ATMIRE

Title	Propuesta de optimización de un desarenador tipo longitudinal aplicando el software IBER
Item Type	info:eu-repo/semantics/bachelorThesis
Authors	Martinez Alvites, Wilfor Rodolfo;Guerra Del Aguila, Juan Diego
Publisher	Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)
Rights	info:eu-repo/semantics/openAccess
Download date	2026-11-27 00:59:25
Item License	http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Link to Item	http://hdl.handle.net/10757/688583

UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Propuesta de optimización de un desarenador tipo longitudinal aplicando el software IBER

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Guerra Del Aguila, Juan Diego	0000-0003-1861-6754
Martinez Alvites, Wilfor Rodolfo	0000-0002-9312-6512

ASESOR(ES)

Guzman Zorrilla, Emanuel Jesus	0000-0001-8381-4509

Lima, 12 de diciembre de 2025

DEDICATORIA

A mi madre por su amor, fortaleza y apoyo incondicional, pilares fundamentales en mi vida y formación. A mi pareja de vida, por su comprensión, motivación y constante inspiración en cada etapa de este camino académico

Juan Diego Guerra Del Aguila

A Dios, a mis padres, quienes me enseñaron el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis hermanos y familiares que han mostrado siempre su apoyo durante toda la carrera profesional.

Wilfor Rodolfo Martinez Alvites

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo optimizar las dimensiones de un desarenador con la finalidad de incrementar la eficiencia en la captación de sedimentos y mejorar el comportamiento hidráulico de la estructura. Para ello, se desarrolló un modelamiento numérico utilizando el software IBER, el cual permitió analizar de manera detallada la distribución de velocidades, la trayectoria de los sedimentos y las condiciones de flujo bajo distintas configuraciones geométricas del desarenador. Se plantearon diversas alternativas de redimensionamiento, evaluadas en función de la eficiencia de retención y del equilibrio hidráulico del flujo, seleccionándose la propuesta que alcanzó el mayor porcentaje de captura de sedimentos sin generar fenómenos de turbulencia ni recirculaciones significativas. Los resultados obtenidos evidencian que la modificación de las dimensiones genera una mejora sustancial en la eficiencia de sedimentación, contribuyendo al mantenimiento adecuado de la infraestructura hidráulica y a la reducción de los procesos de desgaste en los sistemas que operan aguas abajo.

Palabras clave: desarenador; modelamiento numérico; IBER; sedimentación; optimización hidráulica.

Proposal for the Optimization of a Longitudinal Desander Using the IBER Modeling Software

ABSTRACT

This study aims to optimize the dimensions of a grit chamber in order to increase sediment capture efficiency and improve the hydraulic performance of the structure. A numerical modeling approach was developed using the IBER software, which enabled a detailed analysis of velocity distribution, sediment trajectories, and flow conditions under different geometric configurations of the grit chamber. Several resizing alternatives were proposed and evaluated based on retention efficiency and hydraulic stability, selecting the option that achieved the highest sediment capture percentage without generating significant turbulence or recirculation zones. The results demonstrate that modifying the chamber's dimensions leads to a substantial improvement in sedimentation efficiency, contributing to proper maintenance of hydraulic infrastructure and reducing wear in downstream systems.

Keywords: desander; numerical modeling; IBER, sedimentation; hydraulic optimization.

Trabajo_u201722060

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%	4%	1%	1%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	2%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	alicia.concytec.gob.pe Fuente de Internet	<1%
4	Submitted to Pontificia Universidad Católica de Chile Trabajo del estudiante	<1%
5	core.ac.uk Fuente de Internet	<1%
6	Submitted to Universidad Tecnologica del Peru Trabajo del estudiante	<1%
7	repositorio.unica.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	doku.pub Fuente de Internet	<1%
9	Submitted to Universidad San Francisco de Quito Trabajo del estudiante	<1%
10	docplayer.es Fuente de Internet	<1%
11	documentop.com Fuente de Internet	<1%

TABLA DE CONTENIDOS

1 CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO 1

1.1 ANTECEDENTES 1
1.2 ANÁLISIS DEL PROBLEMA 2
1.3 ESTADO DEL ARTE 4
1.4 OBJETIVOS 6
1.4.1 Objetivo general 6
1.4.2 Objetivos específicos 6
1.5 INDICADORES DE LOGRO DEL TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL 6
1.6 JUSTIFICACIÓN 7
1.7 LIMITACIONES 8

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO 9

2.1 MARCO CONCEPTUAL 9
2.1.1 Ecuaciones fundamentales del movimiento hidráulico 9
2.1.2 Ecuación de la continuidad 9
2.1.3 Ecuación de (la energía) Bernoulli 10
2.1.4 Desarenador 11
2.1.5 Fuerza de arrastre 12
2.1.6 Ecuación de Stokes y Stokes modificada 13
2.1.7 Proceso de sedimentación 15
2.1.8 Proceso de sedimentación en IBER 16
2.2 ESTÁNDARES, MARCOS DE TRABAJO Y BUENAS PRÁCTICAS 17

3 CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO 18

3.1 DISEÑO DE LA SOLUCIÓN 18
3.1.1 FASE 1: SITUACIÓN INICIAL DEL DESARENADOR 18
3.1.2 FASE 2: MODELACIÓN 18
3.1.3 FASE 3: ALTERNATIVAS DE MEJORA 19
3.1.4 FASE 4: VALIDACIÓN 19
3.1.5 FASE 5: INTERPRETACIÓN 19

3.2 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN 21
3.2.1 Recopilación de información 21
3.2.2 Modelación del desarenador inicial 27
3.3 PROPUESTAS DE MEJORA 42
3.3.1 Propuesta 1. Modificación de la pendiente 42
3.3.2 Propuesta 2. Modificación del ancho de las naves. 45
3.3.3 Propuesta 3. Inclusión de un subcanal al fondo del desarenador 48
3.4 VALIDACIÓN DEL PROYECTO 51
3.5 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS 52
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 54
4.1 CONCLUSIONES 54
4.2 RECOMENDACIONES 56
5 REFERENCIAS 57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 *Indicadores de logro del TSP* 7
Tabla 2 *Coordenadas de la nave 1 del modelo del desarenador en IBER* 28
Tabla 3 *Resumen de resultados de la simulación de la situación inicial del desarenador en IBER* 42
Tabla 4 *Resumen de resultados de la simulación de la Propuesta 1 del desarenador en IBER* 45
Tabla 5 *Resumen de resultados de la simulación de la Propuesta 2 del desarenador en IBER* 47
Tabla 6 *Resumen de resultados de la simulación de la Propuesta 3 del desarenador en IBER* 51
Tabla 7 *Resumen de resultados de las simulaciones del desarenador en IBER* 52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 *Árbol de problemas* 3
Figura 2 *Volumen de control de fluido* 10
Figura 3 *Representación de la conservación de energía de un fluido en un canal abierto* 10
Figura 4 *Desarenador de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair* 11
Figura 5 *Flujograma general* 20
Figura 6 *Desarenador de la represa Tablachaca en Huancavelica* 22
Figura 7 *Croquis de la sección transversal del desarenador* 23
Figura 9 *Registro de caudales del rio Mantaro de la estación La Mejorada* 24
Figura 10 *Curva granulométrica de los sedimentos* 25
Figura 11 *Geometría del desarenador* 28
Figura 12 *Condición de entrada del modelo de desarenador* 29
Figura 13 *Condición de salida del modelo de desarenador* 30
Figura 14 *Condición de rugosidad del modelo de desarenador (Manning)* 30
Figura 15 *Condición de posición roca del modelo de desarenador* 31
Figura 16 *Condición de entrada de sedimentos* 32
Figura 17 *Definición de CFL para la simulación en IBER* 33
Figura 18 *Selección de parámetros de resultados de transporte de sedimentos en el modelo* 34
Figura 19 *Malla generada para el modelo de desarenador en IBER* 35
Figura 20 *Inicio de proceso de simulación en IBER* 36
Figura 21 *Termino de proceso de simulación en IBER* 36
Figura 22 *Cota de agua (calado) en el modelo situación inicial del desarenador en IBER* 37
Figura 23 *Vectores de velocidades en el modelo situación inicial del desarenador en IBER* 38
Figura 24 *Velocidad de flujo de modelo situación inicial del desarenador en IBER* 39
Figura 25 *Concentración de sedimentos en el modelo situación inicial del desarenador en IBER* 39
Figura 26 *Grafica fondo desarenador vs Altura de sedimento acumulado en el fondo* 40
Figura 27 *Fondo de nave y altura sedimento acumulado en una nave en x=85 m* 41
Figura 28 *Cota de agua (calado) en el modelo Propuesta 1 del desarenador en IBER* 43

Figura 29 *Velocidad de flujo en el modelo Propuesta 1 del desarenador en IBER* 44
Figura 30 *Concentración de sedimentos en el modelo Propuesta 1 de desarenador en IBER* 44
Figura 31 *Cota de agua (calado) en el modelo Propuesta 2 del desarenador en IBER* 46
Figura 32 *Velocidad de flujo en el modelo Propuesta 2 del desarenador en IBER* 46
Figura 33 *Concentración de sedimentos en el modelo Propuesta 2 de desarenador en IBER* 47
Figura 34 *Vista transversal del desarenador para la Propuesta 3* 48
Figura 35 *Cota de agua (calado) en el modelo Propuesta 3 del desarenador en IBER* 49
Figura 36 *Velocidad de flujo en el modelo Propuesta 3 del desarenador en IBER* 49
Figura 37 *Concentración de sedimentos en el modelo Propuesta 3 de desarenador en IBER* 50

1 CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes

Los desarenadores han sido objeto de múltiples estudios debido a problemas recurrentes de colmatación y manejo de sedimentos en sistemas hidráulicos. Diversos informes técnicos (INGETEC, 2007) , identifican la sedimentación como uno de los principales desafíos operativos en este tipo de infraestructuras y proponen medidas de operación y manejo para mitigarla. Asimismo, estudios como los desarrollados por (Mogrovejo, 2019) analizan la influencia de filtraciones y procesos de inestabilidad en laderas cercanas a estructuras hidráulicas, indicando que estos fenómenos pueden incrementar la carga sedimentaria transportada por el flujo.

De igual manera, trabajos orientados a la modelación de desarenadores (Castro & Ostos, 2024) , presentan el análisis numérico de estructuras tipo longitudinal utilizando el software IBER, evaluando su comportamiento hidráulico bajo distintas configuraciones. Además, informes operacionales y actas de inspección (Guevara Cotera, 2023) , documentan el estado de las naves de desarenadores y los procedimientos de purga, lo cual permite contrastar condiciones reales de operación con las hipótesis empleadas en la modelación numérica. Estas referencias sirven como base para sustentar la carga sedimentaria utilizada en este estudio y respaldan la selección de parámetros hidráulicos y de diseño.

En ese sentido, este trabajo busca utilizar dicha información para optimizar las dimensiones de un desarenador de tipo longitudinal, con el fin de mejorar su eficiencia operativa y reducir los costos asociados a la limpieza y descolmatación de estas estructuras.

1.2 Análisis del Problema

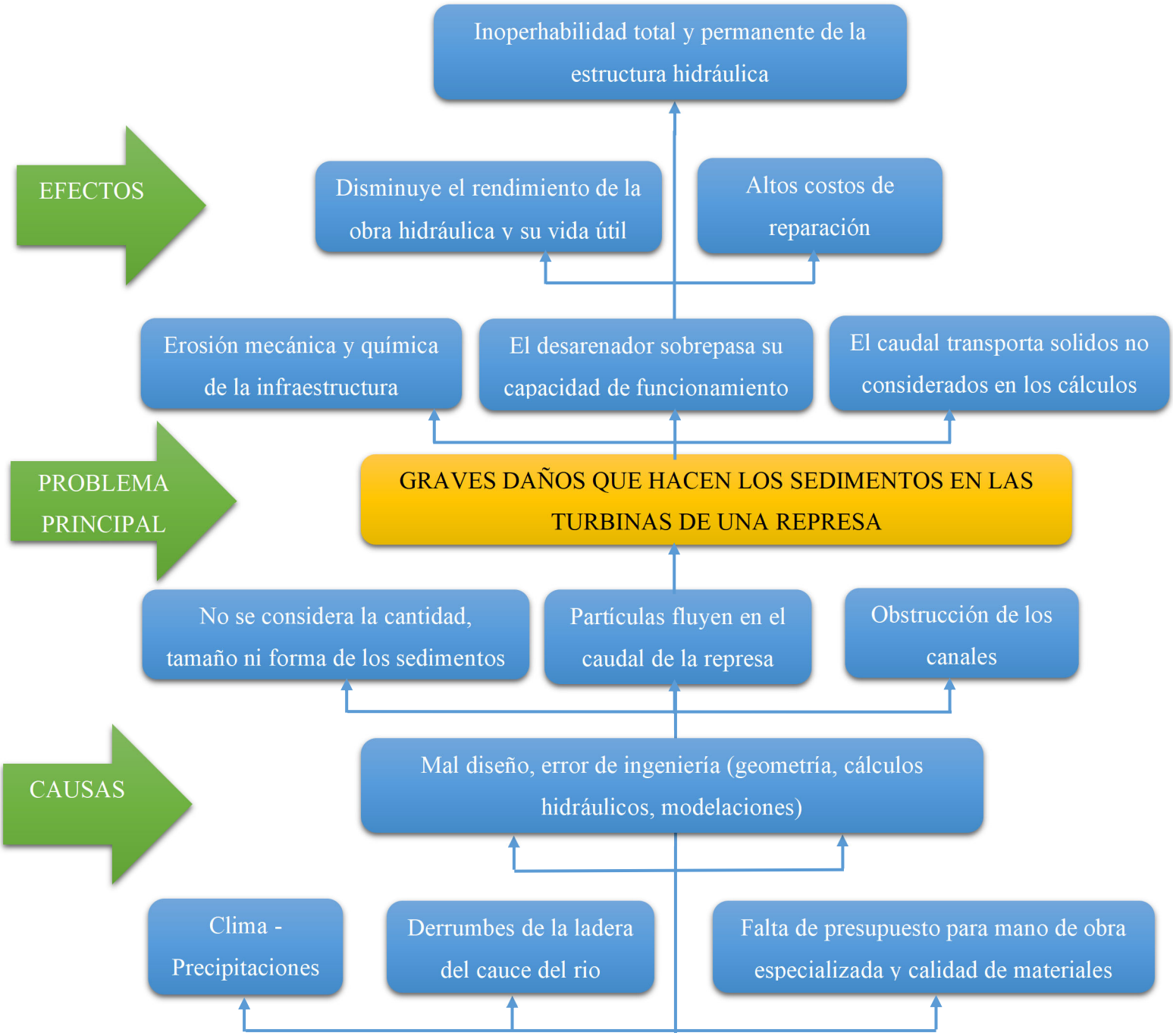
Es inherente al ser humano hacer uso de los recursos naturales para su beneficio, como la construcción de obras hidráulicas para generación de energía eléctrica o embalsamiento. Para ello, es necesario que estas estructuras funcionen de manera óptima, garantizando su vida útil prevista al momento de su diseño. Sin embargo, factores como la concentración de sedimentos transportados por el caudal, especialmente durante los periodos de mayor precipitación, pueden dañar las partes internas de la infraestructura, causando paradas por mantenimiento y reduciendo la eficiencia y vida útil de la obra (Alva, 2014).

Se ha documentado que los daños en equipos hidráulicos suelen estar asociados a partículas sólidas no retenidas por los desarenadores, las cuales aumentan durante crecidas o debido a procesos de erosión y derrumbes en áreas aledañas al cauce (ELECTROPERU, 2009) . Por esta razón, es fundamental implementar estrategias que permitan capturar un mayor porcentaje de sedimentos antes de que entren en contacto con equipos sensibles, como turbinas o compuertas, con el fin de preservar el rendimiento operativo de la infraestructura (ELECTROPERU, 2022).

Con base en antecedentes de estudios sobre sedimentación y datos hidrográficos, se pueden identificar los principales problemas asociados a la acumulación de sedimentos, incluyendo daños en equipos, incremento de costos de mantenimiento y reducción de la eficiencia operativa (Repetto, 1985). Considerando estos factores, se puede establecer un árbol de problemas que representa la situación actual relacionada con los impactos que ocasionan los sedimentos en las áreas operativas de un desarenador y sus sistemas hidráulicos asociados.

Figura 1

Árbol de problemas



¿Como se puede disminuir los daños en las turbinas de una represa ocasionados por los sedimentos?

1.3 Estado del Arte

Se tiene como referencia los siguientes artículos de investigación.

El estudio titulado “Análisis del diseño de un desarenador tipo longitudinal para la gestión de sedimentos utilizando el software IBER – 2024” tuvo como objetivo principal evaluar el comportamiento hidráulico y sedimentológico de un desarenador longitudinal mediante simulación numérica en el programa IBER. La investigación se orientó a realizar un análisis dinámico y detallado del desempeño de la estructura, aprovechando la capacidad del software para representar de manera gráfica los procesos de flujo y sedimentación que ocurren durante su funcionamiento. El área de estudio correspondió al río Huapra, ubicado en el distrito de Marcará, de donde se obtuvieron muestras reales de sedimentos que fueron empleadas en la simulación. A partir de los resultados numéricos se determinaron parámetros hidráulicos relevantes, como la velocidad del flujo (entre 0.160 m/s y 0.442 m/s), la velocidad de sedimentación (0.03 m/s), el tirante de agua (de 0.4189 m a 0.5965 m), las zonas de concentración de sedimentos y el tiempo de retención hidráulica (48 s). Los resultados permitieron concluir que el uso del software IBER constituye una herramienta eficaz para el análisis y optimización del diseño de desarenadores longitudinales, al proporcionar una visualización dinámica y cuantitativa de los procesos hidráulicos y sedimentológicos involucrados (Castro & Ostos, 2024).

El artículo titulado “Optimización de la distribución del caudal en las naves de un desarenador con modelación numérica – 2024” aborda las deficiencias observadas en el diseño hidráulico de varios desarenadores a nivel nacional, proponiendo estrategias para optimizar su funcionamiento desde la etapa conceptual del diseño. Con el propósito de mejorar la distribución del caudal y la eficiencia hidráulica de estas estructuras, se realizaron simulaciones numéricas en el software ANSYS, a partir de un diseño convencional y considerando dos escenarios alternativos: la implementación de rejillas y el alargamiento de la transición de entrada. Los resultados demostraron que dichas modificaciones permitieron alcanzar una

distribución más uniforme del flujo en las naves del desarenador, evidenciando una mejora significativa respecto al diseño base. Además, se efectuó el rediseño del segundo escenario con el objetivo de establecer una relación adimensional entre el tamaño de la arista de la varilla de la rejilla (1 cm, 3 cm, 7 cm y 10 cm) y el número de Froude, generando una gráfica comparativa que servirá como referencia para futuras investigaciones en el campo del diseño hidráulico de desarenadores (Ponce & Saavedra, 2024).

