



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Estudio del transporte de sedimentos en tanques desarenadores de pequeñas centrales hidroeléctricas y recomendaciones de sistemas de remoción**

**María Paula Franco Tangarife**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil  
Manizales, Colombia

2022

# **Estudio del transporte de sedimentos en tanques desarenadores de pequeñas centrales hidroeléctricas y recomendaciones de sistemas de remoción**

**María Paula Franco Tangarife**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Magíster en Ingeniería – Recursos hidráulicos**

Director:

PhD. Philippe Chang

Codirector:

PhD. Diego Paredes Cuervo

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2022

# Declaración de obra original


Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

  
\_\_\_\_\_

Maria Paula Franco Tangarife

Fecha 01/03/2022

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales por su apoyo como institución, a los profesores del programa académico Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos: Philippe Chang, Jeannette Zambrano, Freddy Leonardo Franco y Jorge Julián Vélez Upegui, así como al grupo de trabajo del laboratorio de Hidráulica por su apoyo y soporte durante el proceso de formación académica y de desarrollo de la presente tesis.

Agradecimientos especiales al Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento de la Universidad Tecnológica de Pereira y a la Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC.

## Resumen

### **Estudio del transporte de sedimentos en tanques desarenadores de pequeñas centrales hidroeléctricas y recomendaciones de sistemas de remoción**

El presente trabajo analiza el comportamiento hidráulico y del transporte de sedimentos del tanque desarenador de la Planta Sancancio de la Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC, (esta planta es catalogada según su capacidad, como una Pequeña Central Hidroeléctrica - PCH), mediante la implementación del modelo numérico 2D, Iber, versión 2.5.2. El estudio parte de la problemática del aumento progresivo en el transporte y producción de sedimentos en los ríos, los cuales al ingresar a las plantas hidroeléctricas generan un desgaste erosivo del equipo electromecánico creando la necesidad de estructuras de remoción de sedimentos más eficientes.

El estudio se realizó en dos fases: mediciones de campo y modelación numérica; en la primera fase se recopilieron datos de diferentes condiciones climáticas de un año, los cuales fueron utilizados en la segunda fase para modelar siete escenarios con simulación hidrodinámica para todos los caudales y del transporte de sedimentos para el caudal máximo. Los resultados obtenidos presentaron un buen ajuste entre los datos medidos y los modelados con un error relativo porcentual para la velocidad entre 0% y 25%, evidenciando el máximo error en las zonas de menor velocidad, no obstante, la tendencia de la velocidad en los datos modelados fue similar a la tendencia de los datos observados. El análisis de vectores de velocidad mostró zonas de recirculación y de flujo preferencial en el tanque, lo cual se evidenció en los resultados del transporte de sedimentos, puesto que la distribución de la concentración de sólidos en suspensión no fue uniforme en la zona de sedimentación y por ende, la acumulación de partículas se da en zonas específicas del tanque. Los resultados permiten concluir que con el uso del modelo, es posible definir un periodo de mantenimiento acorde con las características del flujo y de sedimentos en la entrada, lo cual puede garantizar un mejor funcionamiento del tanque para la remoción de sedimentos.

**Palabras clave:** Tanque desarenador, Modelación hidráulica, PCH, Transporte de sedimentos.

# Abstract

## **Sediment transport study in small hydropower plants settling tanks and removal systems recommendations**

The present work analyzes the hydraulic and sediment transport behavior of the settling tank of Sancancio Caldas Hydroelectric Power Plant (this plant is classified according to its capacity, as a Small Hydropower Plant - SHP), through the implementation of the 2D numerical model, Iber, version 2.5.2. The study examines specifically the hydrodynamics and efficiency of settling tanks as sediment removal structures in order to minimize erosive wear of the electromechanical equipment

The study was carried out in two phases: field measurements and numerical modeling; in the first phase, field data of the Sancancio settling tank was collected over a year in order to better understand its behavior. During the second phase of the study a model of the tank was developed and seven scenarios were examined to simulate flow hydrodynamics and sediment transport up to maximum flow. The results obtained showed a good fit between the field and modeled data with a relative percentage error for the velocity between 0% and 25%, with greater error in low flow areas, however, the velocity trend was similar in the observed and modeled data. The velocity vectors analysis showed zones of recirculation and preferential flow in the tank, which was also evidenced in the field and examining the sediment transport model. Suspended solid concentration distribution was not uniform in the settling zone of the tank and therefore, sediment accumulation occurs in specific areas of the tank. The study shows how a 2D flow model allows one to better define a tank maintenance period and protocol according to flow and sediments characteristics at the inlet, hence ensuring a more efficient sediment removal process.

