

ESTUDIO CFD DE REMOCIÓN DE SEDIMENTOS EN UN DESCARGADOR DE FONDO

CFD STUDY OF SEDIMENT REMOVAL IN A BOTTOM OUTLET

Martín Sabarots Gerbec^{a,b} y Gastón P. Latessa^b

^aLaboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina, msabger@gmail.com,
<http://www.ina.gob.ar/>

^bFacultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina, msabger@gmail.com,
<http://www.fi.uba.ar/>

Palabras clave: Sedimentos, descargador de fondo, sedFoam.

Resumen. El transporte de sedimentos en embalses artificiales es estudiado mediante Modelación numérica apoyando distintos enfoques según las escalas. En particular si se busca analizar el proceso de remoción de sedimento en el entorno de las obras hidráulicas, es necesario tener correctamente representada la hidrodinámicas de la estructura hidráulica. Actualmente existen distintos software de reconocido uso en el campo de la ingeniería fluvial como Delft3d y Telemac, con tratamientos específicos en el transporte de sedimentos, pero la implementación resulta insuficiente en este tipo de problemas. Este trabajo presenta la implementación de un modelo numérico utilizando el paquete *sedFoam* de OpenFOAM para el estudio de operaciones de remoción de sedimento en el entorno de un descargador de fondo y asegurar el correcto funcionamiento de la obra. Se exponen las ventajas de la representación hidrodinámicas y computacionales del problema, las limitaciones respecto al tratamiento de los sedimentos y las hipótesis adoptadas para llevar adelante el estudio.

Keywords: Sediments, bottom outlet, sedFoam.

Abstract. The sediment transport in artificial reservoirs is studied through numerical modeling, supporting different approaches depending on the scales. In particular, if the goal is to analyze the sediment scouring process in the vicinity of hydraulic structures, it is necessary to accurately represent the hydrodynamics of the hydraulic structure. Currently, there are various widely used software tools in the field of river engineering, such as Delft3d and Telemac, with specific treatments for sediment transport. However, their implementation often proves insufficient for addressing these types of problems.

This work presents the implementation of a numerical model using the *sedFoam* package of OpenFOAM to study sediment removal operations in the vicinity of a bottom outlet and ensure the proper functioning of the structure. We discuss the advantages of the hydrodynamic and computational representation of the problem, the limitations regarding sediment treatment, and the assumptions made to carry out the study.

1. INTRODUCCIÓN

Los descargadores de fondo son obras hidráulicas que pueden estar presentes o no en los aprovechamientos hidráulicos y cuya función varía según las características propias del sitio. En términos generales pueden ser utilizados como parte del conjunto de las obras de alivio ante eventos de crecidas, para el vaciado del embalse y en algunos casos se emplea para operaciones de barrido de sedimentos (flushing).

En todos los casos, por la naturaleza de la obra (con la toma ubicada en el inferior del vaso), suelen ser susceptibles a taponamiento debido los procesos de sedimentación. La sedimentación y posible obstrucción de la embocadura puede conllevar a que la estructura quede fuera de servicio, por eso es que las operaciones preventivas ayudan al mantenimiento de la misma.

Las simulaciones para evaluar la autolimpieza del descargador de fondo resultan un desafío, ya que implica la implementación de modelos morfológicos para representar los procesos de erosión/sedimentación, pero al mismo tiempo la modelación detallada de la hidrodinámica cercana a la toma.

Comúnmente los software de amplio uso en el campo de la ingeniería, son utilizados en una escala espacial mayor a la que se requiere en una estructura de este tipo, por tener un abordaje tipo 2DH (ej. Delft3D, Telemac, Mohid). Por este motivo se vuelve necesario combinar modelos numéricos hidrodinámicos de detalle (Computational Fluid Dynamics, CFD) con los procesos morfodinámicos.

2. OBJETIVO

El objetivo de este estudio es en primer lugar implementar un modelo CFD morfodinámico de un descargador específico y evaluar el efecto de una operación de autolimpieza de sedimentos. Secundariamente, se busca identificar algunos de las principales dificultades en la implementación de un modelo de este tipo.

3. METODOLOGÍA

Para el análisis del proceso morfodinámico se implementa un código numérico, *sedFoam*, desarrollado bajo la plataforma de OpenFOAM. Para esto se desarrolla el modelo hidrodinámico en primer lugar, para el cual se evalúan las velocidades en el descargador de fondo ante distintos escenarios de sedimentación. El caso de estudio es el descargador de fondo del aprovechamiento multipropósito Potrerillos, ubicado en Mendoza, Argentina. Del mismo se cuenta con información batimétrica en las cercanías de la obra del descargador de fondo y la geometría de la estructura, lo cual se integra en un único modelo geométrico 3D (Fig. 1). Por otra parte, se tiene información básica para la caracterización del sedimento de fondo (granulometría), el cual se constituye por una mezcla de limos y arcillas. Luego se desarrolla un modelo sedimentológico, el cual aproxima las características del material de fondo, aunque con limitaciones que se detallarán más adelante obtenidas a partir de datos de base del aprovechamiento.