Por último, en el artículo que tiene como título: ‘‘Investigación numérica y de campo para mejorar el rendimiento de un desarenador existente con exclusión de sedimentos distribuidos - 2025’’, donde los desarenadores son esenciales para gestionar la sedimentación en los sistemas de riego, garantizando la eficiencia y la longevidad de la infraestructura hídrica. Este estudio aborda el bajo rendimiento del desarenador del Proyecto de Riego de Pequeños Productores del Bajo Usuthu (LUSIP) en la cuenca del río Usuthu, Esuatini, donde la acumulación de sedimentos afecta su eficiencia operativa. Mediante investigaciones de campo y modelado numérico avanzado con ANSYS Fluent, el estudio evalúa la eficiencia de captura y descarga del desarenador. Un modelo numérico 3D totalmente acoplado simula la hidrodinámica y el transporte de sedimentos, centrándose en la velocidad del flujo y la distribución de la concentración de sedimentos en suspensión, tanto en condiciones de caudal máximo de diseño como de bajo caudal. Las investigaciones de campo revelaron una eficiencia de captura del 27 % y una eficiencia de descarga del 36 % en condiciones de bajo caudal, debido principalmente a la turbulencia y a las limitaciones de diseño. Las simulaciones numéricas identificaron patrones críticos de deposición de sedimentos y la dinámica del flujo, lo que dio lugar a recomendaciones de diseño. Con las modificaciones propuestas, se proyecta que la eficiencia de captura del desarenador aumente al 85%, mientras que la eficiencia de descarga alcance el 80% en condiciones de bajo caudal. Este estudio introduce enfoques de modelado innovadores para evaluar la dinámica de flujo tridimensional en sistemas de exclusión de sedimentos distribuidos, ofreciendo información práctica para optimizar la gestión de sedimentos en la infraestructura de riego. Estos hallazgos contribuyen al

desarrollo agrícola sostenible y a la gestión de los recursos hídricos, abordando los desafíos en las regiones semiáridas (Mc Leod & Bosman, 2025).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Optimizar dimensiones de un desarenador para captar mayor cantidad de sedimentos usando un modelamiento en IBER.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar la situación inicial de un desarenador generico.
- Ejecutar el análisis numérico. Haciendo uso del software IBER, realizar el modelamiento con el fin de obtener resultados hidrodinámicos y de decantación.
- Proponer una alternativa de mejora en el desarenador evaluando diversos escenarios.
- Interpretar los resultados obtenidos.
- Validar la propuesta ejecutada en la simulación.

1.5 Indicadores de logro del Trabajo de Suficiencia Profesional

Uno de los indicadores del TSP será la velocidad mínima en el desarenador (m/s) que se obtendrá luego de la simulación. De esta manera se puede asegurar que mayor cantidad de sedimento se depositara en el desarenador. Se entiende que el modelo identificara la velocidad mínima de la simulación en las naves del desarenador.

Además, se evaluará la concentración mínima de sedimentos en suspensión en el flujo que atraviesa el desarenador (g/L). La reducción de dicha concentración en las propuestas del desarenador, en comparación con la situacion inicial, será considerada como un indicador de éxito de la modelación.

Finalmente, el principal indicador del TSP es el volumen de sedimento acumulado al fondo del desarenador (m^3). Esto para cuantificar la cantidad de sedimento acumulado y poder compararlo con los obtenidos en las propuestas.

Se muestra un resumen de los indicadores del TSP en la Tabla 1.

Tabla 1

Indicadores de logro del TSP

Indicador	Unidad de medida	Descripción
Velocidad mínima en el desarenador	m/s	Velocidad mínima que tiene el flujo al recorrer el desarenador luego de la simulación en IBER.
Concentración de sedimentos mínima en el desarenador	g/L	Concentración de sedimentos mínima en el flujo que recorre el desarenador luego de la simulación en IBER.
Volumen de sedimento acumulado en el desarenador	m^3	La cantidad de sedimento captado por las naves del desarenador luego de la simulación en IBER.

1.6 Justificación

En el Perú, son pocos los estudios relacionados a los desarenadores y sedimentos, los existentes quedan obsoletos para el mundo moderno. Actualmente, se cuenta con tecnología CFD – *Computacional Fluid Dynamics*, donde por métodos numéricos se pueden simular comportamientos del flujo de un caudal para una determinada estructura hidráulica. Es asi como se puede simplificar el trabajo de diseño del desarenador por uno más optimo (Sarkar, 2024).

De esta manera se pueden reducir la detención de actividades de una represa por trabajos de limpieza y mantenimiento de los equipos hidráulicos asegurando energía

eléctrica constante a los usuarios e incrementar la producción de energía para más peruanos.

Finalmente, dado que no existe una normativa sobre el diseño de desarenadores en el país, se espera que este trabajo de suficiencia profesional sea una referencia a una posible futura norma técnica.

1.7 Limitaciones

La falta de una normativa peruana para el diseño de desarenadores también es un limitante. Sin embargo, el ANA hizo una publicación sobre criterios de diseños de obras hidráulicas (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2010). Cabe mencionar, que en dicho manual no se hace mención del uso de CFD.

El presente estudio se centra en la modelación de un desarenador de tipo longitudinal general, por lo que no se consideran características específicas de una obra real en particular. Esto implica que los resultados obtenidos mediante el software IBER permiten evaluar tendencias hidráulicas y de sedimentación de manera general, pero no pueden compararse directamente con datos de campo de un desarenador existente.

Finalmente, el tiempo es un limitante a considerar. Al ser este un trabajo a realizar en 15 semanas se deberá apresurar algunos procesos.

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 Ecuaciones fundamentales del movimiento hidráulico

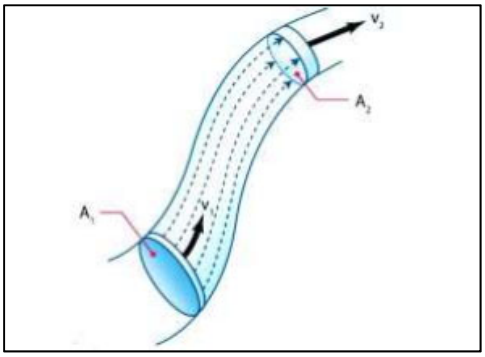
El movimiento del agua en canales y estructuras hidráulicas se describe mediante las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos, que expresan los principios de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. En el caso de flujos en lámina libre, estas se simplifican a las ecuaciones de Saint-Venant, las cuales representan una forma promediada en profundidad de las ecuaciones de Navier-Stokes. Dichas ecuaciones relacionan la variación temporal y espacial de la profundidad del flujo, la velocidad media, la pendiente del fondo y las fuerzas de fricción, permitiendo modelar fenómenos como la aceleración, la resistencia y la propagación de ondas en el flujo. Estas formulaciones constituyen la base teórica de la hidrodinámica computacional utilizada en programas como IBER para simular el comportamiento del flujo en canales, ríos y desarenadores.

2.1.2 Ecuación de la continuidad

La ecuación se basa en el principio de conservación de la masa aplicado al movimiento de fluidos, el cual establece que, en ausencia de aportes externos o fugas, la cantidad de fluido que ingresa por una sección de un conducto debe ser igual a la cantidad que sale por otra sección, siempre que el flujo sea permanente. Para su análisis, se considera una superficie de control, como se muestra en la Figura 2, que delimita el volumen de estudio, dentro de la cual se cumple que el caudal de entrada es igual al caudal de salida, garantizando así la conservación de la masa en el sistema (Chereque, 1987).

Figura 2

Volumen de control de fluido



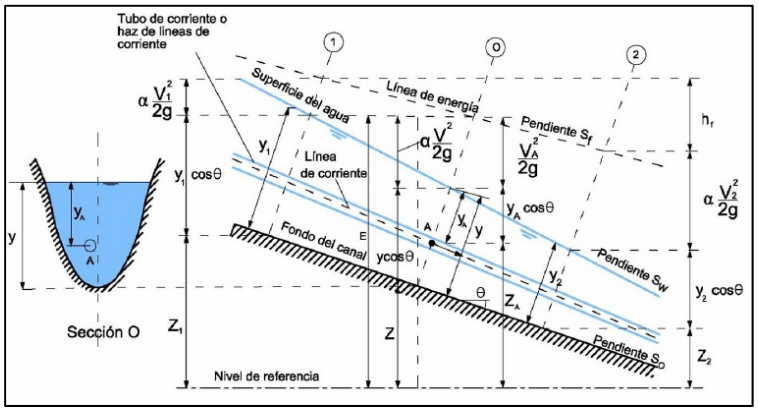
Nota. De “Mecánica de fluidos 1” 1987.

2.1.3 Ecuación de (la energía) Bernoulli

Esta ecuación se basa en la ley de conservación de energía (Lavoisier, 1789). En todo sistema hidráulico, como canales abiertos representados en la Figura 3, se puede identificar tres tipos de energía, energía por la posición (energía potencial), energía de presión, y energía por la velocidad, (Chow V. T., 1994) los cuales se pueden graficar de la siguiente manera:

Figura 3

Representación de la conservación de energía de un fluido en un canal abierto



Nota. De “Mecánica de fluidos 1” 1987.

2.1.4 Desarenador

Un desarenador es una estructura hidráulica diseñada para remover las partículas sólidas en suspensión - principalmente arenas y limos gruesos - presentes en el flujo de agua que ingresa a una obra hidráulica, como una central hidroeléctrica, una planta de tratamiento o un canal de derivación como el que se puede apreciar en la Figura 4, el de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair, en Ecuador. Su funcionamiento se basa en la reducción controlada de la velocidad del flujo, permitiendo que las partículas con mayor peso específico sedimenten antes de que el agua continúe hacia las etapas posteriores del sistema. De esta manera, el desarenador protege los equipos y conductos aguas abajo, evitando la abrasión, obstrucción o desgaste prematuro causados por el arrastre de sedimentos. El diseño de este tipo de estructuras considera parámetros hidráulicos y sedimentológicos, como el tamaño de partícula a retener, la velocidad de sedimentación y el tiempo de detención hidráulica, con el fin de garantizar una eficiencia óptima en la captura y evacuación de sedimentos.

Figura 4

Desarenador de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair



Nota. De "Obra de captación", por CELEC EP, 2023(https://www.celec.gob.ec/cocacodo/galeria-imagen/coca-codo/) *(CELEC EP, 2023)*

2.1.5 Fuerza de arrastre

Los sedimentos en suspensión son partículas finas (normalmente limos y arcillas, o arenas muy finas) que no reposan en el lecho, sino que permanecen suspendidas dentro de la masa de agua. Esto ocurre cuando la fuerza de arrastre del flujo es capaz de contrarrestar el peso efectivo de las partículas (tendencia a sedimentar).

Una partícula en suspensión está sometida principalmente a:

- Peso efectivo: $F_g = (\rho_s - \rho) g V_p$ (hacia abajo)
- Fuerza de arrastre:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \, \rho \, A_p \, (U - u_p)^2$$ (en dirección del flujo, según turbulencia)

Donde:

- ρ_s : es la densidad de la particula.
- ρ : es la densidad de fluido.
- g : es la aceleración debida a la gravedad.
- V_p : es el volumen de la particula.
- C_d ; es coeficiente de arrastre.
- A_p : el area proyectada de la particula.
- U : es la velocidad relativa del fluido.
- u_p : es la velocidad relativa de la partícula

Fuerza de sustentación (lift): generada por los gradientes de velocidad del flujo, ayuda a mantener la partícula en suspensión.

La condición de suspensión se mantiene cuando las fluctuaciones turbulentas verticales del flujo (u') son comparables o mayores que la velocidad de caída de la partícula (ω_s):

$$u' \gtrsim \omega s$$

La fuerza de arrastre es la que permite que la turbulencia del flujo mantenga las partículas suspendidas. Depende del tamaño y forma de la partícula, así como de la velocidad relativa entre el flujo y la partícula.

En términos del número de Reynolds de la partícula:

$$Re_p = \frac{Ud}{\nu}$$

Donde:

- U : es velocidad de flujo.
- d : es diametro de la particula.

El coeficiente de arrastre (C_d) varía según el régimen:

- $C_d = \frac{24}{Re_p} \longrightarrow$ flujo laminar (Stokes, partículas muy finas)
- $C_d = 0.44 \longrightarrow$ régimen turbulento (arenas finas o mayores)

En sistemas como en un desarenador tipo longitudinal, entender la fuerza de arrastre sobre los sedimentos en suspensión permite evaluar la eficiencia de remoción de partículas finas o predecir la concentración de sedimentos que llegan a las turbinas.

Principalmente, permite diseñar zonas de baja velocidad donde la fuerza de arrastre disminuya y las partículas puedan depositarse o ajustar el diseño hidráulico (longitud, pendiente, caudal) para optimizar la decantación.

2.1.6 Ecuación de Stokes y Stokes modificada

La ecuación de Stokes describe la velocidad de caída de partículas pequeñas en un fluido bajo condiciones de flujo laminar, y constituye la base teórica para estimar la velocidad de sedimentación de los sedimentos finos. Esta ley se expresa como:

$$w_s = \frac{(\rho_s - \rho) g d^2}{18\mu}$$

Donde:

- w_s : es la velocidad terminal de sedimentación.
- ρ_s : es la densidad de la particula.
- ρ : es la densidad de fluido.
- g : es la aceleración debida a la gravedad.
- d : el diámetro de la partícula.
- μ : es la viscosidad dinámica del fluido (Cheng, 1997).

La ecuación de Stokes es válida principalmente para partículas muy finas (con número de Reynolds $Re_p < 0.5$), donde las fuerzas viscosas predominan sobre las inerciales. Sin embargo, en el caso de sedimentos naturales, que presentan diámetros superiores a 0.1 mm, el flujo alrededor de las partículas se encuentra en régimen transicional o turbulento, por lo que la velocidad real de sedimentación tiende a ser mayor. En estos casos, se aplican versiones modificadas de la ecuación de Stokes, como las propuestas (Ferguson, 2004) o (Van Rijn, L. C., 1984), que incorporan el efecto del coeficiente de arrastre y de la turbulencia, permitiendo obtener estimaciones más realistas de la velocidad de caída en condiciones de flujo no laminar.

En el modelo numérico implementado por IBER, la velocidad de sedimentación constituye un parámetro esencial para determinar el equilibrio entre los procesos de deposición y re-suspensión de partículas. Esta velocidad, calculada a partir de la ecuación de Stokes o de sus formulaciones modificadas según el tamaño de grano y las condiciones hidráulicas, se utiliza para estimar el flujo descendente de sedimentos en suspensión. En el modelo, la tasa de deposición se expresa como el producto de la concentración local de sedimento por la velocidad de caída (w_s), mientras que la resuspensión depende del esfuerzo cortante en el fondo y de la tensión crítica de arranque. De este modo, IBER evalúa de forma dinámica el balance entre sedimentación y transporte, actualizando el relieve del fondo mediante la ecuación de Exner. En el caso del desarenador, este parámetro permite representar con precisión la eficiencia del proceso de decantación y cuantificar la capacidad del sistema para retener las partículas sólidas transportadas por el río.

2.1.7 Proceso de sedimentación

El proceso de sedimentación en un desarenador tiene como finalidad la remoción de partículas sólidas suspendidas en el flujo, principalmente arenas y limos gruesos, antes de que el agua sea conducida hacia los sistemas de aducción o las turbinas de una central hidroeléctrica. La sedimentación ocurre cuando la velocidad del flujo disminuye lo suficiente para que la fuerza gravitatoria que actúa sobre las partículas supere la fuerza de arrastre del agua, permitiendo que estas se depositen en el fondo de la estructura (Chow V. , 1959).

El principio básico de funcionamiento consiste en reducir la velocidad del flujo a un valor tal que la partícula con una determinada velocidad de caída (ω_s) pueda recorrer la profundidad del canal antes de salir del desarenador. En otras palabras, la sedimentación es efectiva cuando la velocidad de caída de la partícula es mayor que la componente vertical de la velocidad del flujo. Este equilibrio entre fuerzas determina la capacidad del desarenador para retener partículas de cierto tamaño y densidad (Vanoni, 1975).

Durante el proceso de sedimentación, sobre las partículas actúan principalmente dos fuerzas: la fuerza de gravedad o peso efectivo, que tiende a hacerlas descender, y la fuerza de arrastre, que se opone al movimiento descendente debido a la resistencia del fluido. El balance entre ambas determina la velocidad terminal o velocidad de sedimentación de la partícula. Este parámetro depende de las propiedades físicas del sedimento (tamaño, forma y densidad) y de las características del agua, como su viscosidad y temperatura (Raudkivi, 1998).

En los desarenadores se pueden presentar distintos tipos de sedimentación. La sedimentación discreta se da cuando las partículas caen de manera individual, sin interacción entre ellas, predominando en el caso de arenas y limos gruesos. Por otro lado, la sedimentación floculante ocurre cuando las partículas finas tienden a aglomerarse formando flóculos más grandes y pesados, aunque este fenómeno es menos común en desarenadores hidráulicos. En la mayoría de los casos, el proceso dominante es el de sedimentación discreta (Novak, Moffat, & Nalluri, 2010).

El interior del desarenador se divide funcionalmente en zonas. En la zona de entrada, el flujo se desacelera para lograr una distribución uniforme de velocidades. La zona de sedimentación constituye la región principal, donde el flujo mantiene una velocidad casi constante y un régimen cercano al laminar, condiciones favorables para la caída de partículas. Finalmente, en la zona de descarga, el agua ya clarificada se conduce hacia el canal o túnel de aducción, mientras que, en la zona de acumulación, los sedimentos depositados son evacuados mediante compuertas o conductos de purga (Chanson, 2004).

El diseño hidráulico del desarenador se basa en la relación entre la longitud y la profundidad del canal en función de la velocidad media del flujo y la velocidad de sedimentación de las partículas de diseño. Para que una partícula se deposite completamente, la relación L/h debe ser mayor o igual que V/ω_s, garantizando que este alcance el fondo antes de salir de la estructura. De esta manera, el diseño busca asegurar que las partículas con diámetro mayor al considerado crítico sean eliminadas del flujo (Novak P. &., 2007).

La eficiencia de sedimentación depende de diversos factores, entre los que destacan la velocidad del flujo, el tiempo de retención, la geometría del desarenador, la turbulencia y el sistema de purga. Es fundamental mantener velocidades dentro de un rango adecuado (generalmente entre 0.2 y 0.4 m/s) (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2010) para evitar tanto la resuspensión de partículas como la sedimentación prematura que pueda generar acumulaciones irregulares. Asimismo, la disposición adecuada de las purgas permite eliminar los sedimentos sin alterar significativamente las condiciones hidráulicas del flujo principal (Raudkivi, 1998).

