

Modelización de corrientes de turbiedad en embalses. Caso de estudio: Embalse Amaluza (Ecuador)

Modeling of turbidity currents in reservoirs. Case study: Amaluza reservoir (Ecuador)

Martí Sánchez-Juny^{a1*}, Hernán Larriva^{a2}, Soledad Estrella Toral^{a3} y Marcos Sanz-Ramos^{a4}

^{a1}Institut Flumen, Escola d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) – Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE), 08034 Barcelona, España.

E-mail: ^{a1}marti.sanchez@upc.edu, ^{a2}herman.larriva@upc.edu, ^{a3}soledad.estrella@upc.edu, ^{a4}marcos.sanz-ramos@upc.edu

*Autor para correspondencia

Recibido: 01/08/2023

Aceptado: 04/10/2023

Publicado: 31/10/2023

Citar como: Sánchez-Juny, M., Larriva, H., Estrella Toral, S., Sanz-Ramos, M. 2023. Modeling of turbidity currents in reservoirs. Case study: Amaluza reservoir (Ecuador). *Ingeniería del agua*, 27(4), 253-268. <https://doi.org/10.4995/la.2023.20150>

RESUMEN

Se presenta el análisis hidrodinámico del embalse Amaluza, ubicado en el sur de Ecuador, mediante DELFT3D. Se ha dispuesto de información batimétrica en 30 secciones transversales a lo largo del embalse, que se ha registrado periódicamente desde 1983 hasta 2013. Para construir el modelo hidrodinámico, se ha utilizado una malla estructurada 3D y se muestra un resumen del proceso a seguir para garantizar la estabilidad numérica y precisión del modelo. Se ha llevado a cabo la calibración del modelo hidrodinámico en base a la curva hipsométrica del embalse y, asimismo, se ha simulado la corriente de turbiedad durante un episodio real registrado al inicio de puesta en servicio del embalse. La modelización numérica permite el análisis de diferentes escenarios asociados a distintas estrategias de gestión. Por ejemplo, se ha analizado el comportamiento de la llegada de sedimentos al embalse manteniendo los desagües de fondo cerrados y, en otro caso, con los desagües abiertos. Se aprecia que la apertura de los desagües de fondo mejora significativamente la capacidad de desalojar los sedimentos del embalse, lo que reduce su acumulación.

Palabras clave | corrientes de turbiedad, transporte de sedimentos, modelización hidrodinámica.

ABSTRACT

The hydrodynamic analysis of the Amaluza reservoir, located in southern Ecuador, using DELFT3D is presented. Bathymetric information has been available at 30 cross-sections along the reservoir, recorded periodically from 1983 to 2013. To build the hydrodynamic model, a structured 3D mesh was utilized, and a summary of the process followed to ensure numerical stability and model accuracy is presented. The calibration of the hydrodynamic model was based on the reservoir's hypsometric curve, and the turbidity current was simulated during a real episode recorded at the beginning of the reservoir's operation. The numerical modeling allows for the analysis of different scenarios associated with various management strategies. For instance, the behavior of the sediment arrival to the reservoir was analyzed with the bottom outlets closed, and in another case, with the outlets open. It was observed that the opening of the bottom outlets significantly improves the capacity to flush sediment from the reservoir, reducing its accumulation.

Key words | turbidity currents, sediment transport, hydrodynamic modelling.

INTRODUCCIÓN

La construcción de presas en cursos fluviales provoca, entre otros fenómenos, la interrupción parcial o total de la dinámica sedimentaria del río y, en consecuencia, la acumulación de sedimentos en el embalse debido al cambio en las condiciones hidrodinámicas (Wen Shen, 1999; Jiménez *et al.*, 2005; Mangini *et al.*, 2007; Roura Carol *et al.*, 2008; Prats Rodríguez *et al.*, 2014; Sanz-Ramos *et al.*, 2019; Bladé Castellet *et al.*, 2019). El depósito de sedimentos en embalses provoca una pérdida de capacidad en los mismos lo que reduce su posible eficiencia en el control de avenidas, con el consiguiente impacto que ello puede provocar hacia aguas abajo. Asimismo, la acumulación de sedimentos puede deteriorar la infraestructura de la presa en sí misma (mayor empuje), así como los equipos hidroeléctricos o propiciando el bloqueo de compuertas y tomas (Fan y Morris, 1992; Morris *et al.*, 2008).

Las corrientes de turbiedad se producen cuando el agua cargada de sedimentos entra en un embalse, se sumerge bajo el agua clara y se desplaza río abajo por el talud sumergido. A medida que la corriente se desplaza río abajo, generalmente depositará la parte más gruesa de su carga de sedimentos en el fondo y, si se deposita suficiente carga de sedimentos, la corriente de turbiedad se disipará a lo largo del camino hasta la presa. Si la corriente llega a la presa, se acumulará sedimento fino para formar un lago fangoso sumergido, pudiendo ser evacuada esta agua turbia si se abren desagües de fondo. Así pues, una corriente de turbiedad es el movimiento de un fluido bajo otro fluido en reposo inducido por la acción de la gravedad y causado por las diferencias de densidad entre ambos. Éstas tienen una gran influencia en el depósito de sedimento en embalses, por lo que conocer su comportamiento hidrodinámico y sedimentológico es fundamental (Morris y Fan, 1998; Commandeur, 2015; Sloff *et al.*, 2016).

Para validar un modelo numérico tridimensional, Cesare *et al.* (2001) utilizaron corrientes de turbidez en un canal de laboratorio y mediciones sobre el terreno realizadas durante dos estaciones de verano en el embalse de Luzzone, en los Alpes suizos. Emplearon módulos de erosión y deposición que tienen en cuenta la interacción entre la corriente y los depósitos de sedimentos existentes. Observaron que las corrientes de turbidez provocadas por una gran crecida podían arrastrar cantidades importantes de sedimentos del lecho y transportarlos dentro de la corriente hasta una zona de deposición próxima a la presa. Así, concluyeron que el modelo numérico puede utilizarse como una herramienta de evaluación estratégica para la gestión de embalses.

Bladé Castellet *et al.* (2019) presentan una metodología para construir y calibrar un modelo bidimensional (2D) de la dinámica sedimentaria de un embalse y un caso práctico de reubicación de sedimentos finos cohesivos en un embalse. Dicha reubicación consiste en la resuspensión de sedimentos en las zonas menos profundas por las corrientes de agua, con su posterior transporte y sedimentación en las zonas más profundas.

Otros autores han estudiado la dinámica de embalses a partir de registros de campo. Por ejemplo, para estudiar la dinámica sedimentaria del embalse de Ribarroja (España), Arbat-Bofill *et al.* (2014) realizaron diversas campañas batimétricas entre las cuales se produjo un episodio de avenida importante, lo que permitió observar la movilización de aproximadamente 170 000 m³ de sedimentos que fueron resuspendidos y desplazados unos 4 km aguas abajo. Islam e Imran (2010), en cambio, determinaron experimentalmente en el laboratorio que el esfuerzo de fricción entre la corriente de turbiedad y el flujo superior de aguas claras es la principal fuente de producción de turbulencias.

En el presente estudio se ha modelizado el comportamiento hidrodinámico de las corrientes de turbiedad en el embalse Amaluza en el sur de Ecuador. El aporte de sedimentos desde aguas arriba ha provocado, desde su puesta en servicio, una reducción notable de su capacidad por efecto de las corrientes objeto de estudio del presente artículo (INECEL, 1984; INECEL, 1985a; INECEL, 1985b; Mora, 2005; Subsecretaría de la Demarcación Hidrográfica Santiago, 2015). Así pues, en este artículo se presentan el proceso de construcción, calibración y validación, así como los resultados de un modelo hidrodinámico 3D del embalse Amaluza. Ello ha permitido simular el comportamiento de las corrientes de turbiedad que se producen en el embalse y así disponer de una herramienta que permita tomar decisiones de gestión del embalse ante determinados escenarios.