3.1. Implementación de modelo CFD

Se desarrolló un modelo CFD del descargador de fondo, para lo cual se utilizó el código abierto de dominio público OpenFOAM, que resuelve numéricamente las ecuaciones de Navier Stokes en base al método de los volúmenes finitos, sobre cualquier malla tridimensional de celdas poliédricas. La resolución se lleva a cabo a través de un método implícito iterativo, de probada robustez, sobre las variables presión-velocidad. El código admite paralelización mediante la técnica de descomposición de dominio lo que permite reducir los tiempos de cómputo

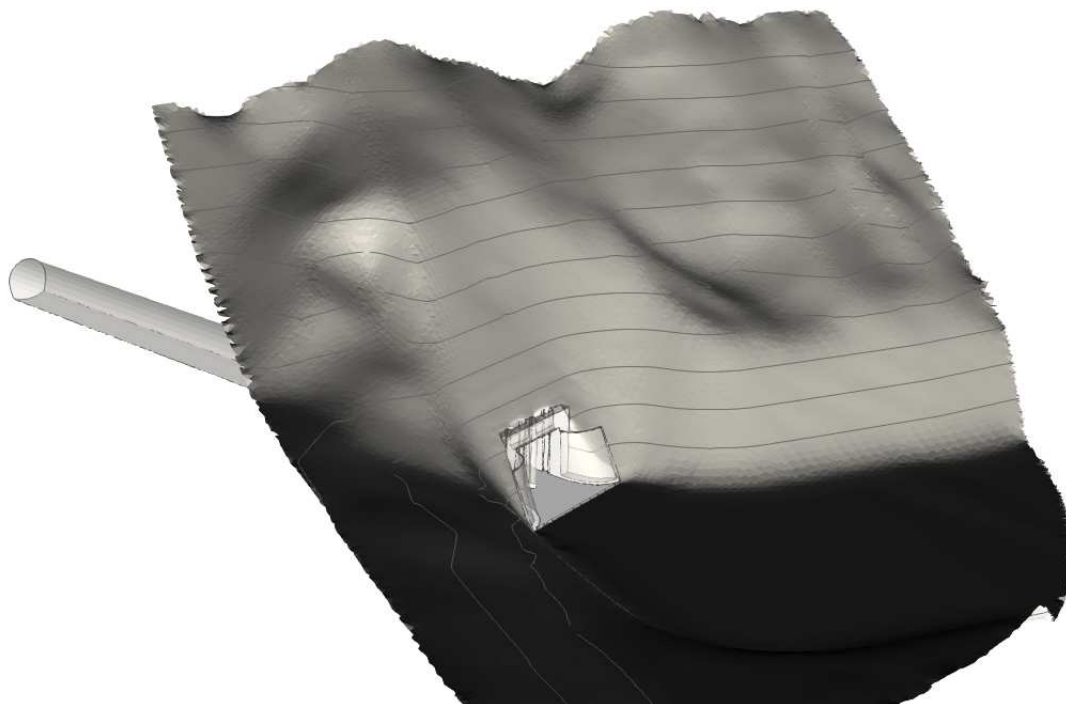


Figura 1: Geometría de dársena.

de manera considerable.

3.2. Domino y condiciones de borde

El dominio de cálculo se extiende 80m aguas arriba de la embocadura del Descargador de Fondo, de forma de contar con una buena representación del flujo de aproximación a la estructura. En la vertical el dominio llega hasta el nivel de embalse correspondiente a 1371mIGN, ubicándose el descargador de fondo en cota 1275mIGN. Hacia aguas abajo el modelo llega hasta el pozo de compuertas ubicado en la progresiva 165.16m.

Para las condiciones de borde (véase la Fig. 2) se tienen las siguientes condiciones de borde:

- “Entrada”: se define presión hidrostática compatible con la altura de columna de agua del nivel de embalse,
- “Salida”: caudal de salida por el descargador
- “Superficie”: coincidente con la superficie del embalse, donde se imponen velocidades tangentes a la superficie (no hay entrada o salida de flujo)
- “Terreno”: representación de las laderas como una condición de borde de pared rugosa
- “Fondo”: representación del sedimento como una condición de borde de pared rugosa
- “Estructura”: representación del descargador con una condición de borde de pared rugosa que represente el hormigón
- “Laterales”: bordes de cierre, representados con una condición de borde de pared.