**Keywords: Settling tank, Numerical model, Small Hydropower Plants, Sediment Transport.**

# Contenido

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Capítulo 1 – Proyecto investigativo .....</b>	<b>3</b>
1.1    Introducción .....	3
1.2    Planteamiento del problema.....	3
1.3    Objetivos.....	5
1.3.1    Objetivo general .....	5
1.3.2    Objetivos específicos.....	5
1.4    Alcance .....	6
1.5    Características del tanque desarenador planta Sancancio.....	6
1.5.1    Descripción .....	6
1.5.2    Localización.....	8
1.5.3    Problemática.....	9
1.6    Metodología de la investigación.....	11
1.7    Conclusión .....	12
<b>2. Capítulo 2 – Estado del arte .....</b>	<b>12</b>
2.1    Introducción .....	12
2.2    PCH – descripción y problemáticas .....	12
2.3    Alternativa para el control de sedimentos.....	15
2.4    Dinámica del transporte de sedimentos.....	19
2.5    Modelos numéricos como herramienta de estudio.....	21
2.6    Conclusión .....	30
<b>3. Capítulo 3 – Proceso experimental .....</b>	<b>31</b>
3.1    Introducción .....	31
3.2    Caracterización del tanque desarenador Sancancio.....	31
3.2.1    Geometría.....	31
3.2.2    Mediciones en campo y toma de muestras .....	33
3.2.3    Caudales históricos .....	37
3.3    Modelación hidrodinámica mediante Iber .....	38
3.3.1    Ecuaciones hidrodinámicas.....	39
3.3.2    Modelo de turbulencia.....	41
3.3.3    Modelo de transporte de sedimentos.....	43
3.4    Resolución numérica.....	46
3.5    Pre-proceso en el modelo Iber.....	46
3.5.1    Creación de la geometría y malla de cálculo.....	47

---

3.5.2	Asignación de condiciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos .....	49
3.5.3	Asignación de valores de rugosidad .....	52
3.5.4	Escenarios de simulación.....	52
3.5.5	Selección y asignación de parámetros de cálculo .....	53
3.6	Conclusión .....	54
<b>4.</b>	<b>Capítulo 4 – Resultados de modelación .....</b>	<b>55</b>
4.1	Introducción .....	55
4.2	Resultados de la modelación Hidráulica.....	55
4.3	Resultados de la dinámica de transporte de sedimentos.....	59
4.4	Análisis de resultados.....	61
4.4.1	Análisis de la Hidrodinámica del tanque .....	61
4.4.2	Análisis del transporte de sedimentos .....	66
4.4.3	Otras consideraciones.....	71
4.5	Conclusión .....	77
<b>5.</b>	<b>Capítulo 5- Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>77</b>
5.1	Conclusiones .....	77
5.2	Recomendaciones.....	80
<b>6.</b>	<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>82</b>



## Lista de figuras

Figura 1: Tanque desarenador Sancancio.....	7
Figura 2: Esquema general tanque desarenador Sancancio.....	8
Figura 3: Localización tanque desarenador Sancancio.....	9
Figura 4: Problemáticas tanque desarenador Sancancio.....	10
Figura 5: Componentes principales de una PCH.....	14
Figura 6: Componentes de un desarenador convencional.....	16
Figura 7: Esquema de mecanismos de transporte de sedimentos.....	21
Figura 8: Levantamiento topográfico – tanque desarenador Sancancio (Oct-30-18).....	32
Figura 9: Modelo 3D - tanque desarenador Sancancio.....	32
Figura 10: Geometría - tanque desarenador Sancancio.....	33
Figura 11: Localización de puntos de medición.....	34
Figura 12: Mediciones en in situ y recolección de muestras.....	34
Figura 13: Registros históricos de caudal.....	38
Figura 14: Procesamiento de geometría en Civil 3D.....	47
Figura 15: Creación de geometría en Iber mediante importación de puntos de Civil 3D.....	47
Figura 16: Generación de malla de cálculo (tamaño: 0.25).....	48
Figura 17: Definición de condición de contorno a la entrada.....	49
Figura 18: Definición de condición de contorno a la salida.....	50
Figura 19: Asignación de condiciones internas – vertederos.....	50
Figura 20: Condición de entrada de sedimentos de fondo.....	51
Figura 21: Condición inicial de sedimentos en suspensión.....	51
Figura 22: Asignación de rugosidad.....	52
Figura 23: Resultados de la hidrodinámica tanque Sancancio – Calado (m).....	56
Figura 24: Resultados de velocidad de flujo longitudinal (m/s) y error relativo porcentual.....	58
Figura 25: Resultados de concentración de sólidos suspendidos (mg/l) para diferentes pasos de tiempo.....	60
Figura 26: Resultados de erosión (m) para el tanque desarenador.....	61
Figura 27: Profundidades reales del tanque desarenador.....	61
Figura 28: Localización error relativo máximo en la velocidad del flujo.....	63
Figura 29: Comparación de velocidad medida en campo y modelada para los diferentes escenarios analizados.....	64
Figura 30: Vectores de velocidad para caudal máximo. Escenario 7 (3.46 m <sup>3</sup> /s).....	65
Figura 31: Distribución de carga de sólidos en suspensión en el tanque.....	67