MATERIAL Y MÉTODOS

Modelo DELFT3D

La herramienta de modelización DELFT3D, y particularmente su módulo DELFT3D-FLOW, resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas no estacionarias en dos (promediando en la profundidad) o tres dimensiones. En concreto resuelve las ecuaciones de Navier – Stokes promediadas por Reynolds (RANS) bajo la asunción de flujo incompresible y para pequeñas diferencias de densidad. El sistema resuelve la expresión de cantidad de movimiento en la horizontal, la de continuidad y la ecuación de transporte, junto con un modelo de cierre de turbulencia (Van Rijn y Walstra, 2004; De Goede, 2020; DELTARES, 2023). La relación de la cantidad de movimiento en la vertical asume la hipótesis de distribución de presiones hidrostáticas, aceptándose que las aceleraciones verticales son pequeñas en comparación con la aceleración gravitatoria, lo que supone una simplificación del modelo tridimensional. DELFT3D-FLOW discretiza en diferencias finitas y resuelve las ecuaciones 3D de aguas poco profundas de forma explícita en una malla rectangular, curvilínea o esférica que cubre el área de estudio. Se asume que la malla es ortogonal y está bien estructurada (Lesser *et al.*, 2004). Así, el modelo permite modelizar fenómenos de flujo cuya escala horizontal de longitud y tiempo son significativamente mayores que la escala vertical. Todo ello permite que DELFT3D-FLOW sea adecuado para simular el flujo en embalses (De Goede, 2020).

El modelo de transporte de sedimentos en suspensión se basa en la ecuación de advección – difusión que se formula de forma conservativa mediante la aproximación de los volúmenes finitos (Lesser *et al.*, 2004). Los mismos autores indican que pueden definirse hasta cinco fracciones de sedimentos que deben clasificarse como “lodo” o “arena”, ya que se utilizan diferentes formulaciones para determinar el intercambio con el lecho y su velocidad de sedimentación.

El embalse Amaluza, información disponible

El embalse Amaluza (Figura 1) está situado al sur de Ecuador, en el estribo de la cordillera Oriental de los Andes, y esta alimentado principalmente por el río Paute. Entró en operación en el año 1983 y es parte del complejo Hidroeléctrico Paute Integral. En la Tabla 1 se describen los datos técnicos más relevantes de la presa entre 1983 y 2013, periodo durante el cual se centrará este trabajo.



Figura 1 | Localización (izquierda) e imagen del embalse Amaluza (derecha).

Se dispone de información batimétrica en 30 secciones transversales en el río Paute localizadas a lo largo del embalse (Figura 2), que comprenden desde el perfil original de febrero del 1983 (Batimetría 0), hasta el perfil de diciembre de 2013 (Batimetría 57). Durante dicho periodo, las campañas batimétricas se llevaron a cabo, aproximadamente, cada 6 meses.

La Figura 3 representa cómo ha variado el volumen del embalse en función de la cota de la lámina de agua desde 1983 hasta 2013. Así se muestra la pérdida de capacidad del embalse Amaluza, que supera el 50% en el nivel de máxima operación, situación que se habría producido en un período de 30 años según el registro de batimetrías (CELEC-EP, 2014).

Tabla 1 | Características de la presa y embalse Amaluza.

Altura de la presa (sobre cimientos)	170.0 m
Longitud de coronación	420.0 m
Altura de ataguía (a 250 m aguas arriba de la base)	38 m
Caudal medio interanual río Paute (sector embalse Amaluza 1983-2010)	120 m ³ /s
Caudal máximo de desagües de fondo (2 unidades)	112,5 m ³ /s cada uno
Caudal máximo de vertederos (3 vertederos, 6 compuertas radiales)	7724,0 m ³ /s
Volumen total inicial	120 hm ³
Volumen muerto inicial	18,5 hm ³
Volumen útil inicial	101,5 hm ³
Sedimentos de entrada anual promedio (1983-2010)	2,75 hm ³
Dragado anual promedio	0,3 hm ³
Nivel máximo de operación	1991 m s.n.m.
Nivel de operación mínimo	1960 m s.n.m.
Pendiente promedio del río Paute original en el tramo del embalse Amaluza	1,0%
Longitud del embalse Amaluza en cota máxima (1991 m s.n.m.)	12.0 km
Área de espejo de agua en cota máxima (1991 m s.n.m.)	275,31 ha

En la Figura 4 se muestra la evolución de los perfiles batimétricos registrados en el embalse Amaluza desde febrero de 1983 hasta mayo de 2013. Por su parte, en la Figura 5 se muestra el detalle de la evolución del perfil de sedimento aguas arriba de la ataguía que se localiza unos 250 m aguas arriba de la presa. La evolución del soterramiento de las proximidades de la presa hizo prever que los desagües de fondo (cota 1891 m) y las tomas de carga (cota 1920 m) acabaran quedando soterradas antes de 2010. Para evitar este fenómeno, el Instituto Nacional de Electrificación de Ecuador (INECEL), encargado de la planificación y desarrollo de la electrificación de Ecuador, se propuso dragar a 250 m aguas arriba de la ataguía para mantener el nivel del cuenco a la cota de 1898 m. Como resultado de tal actuación, se puede apreciar (Figura 5) que la batimetría B54, de junio de 2010, es menor que las anteriores, siendo su nivel ligeramente más bajo que el nivel del desagüe de fondo. Ello es debido al efecto del funcionamiento del desagüe de fondo en diversos episodios.

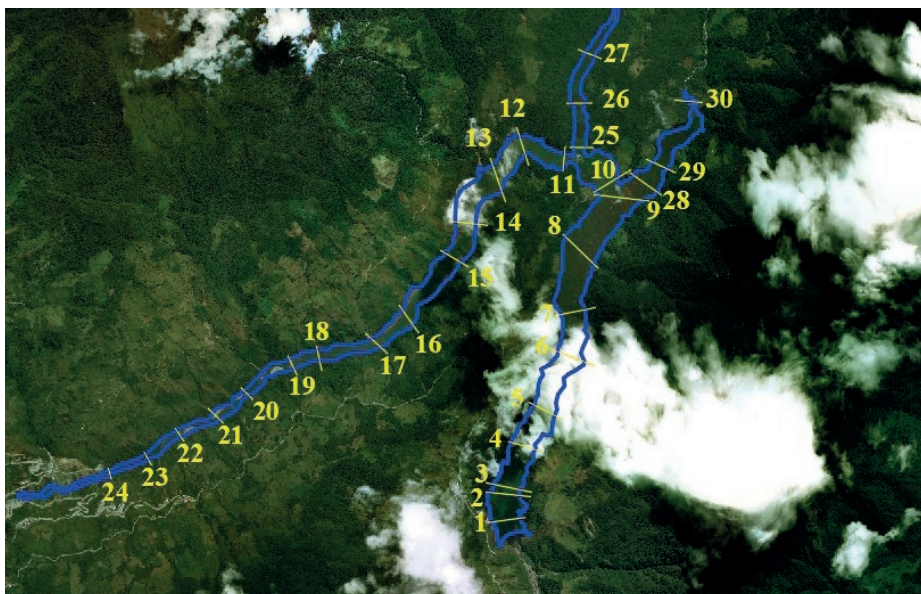


Figura 2 | Secciones transversales con información batimétrica disponible para el estudio del embalse Amaluza.

Analizando la evolución histórica de los perfiles longitudinales registrados en el embalse Amaluza se pueden apreciar dos periodos de formas predominantes en los perfiles del fondo (Figura 4):

- El primero comprendido desde el inicio del llenado del embalse en abril de 1984 hasta noviembre de 1992 (9 años), donde los estratos van rellenando el perfil del embalse aguas arriba de la ataguía hasta acabar superando su coronación.
- El segundo comprende desde mayo de 1993 hasta abril de 2008 (16 años) donde se observa que los estratos forman dos tipos de curvas: una superior que es cóncava y una inferior que es convexa intuyéndose un punto de inflexión común en la sección S-5. Ello sugiere que a partir de mayo de 1993 el efecto de la ataguía sobre los sedimentos empezó a influenciar formándose dos curvas de diferente curvatura.

Para la calibración y posterior modelización del embalse Amaluza se ha considerado como batimetría de partida la de febrero de 1983.

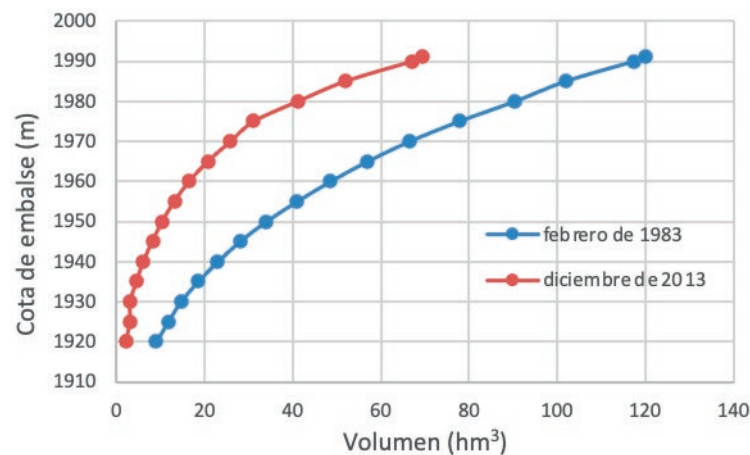


Figura 3 | Comparación de las curvas cota – volumen de embalse correspondientes a la puesta en servicio en febrero de 1983, (INECEL, 1985a) y la última batimetría disponible de diciembre de 2013 (CELEC-EP, 2014).