La rugosidad fue parametrizada tomando una rugosidad efectiva del hormigón de $k=5\text{mm}$. Este valor suele ser un orden menor en estructuras con buena terminación de los encofrados, pero dado que se trata de una estructura que inicialmente tiene sedimentos y posibles obstrucciones, se eleva dicho valor. Por otra parte, en el resto de los contornos sólidos ("terreno "fondo") se adoptó $k=20\text{mm}$ asumiendo una mayor rugosidad. La representación de la rugosidad en el modelo CFD se realiza mediante una ley de pared rugosa que tiene en cuenta el valor de rugosidad efectiva ingresado.

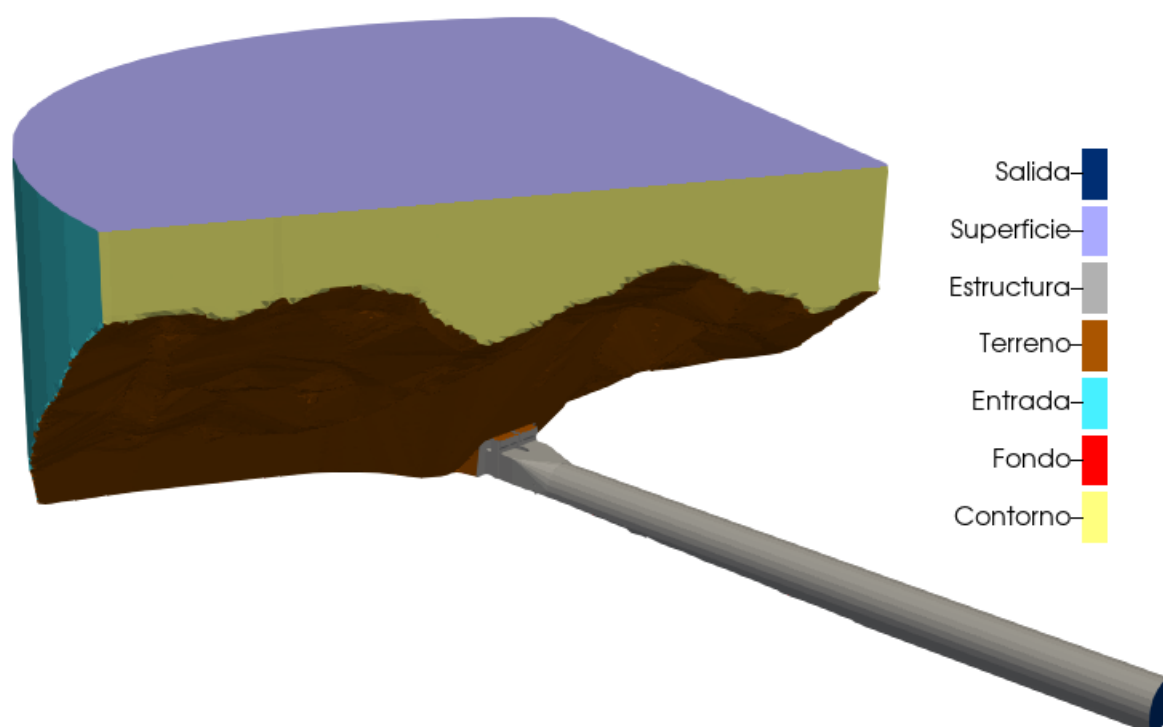


Figura 2: Condiciones de borde.

3.3. Modelo sedimentológico

La formulación matemática del modelo de flujo bifásico euleriano *sedFoam* se obtiene promediando las ecuaciones de conservación de masa y momento locales e instantáneas sobre el fluido y las partículas dispersas. Las ecuaciones de gobierno resultantes pueden considerarse como la contrapartida de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos monofásicos. Para aplicar estas ecuaciones al flujo turbulento, en el que los movimientos turbulentos son generados por la tensión de corte del flujo mucho más grande que la escala del grano, se requiere un promedio o filtrado adicional de la turbulencia.

Ecuaciones Gobernantes: *sedFoam* se basa en ecuaciones de conservación de masa y momentum que se promedian sobre las fases fluida y dispersa. Estas ecuaciones son similares a las ecuaciones de Navier-Stokes para agua sin carga en suspensión. El planteo conserva la masa y el momentum en ambas fases (fluido y partículas), incluyendo términos como densidades, velocidades, fuerzas gravitatorias y fuerzas de arrastre.