2.1.8 Proceso de sedimentación en IBER

El software IBER cuantifica la sedimentación mediante un modelo numérico acoplado hidrodinámico–morfodinámico, que integra el cálculo del flujo superficial con el transporte de sedimentos. El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones bidimensionales de aguas poco profundas de Saint-Venant, obteniendo campos de velocidad, profundidad y esfuerzo cortante sobre el lecho (Bladé, 2014). A partir de

estos resultados, el módulo sedimentológico estima el transporte de fondo y en suspensión mediante formulaciones empíricas (Meyer-Peter, 1948) o (Van Rijn, 1984)en función de las propiedades granulométricas y de las condiciones hidráulicas del flujo. Posteriormente, la evolución del fondo se calcula aplicando la ecuación de Exner, que relaciona el balance de masa de sedimentos con la variación de la cota del lecho. Este acoplamiento permite que IBER genere mapas espaciales de variación del fondo y flujo de sedimentos, herramientas que permiten cuantificar los volúmenes de erosión y depósito dentro del dominio modelado.

En el presente estudio, la aplicación de IBER permitió evaluar y cuantificar el comportamiento sedimentológico de un desarenador, identificando las zonas con mayor acumulación de material y aquellas con tendencia a la erosión. Mediante el análisis de los mapas de variación del fondo, se determinó el volumen de sedimento retenido en distintas configuraciones geométricas, lo que permitió comparar el desempeño hidráulico y la eficiencia de captura de las propuestas de rediseño. De esta manera, la simulación numérica facilitó una evaluación integral de la capacidad de retención de sedimentos y respaldó la selección de la alternativa óptima desde el punto de vista hidráulico y operativo.

2.2 Estándares, Marcos de trabajo y buenas prácticas

Debido a la falta de normativa relacionada sobre el diseño de estructuras hidráulicas en el país, en esta investigación se considerará el Manual: Criterios de Diseños de Obras Hidráulicas para la Formulación de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales y de Afianzamiento Hídrico (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2010) para el diseño de la propuesta de desarenador. En dicho manual se indica todas las consideraciones para el diseño de un desarenador tipo longitudinal.

3 CAPÍTULO 3: DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Diseño de la Solución

En la presente investigación se desarrollará en cinco fases los cuales se muestran a continuación.

3.1.1 FASE 1: SITUACIÓN INICIAL DEL DESARENADOR

En un inicio, se buscará la mayor información posible a través de la lectura de artículos de investigación y tesis académicas relacionadas al tema, con el fin de obtener conocimiento teórico sobre el fenómeno que se está estudiando. Posteriormente, se recopilará información de casos prácticos de desarenadores existentes, tales como geometría de la estructura, velocidad del flujo, estudios de sedimentación, entre otros. Para ello, se considerará información disponible en literatura técnica y asesoría de profesionales con experiencia en operación y diseño de este tipo de estructuras hidráulicas.

3.1.2 FASE 2: MODELACIÓN

Una vez obtenida suficiente información se pasará al diseño del modelamiento numérico en el software IBER, para ello se deberá discretizar variables; en otras palabras, se deberá seleccionar las variables necesarias con tal de ponerle parámetros o límites a nuestra modelación con tal de tener una representación apropiada de la situación inicial del desarenador.

3.1.3 FASE 3: ALTERNATIVAS DE MEJORA

Con el objetivo de optimizar la eficiencia de remoción de partículas en el desarenador, se plantea realizar una modificación de sus dimensiones geométricas mediante simulaciones numéricas en el programa IBER. Este procedimiento permitirá evaluar el efecto de los cambios en la longitud, ancho y profundidad del canal de sedimentación sobre el comportamiento hidráulico del flujo y la distribución de velocidades. Al ajustar estas variables, se busca reducir la turbulencia y la velocidad media en la zona de sedimentación, favoreciendo que las partículas con mayores tiempos de caída se depositen dentro del desarenador. De esta manera, se espera incrementar la captación de sedimentos y, en consecuencia, mejorar la protección de los equipos aguas abajo, manteniendo condiciones hidráulicas estables y sin comprometer la capacidad de conducción del sistema.

3.1.4 FASE 4: VALIDACIÓN

Una vez se haya terminado la modelación, se hará la simulación con los datos de entrada seleccionados y se verificara los datos de salida si están dentro de un rango esperado de acuerdo con los cálculos teóricos. Si no es el caso, se deberá modificar las variables de entrada hasta obtener un resultado que satisfaga nuestro objetivo de mejora. Después, se modelarán diversas situaciones con diversas variables de las cuales se podrá escoger la más optima.

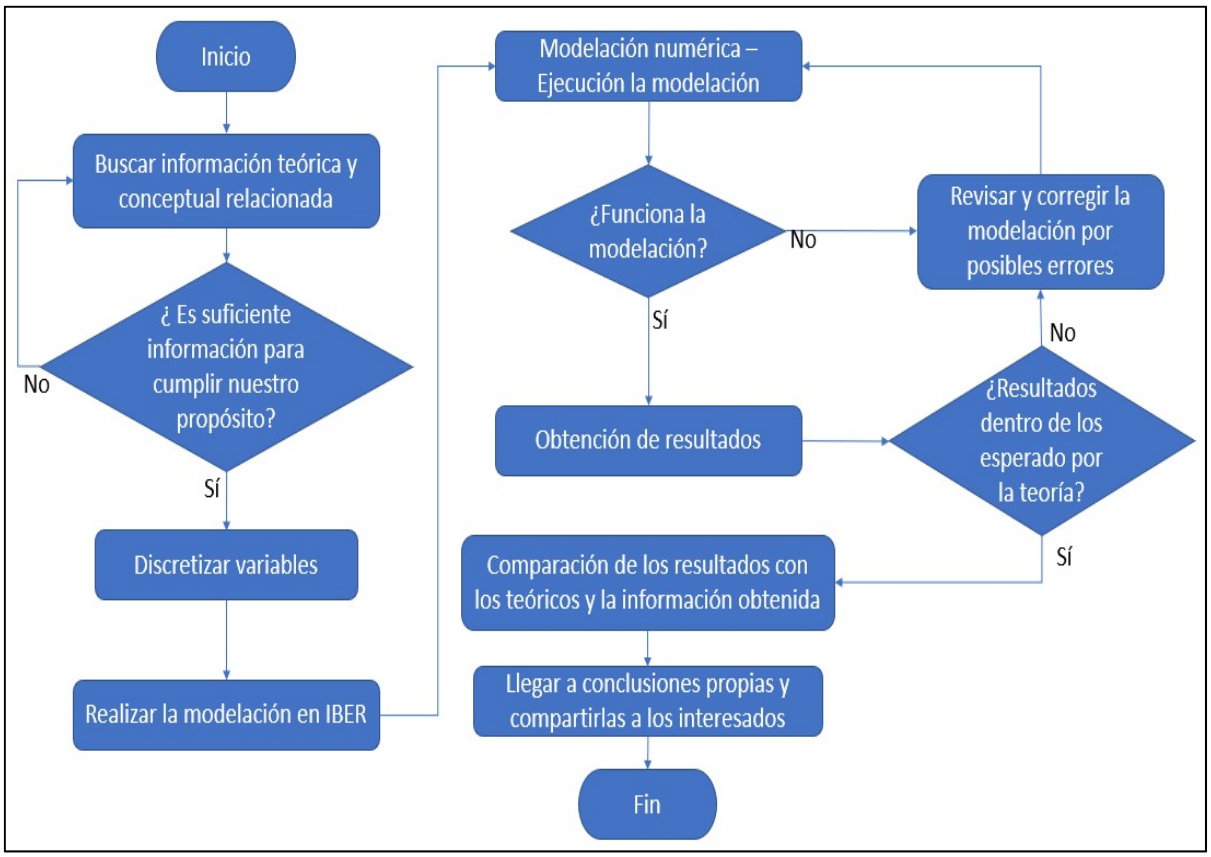
3.1.5 FASE 5: INTERPRETACIÓN

Una vez con los resultados de la modelación, se deberá ser capaz de interpretar y llegar a conclusiones sobre el cómo y por qué funciona en la manera que lo hace la modelación. Así como obtener una propuesta de modelación para el caso de estudio en cuestión. Finalmente, estas conclusiones se darán a conocer a profesionales en el tema y personas interesadas por medio de una publicación.

La Figura 5 representa el flujograma general para la elaboración del TSP, en el cual se sintetizan de manera ordenada las etapas principales del proceso. En este diagrama se describen las fases de recopilación de información, formulación de objetivos, desarrollo metodológico, ejecución del análisis técnico y elaboración del informe final, permitiendo visualizar la secuencia lógica de actividades y su interrelación. Este flujograma sirve como guía estructurada que asegura coherencia, continuidad y organización en el desarrollo completo del TSP.

Figura 5

Flujograma general



3.2 Desarrollo de la Solución

3.2.1 Recopilación de información

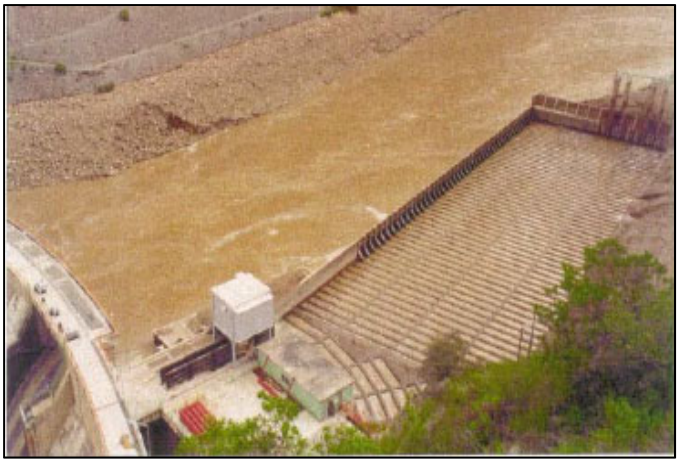
Respecto de las dimensiones del desarenador, se tomará los datos del "Compendio de Presas de Centrales Hidráulicas" (OSINERG, 2005), en donde se usará de referencia al desarenador longitudinal de la represa Tablachaca y se hará un símil con las imágenes referenciales de la represa, Figura 6. Describe que usa un sistema tipo Bieri de hormigón y que son 4 cámaras en total. Así mismo, el desarenador tiene una longitud de 170 metros de largo, 8 metros de ancho y profundidad recta de 11 metros. A su vez, indican que la entrada del desarenador está a una cota de 2667.5 m.s.n.m. y el canal de salida está a una cota de 2664 m.s.n.m., al restar estos datos se obtiene la pendiente del desarenador.

$$\%p = \frac{2667.5 - 2667}{170} * 100 = 2.06\%$$

Es importante señalar que el modelo desarrollado no constituye una representación exacta del desarenador de Tablachaca, sino una aproximación basada en los datos limitados disponibles de esta estructura. Las dimensiones y parámetros utilizados permiten evaluar de manera general el comportamiento hidráulico y la eficiencia en la captura de sedimentos, aunque los resultados deben interpretarse como tendencias y lineamientos de diseño, más que como una simulación precisa del caso real.

Figura 6

Desarenador de la represa Tablachaca en Huancavelica



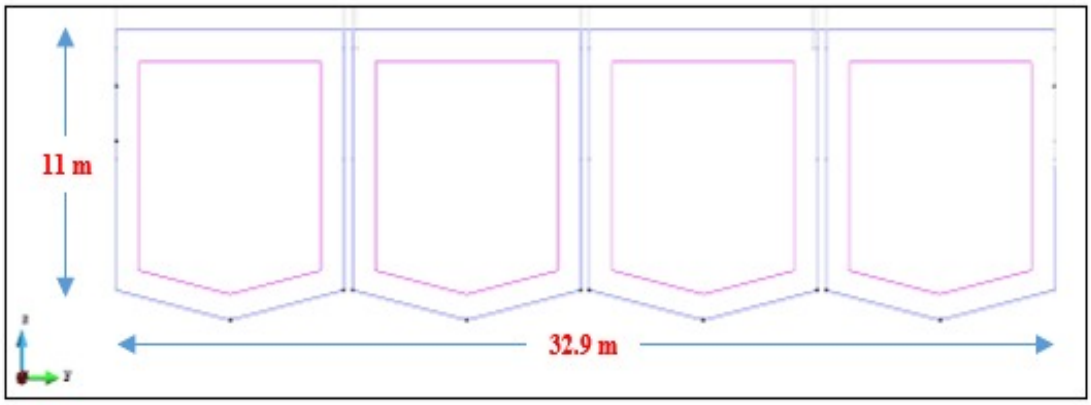
Nota. De “Compendio de represas de centrales hidráulicas”, por OSINERG, 2005

Debido a la limitada disponibilidad de datos e información detallada de la infraestructura existente, fue necesario diseñar la transición de entrada, así como el vertedero ubicado al final del desarenador y el canal de salida o purga, tomando como referencia los criterios técnicos y recomendaciones recogidas en la fuente Manual de Diseño de Estructuras Hidráulicas (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2010) . Estos elementos fueron planteados de manera coherente con las condiciones hidráulicas esperadas y siguiendo lineamientos de diseño reconocidos, de modo que el modelo numérico pudiera representar adecuadamente el comportamiento del flujo y permitir una evaluación confiable de las propuestas de optimización.

Con los datos recopilados durante la fase de caracterización geométrica se puedo modelar, es así como en la Figura 7 presenta la sección transversal del desarenador, donde se muestran las dimensiones principales, la configuración interna y los elementos estructurales relevantes para el análisis. Esta representación permite comprender la distribución espacial del flujo, identificar las zonas de mayor interés hidráulico y establecer las condiciones de contorno que servirán como base para el modelamiento numérico y la evaluación del desempeño del desarenador.

Figura 7

Croquis de la sección transversal del desarenador

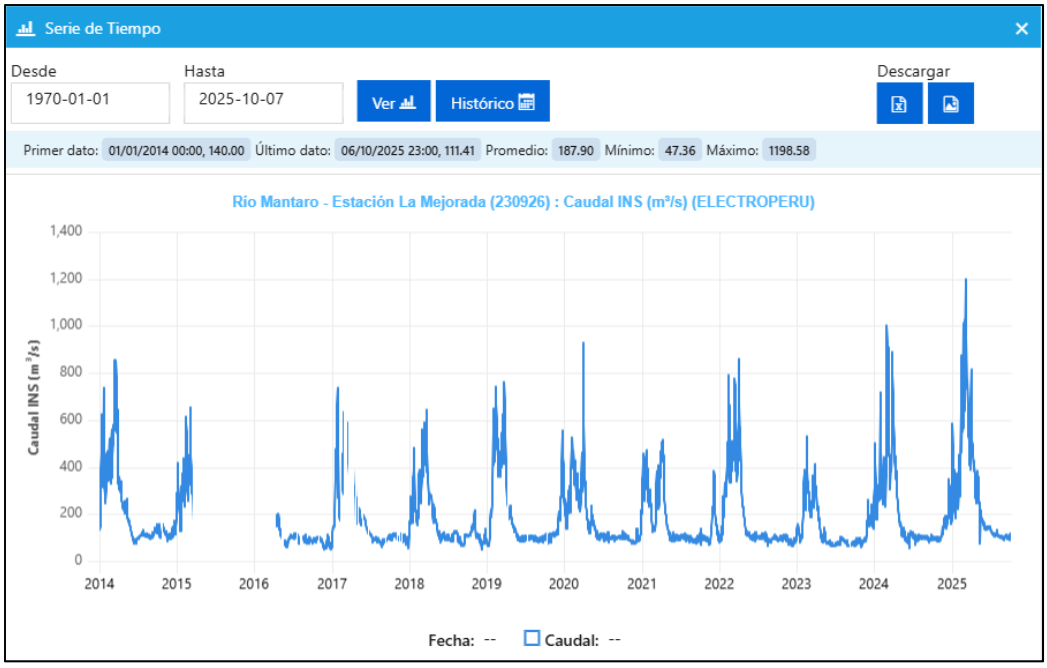


Para la modelación del desarenador se empleó un caudal promedio de 187 m³/s, registrado en una estación hidrometeorológica representativa de la zona de interés (estación La Mejorada como se ve en la Figura 8), según datos del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos (SNIRH). Este valor promedio se selecciona porque permite evaluar el comportamiento hidráulico y la eficiencia en la captura de sedimentos bajo condiciones típicas de operación, representando la situación más frecuente de flujo en el sistema. No se consideran caudales máximos o picos de crecida, ya que estos corresponden a eventos extremos de corta duración que podrían generar resultados poco representativos y no reflejar el desempeño habitual de la estructura.

El uso del caudal promedio permite obtener estimaciones más estables de velocidades, distribuciones de flujo y trayectorias de sedimentos dentro del desarenador, facilitando la identificación de zonas de recirculación o sedimentación insuficiente. De esta manera, se puede evaluar de manera general cómo la geometría y dimensiones del desarenador afectan la eficiencia hidráulica y la retención de sedimentos, ofreciendo lineamientos de optimización aplicables a estructuras similares sin que los resultados estén vinculados a un caso particular ni a un río específico.

Figura 8

Registro de caudales del rio Mantaro de la estación La Mejorada

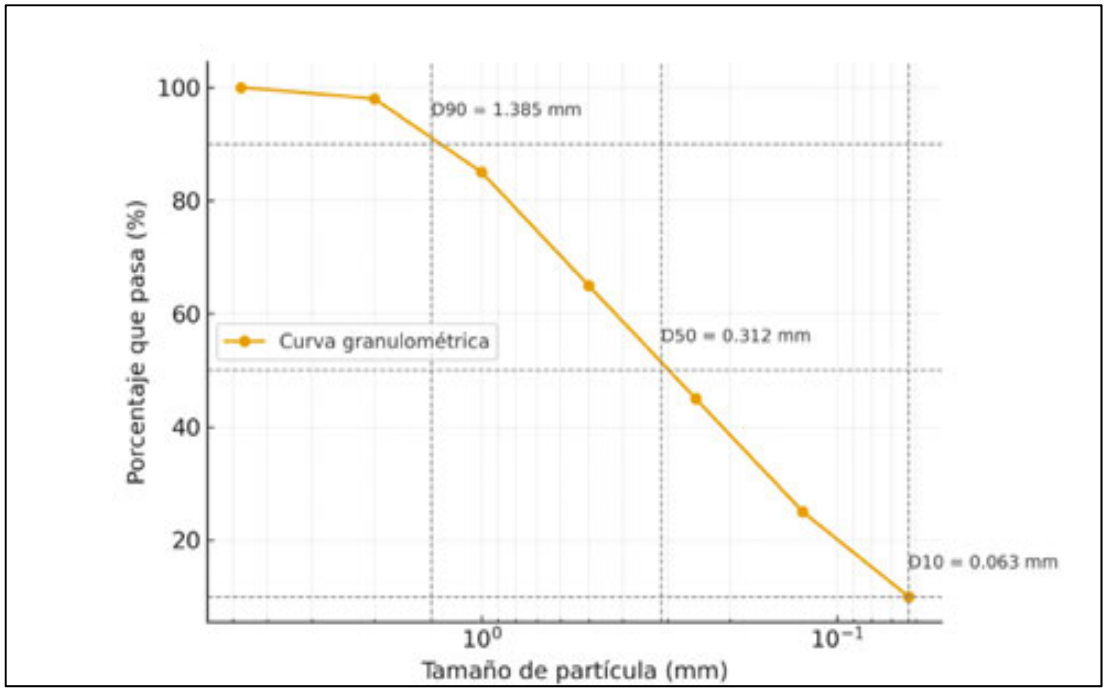


Nota. De "Servicio Nacional de Información de Recursos Hídricos", por ANA, 2025 (https://snirh.ana.gob.pe/VisorPorCuenca/?IdVar=46)

Para la caracterización granulométrica de los sedimentos utilizados en el modelamiento, se tomaron como referencia los datos presentados en la tesis (Guevara Cotera, 2023), correspondiente al estudio del comportamiento hidráulico y sedimentológico de un cauce fluvial. En dicho documento se reporta el análisis granulométrico del material del lecho, a partir del cual se obtuvieron los valores de porcentaje que pasa para distintos tamaños de partícula. Estos datos fueron empleados para construir la curva granulométrica representativa del sedimento (Figura 9), así como para determinar los diámetros característicos D_{10}, D_{50} y D_{90}, necesarios para la configuración del modelo de transporte de sedimentos en el software IBER. La utilización de esta fuente garantiza la coherencia de los parámetros sedimentológicos con condiciones naturales de cauces fluviales, permitiendo un modelamiento general aplicable a desarenadores similares.