---

Figura 32: Evolución de la concentración de sólidos suspendidos a la salida.....	67
Figura 33: Comparación de zonas de acumulación de sedimentos obtenidas con Iber y las observadas en campo – tanque 1. ....	69
Figura 34: Comparación de zonas de acumulación de sedimentos obtenidas con Iber y las observadas en campo – tanque 2. ....	70
Figura 35. Tamaño de partículas de diseño y removidas en función del caudal. ....	72

## Lista de tablas

Tabla 1: Clasificación de las PCH según su potencia. ....	13
Tabla 2: Clasificación de las PCH según la altura de caída. ....	13
Tabla 3: Aplicación de modelos numéricos al estudio hidrodinámico y de sedimentos en tanque de proceso. ....	27
Tabla 4: Resultados campañas in situ: caudal, concentración de sólidos y granulometría. ....	35
Tabla 5: Resultados de velocidad de flujo ( $m^3/s$ ) en el tanque desarenador para las diferentes campañas. ....	36
Tabla 6: Escenarios de simulación hidráulica. ....	53
Tabla 7: Parámetros de tiempo y generales de las simulaciones. ....	53
Tabla 8: Parámetros de cálculo módulo de sedimentos – escenario 7. ....	54
Tabla 9. Error relativo porcentual de la velocidad de flujo. ....	62



## Introducción

Los cambios en las características y el aumento progresivo de los sedimentos que son producidos en una cuenca y transportados por los ríos, ha sido una de las principales problemáticas para las Pequeñas Centrales Hidroeléctricas – PCH dado que al captar el agua sobre las fuentes hídricas superficiales, ingresan cargas de sedimentos que generan impactos negativos asociados al desgaste erosivo de los elementos electromecánicos. Como alternativa de manejo de dicha problemática, históricamente se han empleado tanques desarenadores que a través de sedimentación gravitacional, eliminan el material sólido del campo del flujo y es removido posteriormente del sistema. No obstante, se ha demostrado que el diseño de tanques desarenadores ha estado basado en hipótesis que no siempre se cumplen en la realidad y por tanto, al ser construidos, no son eficientes en la remoción de sedimentos.

El uso de herramientas de modelación numérica para procesos de diseño y/o optimización de tanques desarenadores ha sido objeto de estudio de diferentes investigaciones donde se ha concluido que a diferencia de otros métodos como la modelización física, estos proporcionan resultados en menor tiempo y a un costo inferior, sin embargo, aún son cuestionados aspectos de desempeño según las características de los casos de aplicación. Teniendo en cuenta lo anterior, surge el desarrollo de la presente tesis, que estudia el comportamiento hidráulico y del transporte de sedimentos del tanque desarenador de la planta Sancancio, de la Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC, a través del uso del modelo numérico bidimensional Iber, con el fin de validar la aplicación de la herramienta para explicar el comportamiento de la dinámica de transporte de sedimentos y evaluar aspectos de remoción que permitan mejorar su funcionamiento.

La metodología llevada a cabo en el estudio se basó en dos fases correspondientes a la caracterización física del tanque desarenador, en la cual se realizaron siete campañas de mediciones in situ para diferentes condiciones de caudal de operación, y a la modelación numérica con los datos de entrada de la primer fase, en la modelación se corrió el módulo hidrodinámico para todos los caudales y el módulo de transporte de sedimentos para la condición de caudal máximo.

El documento se estructura en cinco capítulos:

En el capítulo 1 se presenta la descripción del proyecto de investigación, iniciando por la descripción del problema a partir del cual surge el desarrollo estudio, basado en la problemática de los sedimentos en las PCH y en las limitaciones de los tanques desarenadores en su fase de diseño, se presentan los objetivos hacia los cuales se apunta cumplir y se presenta la descripción de las características generales del tanque desarenador Sancancio. Posteriormente, en el capítulo 2 se presenta una revisión bibliográfica sobre el funcionamiento de las PCH y sus limitantes por la presencia de sedimentos, los tanques desarenadores como alternativa de solución, el transporte de sedimentos y los modelos numéricos como método de estudio y al final se consolida una revisión de las investigaciones que se han desarrollado a nivel mundial y nacional relacionadas con el objetivo del presente estudio. Luego, en el capítulo 3, se describe la metodología desarrollada en la tesis, iniciando con la caracterización física del tanque desarenador y posteriormente con la modelación mediante Iber, en la cual se incluyen las ecuaciones matemáticas empleadas, la definición de escenarios de simulación y la descripción del pre-proceso para la construcción del modelo y posterior ejecución de cálculo. En el capítulo 4 se presentarán tanto los resultados obtenidos de la modelación de los escenarios como un análisis de los mismos, donde se explica el comportamiento del tanque y se sub-secciona en el análisis del módulo hidrodinámico y módulo de transporte de sedimentos, así mismo, se analizan otras consideraciones relacionadas con aspectos de diseño, operación y mantenimiento, y limitantes. El último capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones que surgen específicamente para el tanque desarenador Sancancio y para aspectos de aplicación.