Por otra parte se tiene formulaciones para la determinación del coeficiente de arrastre sobre el sedimento, las tensiones de corte sobre las partículas y la reología granular (Chauchat et al., 2017).

El modelo ha sido testeado y validado para distintos casos 2D y 3D teniendo en cuenta solo sedimentos no cohesivos (Mathieu et al., 2019).

3.4. Turbulencia

Los efectos turbulentos fueron representados por el modelo bivariado K-omega SST (Shear Stress Transport), de probada robustez para analizar flujos turbulentos. Para aplicar estas ecuaciones al flujo turbulento, se requiere un promedio adicional o filtrado de la turbulencia generada por el corte de flujo. En este modelo, se derivan ecuaciones para el flujo bifásico Euleriano con turbulencia promediada.

3.5. Mallado

Para definir la malla final de cálculo se realizaron sucesivas simulaciones con las que se determinó la sensibilidad de los resultados obtenidos a la discretización de la malla. La malla utilizada para las simulaciones definitivas tiene un total de 1.3M de elementos y elementos de base de 2,4m que son refinados en las proximidades de lo obra hasta llegar a un tamaño de 0,3m.

La Figura 3 muestra la discretización de la malla a lo largo del eje de la obra. En la sensibilidad de la malla (que queda fuera del presente trabajo) no solo se tuvo en cuenta el tamaño de los elementos en el interior del dominio, también se evaluó la representación de celdas (capas) sobre los contornos, lo que permite alcanzar una correcta representación de las pérdidas friccionales.

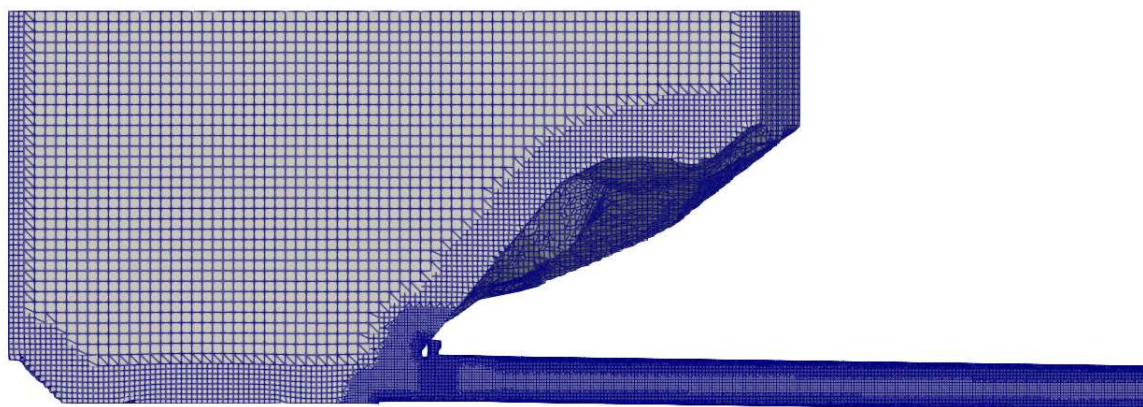


Figura 3: Corte de la malla a lo largo del eje del descargador de fonfo

3.6. Aspectos numéricos

Los esquemas numéricos empleados son de segundo orden, específicamente se utilizó "*Gauss linearUpwind grad(*)*" para los esquemas divergentes, que brinda estabilidad en las simulaciones. Para la resolución de las ecuaciones de conservación de masa y momentum, se empleó PIMPLE con 2 correctores externos, y 2 iteraciones internas (sin control de residuos de cada paso) y el factor de relajación para la presión se fijó en 1 para acelerar la convergencia.

El paso de tiempo es ajustable al número de Courant el cual se fijó en 0,75.

4. RESULTADOS

4.1. Simulaciones a fondo fijo

En primer lugar, se realizaron distintas simulaciones a fondo fijo con el fin de caracterizar la hidrodinámica general de la obra. A partir de relevamientos batimétricos se tenía conocimiento de un cierto grado de atarquinamiento, siendo que la embocadura de la toma representaba una obstrucción de la mitad de la sección. Teniendo en cuenta esta información se simularon distintos escenarios de caudal, manteniendo el fondo coincidente con el nivel de sedimentación aguas arriba de la toma y disminuyéndolo progresivamente hasta ser nulo en la zona de compuertas. El escenario de mayor interés era el asociado a un caudal de $300\text{m}^3/\text{s}$ (capacidad máxima del descargador), en el que se evaluaron campos de velocidades y las tensiones de corte.