Figura 9

Curva granulométrica de los sedimentos



Nota. De "Planeamiento de proceso de purga del embalse Tablachaca en base al pronóstico de lluvia realizado para el año 2018", por Guevara Cotera, 2021 (https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/fe0cc05b-b54b-4561-8975-32c10942495a)

Entonces, se empleó el D_{50} de la curva granulométrica, igual a 0.312 mm, redondeado a 0.3 mm, por constituir el diámetro medio representativo del material que ingresa al sistema. El D_{50} define el tamaño de partícula para el cual el 50 % en peso del sedimento es más fino y el otro 50 % más grueso, por lo que refleja adecuadamente el comportamiento hidráulico dominante del conjunto de partículas. Su utilización permite describir de manera consistente las propiedades de transporte y deposición del sedimento, evitando sesgos hacia las fracciones muy gruesas o finas presentes en la mezcla. De este modo, el valor de 0.3 mm se adopta como parámetro característico para los análisis hidráulicos y sedimentológicos, proporcionando una base física equilibrada y coherente para la modelación del desarenador.

Según la Evaluación de Recursos Hídricos Cuenca del Mantaro (ANA, 2012), se estima que el aporte sólido anual de una cuenca critica alcanza aproximadamente 115 645 212 toneladas. Para calcular la concentración promedio de sedimentos en el flujo de entrada al desarenador, se relacionó esta carga total con el volumen de agua transportado durante el año. Considerando un caudal medio de 187 m^3/s, el volumen anual de agua es aproximadamente 5.89×10^{12} litros.

Dividiendo la masa total de sedimentos (convertida a gramos por año) entre el volumen total de agua, se obtiene una concentración promedio de 19.6 g/L. Este valor representa una estimación global del aporte sólido, considerando tanto la carga en suspensión como la de fondo, y se utiliza como escenario general para fines del presente trabajo, sin estar asociado a un desarenador o río específico. Aunque puede ser superior a mediciones puntuales de sólidos en suspensión, proporciona un marco representativo del transporte sólido total del sistema para el modelamiento hidráulico y sedimentológico

El valor de concentración promedio de sedimentos de 19.6 g/L utilizado en este trabajo se encuentra fuera del rango típico observado en desarenadores, que generalmente oscila entre 0.5 y 1 g/L para caudales medios. Sin embargo, este valor elevado se adopta de manera intencional como escenario representativo de máxima carga sólida, permitiendo evaluar de forma conservadora el comportamiento hidráulico y la eficiencia de sedimentación del desarenador bajo condiciones extremas de aporte sólido. De esta manera, se garantiza que los resultados del modelamiento contemplen posibles situaciones de alta sedimentación, proporcionando lineamientos generales de diseño y optimización que sean robustos y aplicables a estructuras similares, sin depender de un caso particular.

Adicionalmente, el desarenador se asumirá que está construido en concreto armado (hormigón), por lo que para la modelación hidráulica se adoptó un coeficiente de Manning n = 0.015, (Chow, V. T., 1959) , valor típicamente empleado para superficies de concreto acabado. Además, en IBER, esta condición implica la

asignación de una capa roca 0.0 m, lo que significa que no se considerarán procesos de erosión ni degradación del material del desarenador durante la simulación. Esta configuración permite centrar el análisis exclusivamente en el comportamiento hidráulico y sedimentológico del flujo, asumiendo que las superficies estructurales mantienen su integridad y rugosidad constante a lo largo del periodo evaluado.

3.2.2 Modelación del desarenador inicial

Una vez con los datos definidos, se procede a ingresarlos al software IBER para la modelación y simulación del desarenador inicial y luego modificarlo para su optimización y así lograr el objetivo de este trabajo de suficiencia profesional.

Se empezará por modelar la situación inicial del desarenador, es decir, se ingresarán las dimensiones por medio de coordenadas. Así se obtendrá una modelación de las 4 naves del desarenador.

Para realizar las dimensiones del desarenador en el software IBER, se crearon las coordenadas mostradas en la Tabla 2 para solo una nave, igualmente se realizó el mismo procedimiento para las 3 naves siguientes y el canal de transición de entrada y salida del desarenador. Al final se obtuvo una representación geométrica en IBER del desarenador tal como se ve en la Figura 10 estableciendo las superficies que recorre el flujo. Sobre las paredes verticales, si no son definidas como superficies, IBER reconoces que son paredes de altura infinita.

Tabla 2

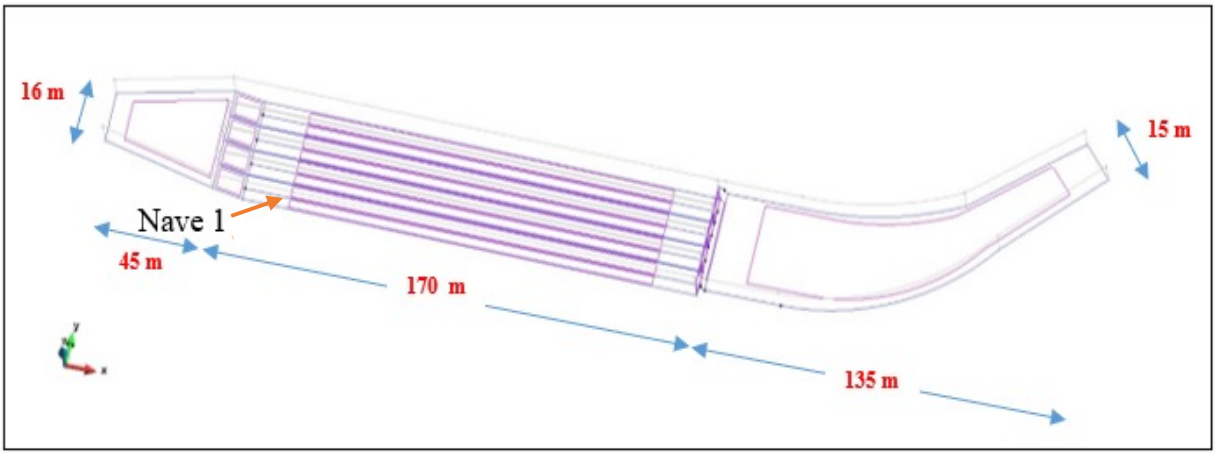
Coordenadas de la nave 1 del modelo del desarenador en IBER

Coordenadas	X	Y	Z
Punto 1	-0.15	7.5	11.8
Punto 2	-0.15	7.5	3.8
Punto 3	-0.15	11.5	3.0
Punto 4	-0.15	15.5	3.8
Punto 5	-0.15	15.5	11.8
Punto 6	170.2	7.5	8.3
Punto 7	170.0	7.5	-2.7
Punto 8	170.0	11.5	-3.5
Punto 9	170.0	15.5	-2.7
Punto 10	170.2	15.5	8.3

Se obtuvo una sección transversal prismático con la cual se modelará en IBER.

Figura 10

Geometría del desarenador



En la modelación hidráulica se definió el flujo del río de izquierda a derecha, considerando que el canal de entrada se ubica en el extremo izquierdo y el canal de salida en el extremo derecho del dominio de simulación. La condición de caudal en la entrada se estableció un régimen Critico/Subcrítico y un caudal total de 187 m^3/s, desde el tiempo 0 s como se ve en la Figura 11. En IBER, esta condición se implementa asignando un caudal constante en la frontera de entrada, asegurando que el flujo que ingresa al modelo sea uniforme y representativo del caudal de diseño.

Por otro lado, en la salida se aplicó una condición de nivel constante (o agua libre – condición de flujo Supercrítico/Critico) como se ve en la Figura 12, así se le permite al modelo ajustar la profundidad de flujo según las variaciones internas del canal y garantizar la estabilidad numérica. Esta configuración asegura que la simulación reproduzca correctamente la dirección natural del flujo y las condiciones hidráulicas del desarenador, permitiendo evaluar con precisión la distribución de velocidades y la acumulación de sedimentos.

Figura 11

Condición de entrada del modelo de desarenador

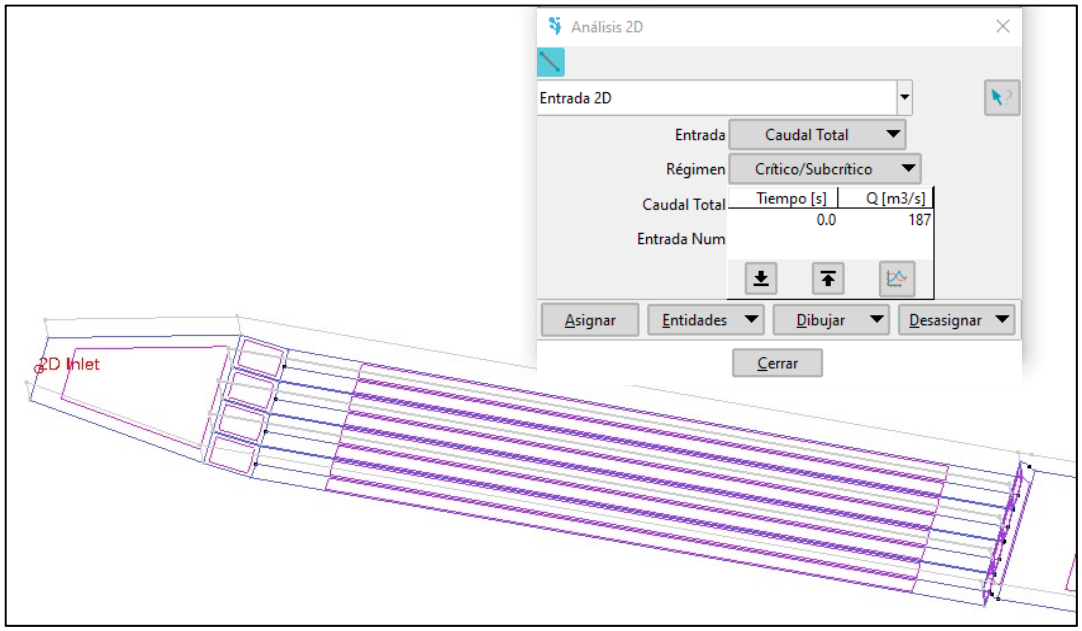
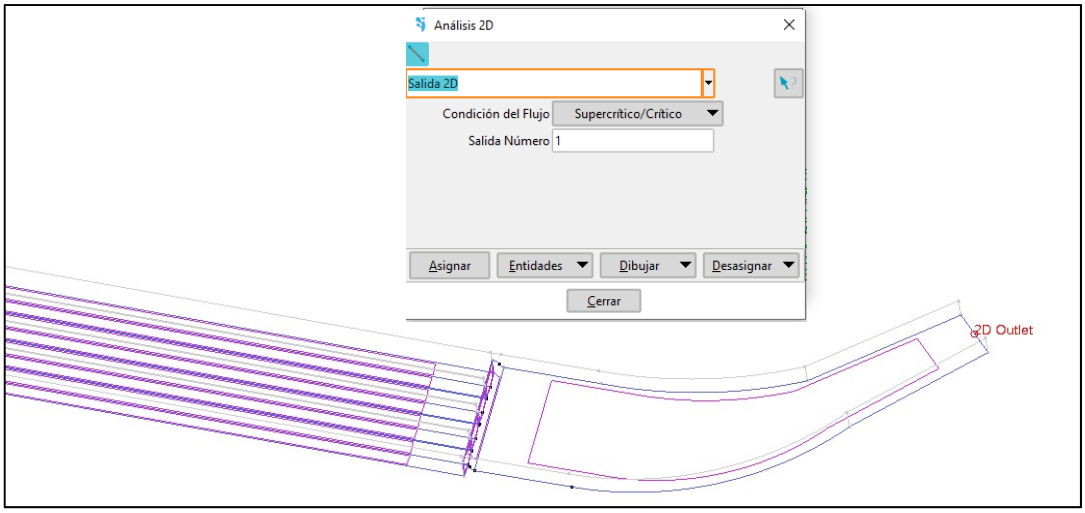


Figura 12

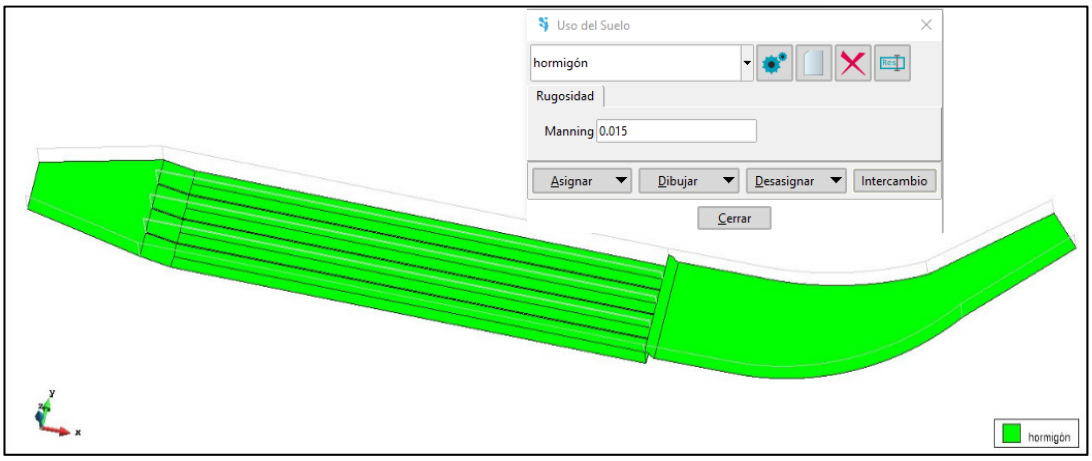
Condición de salida del modelo de desarenador



En la modelación, todas las superficies del desarenador se definieron como concreto, asignándoles un coeficiente de rugosidad de Manning $n = 0{,}015$. La Figura 13 ilustra cómo se aplicó este valor a todas las paredes y el fondo del desarenador, asegurando que el flujo se simule considerando la resistencia uniforme del material en toda la estructura.

Figura 13

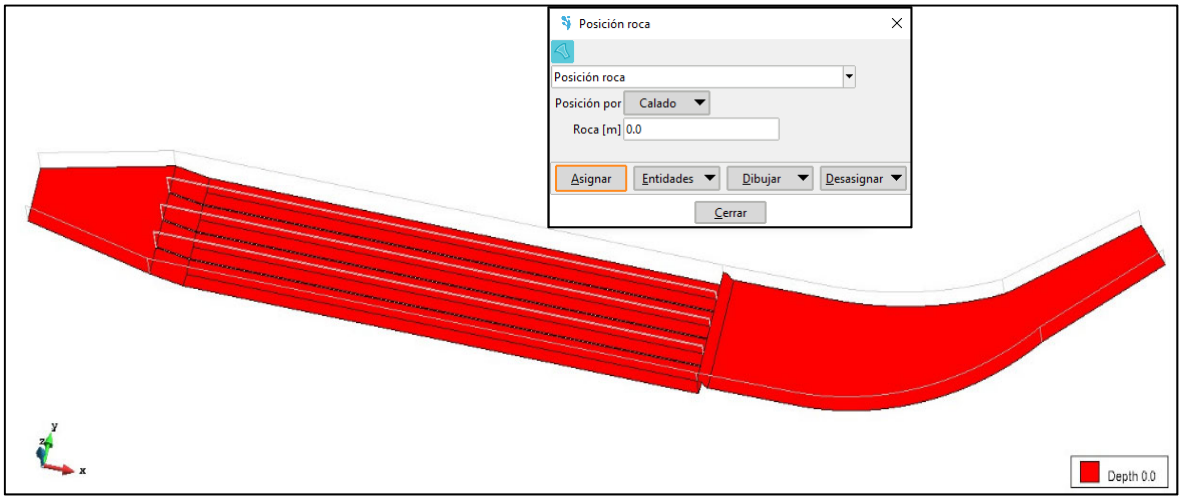
Condición de rugosidad del modelo de desarenador (Manning)



Para el apartado correspondiente al transporte de sedimentos, fue necesario configurar en IBER una capa roca con espesor de 0.0 m en toda la superficie del desarenador como se aprecia en la Figura 14. Esta definición garantiza que el software no considere procesos de erosión ni degradación del material estructural, dado que el canal está construido en concreto y no está sujeto a dinámica morfológica como un cauce natural.

Figura 14

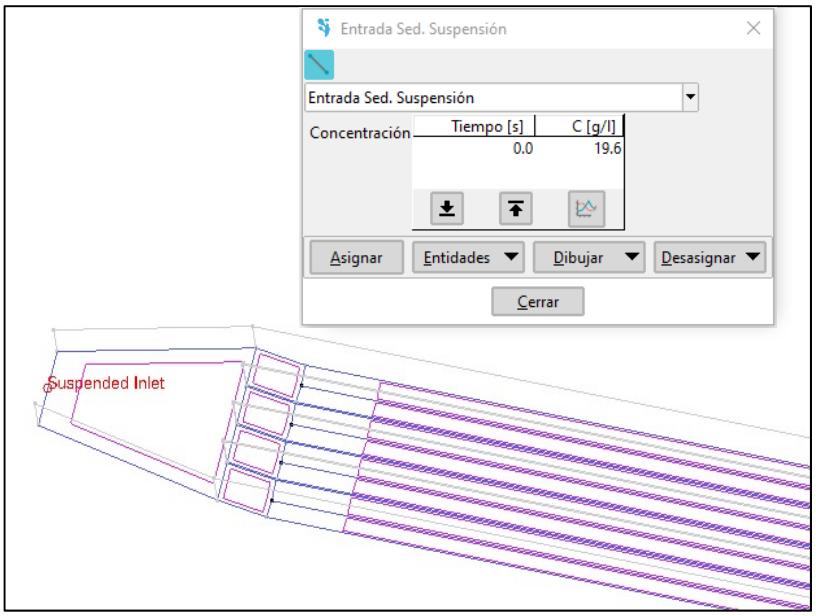
Condición de posición roca del modelo de desarenador



De esta manera, se asegura que el cálculo se enfoque exclusivamente en el comportamiento de los sedimentos finos en suspensión, sin alterar la geometría del modelo. Asimismo, se incorporó en la condición de entrada la concentración de sedimentos en suspensión previamente calculada, equivalente a 19.6 g/L, asociándola al instante inicial (tiempo 0 s) de la simulación y al inicio del canal de entrada como se ilustra en la Figura 15.

