante del lecho es igual al crítico.

Partiendo de un esfuerzo crítico para transporte (τ_b) de 0.29 N/m^2 calculado como 0.785 veces el D50 en mm, promedio determinado para los datos disponibles en el embalse y que corresponde a 0.37 mm, se obtuvieron los esfuerzos para erosión en masa (τ_{cr1}) y de partículas (τ_{cr2}) de limos y arcilla de 0.24 N/m^2 y 0.12 N/m^2 de acuerdo con las ecuaciones expuestas en Morris y Fan (1997).

Se calculó el valor de umbral para erosión superficial τ_{cd} empleando la ecuación (2.22), donde ρ_{wb} representa la densidad húmeda del sedimento, cuyos valores para mezclas de arena y limos puede alcanzar valores entre 1200 kg/m^3 y 1520 kg/m^3 con un promedio de 1239 kg/m^3 (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006).

Para el caso de la pendiente de la curva de erosión superficial, ρ_b representa la densidad seca del sedimento que se asumió como 1.52 g/cm^3 (U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006).

- Transporte en condición de no equilibrio

De acuerdo con lo expuesto en el numeral 2.2.1 el transporte de material de fondo para el caso de embalses se representa de una mejor forma en condiciones de no equilibrio (Ahn, 2011).

El comportamiento de esta condición de transporte se rige por el valor del denominado factor de recuperación (α) (numeral 2.2.1). Aunque existen recomendaciones sobre el valor del mismo en condiciones de erosión y depositación (1.0 y 0.25 respectivamente), este factor debe calibrarse para cada caso específico pues depende tanto de las condiciones específicas del sitio como de la malla de cálculo que se emplee (Ahn, 2011).

Como propuso el autor anterior se realizaron 250 simulaciones preliminares con una condición dada del modelo GSTAR4 con el fin de establecer el posible rango de variación que tendría el factor de recuperación. Dicho rango se fijó con los valores que conservaban las tendencias de erosión y depósito de sedimento vistas en la línea del thalweg extraída de las batimetrías, encontrándose los valores base en el rango de 0.05 a 1.0.

- Temperatura del agua

Se emplearon como valores base para iniciar el análisis de sensibilidad y la calibración un rango de temperatura conformado por los valores del ciclo anual estimado de la temperatura del río (**Figura 5-22**) junto con las temperaturas del agua medidas al interior del embalse (**Figura 5-23**).

- Numero de iteraciones (paso de tiempo)

En lo referente a la hidrodinámica en estado cuasi-uniforme (método del paso estándar, numeral 2.1.2) el paso de tiempo empleado fue de 1 día, correspondiente a la resolución de la información de niveles del agua y de los caudales de entrada al embalse.

Para el modelo de transporte y depósito de sedimento el paso de tiempo se estimó empleando en forma conjunta las expresiones (2.15) y (2.17) con el fin de cumplir la condición de Courant-Friedrichs-Lewy, considerando un Δx de 250m como mínimo (según lo expuesto en el numeral anterior), un valor del cuadrado del número de Froude cercano a cero (régimen ampliamente subcrítico), un rango para el parámetro b entre 3 y 7 (Ahn, 2011), y una porosidad estimada del sedimento de 0.82 según criterios expuestos en (Julien, 2002), junto con valores de VC_v máximos estimados a partir de diferentes simulaciones preliminares realizadas con el modelo en los períodos 2001-2004 y 2004-2007. Del procedimiento anterior (Ahn, 2011) se obtuvo un rango de Δt entre los 1.48 minutos y los 7.2 minutos los cuales provocaron tiempos de simulación de aproximadamente 3 horas y 30 minutos respectivamente.

Diversas simulaciones posteriores mostraron que los resultados obtenidos con ambos pasos de tiempo eran similares entre sí y no exponían signos de inestabilidades numéricas por lo que se seleccionó el paso de tiempo de 7.2 minutos.

6.2 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se desarrolló mediante un muestreo Monte Carlo empleando como base la función de distribución uniforme en 500 simulaciones realizadas sobre el período 01/Junio/2001 al 30/Septiembre/2004 y empleando como medidas de ajuste el error al volumen sedimentado y el RMSE al ajuste de las simulaciones al “thalweg” de embalse. La información anterior fue procesada con el software MCAT con el fin de observar si los parámetros y variables estudiadas fueron o no identificables y si el ajuste del modelo a los datos de campo es sensible a dichos parámetros. A continuación se presentan, los respectivos rangos de exploración y los resultados obtenidos para los parámetros y variables analizadas.

- Coeficiente de rugosidad de Manning. Se valoró en el rango [0.01 - 0.06] ampliando el rango de los valores estimados con base en la granulometría del material del lecho. Se consideraron tres tramos para su valoración, el ubicado en la zona del “topset” (entrada del río Porce y tramo medio entre las confluencias de

las quebradas Guaduas y Cancana), en la zona del frente del delta (“foreset”) hasta la confluencia de la quebrada La Frijolera, y en la zona profunda hacia el sitio de presa.

- Porcentaje de reducción o incremento del caudal que ingresa al embalse. Ya que los registros de caudal de la estación El Diamante se realizaron 9 km aguas arriba del embalse, se valoró la posible variación que a nivel diario pudieron tener dichos caudales al transitar hacia el lago, y para ello se consideró un rango de variación del porcentaje ya fuera de reducción (valorando posibles problemas en la medición en la estación) o incremento del caudal (aportes entre el sitio de medición y el embalse) en el rango de [5% - 15%].
- Ecuación de transporte. De forma aleatoria se exploró el desempeño de las expresiones de Laursen (1958), Engelund y Hansen (1972), Yang (1973) y Yang (1979) complementada con el método de gravas (1984) y Duboys (1879) en los términos descritos en Yang y Ahn (2011).
- Factor de multiplicación en la estimación del espesor de la capa activa. Según los valores referentes expuestos por el U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation (2006) se seleccionó un rango de exploración de [14 - 70], siendo el primer valor el empleado por defecto por el GSATR4.
- En cada una de las tres zonas en las cuales se estudió la asignación del coeficiente de rugosidad de Manning se estudió el valor del factor de recuperación (“recovery factor”) tanto para depositación como para erosión en el rango [0.001 - 1]. Se amplió el rango inferior más allá del valor obtenido en las simulaciones previas (0.05) con el objeto de obtener una mejor definición del espacio muestreado pues Ahn (2011) expone también experiencias con valores tan pequeños como el asignado en la frontera del rango.
- Porcentaje en la carga total que corresponde al sedimento de fondo. Ante la ausencia de datos correspondientes a la carga de fondo que permitieran construir la curva de descarga de sedimentos total en la estación El Diamante, se exploró expresar la cantidad de sedimento correspondiente a la carga de fondo como un porcentaje de la carga en suspensión en el rango [25% - 45%] (Ochoa, 2011; Posada y Montoya, 2000).
- Factores de regresión, pendiente y exponente de la curva de descarga de sedimentos. En lo correspondiente al sedimento en suspensión expresado éste

en función del caudal líquido que ingresa al embalse, para los coeficientes de regresión obtenidos en el período 2000-2010 (**Figura 5-19**) se empleó un rango de variación de [1.3 - 2.1].

- Temperatura media del agua en el embalse. Se empleó una temperatura media uniforme para el embalse valorada en el rango [21.5 °C – 23.5 °C].
- Densidad de las fracciones de sedimento. Los valores inicialmente estimados fueron variados porcentualmente en un 10% tanto por encima como por debajo de los valores iniciales.
- Distribución de tamaños en la carga de sedimentos que ingresa al embalse. Se incluyeron en el muestreo Monte Carlo las diez granulometrías expuestas en la **Figura 6-1** con el fin de explorar el efecto de tener granulometrías desde sedimentos más finos a más gruesos alrededor de la granulometría promedio construida.

En la **Figura 6-2** se observa para el error en el volumen sedimentado entre lo calculado para el período Junio/2001 a Septiembre/2004 (8.27 Mm³, **Tabla 5-1**) y lo simulado con el GSTARS4, el examen de la estimación mediante diagramas de dispersión de los parámetros N0SED01, N0SED02, N0SED03, N0ERO01, N0ERO02, y N0ERO03 correspondientes en cada una de las tres zonas antes mencionadas al interior del embalse a los factores de recuperación para sedimentación (los tres primeros) y erosión (los tres finales), así como el porcentaje del sedimento grueso (%QGRUESO), la pendiente y exponente de la regresión potencial entre caudal líquido y sólido en suspensión (QRMUL y QREXP respectivamente), la temperatura del agua, el porcentaje de variación en la densidad del sedimento depositado, y la curva granulométrica empleada en la simulación (GRANULOMETRIA).

De esta figura se observa que solo el parámetro QREXP presenta una región que apunta a un óptimo global, tanto en la evaluación con el error referente al volumen sedimentado como al RMSE del ajuste del thalweg (no se muestra este último) por lo que se consideró como un parámetro identificable. Para el resto de parámetros evaluados, incluidos los que no se exponen en la figura (coeficientes de rugosidad de Manning, porcentaje de variación del caudal de ingreso por el río Porce, la ecuación de transporte y el factor de

multiplicación para la estimación de la capa activa), el comportamiento es el correspondiente a un parámetro no identificable donde existe una alta interacción paramétrica que ocasiona que diversos valores de los mismos proporcionen resultados igualmente buenos.

La **Figura 6-3** muestra para la misma medida de error de ajuste y variables las gráficas de sensibilidad regional representadas como la distribución acumulada de 10 clases del espacio paramétrico ordenadas de acuerdo a la media de confiabilidad o bondad de ajuste (Camacho, 2006). Dado que parámetros insensibles presentan distribuciones similares para cada clase, se aprecia que solo QREXP se considera un parámetro sensible, mientras que los restantes en la figura y los que no aparecen en ella (antes mencionados) no muestran sensibilidad referente tanto a la medida del error al volumen sedimentado como el RMSE del ajuste del thalweg (no mostrado en las figuras).