La Figura 4 muestra el campo de velocidades para un caudal de $300\text{m}^3/\text{s}$ y obstrucción de la toma, donde se aprecia la fuerte aceleración del flujo en la sección de la toma, con velocidades menores a 1m/s aguas arriba y velocidades tendientes a $4,5\text{m/s}$ hacia la sección donde se emplazan las compuertas. Además se compararon las velocidades a lo largo del conducto respecto de una condición sin sedimentos depositados en el descargador y se puede observar que el incremento de velocidad por presencia de los sedimentos es en promedio de un 50 %.

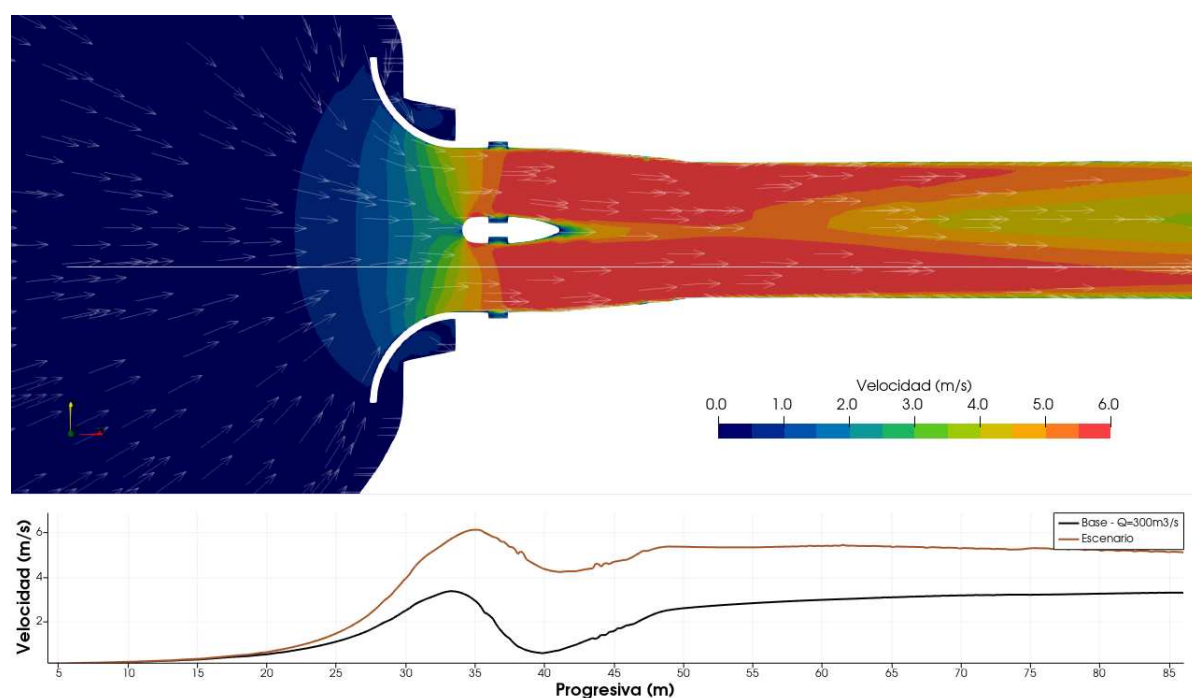


Figura 4: Campo de velocidad a lo largo del eje de la obra

En particular resultó de interés el campo de tensiones de corte para el escenario de base (ver Figura 5). Se observa que el proceso de autolimieza quedaría acotado dentro de la conducción, ya que las tensiones aguas arriba caen rápidamente por debajo de los $0,02\text{ N/m}^2$, lo cual resulta en valores inferiores a la tensión crítica de remoción de sedimentos finos, teniendo en cuenta que el rango de tensiones de corte asociadas a la movilidad de arcillas varía entre $0,05$ y $0,40\text{ N/m}^2$. (van Rijn, 2020).