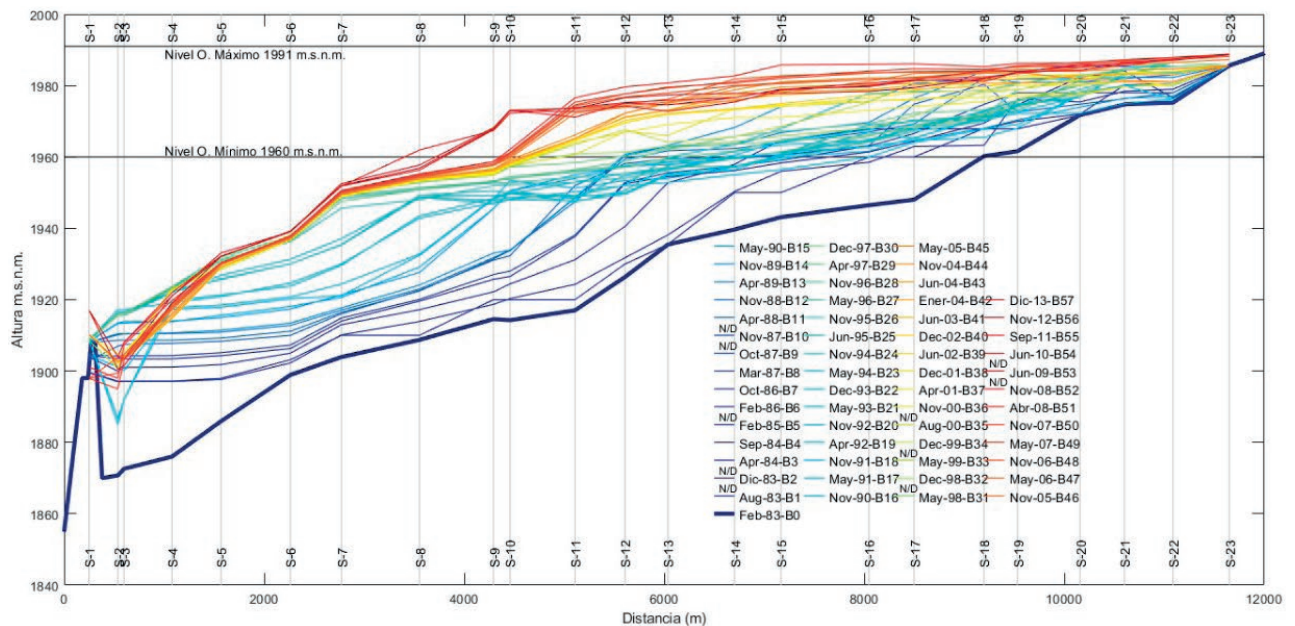


Figura 4 | Evolución de los perfiles longitudinales de las batimetrías registradas en el embalse Amaluza de febrero de 1983 hasta mayo de 2005.

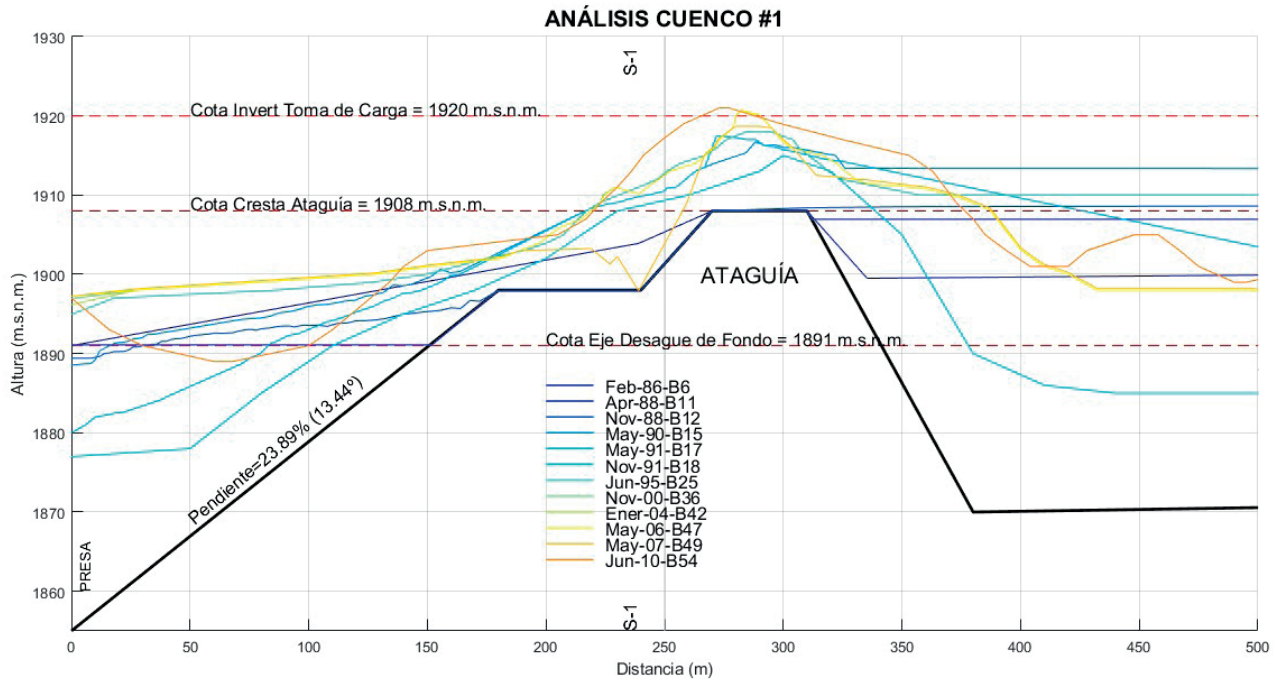


Figura 5 | Evolución del perfil sedimentológico en el cuenco.

Construcción del modelo hidrodinámico

Uno de los aspectos más importantes a la hora de construir un modelo numérico es la generación de la malla de cálculo. Esta debe servir, por un lado, para discretizar la zona de estudio (en este caso el cuenco del embalse) con suficiente detalle como para obtener resultados representativos del fenómeno físico a reproducir (transporte de sedimentos). Por otro lado, debe tener un tamaño y formas adecuados para obtener un proceso de cálculo robusto. De ambos dependerá el criterio de estabilidad numérica, que en este caso se introduce a través del valor del paso de tiempo (Δt).

La construcción de la malla de cálculo consistió en la generación de una malla 2D de elementos cuadriláteros de tipo estructurada la cual, posteriormente a ingresar el número de capas en la vertical, resultó en una malla en hexaedros (3D). Este tipo de malla tiene como principal ventaja sobre una no estructurada una convergencia más rápida (Cesare *et al.*, 2001; DELTARES, 2020; 2021; Reynolds *et al.*, 2023).

Relación de aspecto ($\Delta x/\Delta y$)

La relación $\Delta x/\Delta y$ de la malla se define como la relación de forma (DELTARES, 2021). Para la construcción del mallado primero se consideró el alineamiento longitudinal de la malla en dirección siguiendo la línea del *thalweg* (Δx). En el tramo principal (río Paute), se ha tomado una longitud Δx característica de 50 m, predefiniéndose 5 celdas perpendiculares a cada lado del eje longitudinal, por lo que la dirección transversal al *thalweg* queda definida con un total de 10 elementos (Figura 6).

Cuando el flujo es primordialmente unidireccional la relación de aspecto puede llegar a tener valores de hasta 5 sin que existan problemas de inestabilidad numérica (DELTARES, 2021). En la zona próxima a la presa, la relación de aspecto se fijó menor a 2 debido a que se realizó un discretizado menor en la dirección x para poder definir con mayor resolución el comportamiento hidráulico de la zona de la ataguía. En dicha zona relación de aspecto alcanzó el valor de 0.63.