Combinando los resultados de ambas evaluaciones, se consideró que solo el exponente de la curva de ajuste potencial entre el caudal líquido y el caudal de sólidos en suspensión fue identificable inequívocamente, pues presentó un óptimo global junto con una alta sensibilidad en torno a dicho valor óptimo, luego se consideró como el único parámetro entre los evaluados factible a ser calibrado de forma óptima.

El hecho de que los restantes parámetros no muestren sensibilidad no significa realmente que no sean sensibles, pues es la incertidumbre que aportan a la solución final, a través de la deficiencia o ausencia de valores medidos correctamente en campo junto con lo asumido para suplir lo anterior, lo que ocasiona dicho comportamiento (Shen et al., 2011).

Lo que si exponen de forma clara los resultados antes mencionados, es que a la luz del ajuste del modelo a un comportamiento medido del “thalweg” al interior del embalse y al volumen sedimentado en el período interbatimétrico evaluado, el modelo GSTARS4 no se puede calibrar de forma óptima en el embalse Porce II con la información actualmente disponible, lo que si es factible lograr es una buena solución.

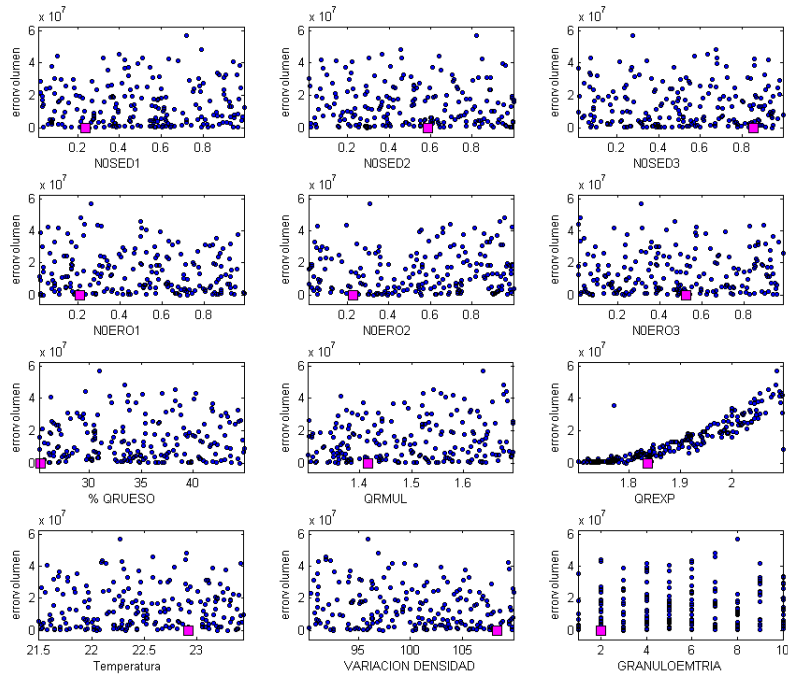


Figura 6-2: Diagramas de dispersión muestreo Monte Carlo contrastados contra el error en el volumen sedimentado en el período Junio/2001-Septiembre/2004

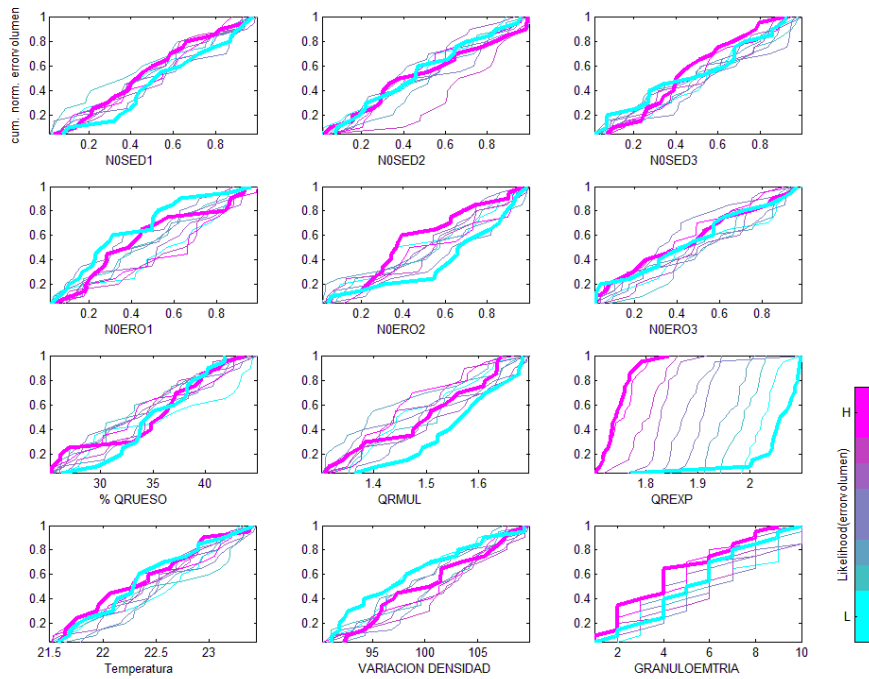


Figura 6-3: Gráficas de sensibilidad regional empleando el error en el volumen sedimentado en el período Junio/2001-Septiembre/2004

6.3 Calibración

Partiendo de las combinaciones de parámetros que proporcionaron las soluciones en el período de calibración (Junio/2001-Septiembre/2004) con mejores ajustes al volumen sedimentado y al “thalweg” medido al interior del embalse, se realizaron 120 simulaciones adicionales ajustando de forma manual los parámetros estudiados, para establecer la mejor solución posible con la calidad de información disponible.

La **Figura 6-4** expone el resultado final del proceso de calibración. La solución obtenida presenta un RMSE de ajuste al “thalweg” en la totalidad del embalse de 1.28 m, y un error en el volumen depositado del 8.2% (sobre estimación de 0.68 millones m³, 8.97 millones m³ simulados frente a 8.27 millones m³ medidos desde la batimetría).

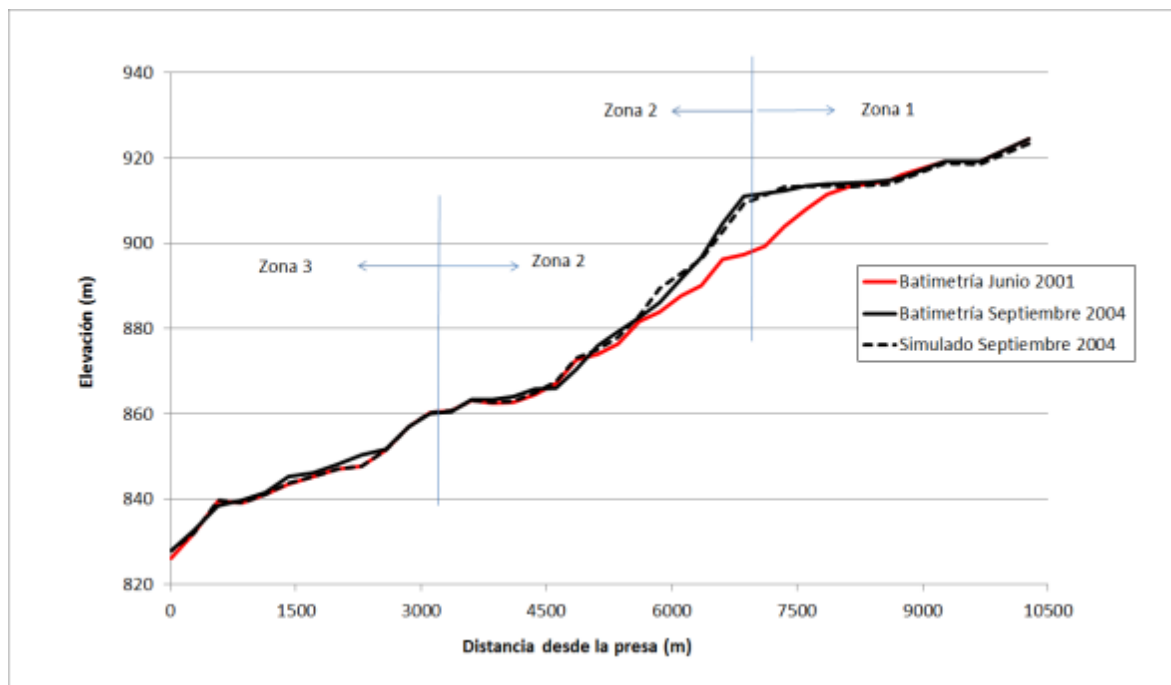


Figura 6-4: Perfil del “thalweg” del embalse simulado entre 01/Junio/2001 al 30/Septiembre/2004, calibración

En el modelo resultante de la calibración se empleó un incremento del 5% en el caudal medido en la estación El Diamante, la ecuación de transporte de sedimento de Laursen, valores del coeficiente de rugosidad de Manning de 0.04, 0.02 y 0.01 (para las tres zonas antes mencionadas desde la entrada del río Porce hasta la presa), un factor de

multiplicación en la estimación del espesor de la capa activa de 43, una temperatura promedio del agua de 22.81 °C, una curva de descarga de los sedimentos totales $Q_s = 1.7 Q_w^{1.80}$ (Q_s es el caudal sólido en Ton/día y Q_w el caudal líquido en m³/s), y valores del factor de recuperación para depositación en las zonas expuestas en la **Figura 6-4** entre 0.001 - 0.02 – 0.04 en la zona uno, 0.04 – 0.025 en la zona dos y 0.025 – 0.01 en la zona tres, y para erosión de 1.0 – 0.8 – 0.5 en la zona 1, 0.5 – 0.01 en la zona dos y 0.01 – 0.1 en la zona tres. La granulometría que se estimó ingresa por el río Porce se presenta en la **Tabla 6-2**.