Figura 15

Condición de entrada de sedimentos

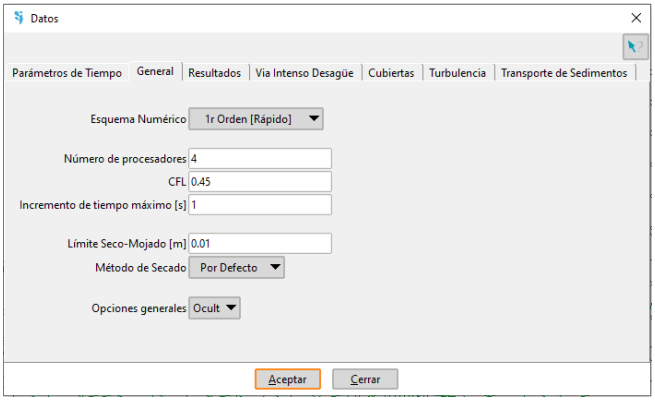


En la simulación numérica se estableció un tiempo total de 900 segundos, con intervalos de 10 segundos para el almacenamiento de resultados. Esta configuración se seleccionó con el fin de garantizar la estabilidad numérica del modelo y obtener una resolución temporal adecuada para representar la evolución del flujo y los procesos de sedimentación dentro del desarenador. El tiempo total definido permitió que el sistema alcanzara un régimen cuasi estacionario, en el cual las variaciones de velocidad y nivel del agua se estabilizaron progresivamente hasta mantenerse constantes, asegurando así que los resultados reflejen el comportamiento permanente del flujo. Por otro lado, el intervalo de 10 segundos entre resultados ofrece una frecuencia de registro suficiente para analizar la evolución temporal de las variables hidráulicas —como la velocidad, la profundidad y la variación del fondo— sin generar un volumen excesivo de datos que afecte la eficiencia computacional. De esta manera, se logra un equilibrio entre precisión temporal, estabilidad del cálculo y eficiencia de procesamiento, garantizando una representación confiable del comportamiento hidráulico y sedimentológico del desarenador.

En el entorno de simulación hidrodinámica de IBER, la definición de los parámetros temporales constituye un aspecto fundamental para garantizar la estabilidad numérica del modelo. El programa permite al usuario fijar el tiempo inicial, el tiempo final y la frecuencia de almacenamiento de resultados, mientras que el paso de tiempo interno es calculado automáticamente mediante la condición de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL). De acuerdo con el Manual Técnico de IBER (IBER Team, 2019), el esquema explícito del modelo ajusta el Δt en cada iteración de modo que se cumpla el criterio de estabilidad en función de la velocidad local del flujo y del tamaño de los elementos de la malla. En la Figura 16 se muestra definición del CFL de 0.45 y un incremento de tiempo máximo de 1 segundo para las simulaciones

Figura 16

Definición de CFL para la simulación en IBER



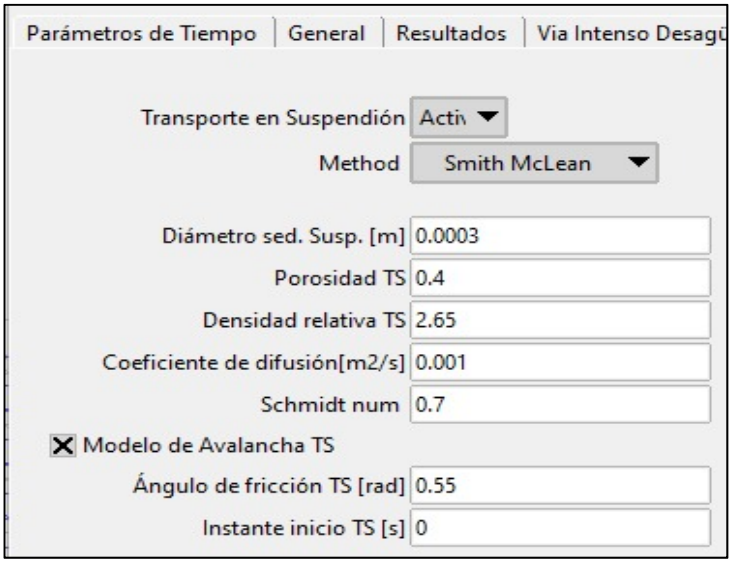
En el esquema de integración explícita utilizado por IBER, el usuario define únicamente el número de Courant (CFL), mientras que el paso de tiempo Δt es calculado automáticamente por el programa para cumplir la condición de estabilidad. No obstante, para verificar que el esquema adoptado es estable, se realizó el cálculo teórico del Δt máximo admisible a partir de la condición CFL

$$\Delta t \leq \mathrm{CFL} \cdot \frac{\Delta x_{\min}}{|u|_{\max} + c}$$

Para la simulación del transporte de sedimentos, se empleó el método de McLean dentro del software IBER, que permite modelar de manera precisa la sedimentación de partículas en suspensión en flujos abiertos. Se consideró un diámetro de sedimento en suspensión de 0,0003 m (0.3 mm) de acuerdo con la curva granulométrica de la Figura 10, representativo de los sedimentos finos presentes en el río. Asimismo, la densidad específica y la porosidad de los sedimentos se definieron de acuerdo con los valores típicos reportados para los sedimentos fluviales andinos, garantizando que el modelo reproduzca fielmente la interacción entre el flujo y las partículas, así como los procesos de transporte, decantación y acumulación dentro del desarenador, como evidencia en la Figura 17. Esta parametrización permite evaluar con detalle la eficiencia de captura de sedimentos y el comportamiento hidráulico bajo las condiciones de diseño del sistema.

Figura 17

Selección de parámetros de resultados de transporte de sedimentos en el modelo

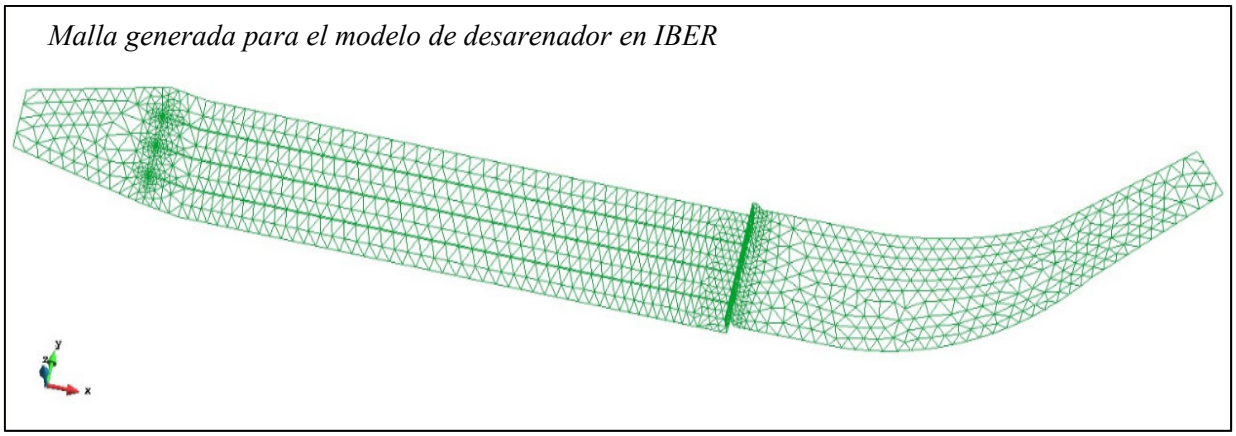


A partir de la geometría del desarenador, se generó en IBER una malla computacional no estructurada, la cual constituye la base para la simulación hidráulica y de transporte de sedimentos. Esta malla se construye a partir de superficies discretas de aproximadamente 4 m de longitud, permitiendo representar

con detalle tanto el fondo como las paredes del desarenador. Al ser no estructurada, la malla se adapta a la forma real del canal, facilitando la resolución de flujos complejos, curvaturas y cambios en la sección transversal, tal como se puede apreciar en la Figura 18. Cada celda de la malla constituye un elemento sobre el cual el software calcula de manera precisa la velocidad del flujo, la dirección de este y la distribución de sedimentos en suspensión, asegurando que la simulación refleje fielmente el comportamiento hidráulico y la eficiencia de captura de sedimentos dentro de toda la estructura.

Figura 18

Malla generada para el modelo de desarenador en IBER



Finalmente se ejecutó la simulación del software IBER como se evidencia en la Figura 19. Se dejo “correr” el programa hasta que cumpla los parámetros de tiempo establecidos. Si bien es posible visualizar resultados parciales antes de que termine el proceso de simulación, es preferible esperar hasta que esta termine para que le flujo alcance estabilidad. Una vez finalizado el proceso como se aprecia en la Figura 20, se ingresa al apartado “postproceso” para visualizar los resultados obtenidos de la simulación.

Figura 19

Inicio de proceso de simulación en IBER

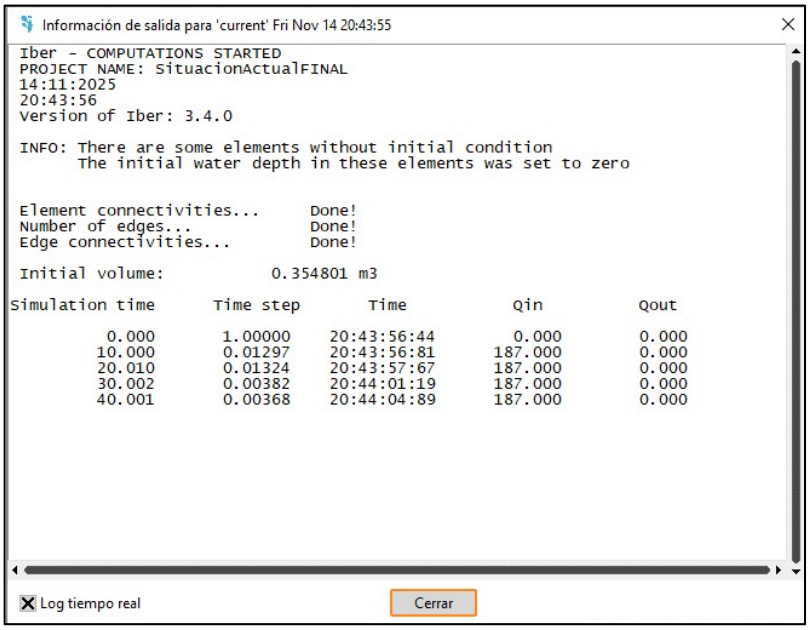
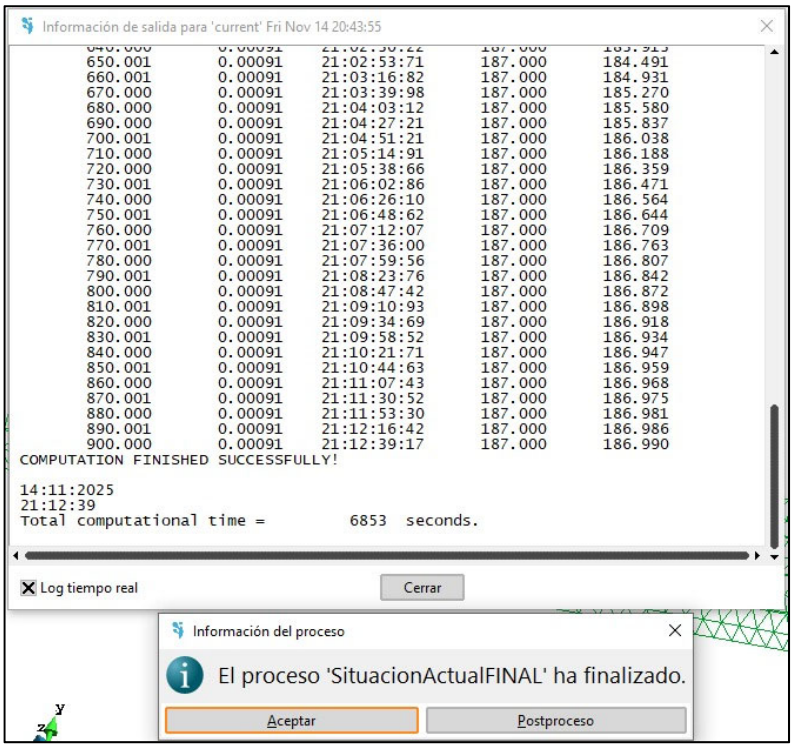


Figura 20

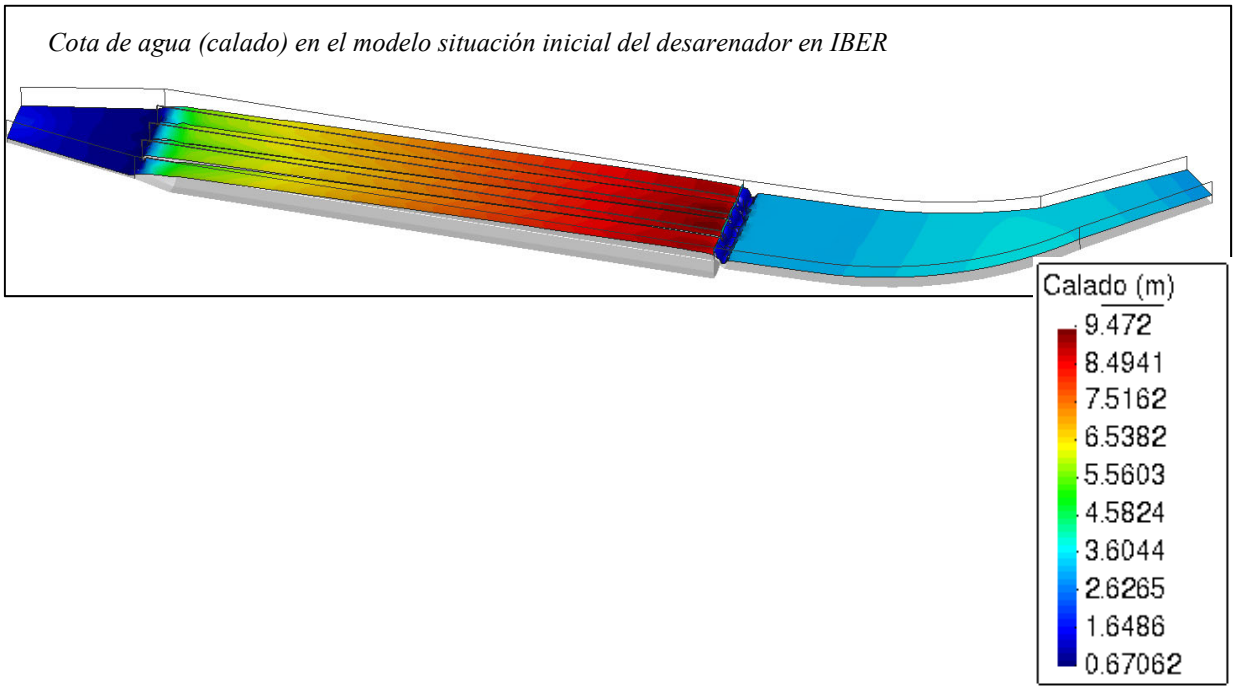
Termino de proceso de simulación en IBER



Al finalizar la simulación en IBER, se generan gráficas de distribución de áreas coloreadas suaves. Es así como se pueden resultados hidráulicos como el tirante (calado), velocidad y concentración de sedimentos. En la Figura 21 se puede apreciar como cambia el tirante de agua a lo largo del desarenador.

Figura 21

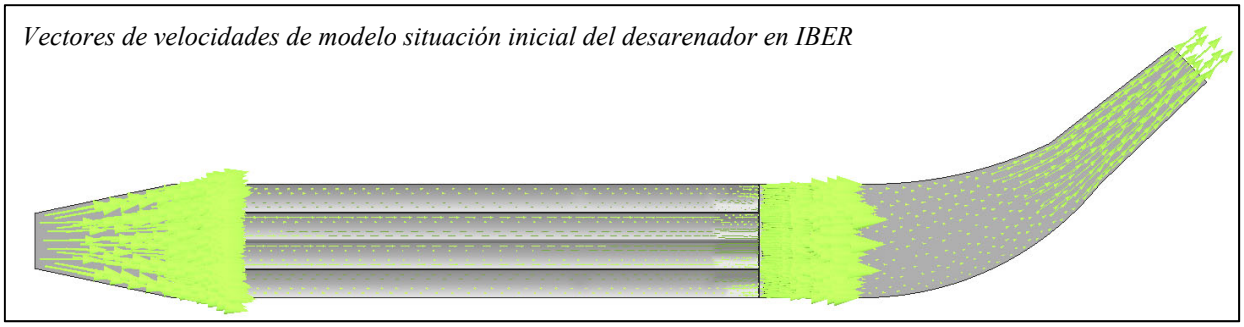
Cota de agua (calado) en el modelo situación inicial del desarenador en IBER



Los vectores de velocidad, como se muestra en la Figura 22, obtenidos tras la simulación, donde se aprecia con claridad la distribución del flujo dentro del desarenador. Según lo esperado, se observan zonas de mayor turbulencia al ingresar a las naves, producto de la transición del flujo hacia un entorno más amplio; asimismo, se evidencia un incremento en la turbulencia inmediatamente después del vertedero, asociado al cambio de régimen del flujo; y finalmente, se identifican patrones turbulentos en la zona de salida, donde el flujo vuelve a acelerarse antes de abandonar la estructura. Esta representación vectorial permite comprender mejor las dinámicas internas del flujo y sus implicancias en la eficiencia hidráulica y de sedimentación del sistema.

Figura 22

Vectores de velocidades en el modelo situación inicial del desarenador en IBER



Así se pueden ver los parámetros de velocidades en m/s y de concentración de sedimentos en el flujo de agua en g/L promedios a lo largo del desarenador, representadas en las Figura 23 y Figura 24 respectivamente. Estas representaciones permiten visualizar de manera clara cómo se comporta el flujo dentro de la estructura y cómo se dispersan y sedimentan las partículas en suspensión, facilitando el análisis de la eficiencia hidráulica y sedimentológica del desarenador bajo las condiciones de diseño.