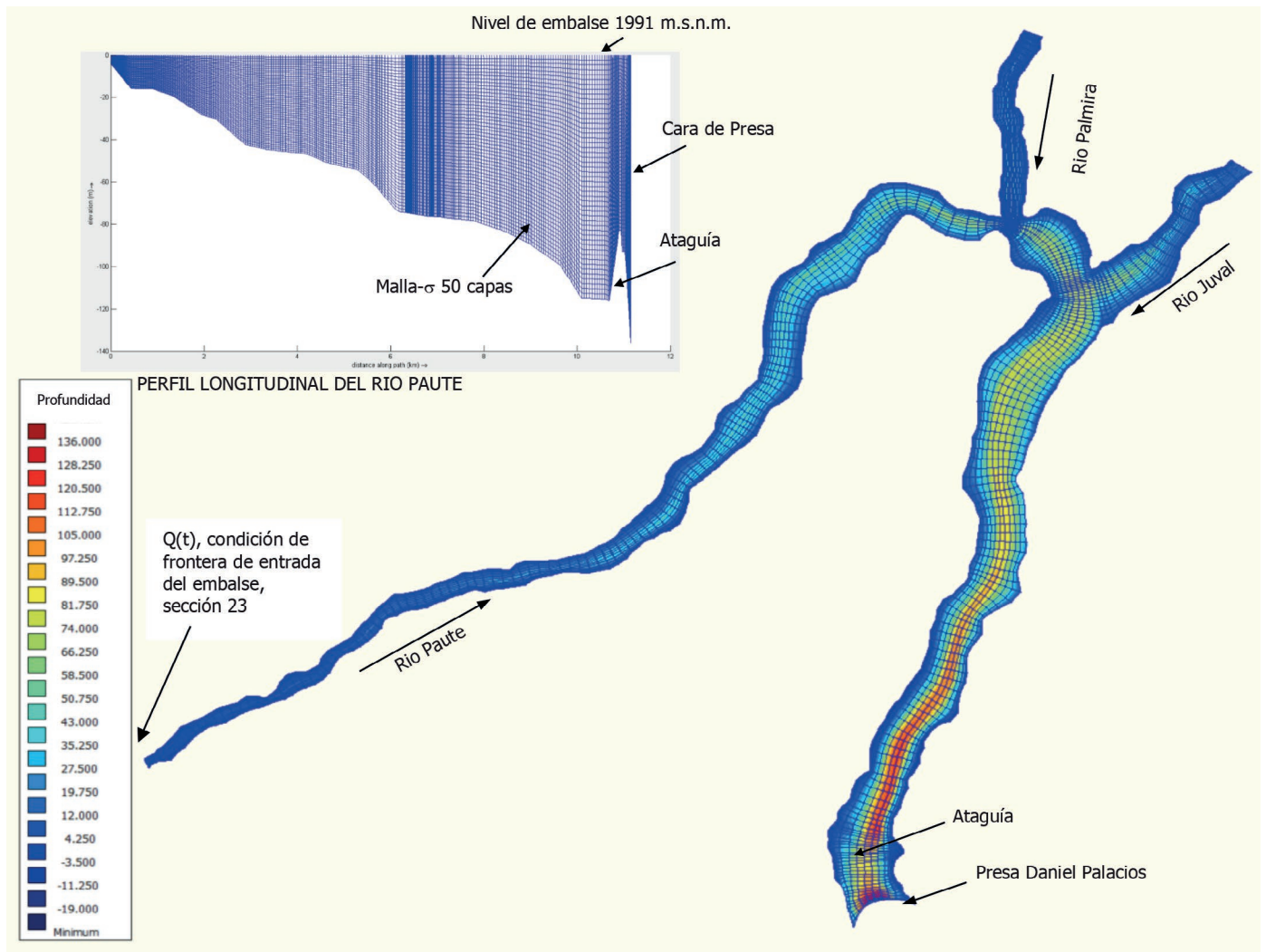


Figura 6 | Malla definida para el embalse Amaluza a partir de la batimetría de operación inicial (febrero de 1983) con respecto a la cota 1991 m.

En las zonas de confluencia con los ríos Palmira y Juval se discretizó con un menor tamaño para poder analizar con un mayor detalle dichas zonas. En la Tabla 2 se resumen las relaciones de aspecto. Con todo ello, el número total de elementos en el plano horizontal resultó de 3900. Las capas verticales se fijaron en 50, ya que en que etapas posteriores se modelizaron fenómenos sedimentológicos como las corrientes de turbiedad. Finalmente, el modelo discretizó la zona de estudio en 195000 elementos o puntos de cálculo (Figura 6).

Tabla 2 | Valores de Relación de Aspecto generales para la malla del embalse Amaluza.

Tramo	Descripción	Abscisa		Δx (m)	Δy (m)	Relación de aspecto
		desde	hasta			
1	Entrada del río Paute al embalse hasta entorno de la presa	12+000	0+700	50	25	2
2	Entorno de la presa	0+700	0+000	25	40	0.63

Ortogonalidad de la malla

La ortogonalidad de la malla se evalúa mediante el coseno del ángulo que forman las esquinas de los elementos de la malla. Una mayor ortogonalidad implica obtener un valor cercano a 0, lo cual indica que el ángulo que forma en la esquina de la malla es cercano a 90° . La falta de ortogonalidad afecta proporcionalmente al término de presión en la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes (DELTARES, 2021). Así, en partes alejadas de las fronteras de la malla, este valor debería ser menor a 0.02, aunque en las orillas se pueden aceptar valores algo mayores.

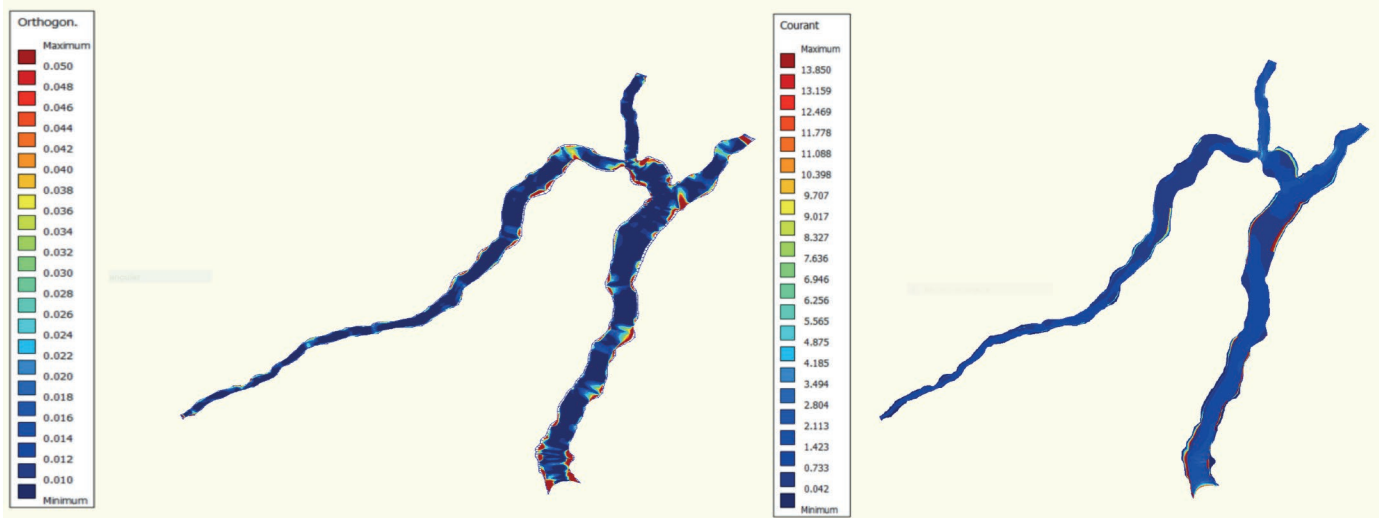


Figura 7 | Ortogonalidad de la malla (izquierda) y distribución del número de Courant (derecha) para $\Delta t = 0.6s$.

En la Figura 7 se observa que la ortogonalidad de la malla es adecuada, con valores por debajo de 0,05 en todo el dominio de cálculo. Debido a la complejidad de la geometría del embalse en las curvas, estrechamientos bruscos y esquinas de la presa se aprecian valores superiores a 0,02, pero se considera aceptable para este tipo de modelo (DELTARES, 2021).

Suavidad de la Malla

La suavidad de la malla es un parámetro que se establece a partir de la relación entre las longitudes de los elementos en las direcciones x y y . Comúnmente se recomienda que dichas relaciones deberían ser menores a 1.2 en el área de interés aunque, es aceptable que puedan incrementarse en un 20% hacia las fronteras (DELTARES, 2021).