Tabla 6-2: Granulometría estimada del sedimento que ingresa al embalse por el río Porce

Tamaño (mm)		% fracción en la mezcla de sedimento	Densidad fracción sedimentada
Inferior	Superior		(kg/m ³)
0.004	0.07	14.3	599.22
0.07	0.15	58.7	886.8
0.15	0.3	17	1147.4
0.3	0.59	4	1472.01
0.59	0.83	5	2129.12
0.83	1	1	2129.12

Se observó que el modelo capturó de forma adecuada la pendiente del “topset” (o parte superior del delta), la ubicación del punto de pivote y, en gran medida la pendiente del frente del delta. En lo referente al depósito de fondo (“bottomset”) el modelo no representó adecuadamente el mismo (según el esquema del delta expuesto en la **Figura 1-2**).

Lo anterior se cree que tiene su explicación en que dicho depósito no es formado exclusivamente por los aportes del río Porce, y como se identificó en el análisis granulométrico del sedimento del lecho hay otras fuentes cercanas a la presa que aportan a dicho depósito, adicionalmente, el mismo es posiblemente formado en parte por corrientes de densidad como las expuestas en la **Figura 5-1** que el GSTAR4 no tiene la capacidad de representar, este último tipo de inconvenientes al aplicar modelos

unidimensionales ha sido ya reportado en modelos como el HEC-6 (Spalletti, y Brea, 2005) en modelaciones en el lago Mead.

En las secciones transversales expuestas en la **Figura 6-5** se aprecia un ajuste adecuado entre los datos estimados desde las campañas batimétricas y los simulados por el modelo en la zona inicial del delta (secciones 1 a 3) y hacia el frente del mismo (sección 5), siendo el mayor error en el nivel del lecho simulado el encontrado hacia la confluencia de la quebrada Guaduas (sección 4) (ubicación de las secciones en la **Figura 5-7**).

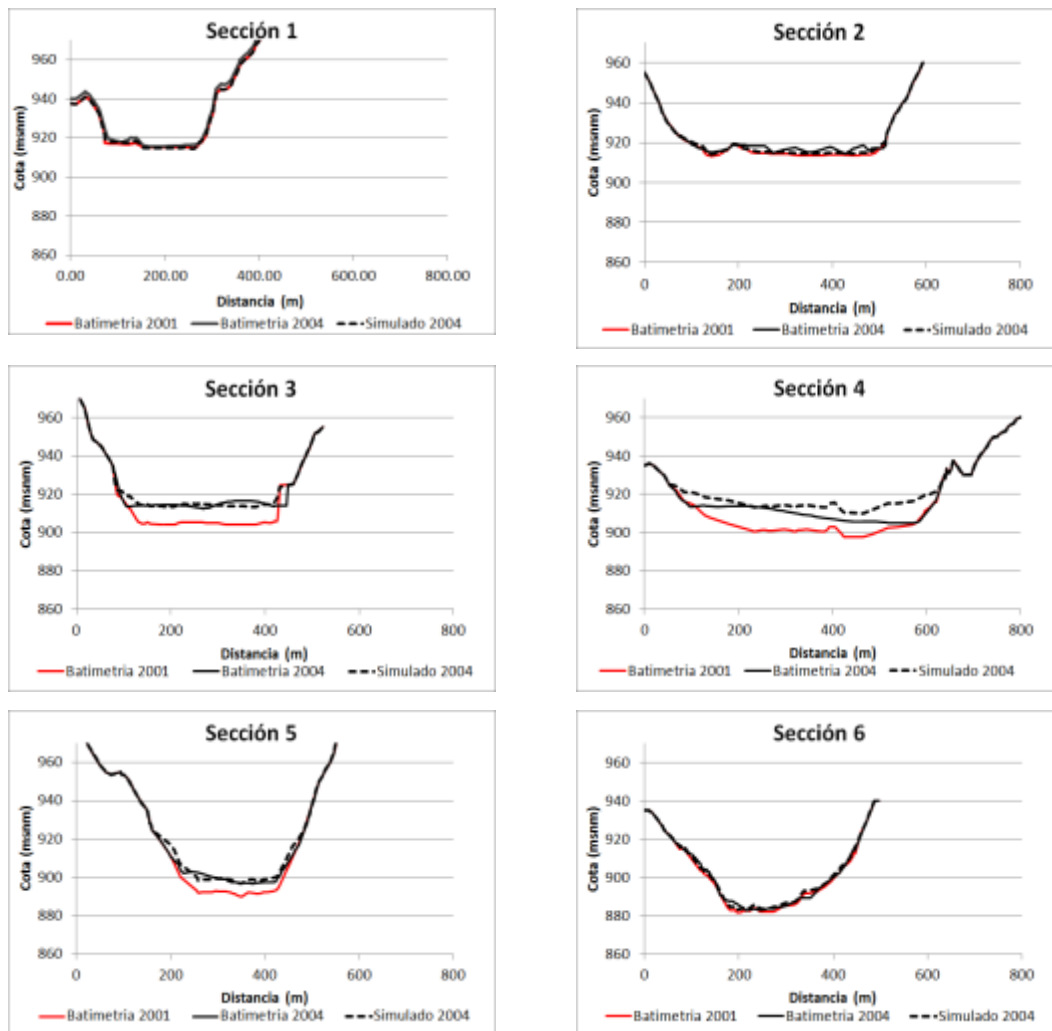


Figura 6-5: Comparación de secciones transversales batimétricas y simuladas, calibración

En este lugar el río Porce al parecer transitó preferencialmente hacia la margen derecha conformando el depósito hacia la margen izquierda, este comportamiento no fue reproducido por el modelo dado que para el mismo se empleó un solo tubo de corriente. La cantidad extra que el modelo depositó en esta zona fue la que contribuyó en mayor proporción a la sobrestimación del volumen sedimentado en el proceso de calibración.

Al analizar el comportamiento del tamaño D50 del material del lecho simulado al final del período de calibración (**Figura 6-6**), se observó que éste disminuye su tamaño en el dominio del delta fluvial, donde los mayores tamaños que se observan de los 4500 m hasta la presa (cero metros) obedecen al material inicialmente asignado al lecho pues el depósito modelado no lleva material hasta dicha zona. Dicha disminución del tamaño del sedimento transportado en el sentido del flujo es el comportamiento que generalmente se espera si el sedimento en el vaso proviene mayoritariamente de una fuente hacia la cola del embalse.

Al comparar el comportamiento identificado desde la simulación con algunos valores de D50 muestreados en el sedimento superficial (entre 0.1 m y 0.2 m de profundidad) por el programa Embalses desarrollado por la UNAL-UdeA, se apreció que solo unas campañas guardan dicha disminución del tamaño del material en el sentido del flujo (Agosto del 2011, Febrero del 2012 y Mayo del 2012), las mismas corresponden a los casos en donde se apreciaron rangos de variación del material pequeños (**Figura 5-21**).

Aquellas campañas que presentan amplios rangos de variación rompen la grano-selección mostrando incrementos del D50 en el sentido del flujo (Noviembre del 2011), donde, según las simulaciones realizadas, dicho material no provendría del río Porce, lo que da pie a pensar que podría ser efecto de aportes locales desde una cauce cercano o por derrumbes desde las laderas del embalse, o ambas.

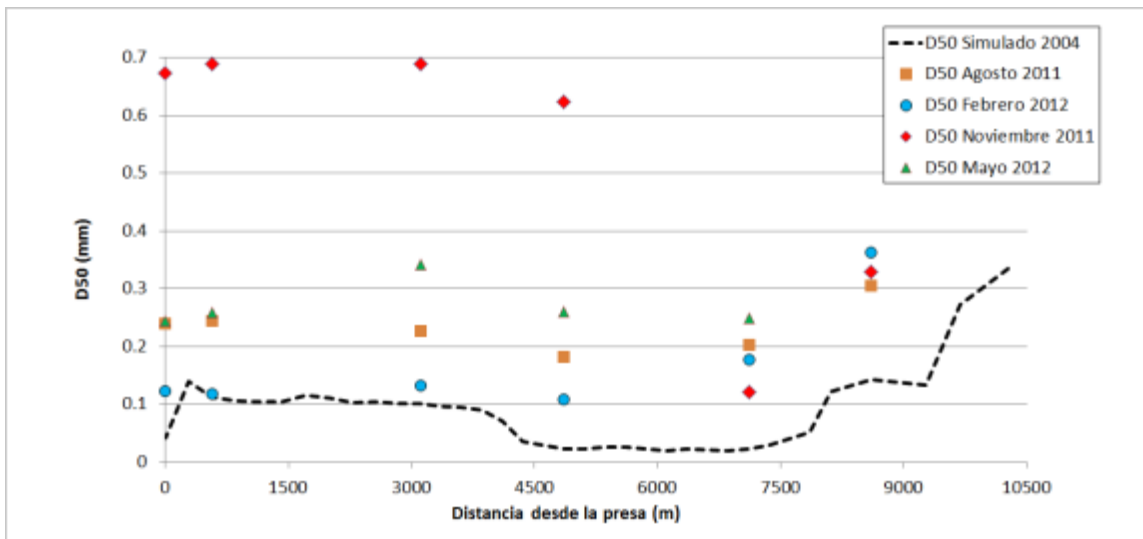


Figura 6-6: Simulación del D50 del material del lecho del embalse, calibración

6.4 Validación de la calibración

Esta labor se desarrolló en el período comprendido entre el 01/10/2004 al 24/11/2007 empleando sin modificación alguna los parámetros seleccionados en el proceso de calibración.