Figura 23

Velocidad de flujo de modelo situación inicial del desarenador en IBER

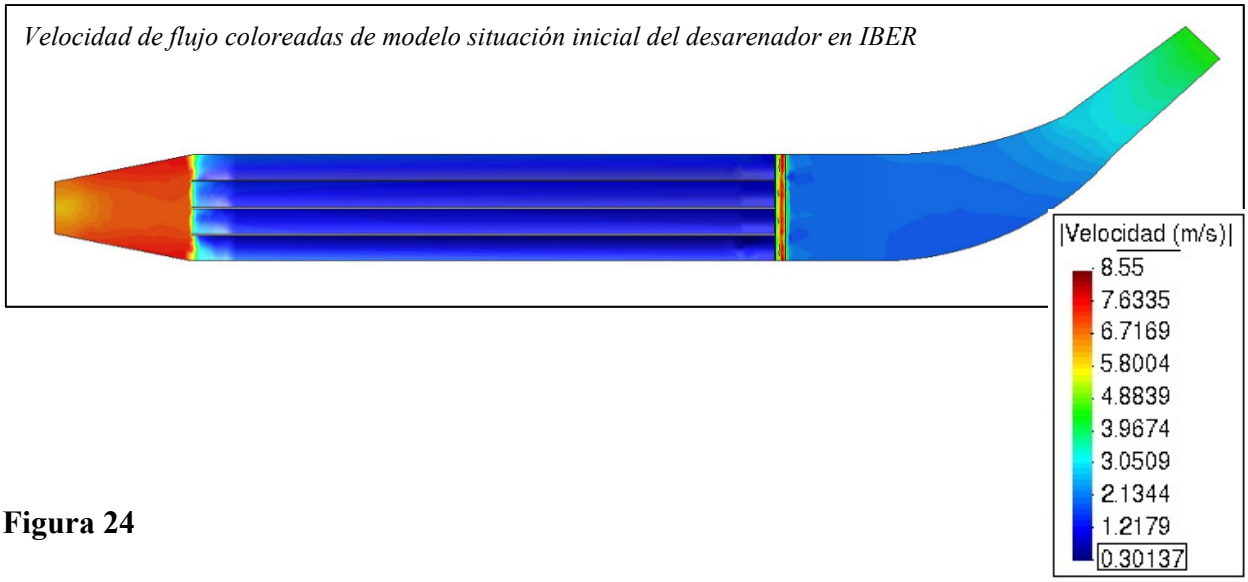
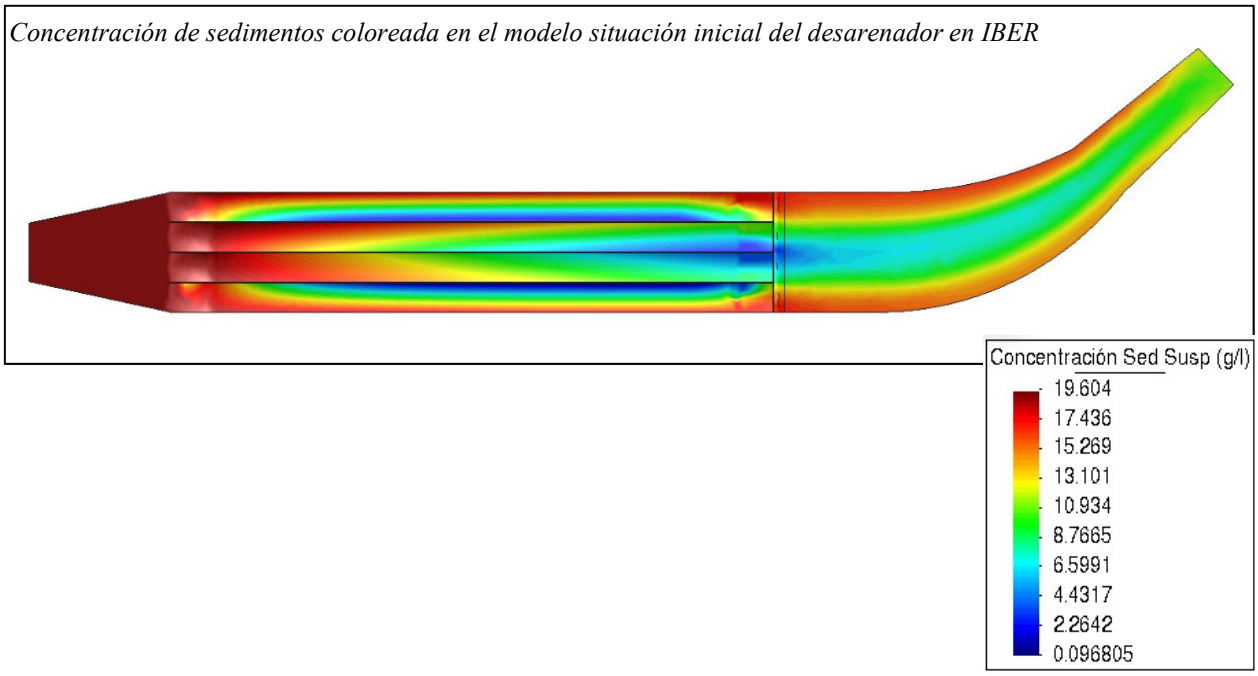


Figura 24

Concentración de sedimentos en el modelo situación inicial del desarenador en IBER

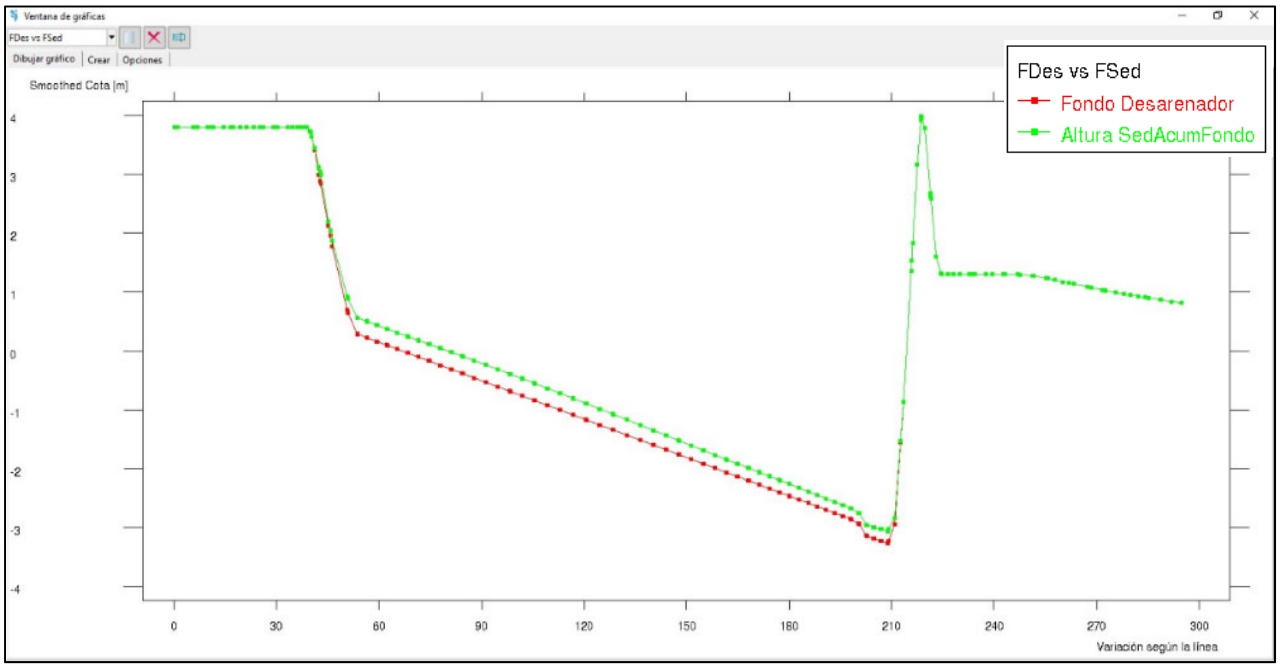


De estas, se obtuvo una velocidad mínima en el desarenador de 0.301 m/s y una concentración de sedimentos mínima de 0.097 g/L.

Además, se generó una gráfica de elevación del fondo del desarenador y la altura que alcanzo el sedimento acumulado a lo largo del desarenador, Figura 25, para evaluar la acumulación de sedimentos en el fondo. Estas representaciones permiten identificar las zonas donde se deposita mayor cantidad de material, facilitando el análisis de la eficiencia de captura de sedimentos y la identificación de posibles áreas críticas que podrían requerir mantenimiento o ajustes en el diseño hidráulico.

Figura 25

Grafica fondo desarenador vs Altura de sedimento acumulado en el fondo

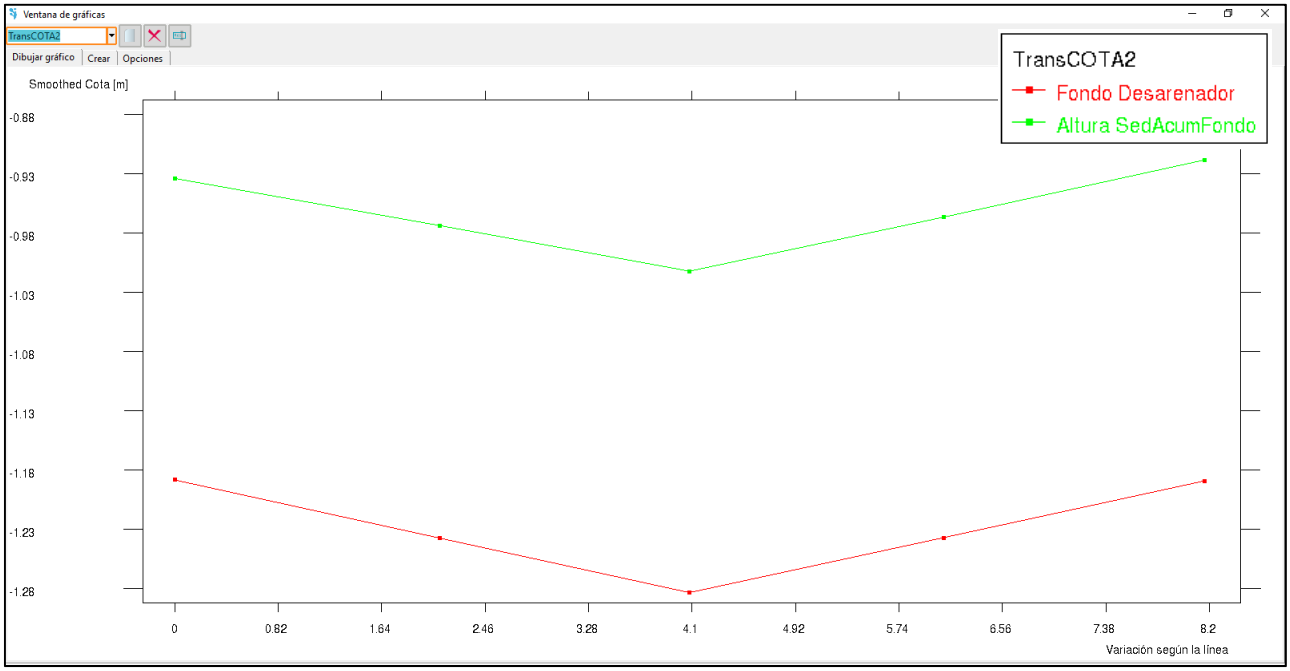


Para la evaluación de la situación inicial del desarenador, se analizó el perfil longitudinal de una de las naves, obteniéndose una altura promedio de sedimentos acumulados de 0.232 m.

Adicionalmente, se realizaron tres cortes transversales en puntos representativos a lo largo de la nave, ubicados en x = 30 m (zona de entrada), x = 85 (tramo intermedio) y x = 160 m (sector final), con una separación uniforme de 65 m entre ellos. A partir de estas secciones se generaron las vistas transversales correspondientes y se determinaron las áreas de sedimento depositado, como se muestra en la Figura 26, obteniéndose valores de 2.245 m², 2.178 m² y 1.459 m², respectivamente. Con estas áreas se procedió a interpolar el volumen acumulado en la nave, obteniendo un valor de 261.96 m³. Finalmente, considerando que el desarenador cuenta con cuatro naves idénticas, se estimó un volumen total de sedimentos de 1 047.83 m³.

Figura 26

Fondo de nave y altura sedimento acumulado en una nave en x=85 m



Así se elaboró la Tabla 3, donde se hace un resumen de los resultados relacionados a los indicadores de la simulación del desarenador en IBER de la situación inicial del desarenador.

Tabla 3

Resumen de resultados de la simulación de la situación inicial del desarenador en IBER

Indicadores		
V min (m/s)	C min (g/L)	Vol Sed Acum (m^3)
0.301	0.097	1047.83

3.3 Propuestas de Mejora

Para el desarrollo de las propuestas de mejora, se empleará el mismo procedimiento de modelación utilizado en la evaluación de la situación inicial, introduciendo únicamente las modificaciones geométricas correspondientes a cada alternativa con el propósito de incrementar la eficiencia en la captura de sedimentos en el fondo del desarenador. Dado que la metodología general no experimenta variaciones significativas, no se profundizará nuevamente en su descripción del software IBER; en su lugar, se presentarán de manera directa los resultados obtenidos para cada propuesta, y finalmente se presentará un análisis comparativo respecto al escenario base.

3.3.1 Propuesta 1. Modificación de la pendiente

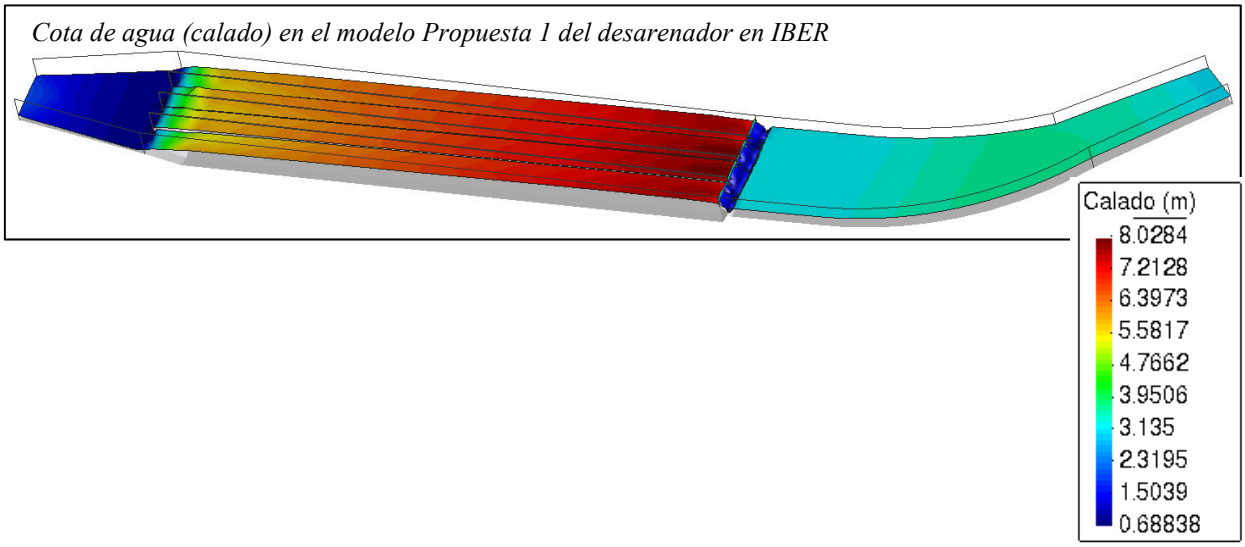
En la Propuesta 1 se modificó la pendiente longitudinal del desarenador con el objetivo de reducir la velocidad del flujo y, con ello, favorecer la deposición de sedimentos en el fondo. Para lograr este efecto, las coordenadas del punto de entrada fueron disminuidas en 1.5 m respecto a la situación inicial, obteniéndose una pendiente suavizada del 1.17 %. Esta configuración busca generar un flujo más

controlado y con menor energía, promoviendo así una mayor eficiencia en la captura de sedimentos a lo largo de la estructura.

En la Figura 27 se muestra la variación del tirante a lo largo del desarenador, evidenciando cómo el flujo experimenta cambios progresivos conforme avanza desde la entrada hasta la salida del sistema. Esta representación permite identificar zonas de incremento y estabilización del nivel de agua, asociadas a la transición de regímenes y a la disipación de energía dentro de la estructura. La distribución del tirante es un indicador clave para evaluar el desempeño hidráulico del desarenador, ya que condiciona tanto la velocidad del flujo como la capacidad de sedimentación a lo largo de todo su recorrido.

Figura 27

Cota de agua (calado) en el modelo Propuesta 1 del desarenador en IBER



Luego de la simulación de la propuesta 1 se obtuvo una velocidad mínima en el desarenador de 0.281 m/s, así como una concentración de sedimentos mínima de 0.088 g/L en el flujo, evidenciadas en las Figura 28 y Figura 29 respectivamente.