Determinación del paso de tiempo de cálculo Δt

Para determinar el mayor paso de tiempo aceptable de acuerdo al mallado establecido, y a fin de dar estabilidad numérica al modelo, se procede a graficar la variación del número de Courant (DELTARES, 2021) con Δt de acuerdo a la batimetría de 2013, ya que es la batimetría más compleja. Tras algunas tentativas con diferentes Δt , se observó que con un valor de 0.6 s el número de Courant resultó menor que 10 prácticamente en todo el embalse (Figura 7). Se puede visualizar que existen elementos de la malla con valores cercanos a 6 en la confluencia del río Paute con el río Palmira, pero que no se considera que puedan dar problemas de estabilidad al modelo ya que está por debajo del valor recomendado para este modelo numérico (< 10).

También se observa que en algunas orillas el valor del número de Courant alcanza valores superiores a 10. En estas zonas la batimetría es más alta que el nivel 1991 m s.n.m. (nivel máximo de operación) por lo que no dará problemas en la simulación hidrodinámica al embalse.

Validación de la curva de embalse

Se llevó a cabo una primera simulación para verificar el buen comportamiento del modelo hidrodinámico en condición de aguas claras. Al no disponer de datos históricos de caudales de entrada en el embalse frente a caudales turbinados, la validación del modelo se realizó mediante la estimación de error de los volúmenes acumulados simulados frente a los volúmenes estimados de alguna de las batimetrías existentes. Así, se comprueba que el volumen de agua que entra en el modelo en dos días se ajusta a la curva del embalse, comparándose el escenario correspondiente a la última batimetría disponible de diciembre de 2013 con la curva cota–volumen de CELEC-EP (2014) mostrada en la Figura 3. Los caudales de entrada considerados fueron de 120 m³/s en el río Paute, 10 m³/s en el río Palmira y 13 m³/s en el río Juval que corresponden, respectivamente, a sus caudales medios anuales (INECEL, 1985b). Mientras que se tomaron 200 m³/s de caudal de salida correspondiente al caudal medio turbinado. La cota de embalse inicial considerada fue 1991 m s.n.m. Teniendo en cuenta los caudales considerados se entiende que se simuló el proceso de vaciado del embalse durante 2 días que alcanzó los 4 m.

En la Tabla 3 se muestra la comparación entre las cotas de agua en el embalse obtenidas al final de la simulación y la estimada con la curva teórica de la Figura 3. Se observa que después de 86 400 s de simulación (1 día) la cota se encuentra 0.05 m por encima de la curva teórica cota–volumen, mientras que tras 172 800 s (2 días) la cota simulada pasa 0.21 m por debajo de la teórica. Estas diferencias se consideran aceptables, verificándose que la información batimétrica disponible y el mallado ajustado a ella, tanto en el plano horizontal como en la vertical, reproduce con suficiente precisión los niveles en el embalse.

Tabla 3 | Comparación entre las cotas de embalse obtenidas al final de la simulación y la estimada con la curva de la Figura 1.

Instante de simulación (s)	Variación de volumen calculada (hm ³)	Volumen remanente (hm ³)	Cota final de embalse (m)		Diferencia en altura (m)
			Teórica	Simulada	
86 400	-4.92	64.55	1989.00	1989.05	-0.05
172 800	-9.85	59.62	1987.30	1987.09	0.21

Calibración de la corriente de turbiedad

INECEL (1984) registró un hidrograma entre los días 18 de julio y 22 de julio de 1984, y durante el cual se midió también un perfil de concentración de sedimentos en la vertical en la sección 14 (Figura 2). Ambos registros se muestran en la Figura 8. Se consideran entradas de caudal constantes en el río Palmira y Juval de 10 m³/s y 13 m³/s, respectivamente, y un caudal de salida turbinado de 100 m³/s que corresponde a la capacidad nominal de las turbinas que estaban operativas en esa fecha. Se aprecia que los caudales de entrada al modelo superan, prácticamente durante todo el episodio, los caudales turbinados de salida. La cota inicial del embalse en esas fechas se encontraba en el entorno de la cota 1985 m s.n.m. Al tratarse de elevados caudales de entrada se entiende que en este escenario se producirían muy probablemente vertidos por el aliviadero de la presa. Estos se han considerado en la configuración del modelo del presente escenario.

El perfil vertical de concentraciones se obtuvo el 18 de julio de 1984 alrededor de las 15:00 horas aproximadamente a partir de la toma de 8 muestras *in situ* en la vertical. En este perfil se aprecian dos puntos (A y B) por debajo de la cota 1953 m que según INECEL (1984) les corresponde un d_{50} e 10 μ m y 15 μ m, respectivamente. Igualmente, se dispone de información granulométrica en la toma de carga con valores de d_{50} de 8 μ m, cuyas partículas están formadas principalmente por limos.

No se dispone de mediciones de concentración a la entrada del embalse durante la campaña de medición de las corrientes de turbiedad. Así pues, se tantearon diferentes valores de concentración de entrada que puedan producir en el entorno de la sección 14 los valores mostrados en la Figura 8.

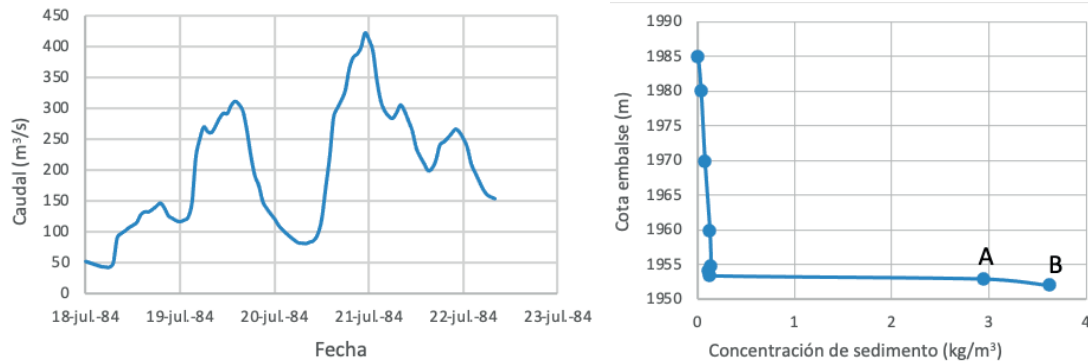


Figura 8 | (izquierda) Hidrograma de entrada simulado y (derecha) perfil de concentraciones de sedimentos registrados en la sección 14 (Figura 2), el 19 de junio de 1984 a las 15:00 aproximadamente. Fuente INECEL (1984).

En la Figura 9 se muestran los resultados de la concentración de sedimentos a lo largo del embalse y en particular en el entorno de la sección 14 para concentración de entrada de 7.5 kg/m^3 . Puede observarse que esta concentración es la que más se ajusta a la concentración medida de 3.0 kg/m^3 a la cota de 1953 m (punto A) y de 3.7 kg/m^3 a la cota de 1952 m (punto B) medidos en campo (Figura 8). Si bien una concentración de entrada de 7.5 kg/m^3 se considera un valor elevado a la entrada del embalse Amaluzá, sí existen registros de esta magnitud (INECEL, 1984; INECEL, 1985a; CELEC-EP, 2014).