El perfil obtenido en el proceso de simulación hacia el final del período de validación se muestra en la **Figura 6-7**, se observa que en lo que respecta al thalweg el modelo captura adecuadamente la tendencia general del mismo en lo correspondiente a la pendiente media del topset y del foreset, y la ubicación del punto de pivote. El valor del RMSE obtenido fue de 2.38 m.

En cuanto al error en el volumen sedimentado, éste fue de 4.24 Mm³ (13.02 Mm³ estimados por el modelo frente a los 8.78 Mm³ calculados desde las batimetrías) que corresponde a una sobreestimación del 48% en volumen.

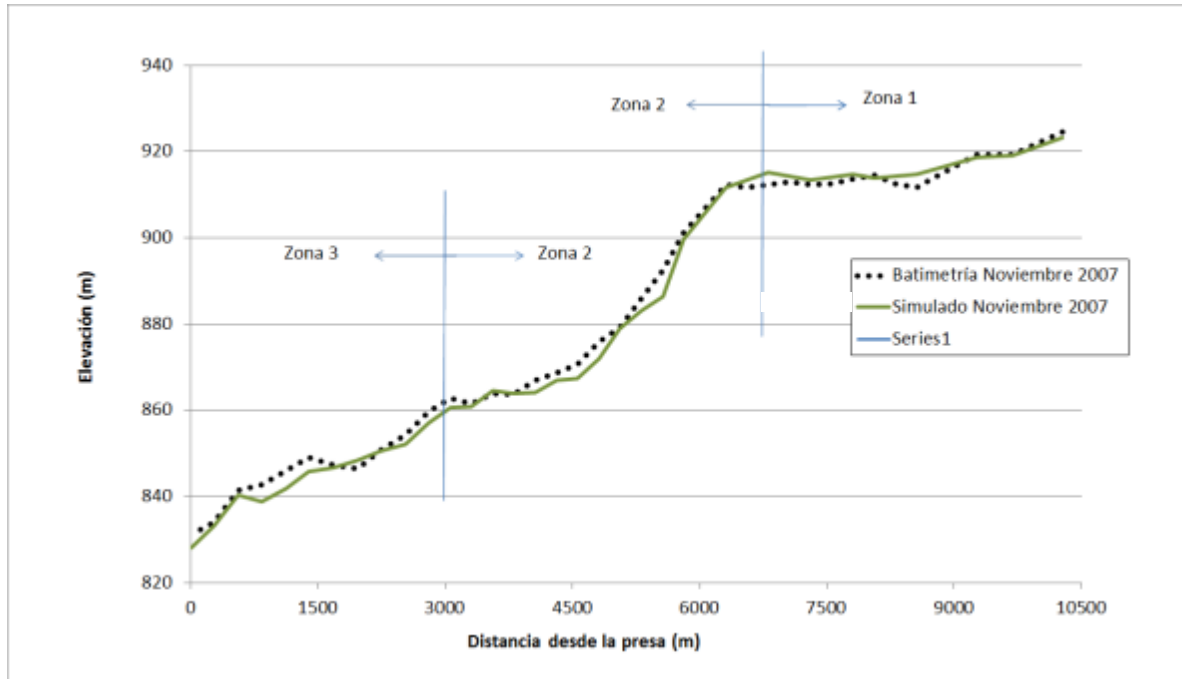


Figura 6-7: Perfil del thalweg del embalse simulado entre 01/Octubre/2004 al 24/Noviembre/2007, validación

Al igual que en la calibración el error en el volumen sedimentado se presentó especialmente en el sector de la sección 4 (confluencia quebrada Guaduas, **Figura 6-8**) con un error medio de 5.5 m en la altura del lecho. Se presentaron subestimaciones hacia el frente del delta (sección 6) que por lo estrecho de las secciones frente a la de la sección 4 no influyeron en demasía en el error del volumen sedimentado.

La posible causa del deficiente desempeño del modelo en la etapa de validación en lo referente al volumen sedimentado, es la interacción paramétrica identificada en el proceso de calibración (equifinalidad de parámetros, diferentes combinaciones de ellos producen soluciones igualmente buenas), que es factible haya ocasionado en la calibración un escenario que podría denominarse como un óptimo local: una buena solución pero no una calibración óptima, por lo que al emplear los parámetros encontrados en la calibración en un set de datos diferente los mismos no tuvieron la capacidad de representar la física de la sedimentación en el cuerpo de agua.

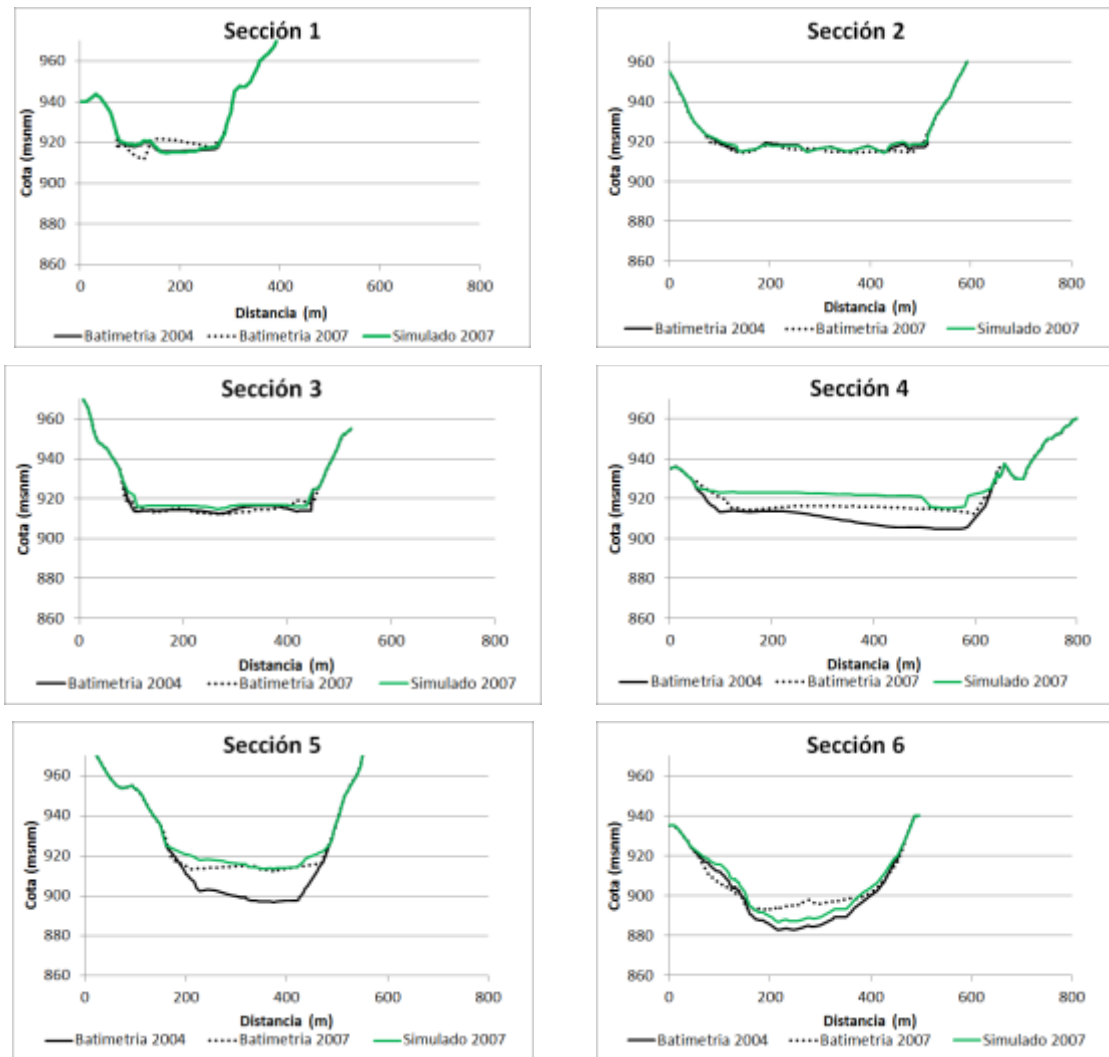


Figura 6-8: Comparación de secciones transversales batimétricas y simuladas, validación

La situación anterior es claramente una consecuencia del desconocimiento de elementos que introducen gran incertidumbre a los resultados finales como lo son la granulometría del material que ingresa al embalse (tanto por el río Porce como por los afluentes, en especial La Frijolera), junto con los caudales asociados a los mismos y su concentración.

Sin embargo, dado que el avance del frente en función de los elementos geométricos generales definidos para el delta fue capturado por el modelo, se empleará el mismo en las condiciones de calibración antes descritas para evaluar situaciones particulares en la formación del delta, como se expone a continuación.

6.5 Simulación de casos

6.5.1 Eventos de ascenso y descenso de nivel

Dentro de la información disponible en el embalse se identificaron una serie de eventos (rachas) relacionados con ascensos y descensos importantes del nivel del agua según el historial disponible entre los años 2001 y 2007 (**Tabla 5-4**), desencadenados por la hidrología y la operación del embalse.

Se consideraron en cada caso los cuatro mayores eventos según el historial del embalse, donde para cada uno se cuantificó desde los resultados del modelo el volumen erosionado (negativo) o depositado (positivo) tanto en el foreset como en el topset.