Figura 28

Velocidad de flujo en el modelo Propuesta 1 del desarenador en IBER

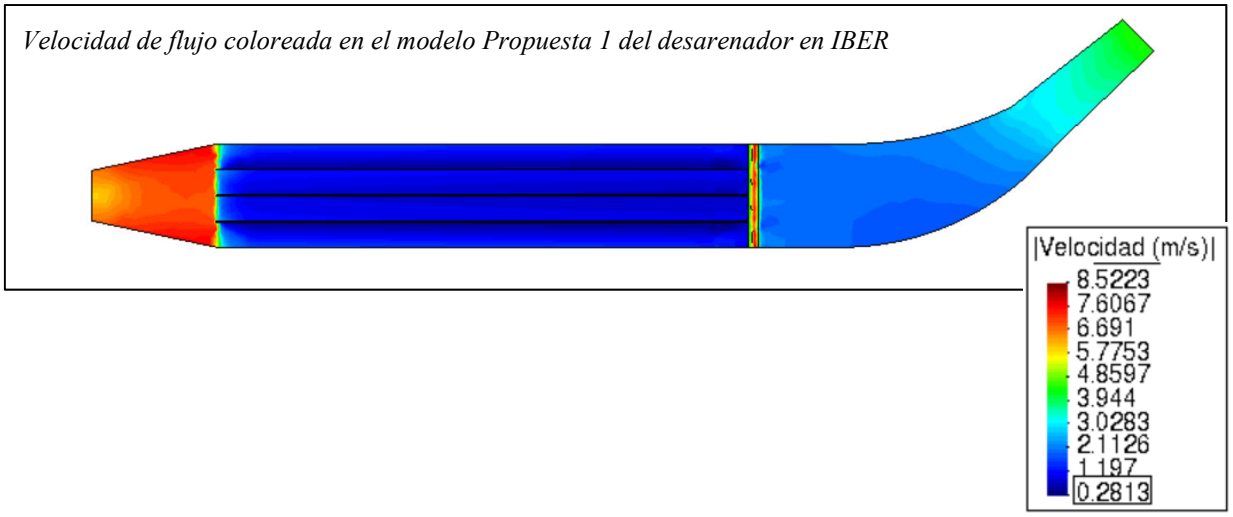
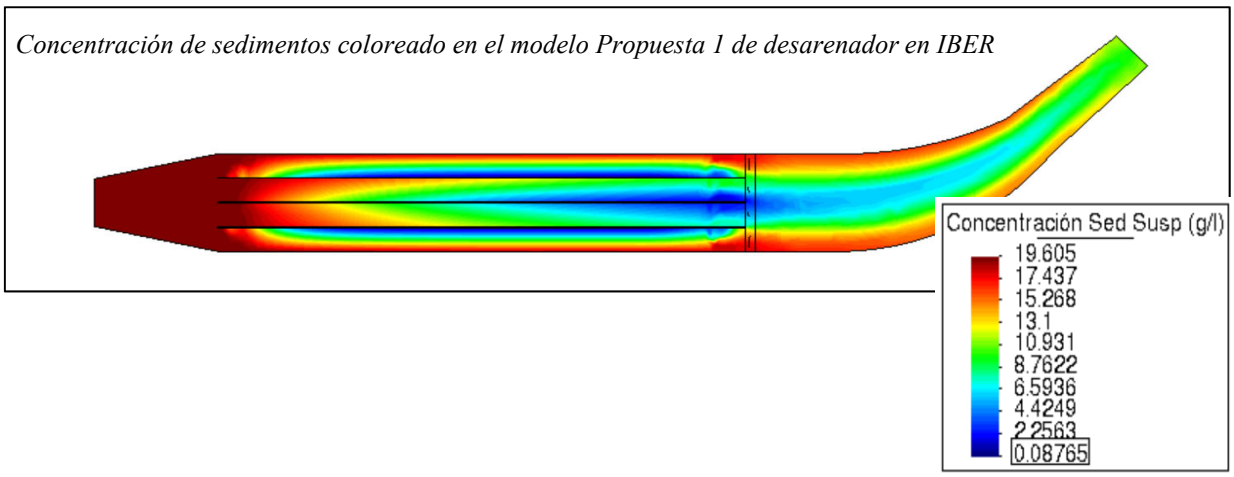


Figura 29

Concentración de sedimentos en el modelo Propuesta 1 de desarenador en IBER



Los resultados obtenidos para la Propuesta 1 muestran que, al igual que en la situación inicial, se realizaron tres cortes transversales en las mismas posiciones a lo largo de la nave, permitiendo evaluar la acumulación de sedimentos bajo la nueva configuración geométrica. Se determinó una altura promedio de sedimento depositado de 0.241 m, alcanzándose un valor máximo de 0.49 m. A partir de las

secciones generadas, se calcularon las áreas correspondientes de sedimento acumulado, obteniéndose valores de 3.346 m², 1.678 m² y 1.415 m². Mediante interpolación de estas áreas se estimó un volumen acumulado de 255.65 m³ por nave. Finalmente, considerando las cuatro naves del desarenador, el volumen total asciende a 1 022.60 m³.

Entonces, se obtiene la Tabla 4, en el que se hace un resumen de resultados.

Tabla 4

Resumen de resultados de la simulación de la Propuesta 1 del desarenador en IBER

Indicadores		
V min (m/s)	C min (g/L)	Vol Sed Acum (m^3)
0.281	0.088	1052.60

3.3.2 Propuesta 2. Modificación del ancho de las naves.

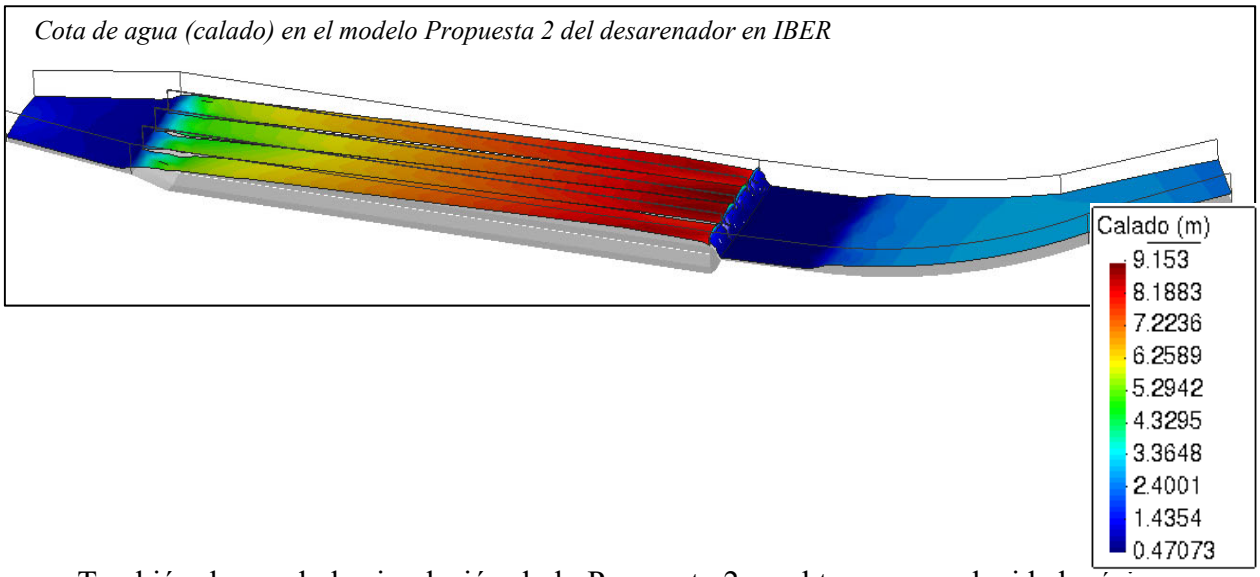
En la Propuesta 2 se incrementó el ancho de cada nave, pasando de 8.0 m a 9.5 m, con el propósito de ampliar el área de la sección transversal y, en consecuencia, reducir la velocidad del flujo dentro del desarenador. Esta disminución en la velocidad permite que las partículas sedimentarias dispongan de un mayor tiempo de residencia, favoreciendo su caída y retención en el fondo. La modificación busca, por tanto, mejorar la eficiencia del proceso de sedimentación mediante una geometría que promueva condiciones hidráulicas más favorables para la deposición.

En la Figura 30 se observa que, en esta propuesta en particular, se desarrolla un resalto hidráulico de gran longitud inmediatamente después del vertedero. Este fenómeno se genera por la transición brusca del flujo supercrítico que desciende por el vertedero hacia un régimen subcrítico hacia la salida del desarenador, lo cual provoca un incremento progresivo del tirante y una zona extendida de disipación de energía. La presencia de este resalto alargado es un indicador relevante del

comportamiento hidráulico interno, ya que influye tanto en la distribución de velocidades como en la eficiencia de sedimentación dentro del sistema.

Figura 30

Cota de agua (calado) en el modelo Propuesta 2 del desarenador en IBER



También, luego de la simulación de la Propuesta 2 se obtuvo una velocidad mínima del desarenador de 0.25 m/s y una concentración de sedimentos mínima de 0.064 g/L en el fluido según se evidencia en la Figura 31 y Figura 32 respectivamente.

Figura 31

Velocidad de flujo en el modelo Propuesta 2 del desarenador en IBER

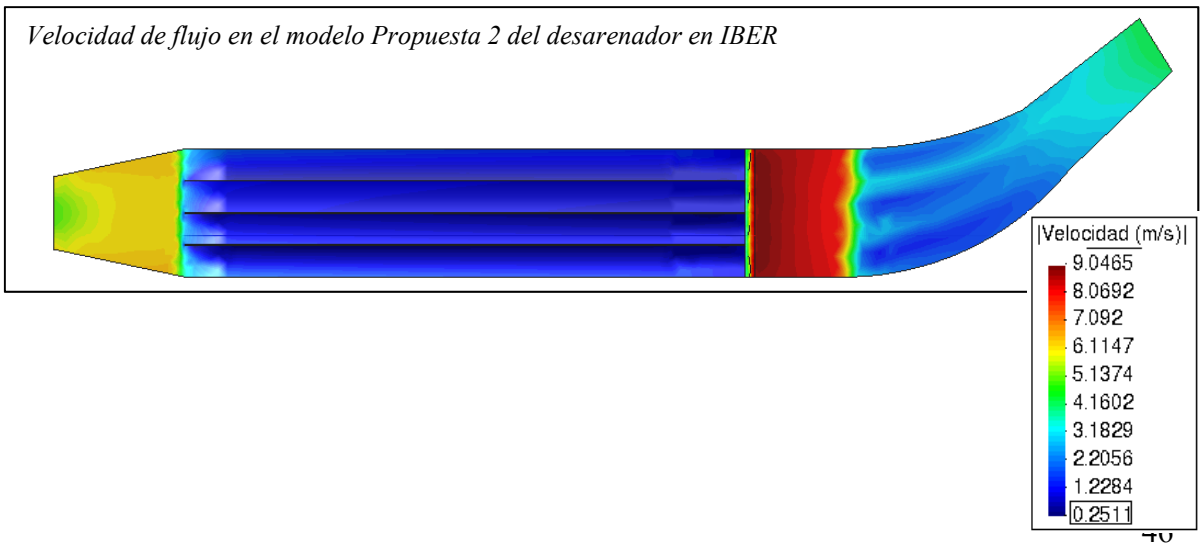
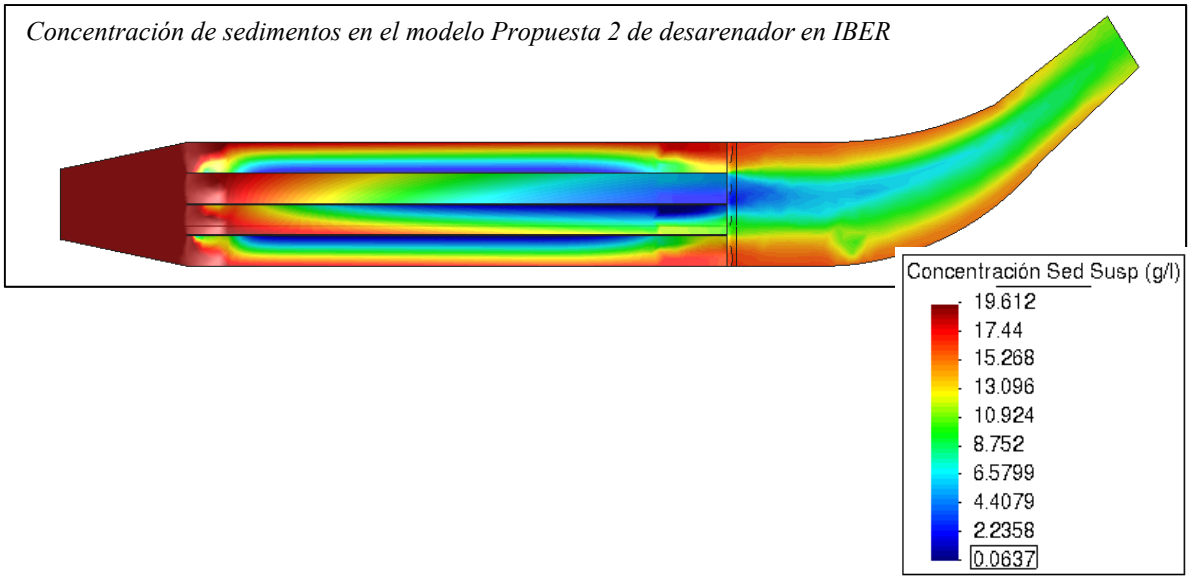


Figura 32

Concentración de sedimentos en el modelo Propuesta 2 de desarenador en IBER



Los resultados obtenidos para la Propuesta 2 evidencian que la ampliación del ancho de las naves genera una redistribución del depósito de sedimentos a lo largo de la estructura. A partir del corte de elevación, se determinó una altura promedio de sedimento acumulado de 0.192 m, alcanzándose un valor máximo de 0.255 m. Mientras que para los tres cortes transversales evaluados las áreas de sedimento correspondientes a cada sección fueron de 2.88 m², 2.01 m² y 1.31 m². Mediante la interpolación de estas áreas se estimó un volumen acumulado de 267.19 m³ por nave. Finalmente, considerando las cuatro naves que conforman el desarenador, el volumen total de sedimentos para esta propuesta asciende a 1 068.76 m³.

La Tabla 5 es un resumen de los resultados que se obtiene:

Tabla 5

Resumen de resultados de la simulación de la Propuesta 2 del desarenador en IBER

Indicadores

V min (m/s)	C min (g/L)	Vol Sed Acum (m^3)
0.25	0.064	1068.76

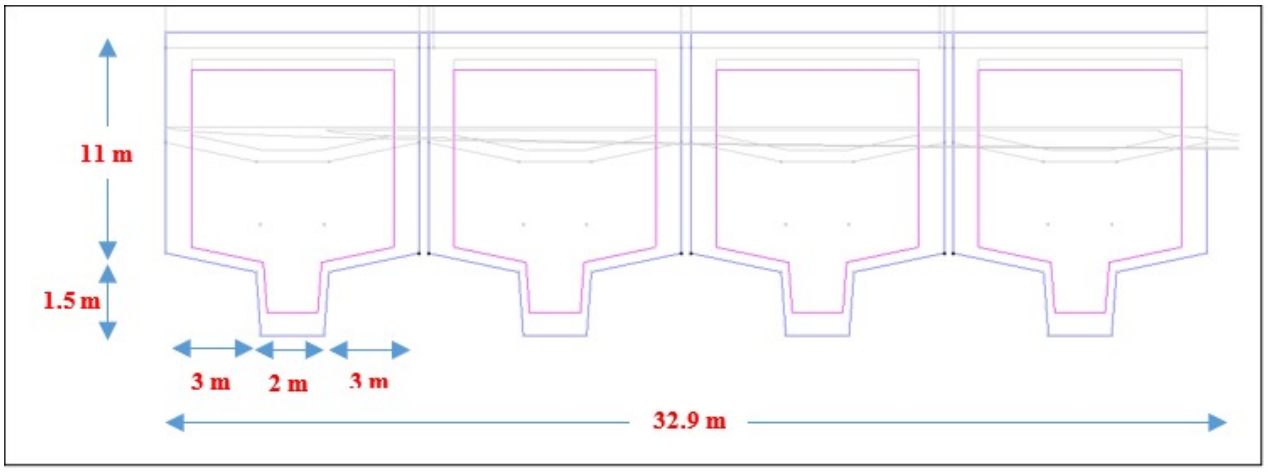
3.3.3 Propuesta 3. Inclusión de un subcanal al fondo del desarenador

En la Propuesta 3 se plantea la incorporación de un subcanal de forma trapezoidal en el fondo del desarenador, con el objetivo de aumentar el área útil de la sección transversal y, de esta manera, reducir la velocidad del flujo en las naves.

Esta modificación busca mejorar las condiciones hidráulicas, proporcionando a las partículas sedimentarias un mayor tiempo de residencia, lo que favorece su caída y retención en el fondo, incrementando así la eficiencia de captura de sedimentos en la estructura. Estos subcanales tendrán un ancho de fondo de 2 metros por 1.5 metros de profundidad adicional. En la Figura 33 se representa la sección transversal de las naves del desarenador para la Propuesta 3.

Figura 33

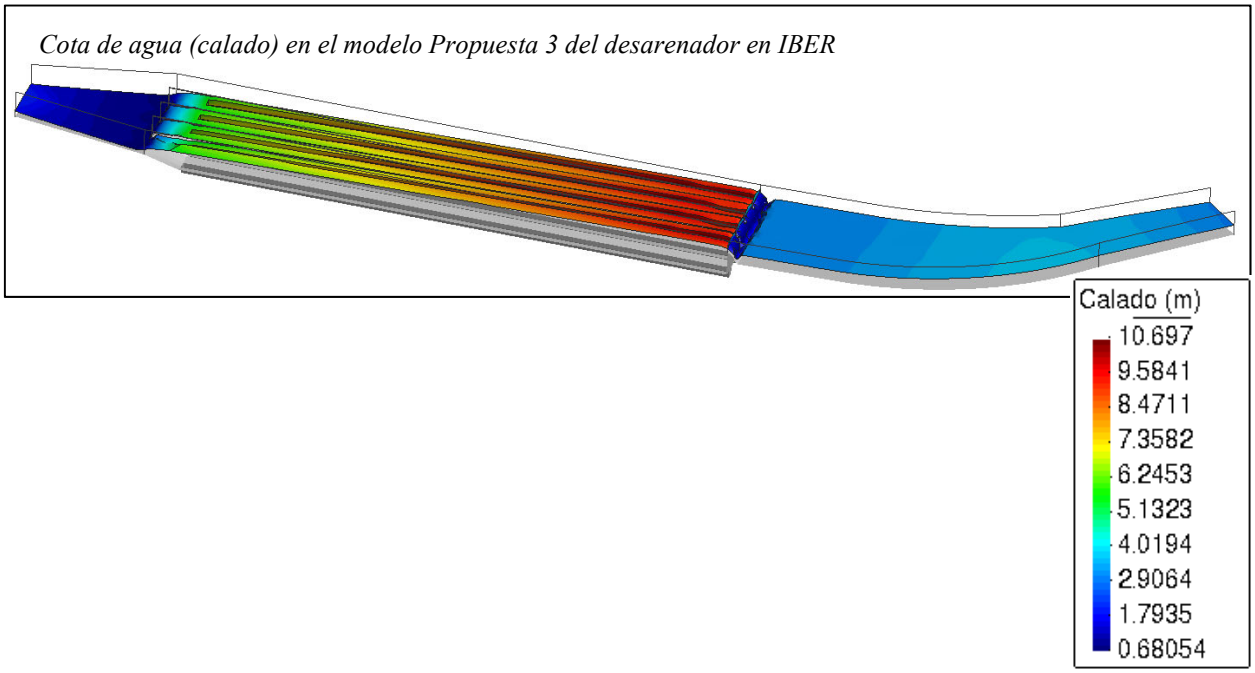
Vista transversal del desarenador para la Propuesta 3



Luego de correr la simulación de la Propuesta 3, en la Figura 34 se muestra la variación del tirante de agua a lo largo de la estructura.

Figura 34

Cota de agua (calado) en el modelo Propuesta 3 del desarenador en IBER



Y analizando los parámetros de velocidad y concentración de sedimentos, se obtuvieron resultados de velocidades mínimas de 0.22 m/s y una concentración de sedimentos mínima de 0.051 g/L en el fluido como se puede visualizar en la Figura 35 y Figura 36 respectivamente.