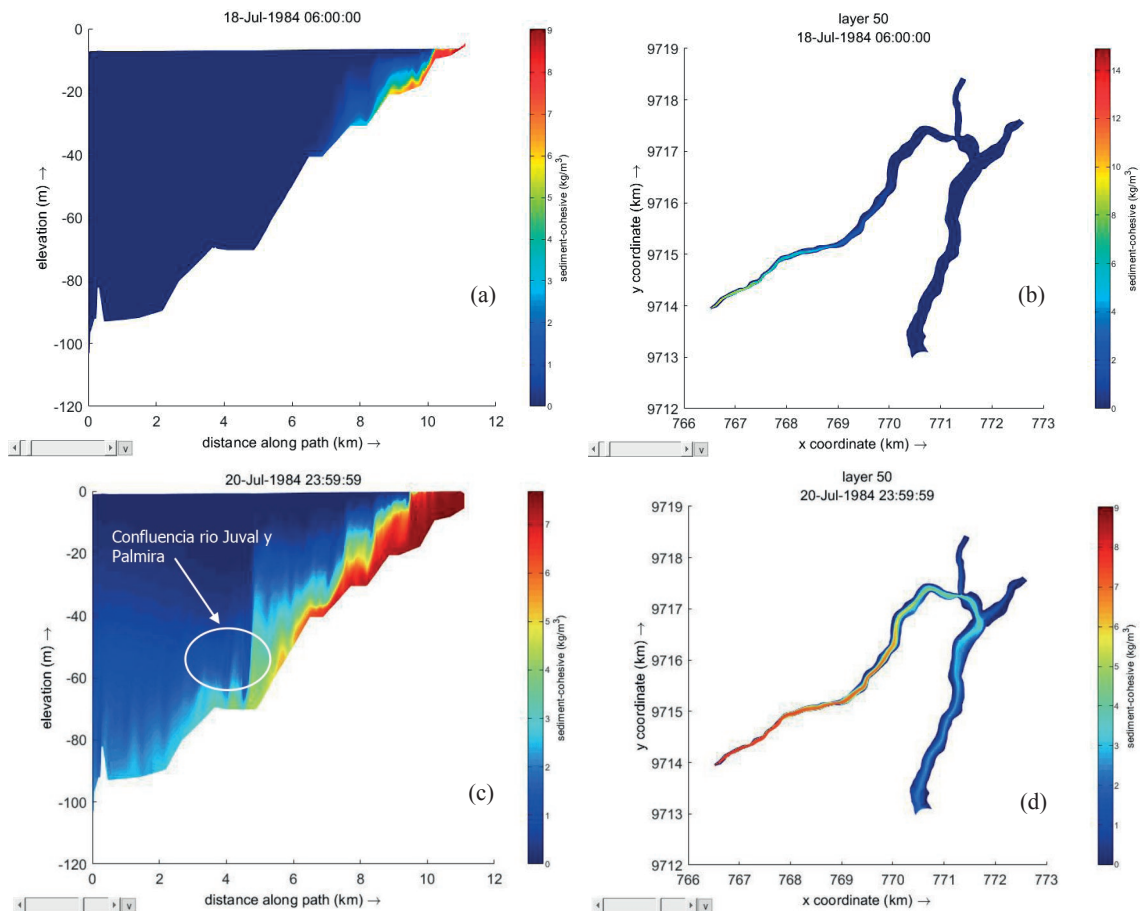


Figura 9 | (Columna izquierda) perfiles longitudinales sobre el *thalweg* y (columna derecha) vista en planta de la variación de la concentración de sedimentos en el caso del escenario 1. En la fila superior se muestra el avance del frente de sedimentos a las 6 h de inicio y en la fila inferior a los 3 días de iniciado el episodio.

Análisis de escenarios

Se analizaron dos escenarios particulares. Ambos parten de las siguientes condiciones comunes que se describen en la Tabla 4. Por otro lado, en la Tabla 5 se describen las particularidades de cada escenario.

Cabe recordar que, como ya se ha comentado anteriormente, el hidrograma de entrada simulado corresponde a un episodio registrado en 1984, por dicho motivo, el escenario 1 se plantea en base a la batimetría disponible más cercana a la fecha de dicho evento. Por su lado el escenario 2, plantea la simulación a partir de la batimetría disponible más reciente de 2013 y con una capacidad de turbinado mejorada en comparación con la capacidad disponible de 1984. En este escenario 2 se pretende analizar cómo la gestión de los caudales de salida con los desagües de fondo y las propias tomas de carga de las turbinas pueden favorecer el desalajo de sedimentos.

Tabla 4 | Condiciones comunes a los dos escenarios considerados.

Dominio	Número de celdas en el plano horizontal: 3900 Número de capas verticales σ : 50
Período de simulación	4 días y 8 horas
Paso de tiempo Δt estimado	0.6 s
Condición Inicial	Nivel del embalse en cota 1985 m
Condiciones de contorno	Aguas Arriba Caudal de entrada al Río Paute: hidrograma de la Figura 8. Concentración de sedimento de entrada: 7.5 kg/m ³ . Caudal de entrada del Río Palmira: 10 m ³ /s Caudal de entrada del Río Jubal: 13 m ³ /s
	Aguas Abajo Caudal Turbinado: ver Tabla 5 Hidrograma de Caudales vertidos para mantener el nivel del embalse en la cota 1991 m
Parámetros Físicos	Gravedad: 9.81 m/s ² Densidad de Agua: 1000 kg/m ³ Rugosidad de fondo: 0.025 (n de Manning) Rugosidad de la pared: condición Libre Viscosidad / Difusividad de remolino Horizontal: 1×10^{-9} m ² /s Viscosidad / Difusividad de remolino Vertical: 1×10^{-8} m ² /s Modelo para turbulencia 3D: k- ϵ
Sedimentos	Tipo: Cohesivo Densidad de referencia para asentamiento obstaculizado: 1600 kg/m ³ Densidad específica: 2650 kg/m ³ Densidad seca de lecho: 1300 kg/m ³ Velocidad de asentamiento inicial: 0.25 mm/s Esfuerzo crítico para asentamiento: 1000 N/m ² Esfuerzo crítico para erosión: 0.5 N/m ² Parámetro de erosión: Uniforme 0.0001 kg/m ² /s Altura inicial de lecho de sedimento: 0.05 m
Software - Versión	FLOW2D3D Versión 6.02.10.7124M

Tabla 5 | Características particulares de los escenarios analizados.

	Batimetría	Operación desagües de fondo	Capacidad desagües de fondo (m ³ /s)	Caudal turbinado (m ³ /s)	Duración de la simulación
Escenario 1	1984	Cerrados	-	100	12.94 días
Escenario 2	2018	Abiertos	250	200	

RESULTADOS

La Figura 9 a y b muestra el frente de las corrientes de turbiedad transcurridas 6 h del inicio del episodio. En la Figura 9 c y d se puede ver la zona de mezcla con agua sin sedimentos correspondiente a la intersección con los ríos Juval y Palmira y cómo la corriente ha alcanzado prácticamente la presa, llegando a valores de alrededor de 2 kg/m^3 frente a la presa. En dicha figura los perfiles “a” y “c” se ubican sobre el *thalweg* del embalse.

En las vistas en planta se aprecia que la concentración máxima sobre el lecho se mantiene alrededor de los 7.5 kg/m^3 en el primer tramo del embalse. Más aguas abajo la corriente se diluye debido a que la geometría del embalse se amplía y su efecto es menor llegando a valores de pie de presa en el entorno de 2 kg/m^3 .

La Figura 10 muestra, para el caso del escenario 1, la variación de las concentraciones en el eje del embalse (izq.) y la vista en planta del lecho (dcha.). En ambos escenarios se aprecia que se producen dos picos de concentración de sedimentos que son análogos a los picos de crecida simulados, por lo que sus concentraciones dependen del tipo de hidrograma de entrada al embalse y de la hidrodinámica de la corriente. En el escenario 1 se puede observar que a nivel de la toma de carga se alcanza una máxima concentración (21 de julio a las 12:00 h) de unos 2 kg/m^3 y de aproximadamente 0.25 kg/m^3 a la cota del aliviadero. En el caso del escenario 2 se observa que la máxima concentración es de 1.6 kg/m^3 a nivel del desagüe de fondo y de 1.31 kg/m^3 a nivel de la toma de carga, estos valores máximos se dan en el segundo pico de creciente del hidrograma (21 de julio a las 12:00 h).

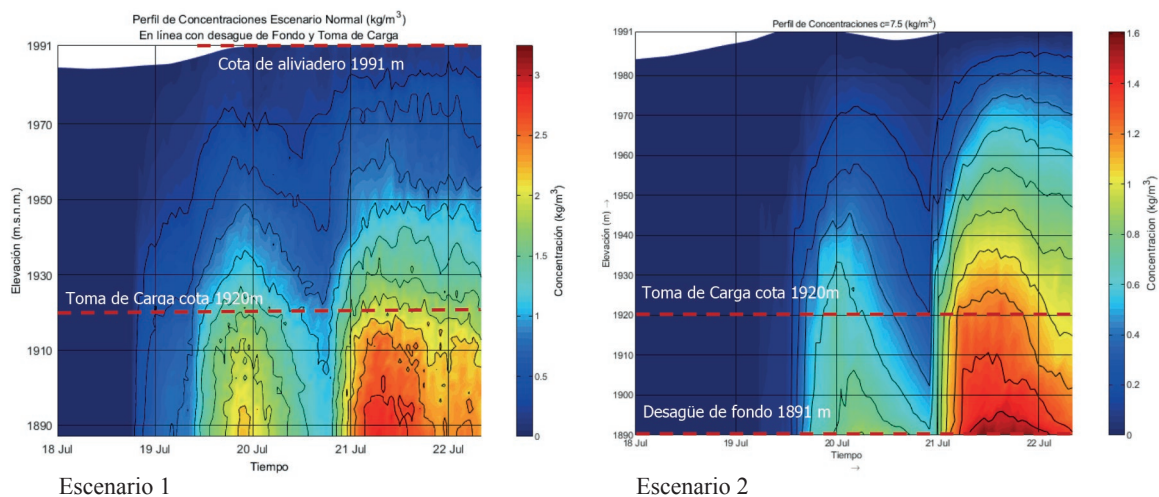


Figura 10 | Variación temporal de la concentración en la vertical en las proximidades de la toma de carga y del desagüe de fondo en los escenarios 1 y 2.