Las simulaciones realizadas fueron sintéticas, pues en cada una se emplearon los datos reales medios diarios de las variaciones de caudal de entrada y de nivel del agua (desde una semana antes de las respectivas rachas), pero dichos datos se ubicaron hacia el final de la serie de tiempo del período de calibración (30 de septiembre del 2004), por lo que los efectos que produzcan los eventos simulados se evaluarán sobre el perfil del thalweg correspondiente a la batimetría de dicho año, la razón de lo anterior, es que en el período de calibración fue donde el modelo mostró el mejor desempeño y se precisó de ese comportamiento para valorar de la mejor manera los posibles efectos de los eventos simulados.

En la **Figura 6-9** se aprecia que en todos los eventos de ascenso del nivel del agua valorados se presentó depósito de sedimento tanto en el topset como en el foreset, siendo los primeros 50% mayores que los segundos. En cada uno de los casos en promedio se depositó en el foreset un volumen de sedimento equivalente al 1% del total depositado a septiembre del 2004, y en el topset el porcentaje fue del 2.1%.

En los eventos de descenso en tres de los cuatro se presentó deposición (**Figura 6-10**), esto asociado a que los descensos aunque producidos por la extracción de agua para generación hidroeléctrica, se vieron acompañados por caudales de ingreso por el río Porce de magnitudes tales que hicieron predominar el depósito a la erosión por el

sedimento por ellos transportado e ingresado al embalse, y adicionalmente, las magnitudes de los niveles del agua precedentes antes de las rachas valoradas distaban de una condición cercana a los mínimos operativos.

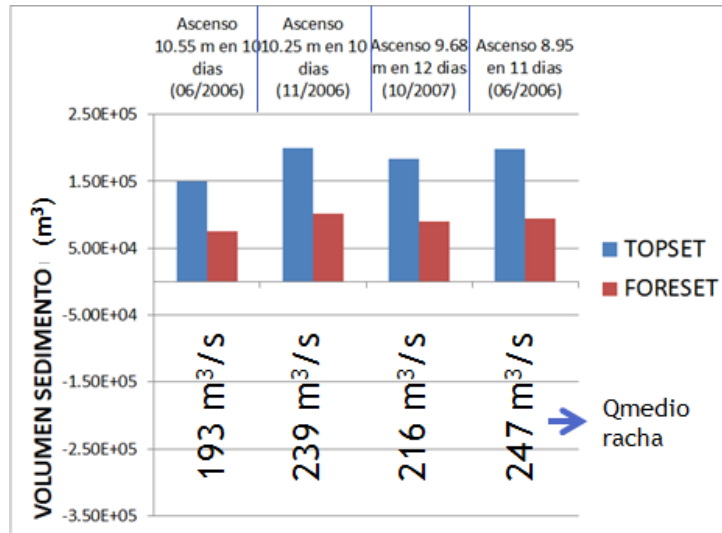


Figura 6-9: Volúmenes erosionados y sedimentados eventos de ascenso del nivel del agua

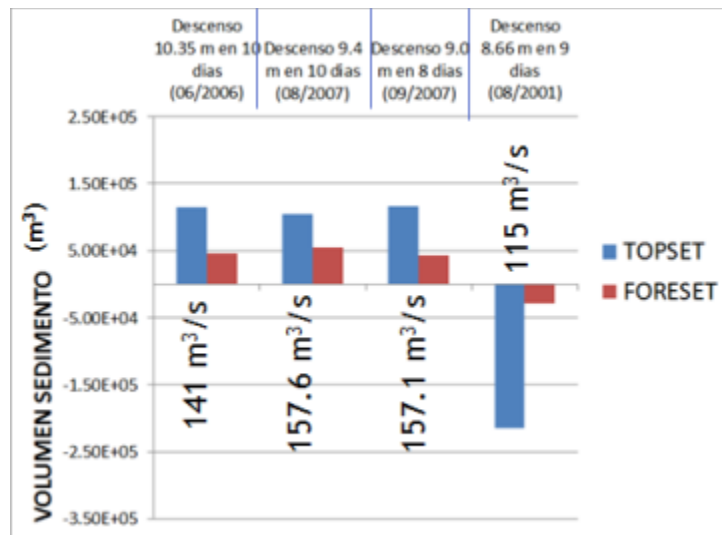


Figura 6-10: Volúmenes erosionados y sedimentados eventos de descenso del nivel del agua

En la racha de descenso de agosto del 2001 (8.66 m de disminución del nivel del agua en 9 días, 0.96 m/día) se presentaron dos situaciones que favorecieron la erosión, la

primera que se redujeron los caudales de ingreso frente a los otros eventos modelados y por ende el volumen de sedimento que ingresa por el río Porce, y segundo y tal vez más importante, el nivel del agua antes de la racha correspondió a un valor inferior al de los otros tres eventos, que según su magnitud puede considerarse como medio a bajo (914.2 m, 8.5 m por debajo del medio operativo).

El volumen erosionado en el evento en mención se estimó en el topset como un 2.6% del volumen total depositado al año 2004, y en el foreset ese porcentaje fue del orden del 0.3%, en este caso, el sedimento que se erosionó se depositó por fuera de la zona que al año 2004 fue considerada como el foreset, contribuyendo con ello al avance del frente, comportamiento acorde con lo observado desde las batimetrías donde del año 2001 al año 2004 el delta principalmente se formó con ciertas características geométricas, y ya hacia el año 2007 avanzó preferentemente antes que aumentar los niveles en la zona del topset.

En lo correspondiente a la variación del tamaño del sedimento en función del D50, se observó que tanto en los eventos de ascenso como de descenso evaluados (en magnitud los mayores registrados en el embalse al año 2007) no se transportan mezclas de sedimento con tamaños D50 mayores a 0.125 mm (arena fina a muy fina) más allá del frente del delta (**Figura 6-11**), donde en las rachas de ascenso se observa una grano-selección que provoca en el sentido preferencial del flujo una disminución uniforme en los tamaños sedimentados, mientras que en los dos mayores eventos de descenso se presentó un incremento en los tamaños depositados hacia la zona del pivote, explicado esto por los pulsos hidrológicos (para unas condiciones de nivel del agua dadas) que propiciaron en un momento dado la llegada de dichos tamaños a esa zona, pero que los caudales posteriores no tuvieron la capacidad de movilizar.

Es necesario aclarar que los eventos antes valorados son rachas de días consecutivos de diferente duración donde el río Porce no presentó condiciones de creciente en los eventos de ascenso, luego las tasas de ascenso del nivel del agua correspondieron a condiciones medias de caudal del río Porce.

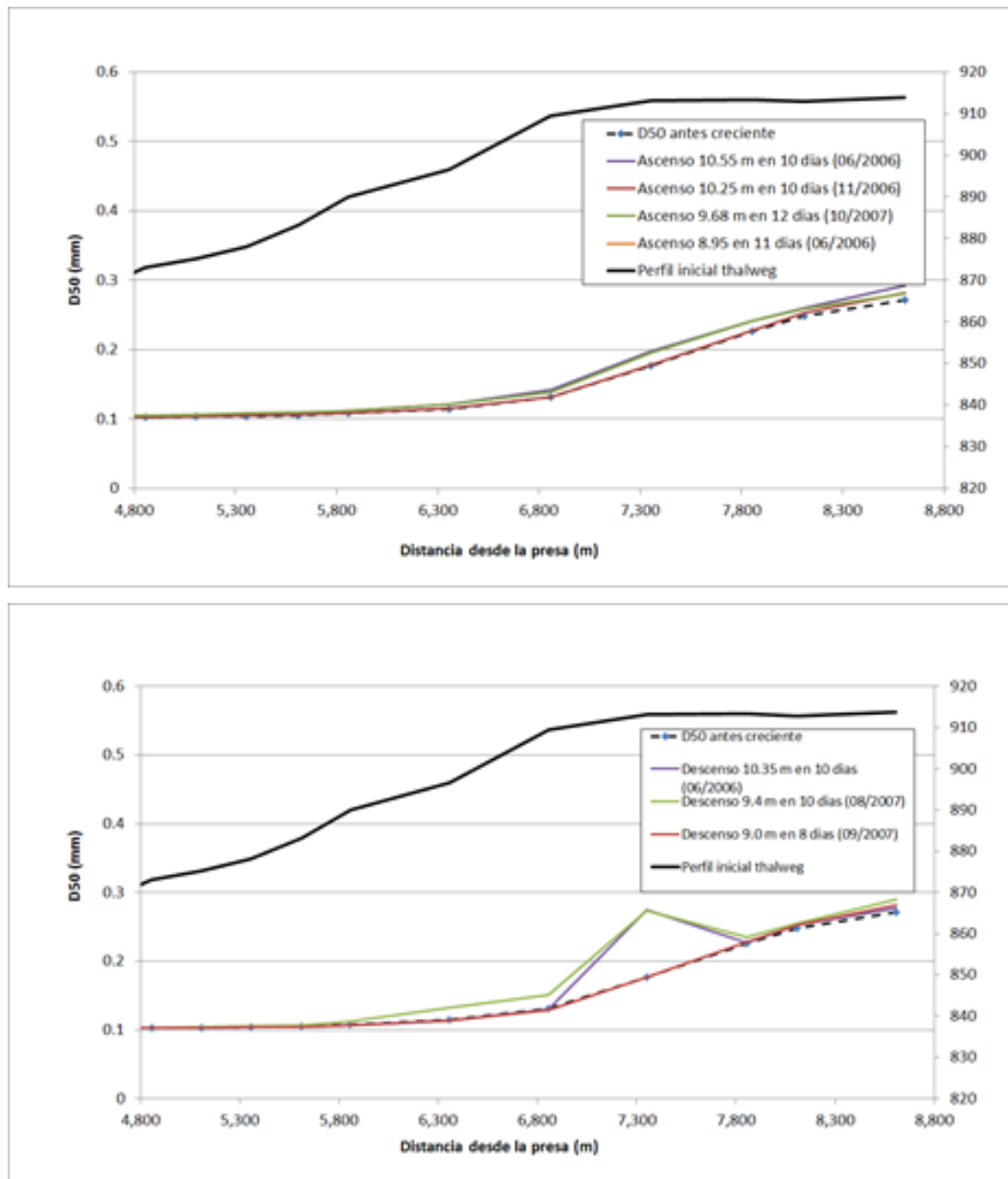


Figura 6-11: D50 simulados del material del lecho en el “thalweg” en la zona del delta fluvial hacia el final de diferentes eventos de ascenso (arriba) y descenso (abajo) del nivel del agua

6.5.2 Eventos de creciente y el papel del nivel del agua en el embalse sobre las características del delta fluvial

Entre los años 2001-2012 se identificaron los eventos de creciente descritos en la **Tabla 6-3** donde se destacan las crecientes de los años 2008 y 2012.