Figura 35

Velocidad de flujo en el modelo Propuesta 3 del desarenador en IBER

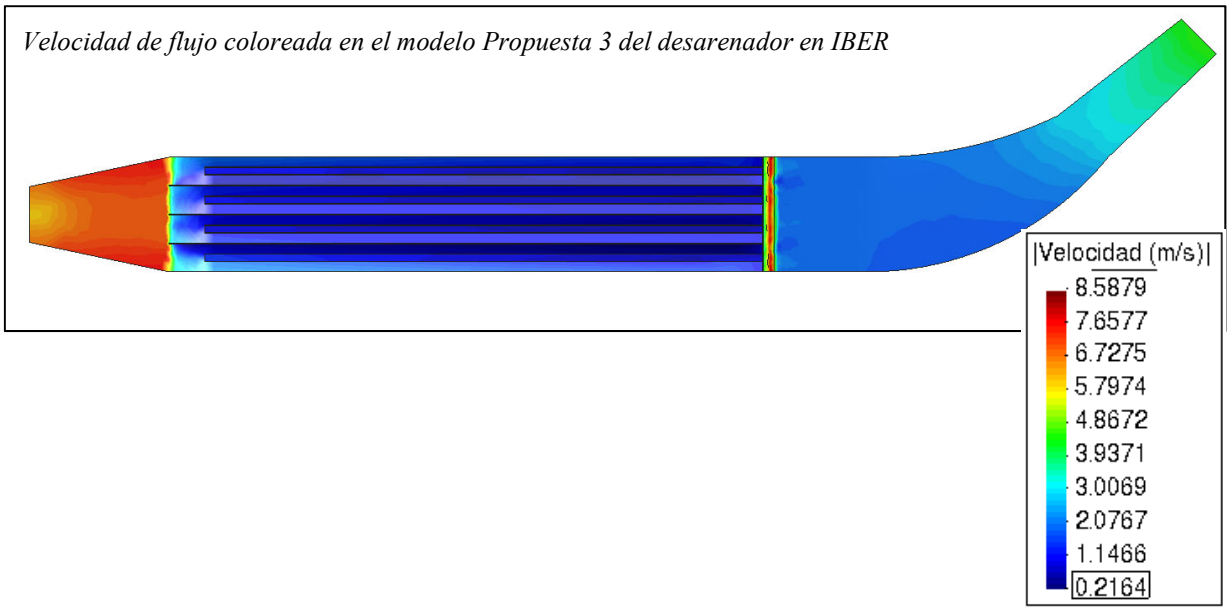
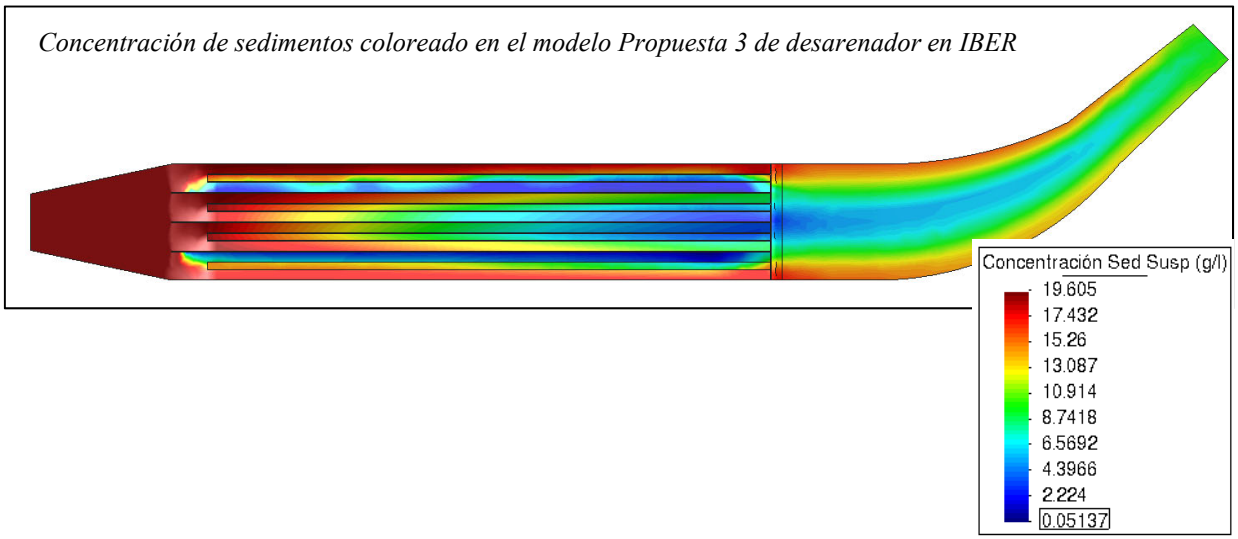


Figura 36

Concentración de sedimentos en el modelo Propuesta 3 de desarenador en IBER



Los resultados de la Propuesta 3 muestran que la incorporación del subcanal genera una redistribución notable en los patrones de sedimentación. A partir de los tres cortes transversales analizados, se obtuvo una altura promedio de sedimentos de 0.116 m, alcanzando un valor máximo de 0.312 m. Las áreas de sedimento acumulado en las secciones evaluadas fueron de 3.964 m², 2.502 m² y 1.972 m², respectivamente. Mediante la interpolación de estas áreas se estimó un volumen de 355.60 m³ de sedimentos acumulados en el fondo de una nave. Finalmente,

considerando las cuatro naves que conforman el desarenador, el volumen total de sedimentos para esta propuesta asciende a 1 422.40 m³.

Se obtuvieron los siguientes resultados resumido en la Tabla 6.

Tabla 6

Resumen de resultados de la simulación de la Propuesta 3 del desarenador en IBER

Indicadores		
V min (m/s)	C min (g/L)	Vol Sed Acum (m^3)
0.21	0.051	1422.4

3.4 Validación del Proyecto

La validación del modelo desarrollado en el software IBER se llevó a cabo mediante la verificación de que los resultados hidráulicos obtenidos se encuentran dentro de los rangos de operación esperados para un desarenador de las características evaluadas. En este sentido, las velocidades del flujo simuladas en las naves presentaron valores comprendidos entre 0.2 y 0.6 m/s, intervalo que coincide con los criterios técnicos recomendados para favorecer la sedimentación de partículas (Autoridad Nacional del Agua (ANA), 2010) sin inducir fenómenos de resuspensión. La consistencia entre estos valores y los parámetros de diseño establecidos confirma que la representación numérica del flujo es adecuada y que el modelo reproduce de manera coherente el comportamiento hidráulico de la estructura.

Asimismo, los resultados de concentración de sedimentos mostraron una disminución progresiva a lo largo del recorrido en las naves, evidenciando que el desarenador está cumpliendo su función de retener parte del material sólido transportado. La reducción de sedimentos en suspensión hacia la zona de salida coincide con el proceso físico esperado, lo que refuerza la confiabilidad del modelo para describir el desempeño real de la estructura. Esta tendencia, capturada por el

cálculo numérico, constituye un indicador directo de que las condiciones simuladas representan de manera apropiada el comportamiento sedimentológico del sistema.

Finalmente, la distribución simulada de los depósitos en el fondo del desarenador muestra una correspondencia con la morfología de sedimentación especialmente en las zonas donde la velocidad del flujo disminuye y se favorece el asentamiento de partículas. Esta coincidencia entre el patrón de acumulación modelado y el registrado durante las operaciones de limpieza proporciona un respaldo adicional a la validez del modelo numérico. En conjunto, estos elementos permiten concluir que la simulación en IBER reproduce de manera satisfactoria el comportamiento hidráulico y sedimentológico del desarenador, constituyendo una herramienta confiable para el análisis y evaluación de propuestas de mejora.

3.5 Interpretación de los Resultados

En la fase de interpretación de resultados, se realiza una comparación directa entre los valores obtenidos en cada una de las propuestas de mejora y los correspondientes a la situación inicial del desarenador. Este análisis comparativo permite identificar los cambios generados por cada modificación geométrica y evaluar su impacto en la eficiencia de captura de sedimentos. A partir de esta contrastación, se determina cuál de las alternativas presenta un mejor desempeño hidráulico y sedimentológico, permitiendo seleccionar la opción más eficiente para optimizar el funcionamiento del desarenador.

Se obtuvo la siguiente Tabla 7 un resumen general de los resultados de todas las simulaciones realizadas en IBER.

Tabla 7

Resumen de resultados de las simulaciones del desarenador en IBER

Caso	Vel min (m/s)	C min (g/L)	Vol Sed Acum (m^3)
Inicial	0.301	0.097	1047.83

Propuesta 1	0.281	0.088	1052.60
Propuesta 2	0.251	0.064	1068.77
Propuesta 3	0.216	0.051	1422.40

La comparación entre la situación inicial y las tres propuestas de mejora permite evaluar el efecto de cada modificación geométrica sobre la eficiencia del desarenador. En la situación inicial, el volumen total de sedimento acumulado en las cuatro naves es de 1 047.83 m³, con una velocidad promedio de 0.301 m/s y una concentración mínima de 0.097 g/L.

En la Propuesta 1, la suavización de la pendiente reduce la velocidad a 0.281 m/s (−6.6 %) y disminuye la concentración mínima a 0.088 g/L (−9.3 %), resultando en un volumen de sedimento acumulado de 1 052.60 m³ (+0.5 % respecto al caso inicial), lo que indica una ligera mejora en la deposición, pero sin un aumento significativo del volumen.

La Propuesta 2, que amplía el ancho de las naves de 8.0 a 9.5 m, reduce la velocidad a 0.251 m/s (−16.6 %) y la concentración mínima a 0.064 g/L (−34 %), logrando un volumen total de 1 068.77 m³ (+2 %), lo que refleja un aumento moderado de la deposición gracias a la mayor sección transversal.

Finalmente, la Propuesta 3, que incorpora un subcanal en el fondo del desarenador, genera la mayor reducción de velocidad a 0.216 m/s (−28.3 %) y la concentración mínima más baja de 0.051 g/L (−47.4 %), permitiendo un volumen total de sedimentos de 1 422.40 m³, lo que representa un incremento significativo de +35.7 % respecto al caso inicial.

Considerando que el objetivo principal es maximizar la acumulación de sedimentos en el fondo, la Propuesta 3 se identifica como la alternativa más eficiente, ya que

proporciona el mayor volumen retenido y condiciones hidráulicas que favorecen la sedimentación, optimizando el funcionamiento del desarenador.

Del análisis comparativo de los resultados obtenidos en las simulaciones hidráulicas y morfodinámicas, se determinó que la Propuesta 3 representa la alternativa más eficiente frente a las demás configuraciones evaluadas. Esta opción presentó una menor distribución de velocidades dentro del desarenador, favoreciendo el aumento de la eficiencia de sedimentación, lo que se traduce en una mayor retención de partículas sólidas y un flujo más uniforme hacia la salida. Asimismo, la propuesta evidenció un comportamiento hidráulico más estable, optimizando el aprovechamiento del volumen útil de la estructura. En conjunto, estos resultados demuestran que la Propuesta 3 ofrece un mejor desempeño hidráulico y sedimentológico, consolidándose como la alternativa más adecuada para el rediseño del desarenador.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El estudio demuestra que la modificación de dimensiones y geometría de un desarenador tipo longitudinal puede mejorar la captura de sedimentos y el comportamiento hidráulico. Este trabajo se centra en un modelo general, basado en datos de referencia limitados, por lo que las conclusiones son aplicables a desarenadores similares y no a un caso específico.

- El modelo desarrollado en IBER para el desarenador reproduce de manera adecuada el comportamiento hidráulico y sedimentológico según la ANA. Las velocidades simuladas se encuentran dentro del rango esperado (0.2–0.6 m/s) y se observa una disminución progresiva de la concentración de sedimentos a lo largo de las naves, lo que confirma que la estructura retiene efectivamente los sólidos transportados.

- La simulación de la situación inicial permitió cuantificar la acumulación de sedimentos en el fondo del desarenador, obteniéndose un volumen total de 1 047.83 m^3 para las cuatro naves. Este escenario sirve como referencia para comparar las propuestas de mejora.

- Sobre los resultados:

    - Propuesta 1 (pendiente suavizada): reduce ligeramente la velocidad y el volumen acumulado (1 022.60 m^3), mostrando una disminución moderada respecto al caso inicial.

    - Propuesta 2 (ancho incrementado de las naves): disminuye la velocidad más significativamente y genera un aumento leve del volumen acumulado (1 068.77 m^3).

    - Propuesta 3 (subcanal en el fondo): produce la mayor reducción de velocidad (0.216 m/s) y concentración de sedimentos en suspensión, incrementando significativamente el volumen acumulado hasta 1 422.40 m^3 (+35.7 % respecto al caso inicial).

- Considerando que el objetivo es maximizar la sedimentación y aumentar la retención de sedimentos en el fondo del desarenador, la Propuesta 3 se identifica como la opción más eficiente. La incorporación del subcanal genera condiciones

hidráulicas que favorecen la deposición, incrementando notablemente el volumen de sedimentos retenidos.

- El uso del software IBER permitió generar mapas detallados de velocidad, concentración y morfología del sedimento, facilitando la evaluación de distintas alternativas sin intervención física. La modelación CFD demostró ser una herramienta eficaz para analizar el comportamiento complejo del flujo y transporte de sedimentos, optimizando el diseño y la toma de decisiones operativas.
- Los resultados obtenidos respaldan la viabilidad de modificar la geometría del desarenador para mejorar su eficiencia sedimentológica. Se sugiere considerar la Propuesta 3 como alternativa prioritaria, evaluando adicionalmente aspectos operativos y de mantenimiento para garantizar un funcionamiento óptimo de la estructura a largo plazo.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda aplicar los lineamientos de optimización propuestos en el estudio, ajustando dimensiones y geometría de desarenadores similares, para mejorar la eficiencia en la captura de sedimentos y el comportamiento hidráulico. Para proyectos específicos, se sugiere complementar el análisis con datos de campo y mediciones locales para adaptar el diseño a las condiciones reales de operación.
- Dado que la Propuesta 3 mostró la mayor eficiencia hidráulica y la mayor retención de sedimentos en el fondo del desarenador, se recomienda considerarla como la alternativa prioritaria para optimizar la captación de sedimentos y aumentar el volumen acumulado en las naves.
- La mayor acumulación de sedimentos generada por la Propuesta 3 puede requerir un programa de limpieza y mantenimiento más frecuente. Se recomienda establecer un plan de monitoreo regular para evitar saturación y asegurar el funcionamiento óptimo de la estructura.
- Es recomendable ajustar las condiciones de operación (por ejemplo, control de compuertas y caudales) para mantener velocidades dentro del rango hidráulico

adecuado, garantizando que se aprovechen las zonas de baja velocidad generadas por la nueva geometría para maximizar la sedimentación.

- Se recomienda utilizar el software IBER para futuras evaluaciones de modificaciones geométricas o cambios operativos, ya que permite predecir de manera confiable el comportamiento hidráulico y sedimentológico sin necesidad de pruebas físicas costosas.
- Para mejorar aún más la eficiencia del desarenador, se sugiere explorar posibles combinaciones de las propuestas (por ejemplo, subcanal con ligera modificación de ancho o pendiente) mediante simulaciones adicionales en IBER, priorizando la maximización de sedimentación y la reducción de velocidad en el fondo.

5 REFERENCIAS

Alva, R. (2014). *electroperu*. Obtenido de https://www.electroperu.com.pe/ElectroWebPublica/PaginaExterna.aspx?id=10&modo=operaciones&idioma=ESPANOL

ANA, A. N. (2012). *Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca del Mantaro.* Lima, Perú. Obtenido de https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/20.500.12543/36/2/ANA0000052_2.pdf

Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2010). *Criterios de diseño de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico.* Obtenido de https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/manual-disenos-1_0_2.pdf

Bladé, E. C.-C. (2014). *IBER: Herramienta de simulación numérica del flujo en lámina libre.* Manual del usuario, Universidade da Coruña – Universitat Politècnica de Catalunya.

Castro, D., & Ostos, A. (2024). *Análisis del diseño de un desarenador tipo longitudinal para la gestión de sedimentos utilizando el software IBER.* Lima.

CELEC EP. (2023). *Obra de captación [Fotografia]*. Obtenido de CELEC EP: https://www.celec.gob.ec/cocacodo/galeria-imagen/coca-codo/

CESEL. (2011). *Estudio de Reevaluación de la Estabilidad del Deslizamiento Denominado Derrumbe N°1.*

Chanson, H. (2004). *The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction.* Elsevier.

Cheng, N.-S. (1997). *Simplified settling velocity formula for sediment particle.* Journal of Hydraulic Engineering.

Chereque, W. (1987). *Mecanica de Fluidos I.* Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.

Chow, V. (1959). *Open-Channel Hidraulics.* McGraw-Hill.

Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abierto.* (M.-H. Interamericana, Ed.) Bogotá: 2.ª ed.

ELECTROPERU. (2009). *Informe Tecnico Ocurrencia del Evento Atascamiento Ataguia Pre Toma de la Presa Tablachaca.* Obtenido de https://www.coes.org.pe/dataweb/2009/DEV/fallas/eve-845_16-1.pdf

ELECTROPERU. (2022). *Plan de contingencias Centro de producción Mantaro.* Obtenido de https://www.electroperu.com.pe/blTransparenciaEstandar/Planes%20de%20Contingencia/MP18-R2%20-%20PLAN%20CONTINGENCIAS%20CPM%20(Rev%209)%20Mar%202022.pdf

Ferguson, R. I. (2004). *A simple universal equation for grain settling velocity.* Journal of Sedimentary Research.

Guevara Cotera, K. E. (2023). *Planeamiento del proceso de purga del embalse Tablachaca en base al pronóstico de lluvia realizado para el año 2018.* Tesis de título profesional, Universidad Nacional Agraria La Molina.

IBER Team. (2019). *Manual Técnico de IBER v2.5.* Universidade da Coruña & Universidad de Zaragoza.

INGETEC. (2007). *Informe Ejecutivo del Estudio Integral del Embalse Tablachaca.*

Lavoisier, A. L. (1789). *Chez Cuchet.Tratado elemental de química [Traité élémentaire de chimie].* París.

Mc Leod, C., & Bosman, A. (2025). *Investigación numérica y de campo para mejorar el rendimiento de un desarenador existente con exclusión de sedimentos distribuidos.*

Meyer-Peter, E. &. (1948). *Formulas for bed-load transport.* Stockholm.

Mogrovejo, R. (2019). *Estimación del Caudal de Filtraciones en Macizos Fracturados Usando FEFLOW para las Galerías de Drenaje: Caso Derrumbe 5 – Huancavelica –2019.* Lima.

Novak, P. &. (2007). *Hydraulic Structures.* Taylor & Francis.

Novak, P., Moffat, A. I., & Nalluri, C. &. (2010). *Hydraulic Structures* (4th ed.). Taylor & Francis.

OSINERG. (2005). *Compendio de represas de centrales hidrahulix.*

Ponce, C., & Saavedra, M. (2024). *Optimización de la distribución del caudal en las naves de un desarenador con modelación numerica.* Universidad de Piura.

Raudkivi, A. J. (1998). *Loose Boundary Hydraulics* (4th ed.). A.A. Balkema.

Repetto, P. (1985). Obtenido de https://repositorio.pucp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f52dfd31-2fc7-479c-84fb-6d7a76372d0d/content

Sarkar, S. (22 de Mayo de 2024). *KETIV*. Obtenido de https://ketiv-com.translate.goog/blog/what-is-computational-fluid-dynamics-and-why-you-need-it/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc

Van Rijn, L. C. (1984). *Sediment transport, part II: Suspended load transport.* Journal of Hydraulic Engineering.

Vanoni, V. (1975). *Sedimentation Engineering* (Vol. 54). ASCE .