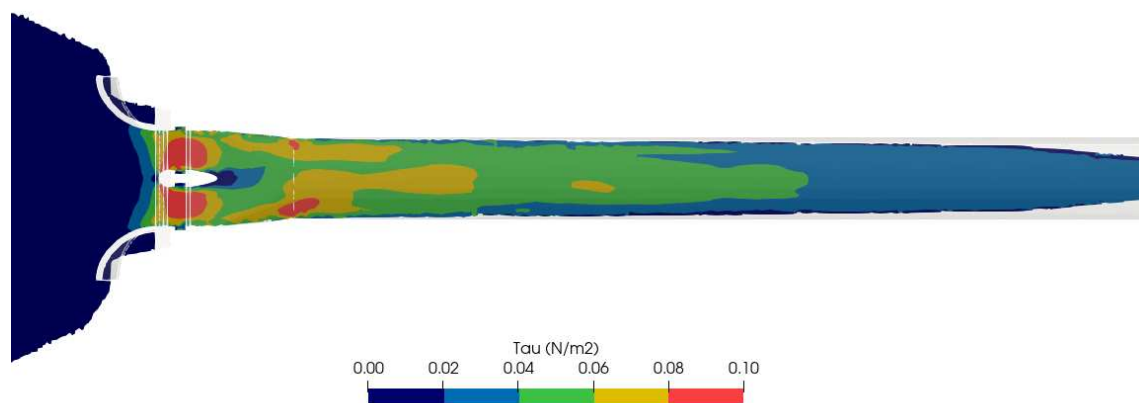


Figura 5: Tensión de corte en la zona próxima a la toma

4.2. Fondo móvil

El estado actual de desarrollo del código *sedFoam* solo permite la modelación de sedimentos no cohesivos. Esto representa una limitación en el caso de estudio, ya que el sedimento depositado en el embalse es mayormente fino, la caracterización granulométrica del lecho se adoptó coincidente con el límite de finos es decir $D_{50} = 63 \mu m$.

En la Tabla 1 se presentan los principales parámetros adoptados para la caracterización del sedimento. Las variables de ajuste se tomaron según los valores por defecto ya que no se contó con datos de la operación de autolimpieza para calibrar. De igual modo, los modelos de reología granular se fijaron según los valores por defecto.

Parámetro	Adoptado
D_{50}	$63 \mu m$
Densidad específica	2650 kg/m^3
Velocidad de caída	0.72 mm/s
Porosidad	0,4

Tabla 1: Parámetros sedimentológicos

Se computó el volumen de sedimento en el interior del descargador de fondo a lo largo del tiempo. En la Figura 6 se puede ver como en los primeros segundos, en los que actúa el caudal, se produce la mayor parte de la remoción de material. Luego se da una erosión gradual, proceso que a su vez es alimentado por parte del sedimento proveniente de aguas arriba de la toma.

En la Figura 7 se presentan cortes en el eje de la conducción de la fracción de sedimento en distintos instantes de tiempo. En los primeros 200 segundos ocurre la mayor remoción de sedimento, seguidas por una estabilización en el volumen total producto de un balance entre la masa de sedimento que sale del conducto y la que entra desde la embocadura. A partir de los 400 seg. se da una gradual disminución del volumen de sedimento producto de la erosión dentro del túnel y una menor contribución del volumen de ingreso desde el embalse.

La secuencia que se presenta en la Figura 8 muestra la variación en la batimetría aguas arriba. Se destaca el hecho de que en la medida en la que el sedimento dentro del conducto es removido, las pendientes que se generan aguas arriba contribuyen a arrastrar el sedimento de aguas arriba