Tabla 6-3: Caudales máximos y mínimos en el período 2001-2012, estación El Diamante

Año	Caudal máximo	Caudal mínimo	Registro	Nota
	m ³ /s	m ³ /s		
2001	440.1	44.04	Instantáneo	
2002	428.8	41.69	Instantáneo	
2003	654.2	34.67	Instantáneo	
2004	526.4	48.11	Instantáneo	
2005	618.3	42.17	Instantáneo	
2006	739.4	53.78	Instantáneo	
2007	610.2	49.83	Instantáneo	
2008	924.3	63.15	Instantáneo	
2009				Información existente pero no disponible
2010	741.477	34.227	Cada 30 min.	
2011	816.47	76.443	Cada 30 min.	
2012	864.376	58.187	Cada 30 min.	Serie hasta 31/05/2012

Entre las dos se seleccionó para la simulación la presentada en el año 2012 pues se contó con información tanto a nivel diario como a nivel intra-horario de la misma, lo que hizo factible apreciar el efecto del promedio diario en la magnitud del pico de la creciente.

En el evento del año 2008 por el contrario solo se tenía la magnitud del pico y los caudales medios diarios disponibles. Sin embargo se estimó que el evento seleccionado es representativo del grupo de crecientes que han ingresado al embalse en el tiempo que lleva de funcionamiento.

En la **Figura 6-12** se muestra la serie de 15 días de caudal medido en la estación El Diamante la cual incluyó el pico de 864.376 m³/s presentado el día 01 de mayo del 2012

a las 2:30 pm, iniciando la creciente a las 7:30 pm del día 30 de Abril y terminando a las 9:00 pm del día primero de Mayo.

Se observó que al realizar el promedio diario el caudal máximo en dicha resolución temporal fue de 498.53 m³/s, aunque es notorio el efecto del promedio sobre el pico, se observó también que en los días siguientes se presentaron dos crecientes de importancia con picos superiores a los 500 m³/s, lo que en conjunto formó un caso interesante para valorar el papel del nivel del agua en la evolución de las características del delta fluvial al momento de entrar una creciente el embalse.

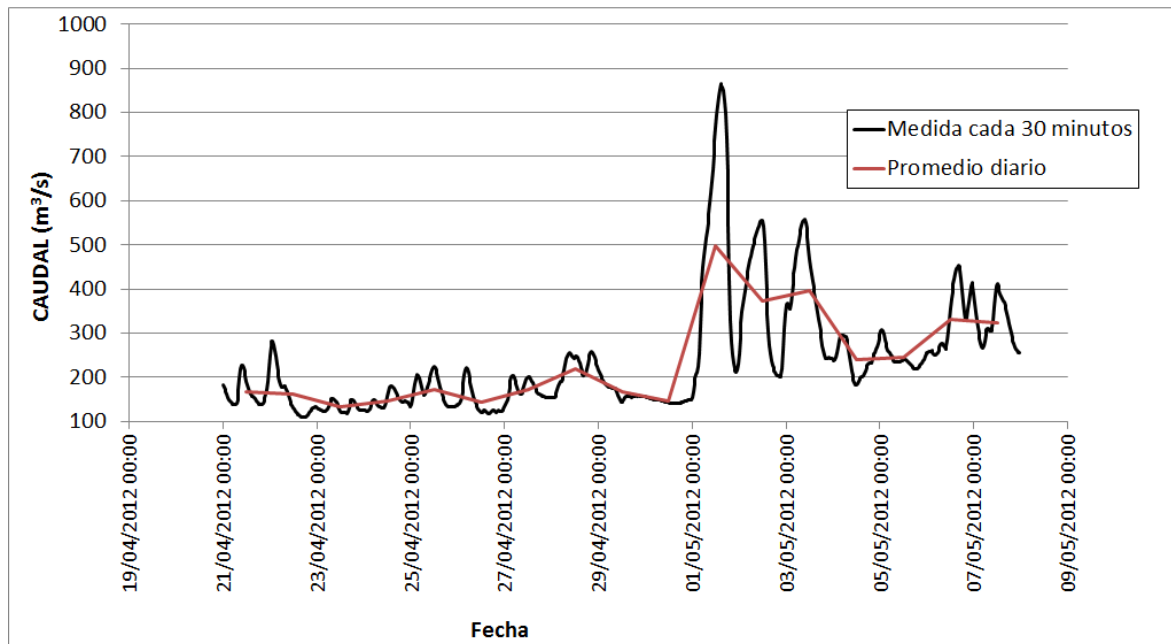


Figura 6-12: Caudales medidos cada 30 minutos y promedio diario en la estación El Diamante en el período 21/04/2012 – 07/05/2012

Con la creciente anterior promedia diaria (resolución temporal del modelo) y empleando el método de la piscina nivelada, se generaron escenarios sintéticos en los cuales se estableció un esquema de descarga del embalse y sus correspondientes niveles del agua, con el fin de obtener ciertos niveles en el vaso el día antes del inicio de los picos de creciente.

En la **Figura 6-13** se muestra la evolución del delta fluvial al ingresar la creciente máxima analizada para niveles del agua en el embalse el día anterior al pico de la creciente entre los 911.45 m (nivel cercano al mínimo operativo) y los 913.56 m.

Se observó que solo se presentaron cambios notorios en la forma del perfil del thalweg cuando el nivel del agua antecedente al evento de creciente fue igual o menor a 912.58m, donde los mayores efectos se presentaron cuando el nivel se acercó al mínimo operativo (evento con nivel antecedente de 911.45 m), en ese escenario la erosión observada en la zona del topset correspondió al 1.2% del volumen total sedimentado al año 2004 (óvalo rojo), y el sedimento depositado en dicho evento hacia el foreset fue del 2.8% (óvalo verde), luego el 1.6% de diferencia en el volumen depositado correspondería a lo que directamente ingresó por el río en el evento (0.13 millones de m³ en aproximadamente cuatro días de crecientes sucesivas).

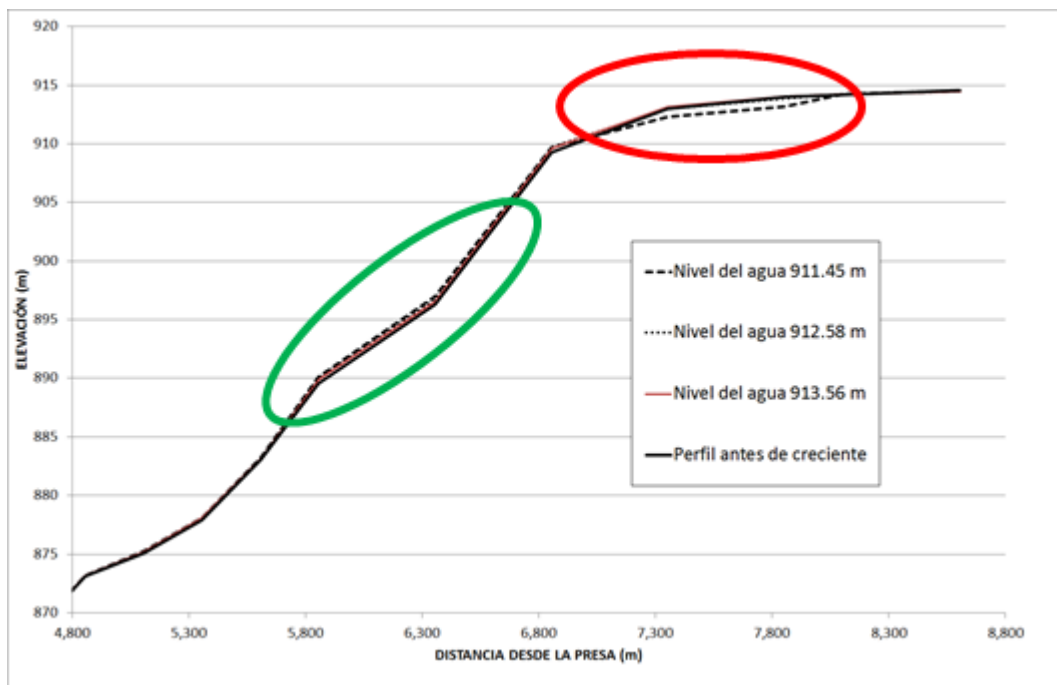


Figura 6-13: Simulación de la evolución del perfil del thalweg en el evento de creciente valorado para diferentes niveles del agua bajos en el embalse en el día antes del pico de creciente

El material del lecho en función de su D50 mostró en su distribución por el thalweg el efecto de los pulsos de caudal (y sedimento correspondiente), que originaron el depósito de materiales del orden de los 0.5 mm (arena media a gruesa) en la zona más cercana al río con otro pico de tamaños hacia la zona del topset cercana al punto de pivote (arenas finas), donde en las combinaciones de creciente y nivel del agua valoradas se encontró igualmente que hacia aguas abajo del foreset, no se transportan mezclas de sedimentos que hayan ingresado por el río Porce que tengan tamaños D50 mayores a 0.125 mm.