DISCUSIÓN

Como ya se ha comentado en la introducción, en Morris y Fan (1998) y Sloff *et al.* (2016) se describe el proceso de formación de las corrientes de turbiedad en embalses. El hundimiento de la carga de sedimentos bajo el agua clara provoca en ésta un flujo secundario que, por transferencia de cantidad de movimiento con el flujo inferior de sedimentos, es arrastrada hacia la presa mientras que en superficie genera un retorno de la misma hacia el punto de sumergimiento. En la Figura 11a se presenta un esquema de la hidrodinámica de dicho proceso de hundimiento adaptado de Morris y Fan (1998), mientras que en la Figura 11b se muestra precisamente los resultados obtenidos en la zona de punto de hundimiento durante el escenario 1 en el instante 20 de julio, prácticamente, a las 23 h en la capa más superficial del embalse (capa 1). Se puede apreciar como DELFT3D capta este fenómeno. De este modo, se aprecia cómo la aportación de sedimentos avanza dentro del embalse hasta la abscisa 767.8 m, donde choca con la masa de agua

clara (concentración de sedimento nula). Dicho fenómeno de hundimiento del sedimento también se aprecia en la vista en perfil de la Figura 9. Asimismo, en la Figura 11 se representan, junto con la concentración de sedimentos, la dirección del campo de velocidades en donde se puede apreciar, igualmente, el efecto del retorno del flujo hacia dicho punto de hundimiento aguas arriba.

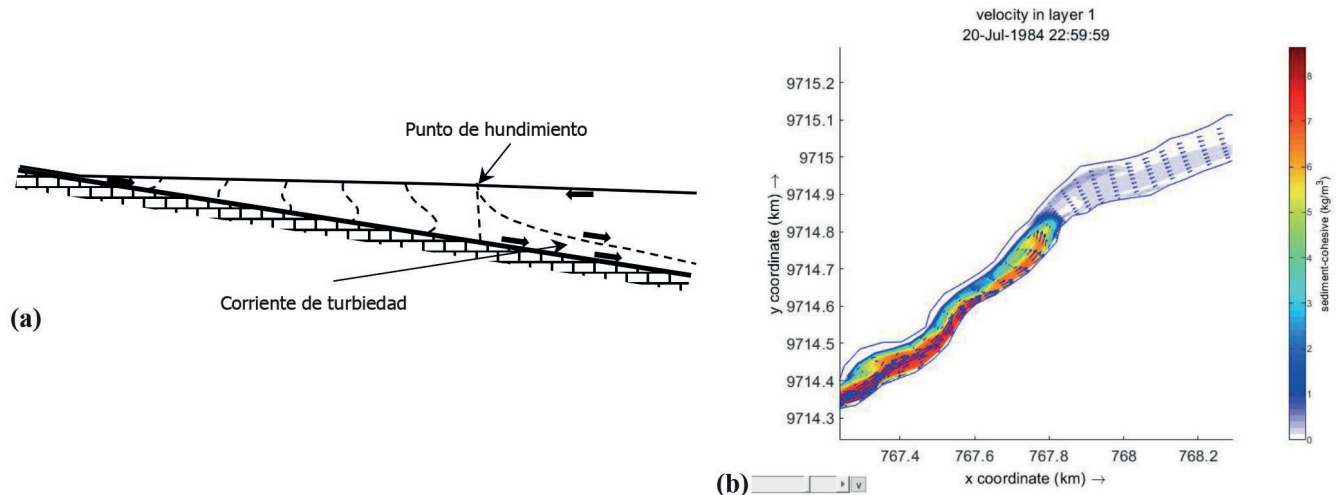


Figura 11 | (a) Esquema del proceso hidrodinámico que se establece en el hundimiento de los sedimentos (adaptado de Morris y Fan (1998)). (b) Vista en Planta en la zona del punto de sumergencia de la lengua de sedimentos y retorno de flujo de agua clara. Concentración de sedimentos de entrada 7.5 kg/m^3 .

En 2011 entró en servicio el embalse de Mazar, ubicado inmediatamente aguas arriba de la cola del embalse de Amaluza. La existencia de dicho embalse ha reducido la aportación de sedimentos, así como laminado los hidrogramas de entrada a Amaluza. Por ello la concentración de entrada de 7.5 kg/m^3 considerada para el escenario 2 se considera poco probable que se dé en la realidad, pero con fines comparativos con las simulaciones originales del año 1984 se ha considerado relevante su simulación. Así, en los escenarios analizados se han obtenido los sedimentogramas de salida que se muestran en la Figura 12. En el escenario 1 (desagües de fondo cerrados) la carga de sedimento alcanza la toma de carga de las turbinas e incluso, aunque en menor medida, también alcanza la salida de caudal por el aliviadero en superficie. En cambio, en el escenario 2 (desagües de fondo abiertos) la carga de sedimentos no alcanza el aliviadero saliendo únicamente por los desagües de fondo y tomas de carga.

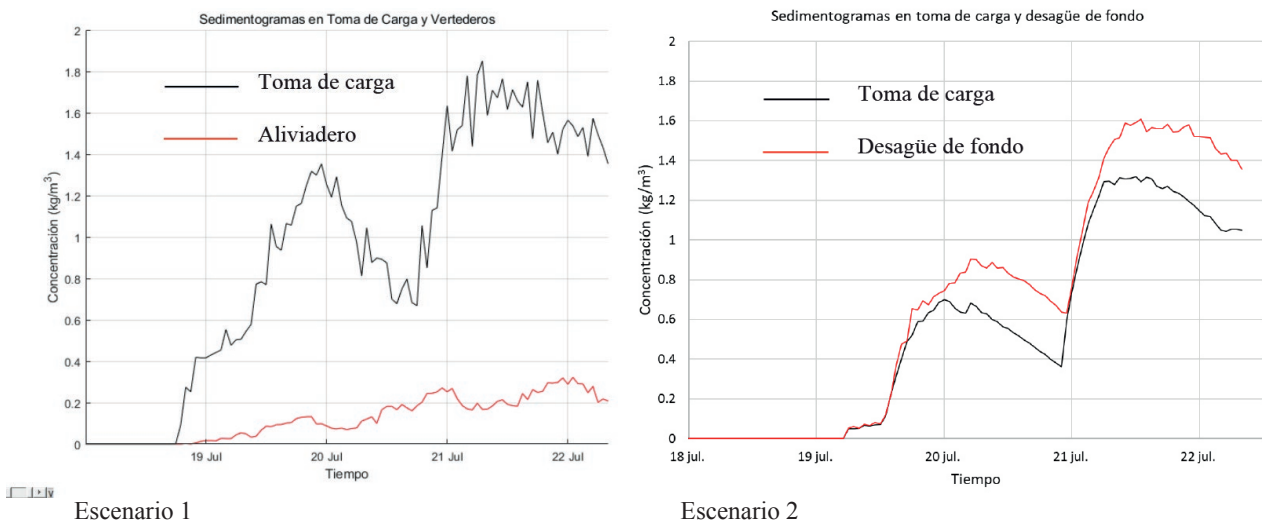


Figura 12 | Sedimentogramas turbinados y vertidos en los escenarios 1 y 2.

En la Tabla 6 se indica la eficiencia de desalojo obtenida en función de la ubicación de los sedimentos de entrada y salida del embalse. Para la obtención del peso de sedimento se ha considerado la evolución temporal de la concentración en los diferentes puntos de control (Figura 12). A modo de resumen, puede observarse que el valor de eficiencia de desalojo en el escenario 1 llega al 7.4%; es decir, el 92.6 % de la corriente se depositaría en el embalse, mientras que en el caso del escenario 2, la apertura de los desagües de fondo permite mejorar significativamente la capacidad desalojo alcanzando el 19% del sedimento aportado.

Tabla 6 | Eficiencia de desalojo de la corriente de turbiedad.