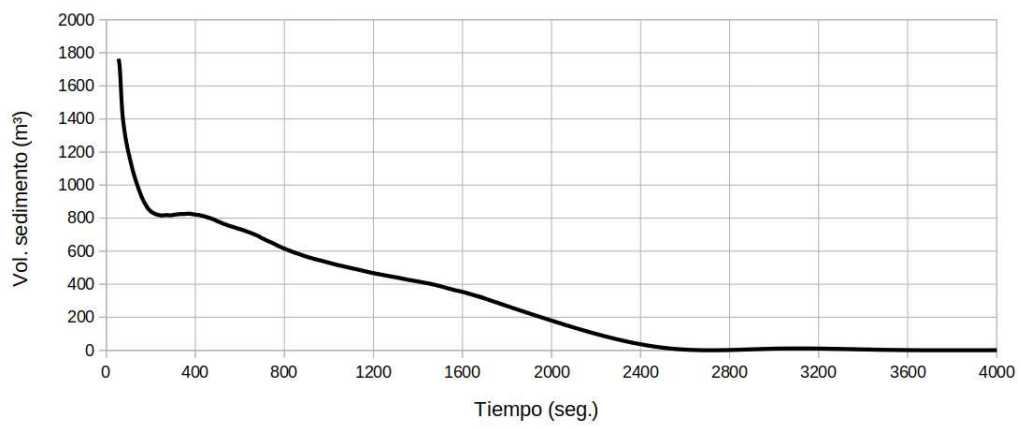


Figura 6: Volumen de sedimento en el descargador de fondo

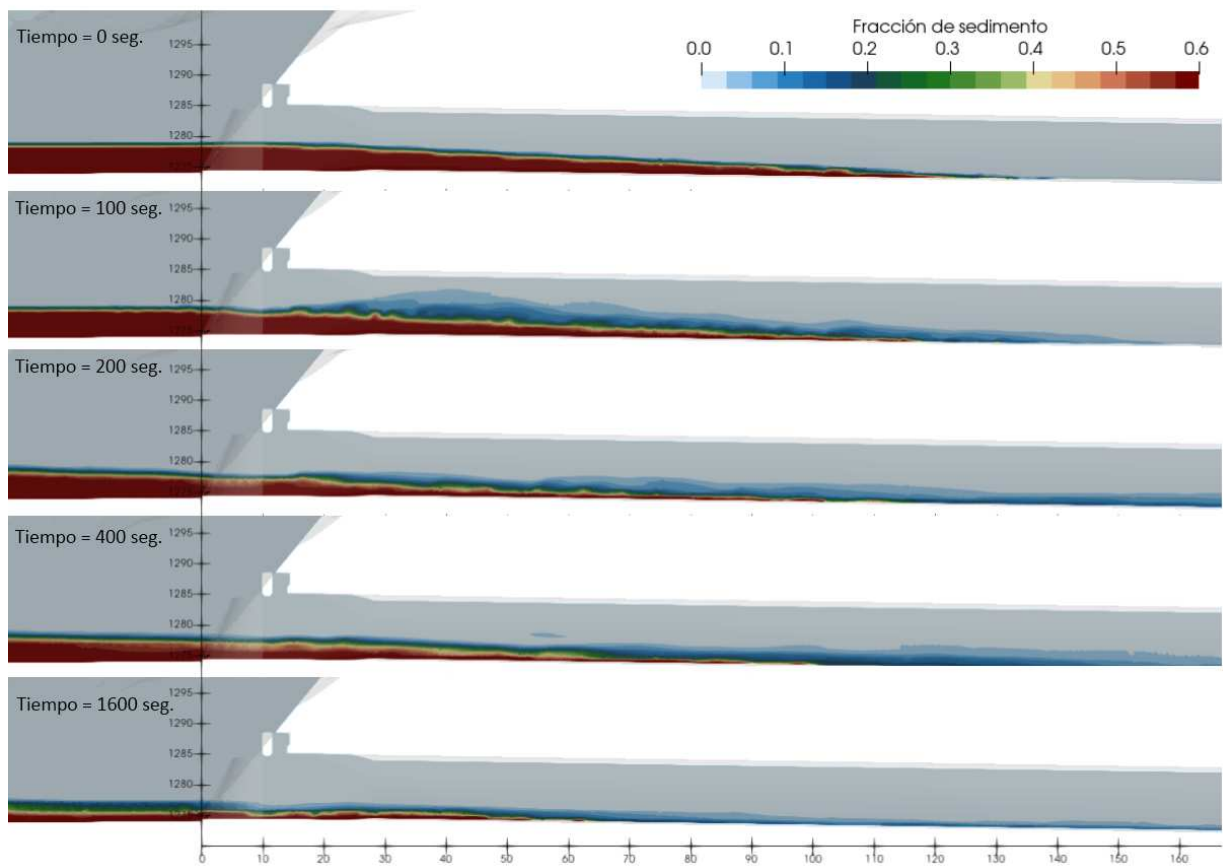


Figura 7: Corte de la concentración de sedimento

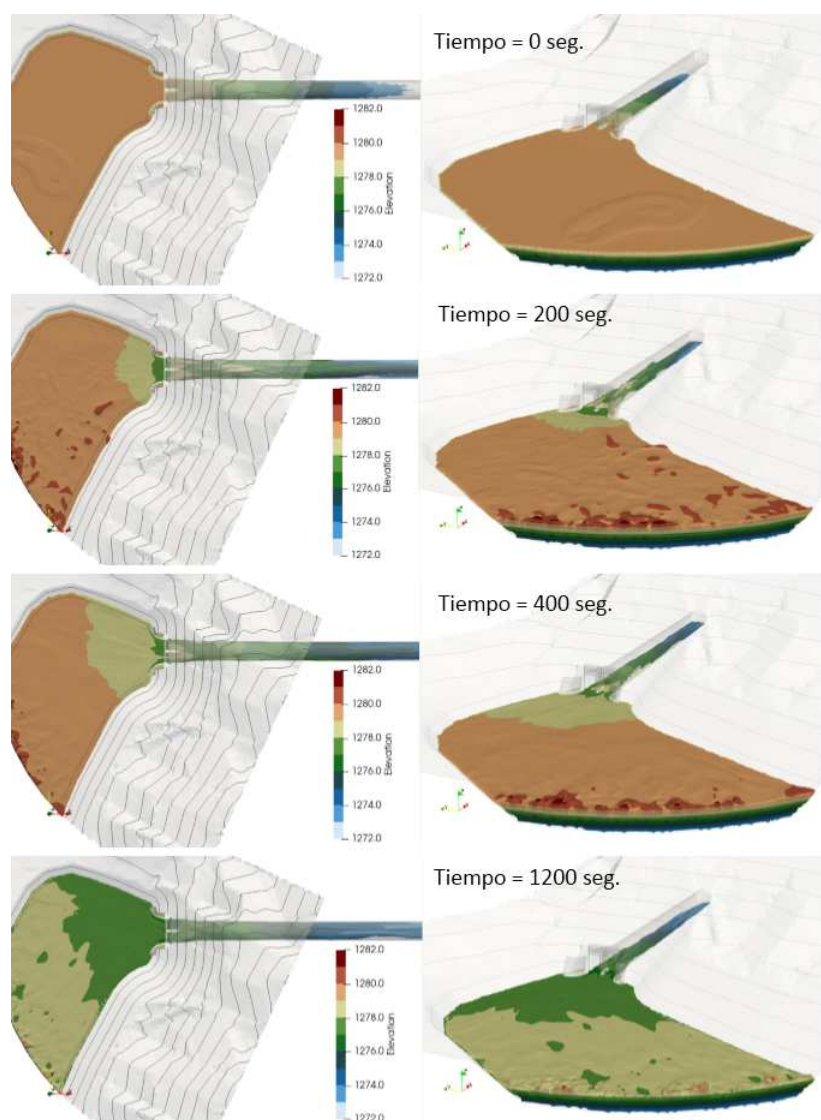


Figura 8: Secuencia de la evolución del fondo

de la toma. Esto no es posible visualizarlo solo a partir de las tensiones de corte obtenidas a partir de las simulaciones de fondo fijo.

Por otra parte se, pueden observar máximos locales en las cotas que obedecen en parte a perturbaciones introducidas primero al activarse el caudal y luego efectos espurios provenientes de las condiciones de borde.

5. CONSIDERACIONES GENERALES Y DISCUSIÓN

Como parte del objetivo del trabajo se logró implementar un modelo CFD morfodinámico para analizar una operación de autolimpieza de sedimentos dentro de un descargador de fondo.

Bajo las hipótesis asumidas se verificó que para las condiciones hidrodinámicas y de sedimentación inicial, el descargador de fondo logra evacuar la mayor parte de sedimento depositado en el interior del conducto y reducir la obstrucción de la entrada. El lapso de tiempo en que esto se desarrolla está fuertemente sujeto a la caracterización del sedimento y en las simulaciones llevadas a cabo, alcanzó una condición de estabilidad en menos de 1hr.

Se pudo captar parte del arrastre de sedimento que se produce aguas arriba de la toma, que

no es posible capturar a partir de las tensiones de corte obtenidas en simulaciones de fondo fijo.

Entre las limitaciones y dificultades que se encontraron en la aplicación del código *sedFoam* se encuentran:

- La imposibilidad de simular sedimentos cohesivos implica una limitación importante en el estudio de este tipo de obras, ya que por la naturaleza de la sedimentación en los embalses, el material grueso se deposita en la cola del embalse mientras que solo el fino llega al cierre, donde se ubica la obra.
- Sensibilidad significativa a la discretización de la malla en la interfaz sedimento-fluido para las condiciones iniciales. Para poder comenzar las simulaciones desde condiciones estables se optó por inicializar con caudal nulo en la salida y bajo un modelo de turbulencia laminar. Alcanzadas condiciones estables se activó el modelo de turbulencia k-Omega SST y se fijó el caudal objetivo.
- El modelo conceptual tiene asociados varios parámetros tanto del modelo reológico granular, como de las características de las fases a simular. Dentro de las simulaciones que se realizaron, se realizaron ensayos para evaluar la sensibilidad a las distintas variables, encontrando mayor peso en las características de la malla, condiciones iniciales y forzantes (el caudal se ingreso de manera progresiva hasta llegar al valor objetivo), que en las propias variables del modelo de sedimentos. Un análisis sistemático de cada variable se está encarando como próximos pasos a seguir.
- Contar con datos relevados de la operación de este tipo de estructuras permitiría ajustar los distintos parámetros de calibración.

REFERENCIAS

- Chauchat J., Cheng Z., Nagel T., Bonamy C., y Hsu T.J. Sedfoam-2.0: a 3-d two-phase flow numerical model for sediment transport. *Geoscientific Model Development*, 10(12):4367–4392, 2017.
- Mathieu A., Chauchat J., Bonamy C., y Nagel T. Two-phase flow simulation of tunnel and lee-wake erosion of scour below a submarine pipeline. *Water*, 11(8), 2019.
- van Rijn L. Literature review of critical bed-shear stresses for mud-sand mixtures. 2020.