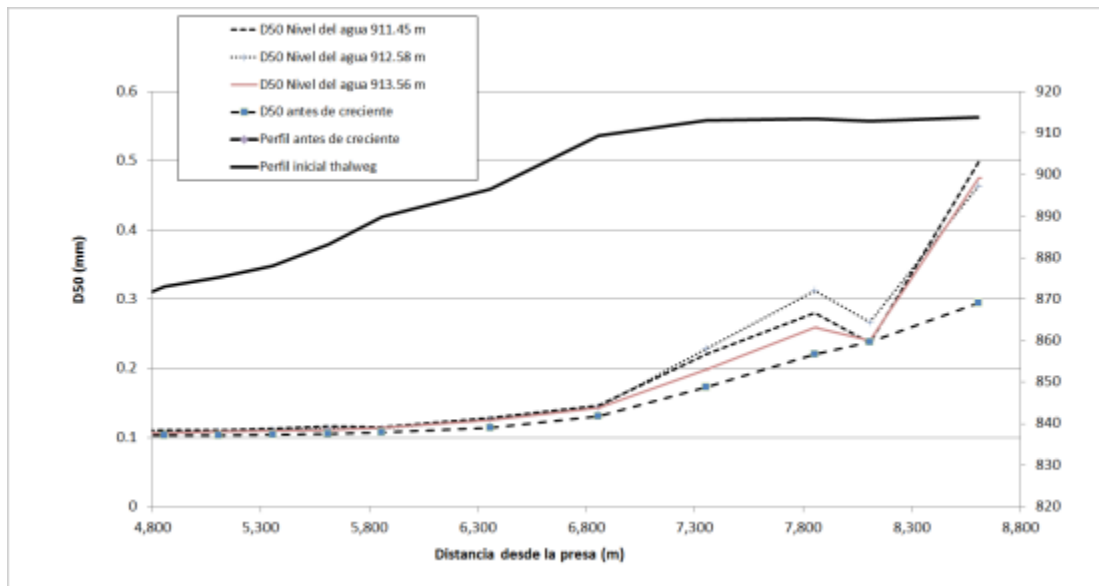


Figura 6-14: Evolución del tamaño D50 por el “thalweg” en el evento de creciente valorado para diferentes niveles del agua en el embalse de medios a altos en el día antes del pico de creciente

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Sobre el proceso de sedimentación

En primera instancia debe resaltarse que dadas las características de la información base empleada en el análisis y el desempeño del modelo matemático derivado de ello, las conclusiones sobre el proceso de sedimentación son preliminares, y abren la puerta a la comprobación de las mismas en los aspectos específicos mencionados en este documento.

Los eventos de ascenso del nivel del agua en condiciones de caudales de ingreso promedios diarios del orden o superiores a los 200 m³/s del río Porce, favorecen la sedimentación en la porción superior del delta de manera importante (Topset), y dada la magnitud de los caudales pueden alcanzar a ocasionar sedimentación en el frente del delta (en menor medida, del orden del 50% de la presentada en el topset).

El ingreso de crecientes o incluso de caudales medios del río Porce en niveles del agua del orden de los 912 m o inferiores, es un mecanismo que condiciona de manera significativa el avance del delta (espacial y temporalmente) más allá de la influencia de los niveles de operación más frecuentes, dadas las modificaciones que pueden inducir al volumen depositado hacia el frente del mismo en eventos de corta duración.

Se considera poco probable que mezclas de sedimento que ingresen por el río Porce con un tamaño D50 mayor al de las arenas muy finas (>0.125 mm) sean transportadas más allá del frente del delta, luego se atribuye el incremento del tamaño del sedimento depositado hacia la presa encontrado en las campañas de campo disponibles, a entradas de afluentes cercanos a la misma, o sedimentos pre-existentes.

El esquema de sedimentación del embalse Porce II puede considerarse complejo pues incluye elementos descritos en la literatura especializada para catalogarlo de dicha forma, como el hecho de encontrarse sedimento grueso donde se esperaría encontrar tamaños más finos a causa de aportes de tributarios o de las mismas márgenes del embalse, la presencia de corrientes de densidad con capacidad de transportar sedimento hasta el sitio de presa, y la evidencia de retrabajo de los depósitos del sedimento en la zona del delta tanto en el afluente principal como en los tributarios menores.

7.2 Sobre el modelo

Con la información actualmente disponible (hidrológica, operativa y de sedimentos) no fue factible calibrar de forma óptima el modelo unidimensional de frontera móvil GSTARS4 en el embalse Porce II. La información disponible, sin embargo, permitió obtener una buena solución para ventanas específicas de tiempo (calibración en un óptimo local), que sirvió para dar respuesta a los objetivos planteados.

Se observó la importancia de calibrar tanto el factor de recuperación para depositación como el factor para erosión, por la existencia de ambos tipos de eventos en el proceso de conformación del delta a escala diaria.

7.3 Recomendaciones

En primer lugar se recomienda mejorar en la medición de los caudales extraídos del embalse, con especial énfasis en separar su origen (turbinado, vertimiento) y la condiciones en las cuales se dan (grado de apertura de compuertas), con el fin de posibilitar el uso futuro de otros tipos de modelos o condiciones de frontera que lleven a la mejora en los resultados obtenidos.

Igualmente es primordial acompañar los aforos de caudal sobre el río Porce con aforos de sedimentos en suspensión y de carga de fondo, incluida además de la estimación de la concentración, la medición de la distribución granulométrica de los mismos.

Es recomendable acometer la toma de núcleos de sedimento en profundidades comparables a las del espesor del delta fluvial formado, con el fin de configurar un esquema más preciso de la forma como ha avanzado el delta, y analizar cómo las diferentes mezclas de sedimento que ingresan por los afluentes según la condición hidrológica se han depositado al interior del mismo.

Debería generarse una caracterización y entendimiento más adecuado del papel de las corrientes de turbidez en el transporte del sedimento fino que ingresa por el río Porce hasta la zona limnética del embalse, en términos de su capacidad de transportar cierta cantidad y gradación de sedimento hasta zonas profundas, con el fin de tener claridad sobre su verdadero papel en el largo plazo sobre la vida útil del embalse.

Bibliografía

- Abood, M.M., Mohammed, T.A., Ghazali, A.H., Mahmud, A.R., Sidek, L.M., 2009. Review study and assessment for sedimentation models applied to impounding reservoirs. *JEAS - Journal of Engineering & Applied Sciences* 4, 152–160.
- Ahn, J., 2011. Numerical modeling of reservoir sedimentation and flushing processes (Ph.D.).
- Althaus, J., De Cesare, G., 2006. Reservoir Sedimentation, in: *Sustainable Sediment Management in Alpine Reservoirs Considering Ecological and Economical Aspects*. Institut für Wasserwesen, Neubiberg, p. 117.
- Asselman, N.E.M., 2000. Fitting and interpretation of sediment rating curves. *Journal of Hydrology* 234, 228–248.
- Bedient, P.B., Huber, W.C., Vieux, B.E., 2007. *Hydrology and Floodplain Analysis*, 4th ed. Prentice Hall.
- Beebo, Q., Bilal, R., 2012. Simulating bathymetric changes in reservoirs due to sedimentation Application to Sakuma dam, Japan (MSc).
- Çaliskan, A., 2008. Modeling of hydrodynamics and sedimentation in a stratified reservoir: Tahtali reservoir, Izmir (MSc).
- Camacho, L., 2006. Calibración y comparación de modelos de transporte de solutos en ríos de montaña. Presented at the XXII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, CIUDAD GUAYANA, VENEZUELA, p. 10.
- Campos, R., 2001. Three-dimensional reservoir sedimentation model (Ph.D.).
- Chow, V.T., Maidment, D.R., 1994. *Hidrología Aplicada*. MC Graw Hill.
- Correa, R., 2010. Estudio preliminar de la estructura térmica del embalse Porce II: Análisis de sensibilidad del modelo unidimensional DYRESM (Trabajo de grado).
- Duque Marín, O.A., Poveda Jaramillo, G., Posada García, L., 2006. Influencia de El Niño en el transporte de sedimentos en algunas cuencas colombianas. Presented at the XVII Seminario Nacional Hidráulica e Hidrología: Conocimiento e ingeniería para la conservación y aprovechamiento del agua, Popayán, p. 10.
- Eder, A., Strauss, P., Krueger, T., Quinton, J.N., 2010. Comparative calculation of suspended sediment loads with respect to hysteresis effects (in the Petzenkirchen catchment, Austria). *Journal of Hydrology* 389, 168–176.
- Eizel-Din, M., Bui, M., Rutschmann, P., Failer, E., Grass, C., Kramer, K., Hussein, A., Saghayroon-Elzein, A., 2010. Trap efficiency of reservoirs on the Nile River. Presented at the River Flow 2010, Bundesanstalt für Wasserbau, pp. 1111–1117.
- Empresas Públicas de Medellín, 2005. *Revista hidrometeorológica: Cincuenta años de hidrometeorología en Empresas Públicas de Medellín*. Medellín.
- Empresas Públicas de Medellín, 2008. *Ingeniería de presas en Empresas Públicas de Medellín*. Medellín.
- Escobar, C.A., 2010. Spatial sensitivity analysis of a hydrodynamic model of the Punchiná reservoir (Antioquia). *Revista EIA* 97–113.
- Escobar, C.A., Pérez, J.A., 2011. 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). *Revista Universidad EAFIT* 45, 73–89.
- Ferguson, R.I., 1986. River Loads Underestimated by Rating Curves. *Water Resources Research* 22, 74–76.
- Francés, F., Vélez, J.I., Vélez, J.J., 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 332, 226–240.
- French, R.H., 2007. *Open Channel Hydraulics*, 1st ed. Water Resources Pubns.
- García, M. (Ed.), 2008. *Sedimentation Engineering: Theories, Measurements, Modeling and Practice: Processes, Management, Modeling, and Practice*, 1st ed. American Society of Civil Engineers.
- González, J., Tamburrino, A., Niño, Y., 2005. Modelo de sedimentación en embalses: deltas y corrientes de turbidez. Presented at the RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos, Neuquén, Argentina, p. 24.
- Goodwill, P., Rowan, J.S., Greco, M., 1995. Sediment routing through reservoirs, Wyresdale Park Reservoir, Lancashire, U.K. *Physics and Chemistry of The Earth* 20, 183–190.
- Han, Q., 1980. A study on the non-equilibrium transportation of suspended load. *Proceedings of the International Symposium on River Sedimentation*, Beijing, China, 793–802.
- Horowitz, A.J., 2003. An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes* 17, 3387–3409.
- Hoven, L., 2010. Three-dimensional numerical modelling of sediments in water reservoirs (MSc).
- Hu, B., Wang, H., Yang, Z., Sun, X., 2011. Temporal and spatial variations of sediment rating curves in the Changjiang (Yangtze River) basin and their implications. *Quaternary International* 230, 34–43.
- Huang, J., Greimann, B., 2010. User's Manual for SRH-1D 2.6, *Sedimentation and River Hydraulics – One Dimension*, (Technical Report No. SRH-2010-25). Bureau of Reclamation, Denver.
- Jiménez, O., Farias, H.D., Rodríguez, C., 2005. Procesos de sedimentación en embalses en ambientes tropicales. *Estudios de casos en Costa Rica y República Dominicana. Ingeniería del Agua* 12, 1–16.
- Jothiprakash, V., Garg, V., 2008. Re-look to conventional techniques for trapping efficiency estimation of a reservoir. *International Journal of Sediment Research* 23, 76–84.
- Julien, P., Rojas, R., 2002. Upland erosion modeling with CASC2D-SED. *International Journal of Sediment Research* 17, 265–274.
- Julien, P.Y., 2002. *River Mechanics*, 1st ed. Cambridge University Press.
- Julien, P.Y., 2010. *Erosion and Sedimentation*, Second edition. ed. Cambridge University Press.
- Kokpinar, M., Kumcu, Y., Sakarya, A., Gogus, M., 2010. Reservoir sedimentation in the Demirköprü Dam, Turkey. Presented at the River Flow 2010, Bundesanstalt, p. 6.
- Kostic, S., Parker, G., 2003a. Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 2. Experiment and numerical simulation. *Journal of Hydraulic Research* 41, 141–152.
- Kostic, S., Parker, G., 2003b. Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 1. Theory and numerical modeling. *Journal of Hydraulic Research* 41, 127–140.