	Escenario 1			Escenario 2		
	Río Paute	Toma de carga	Aliviadero	Río Paute	Toma de carga	Desagüe de Fondo
Volumen de agua (hm ³)	74.3	37.4	30.6	74.3	74.9	93.6
Peso de sedimento (T)	5.57×10 ⁵	3.46×10 ⁴	6.94×10 ³	5,57·10 ⁵	4,15×10 ⁴	6.53×10 ⁴
% Desalojado	-	6.2	1.2	-	7.4	11.7
% Total desalojado	7.4			19.1		

CONCLUSIONES

El modelo DELFT3D, específicamente su módulo DELFT3D-FLOW, permite simular corrientes de turbiedad en embalses consiguiendo una buena representación de los fenómenos asociados a las mismas, como son el punto de sumergencia de los sedimentos o la obtención de sedimentogramas en ubicaciones de interés (tomas de carga, desagües de fondo, etc.). Así, se ha realizado la construcción y validación del modelo hidrodinámico para el embalse Amaluza, que forma parte del complejo hidroeléctrico Paute Integral al sur del Ecuador.

La información de campo es fundamental para la modelización de este tipo de fenómenos: a partir de una simulación en condición de aguas claras, la información batimétrica disponible ha permitido reproducir con suficiente precisión los niveles en el embalse; igualmente, se ha podido calibrar la corriente de turbiedad en base a registros históricos de batimetrías, concentraciones de sedimentos y caudales en el embalse durante un evento específico.

Disponer de un modelo hidrodinámico como el presentado, permite la simulación de escenarios que dan información sobre la incidencia en el embalse de diferentes estrategias de gestión. En particular en este artículo se han analizado dos escenarios de gestión de la llegada de sedimentos a la presa: se ha estudiado la capacidad de desalojo de sedimentos con la apertura, o no, de los desagües de fondo de la presa. El escenario 2, con los desagües de fondo abiertos y mayor capacidad de turbinado que el escenario 1, permite un desalojo de sedimentos significativamente mayor en comparación con el escenario 1 con desagües de fondo cerrados (un 19.1% frente a un 7.4%).

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Gobierno Nacional de la República del Ecuador por la beca concedida al Sr. Hernán Javier Larriva Villareal para la financiación de su estancia en la Unversitat Politècnica de Catalunya para realización de su tesis doctoral. Asimismo, los autores desean agradecer a la Subgerencia de Producción, y sus jefaturas relacionadas, de la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC) y su Unidad de Negocio CELECSUR por la información proporcionada para la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- Arbat-Bofill, M., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Niñerola, D., & Dolz, J. 2014. Suspended sediment dynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain). *Reservoir Sedimentation - Special Session on Reservoir Sedimentation of the 7th International Conference on Fluvial Hydraulics, RIVER FLOW 2014*.
- Bladé Castellet, E., Sánchez-Juny, M., Arbat Bofill, M., & Dolz Ripollés, J. 2019. Computational Modeling of Fine Sediment Relocation Within a Dam Reservoir by Means of Artificial Flood Generation in a Reservoir Cascade. *Water Resources Research*, 55(4), 3156–3170. <https://doi.org/10.1029/2018WR024434>
- CELEC-EP. 2014. *Informe sobre la sedimentación del embalse Amaluza - Batimetría de diciembre 2013* (p. 35). Corporación Eléctrica del Ecuador.
- Cesare, G. De, Schleiss, A., & Felix, H. 2001. Impact of Turbidity Currents on Reservoir Sedimentation. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 127(1), 6–16. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2001\)127:1\(6\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2001)127:1(6))
- Commandeur, A. S. 2015. Turbidity currents in reservoirs. In *Master of Science Thesis*. Delft University of Technology.
- De Goede, E.D. 2020. Historical overview of 2D and 3D hydrodynamic modelling of shallow water flows in the Netherlands. *Ocean Dynamics*, 70(4), 521–539. <https://doi.org/10.1007/s10236-019-01336-5>
- DELTARES. 2020. DELFT3D-FLOW: 3D/2D modelling suite for integral water solutions. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. In *DELFT3D-FLOW, User Manual*.
- DELTARES. 2021. *Delft3D RGFGRID: 1D/2D/3D Modelling suite for integral water solutions. Generation and manipulation of structured and unstructured grids, suitable for Delft3D-FLOW, Delft3DWAVE or D-Flow Flexible Mesh. User Manual*.
- DELTARES. 2023. *DELFT3d-FLOW: 3D/2D modelling suite for integral water solutions*. https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf
- Fan, J., & Morris, G.L. 1992. Reservoir Sedimentation. I: Delta and Density Current Deposits. *Journal of Hydraulic Engineer*, 118(3), 354–369. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:3\(354\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:3(354))
- INECEL. 1984. *Sedimentología del embalse Amaluza - Noviembre de 1984* (p. 35). Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos.
- INECEL. 1985a. *Informe Interno de división de Hidrología y Sedimentología*.
- INECEL. 1985b. *Proyecto Paute. Pronóstico de niveles en el embalse Amaluza* (p. 23). Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos.
- Islam, M.A., & Imran, J. 2010. Vertical structure of continuous release saline and turbidity currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(8), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2009JC005365>
- 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(3), 1–16. <https://doi.org/10.4995/ia.2005.2561>
- Lesser, G.R., Roelvink, J.A., van Kester, J.A.T.M., & Stelling, G.S. 2004. Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 883–915. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- Mangini, S., Prendes, H., Huespe, J., Amsler, M., & Piedra Cueva, I. 2007. Sedimentación de finos en el entorno del embalse de Salto Grande en el Río Uruguay. *Ingeniería Del Agua*, 14(4), 307. <https://doi.org/10.4995/ia.2007.2919>
- Mora, D.E. 2005. *Actualización del conocimiento sobre la producción de sedimentos a diversas escalas en la cuenca hidrográfica del río Paute* [Centro de Estudios de Postgrado. Universidad de Cuenca (Ecuador)]. https://www.researchgate.net/publication/262674494_Actualizacion_del_conocimiento_sobre_la_produccion_de_sedimentos_a_diversas_escalas_en_la_cuenca_hidrografica_del_Rio_Paute

- Morris, G.L., Annandale, G.W., & Hotchkiss, R. 2008. Reservoir Sedimentation. In *Sedimentation Engineering Processes Measurements Modeling and Practice ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 110* (Vol. 36, p. 1132). <https://doi.org/10.2134/jeq2006.0296>
- Morris, G.L., & Fan, J. 1998. *Reservoir sedimentation handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs and Eatersheds for Sustainable Use*. McGraw-Hill Book Co. https://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/classes/CE716/ResSedHandbook1_01.pdf
- Prats Rodríguez, J., Morales Baquero, R., Dolz Ripollés, J., & Armenol Baquero, J. 2014. Aportaciones de la limnología a la gestión de embalses. *Ingeniería Del Agua*, 18(1), 80. <https://doi.org/10.4995/ia.2014.3145>
- Reyns, J., McCall, R., Ranasinghe, R., van Dongeren, A., & Roelvink, D. 2023. Modelling wave group-scale hydrodynamics on orthogonal unstructured meshes. *Environmental Modelling and Software*, 162(December 2021), 105655. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105655>
- Roura Carol, M., Armengol, J., Fernando, J., & Dolz Ripollès, J. 2008. Incidencia en los embalses de Mequinenza y Ribarroja en el transporte sólido en suspensión del río Ebro. *Ingeniería Del Agua*, 15(4), 221. <https://doi.org/10.4995/ia.2008.2936>
- Sanz-Ramos, M., Olivares Cerpa, G., & Bladé, E. 2019. Metodología para el análisis de rotura de presas con aterramiento mediante simulación con fondo móvil. *Ribagua*, 6(2), 138–147. <https://doi.org/10.1080/23863781.2019.1705198>
- Sloff, K. (CJ.), Commandeur, A., & Yang, J.C. 2016. Models for effective sluicing of turbidity-currents in reservoirs. In G. & H. (eds) Constantinescu (Ed.), *River Flow 2016*, Iowa City, USA, July 11-14, 2016 (pp. 868–874). Taylor & Francis Group.
- Subsecretaría de la Demarcación Hidrográfica Santiago. 2015. *Manejo del recurso hídrico de la cuenca del Paute*. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/02/DOC_PRY_MANEJO_RECURSO_HIDRICO.pdf
- Van Rijn, L.C., & Walstra, D.J.R. 2004. Description of TRANSPOR2004 and Implementation in Delft3D-ONLINE. In Z3748 (Issue May). <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aea12eb20-aee3-4f58-99fb-ebc216e98879>
- Wen Shen, H. 1999. Flushing sediment through reservoirs. *Journal of Hydraulic Research*, 37(6), 743–757. <https://doi.org/10.1080/00221689909498509>