- Largo, C., 2011. Caracterización espacio – temporal de la estructura térmica del embalse Porce II (MSc).
- Mamede, G., 2008. Reservoir Sedimentation in Dryland Catchments: Modelling and Management (Ph.D.).
- Masis-Jimenez, J., Fukuoka, S., 2002. Development of a numerical model for reservoir sedimentation in the presence of dry and wetting during flood. Graduate School of Engineering, Hiroshima University 51, 65–74.
- Mays, L.W., 1999. Hydraulic Design Handbook, 1st ed. McGraw-Hill Professional.
- Mohammadnezhad, B., Shamsai, A., 2007. Effects of Density Currents on Sedimentation in Reservoirs. Scientia Iranica 14, 395–404.
- Montoya, J., 2008. Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos (Ph.D.).
- Morris, G.L., Fan, J., 1997. Reservoir Sedimentation Handbook, 1st ed. McGraw-Hill Professional.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., 2005. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation (Theory document). USDA Agricultural Research Service.
- Ochoa, T., 2011. Hidráulica de ríos y procesos morfológicos, 1st ed. Ecoe Ediciones, Bogotá.
- Ortega, S., Restrepo, J., Correa, R., Gómez-Giraldo, A., Toro, M., 2010. Análisis de sensibilidad para la modelación unidimensional de la estructura térmica de embalses tropicales. Presented at the XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.
- Posada, L., Montoya, L., 2000. Capacidad de transporte de sedimentos en cuencas con información escasa. Presented at the XIV Seminario de Hidráulica e Hidrología, Villa de Leyva, Boyacá, p. 10.
- Ramos, R., 2007. Modelación del efecto del viento sobre la estructura térmica del embalse Porce II (MSc).
- Rankinen, K., Karvonen, T., Butterfield, D., 2006. An application of the GLUE methodology for estimating the parameters of the INCA-N model. Science of The Total Environment 365, 123–139.
- Restrepo, J., 2005. Los sedimentos del río Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental, 1st ed. Fondo Editoria Universidad EAFIT, Medellín.
- Roldán, G., Ramírez, J.J., 2008. Fundamentos de limnología neotropical, 2nd ed. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín.
- Russell, K., Greimann, B.P., Cluer, B., Hepler, T., King, D., O'Meara, S., Simon, A., Godaire, J., Salas, D., 2010. Klamath Reservoir Sediment Characterization and Drawdown Impacts for the Dam Removal Investigation. AGU Fall Meeting Abstracts -1, 1053.
- Sadek, N., 2012. Island development impacts on the Nile River morphology. Ain Shams Engineering Journal.
- Saenyi, W., 2003. Temporal and Spatial Sediment Modelling in Masinga Reservoir, Kenya. Die Bodenkultur - Journal for Land Management, Food and Environm 54, 207–213.
- Sánchez, J., 1996. Sedimentación en embalses, 1st ed, Manual ingeniería de ríos. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Shen, Z.Y., Chen, L., Chen, T., 2011. Analysis of parameter uncertainty in hydrological modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three

- Gorges Reservoir Region, China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 8, 8203–8229.
- Shooshtari, M., Adib, A., Ranginkaman, M., 2010. Evaluation of variation of useful storage of reservoir in stream dams by GSTARS3 software. *African Journal of Agricultural Research, Academic Journals* 5, 60–69.
- Simões, F.J.M., Yang, C.T., 2008. GSTARS computer models and their applications, Part II: Applications. *International Journal of Sediment Research* 23, 299–315.
- Sloff, C., 1997. Modelling reservoir sedimentation processes for sediment management studies. Presented at the *Hydropower into the Next Century*, Portoroz, Slovenia, pp. 15–17.
- Spalletti, P., Brea, J., 2005. Predicción de la sedimentación de embalses con modelos unidimensionales tradicionales. Presented at the *RIOS 2005: Principios y Aplicaciones en Hidráulica de Ríos*, Neuquén,.
- Subramanya, K., 2009. *Engineering Hydrology*, 3e. McGraw-Hill Education (India).
- Tagavifar, A., Adib, A., 2010. Evaluation of sedimentation and flushing by mathematical model in reservoirs of the successive Dez stream dams in Iran. *Food, Agriculture & Environment* 8, 980–987.
- Tarela, P., Méndez, A., 2001. Modelación matemática del transporte de sedimentos y la evolución del lecho de embalses. Presented at the *III Taller Internacional sobre Enfoques Regionales para el Desarrollo y la Gestión de Embalses en la Cuenca del Río de la Plata*, Instituto Argentino de Recursos Hídricos, p. 10.
- Toniolo, H., 2009. Numerical simulation of sedimentation processes in reservoirs as a function of outlet location. *International Journal of Sediment Research* 24, 339–351.
- Toniolo, H., Parker, G., Voller, V., 2007. Role of Ponded Turbidity Currents in Reservoir Trap Efficiency. *Journal of Hydraulic Engineering* 133, 579–595.
- Toniolo, H., Schultz, J., 2005. Experiments on sediment trap efficiency in reservoirs. *Lakes & Reservoirs: Research & Management* 10, 13–24.
- Tundisi, J.G., Tundisi, T.M., 2011. *Limnology*, 1st ed. CRC Press.
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, 2006. *Erosion and Sedimentation Manual*. US Department of the Interior, Denver.
- Universidad de Antioquia, Universidad Nacional de Colombia, 2011. Estudio de la problemática ambiental de tres embalses de empresas públicas de Medellín ESP para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico (Avance). Medellín.
- Valizadegan, E., Bajestan, M., Samani, H., 2009. Control of sedimentation in reservoirs by optimal operation of reservoir releases. *Food, Agriculture & Environment* 7, 759–763.
- Villegas, B., 2004. Utilización de un modelo numérico para el estudio de la estructura térmica del embalse Porce II (MSc).
- Vischer, D.L., Hager, W.H., 1998. *Dam Hydraulics*, 1st ed. Wiley.
- Wagener, T., Wheeler, H., Lees, M., 2004. *Monte-Carlo Analysis Toolbox*. Imperial College London, London.
- Wang, H., Yang, Z., Wang, Y., Saito, Y., Liu, J.P., 2008. Reconstruction of sediment flux from the Changjiang (Yangtze River) to the sea since the 1860s. *Journal of Hydrology* 349, 318–332.
- Yang, C., 2008. Applications of GSTARS computer models for solving river and reservoir sedimentation problems. *Transactions of Tianjin University* 14, 235–247.
- Yang, C., Ahn, J., 2011. User manual for GSTARS4.
- Yang, C.T., 2003. *Sediment Transport: Theory and Practice*. Krieger Pub Co.
- Yang, C.T., Marsooli R., 2010. Recovery factor for non-equilibrium sedimentation

- processes. *Journal of Hydraulic Research* 48, 409–413.
- Yang, C.T., Simões, F., 2008. GSTARS computer models and their applications, part I: theoretical development. *International Journal of Sediment Research* 23, 197–211.