# 1. Capítulo 1 – Proyecto investigativo

## 1.1 Introducción

El presente capítulo tiene como propósito describir el proyecto de investigación y se hace a partir del análisis de la problemática que representa el ingreso y manejo de los sedimentos en los tanques desarenadores de las PCH, la presentación de los objetivos de investigación que se desprenden del problema, la descripción de las características del tanque desarenador de la planta Sancancio, el cual es el objeto de estudio y las actividades realizadas para el desarrollo del estudio. El capítulo se divide entonces en cinco partes: planteamiento del problema, Objetivos, Alcance, características del tanque desarenador y metodología de la investigación.

## 1.2 Planteamiento del problema

Colombia tiene un gran potencial hidrológico que ha venido siendo ampliamente explorado en proyectos hidroeléctricos, ocupando el segundo lugar, después de Brasil (OLADE, 2013), en mayor potencial para la energía hidroeléctrica en América Latina para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH). De acuerdo con lo investigado por (Morales et al., 2015), las PCH representan un porcentaje de participación dentro de la categoría de proyectos hidroeléctricos del 73% con una capacidad de 916.35 MW suministrada por 89 plantas.

Debido al amplio uso de este tipo de proyectos, las PCH han venido tomando más importancia debido a los beneficios económicos, ambientales y sociales que tienen con respecto a las grandes centrales hidroeléctricas (Morales et al., 2014), entre los cuales se pueden destacar menores periodos de construcción, mayor rentabilidad, menores costos de operación y ausencia de embalses para regulación hídrica puesto que, en su mayoría son plantas de tipo *run-of-river* o a filo de agua donde debido a las pendientes de las zonas no se requiere de su implementación.

Es así como se identifican los aspectos positivos que tienen las PCH en cuanto a costos y menores afectaciones, con respecto a las grandes centrales hidroeléctricas. Sin embargo, en los últimos años se ha evidenciado un aumento progresivo en la producción de sedimentos que son transportados por los ríos, debido principalmente a los cambios de uso del suelo de las cuencas donde se localizan (Zambrano, 2015); convirtiéndose en uno de los principales problemas en el desarrollo de los recursos hidráulicos asociados a la generación de energía hidroeléctrica. Como se ha evidenciado en diferentes investigaciones, entre ellas las desarrolladas por Padhy & Saini (2012), Neopane (2010) y Thapa, Thapa, & Dahlhaug (2012), el poco control de los sedimentos, altera el concepto inicial de PCH, generando altos costos de operación y mantenimiento por el desgaste erosivo del equipamiento electromecánico y además por el impacto ambiental negativo generado sobre las fuentes hídricas superficiales receptoras de las descargas de material particulado acumulado en las diferentes estructuras hidráulicas que componen los sistemas de generación.

Un caso específico son las unidades de sedimentación conocidas como tanques desarenadores, diseñados y construidos con el fin de eliminar partículas sólidas suspendidas en el campo de flujo mediante sedimentación gravitacional y de evacuar mediante diferentes sistemas de descarga, los sedimentos acumulados. No obstante, su diseño se basa normalmente en el tiempo de residencia de las partículas dentro de la unidad y de la suposición de un campo de flujo y velocidad de sedimentación constante y uniforme, hipótesis que no siempre se cumple lo cual conlleva a ignorar la hidrodinámica de los tanques dando lugar a posteriores problemas de diseño.

Atendiendo a la importancia que representan los sedimentos en este tipo de estructuras, se reportan en la literatura diferentes estudios llevados a cabo en países como Estados Unidos, China, Grecia y Francia principalmente, con el fin de desarrollar y aplicar herramientas de soporte para el proceso de diseño y/o optimización de tanques desarenadores haciendo referencia al uso de modelos físicos y/o numéricos para el estudio del flujo de agua y de sedimentos al interior de estos.



No obstante, la modelización física a escala reducida, aunque generalmente responde satisfactoriamente al entendimiento de procesos de transporte de sedimentos de fondo, diferentes autores, entre ellos Luzuriaga & Amaya (2014), mencionan que “para procesos de suspensión, la modelización física del transporte de sedimentos es muy limitada debido a los efectos que introduce el escalamiento”, además de demandar altos costos, personal y equipos de laboratorio especializado.

De manera particular, en proyectos de generación hidroeléctrica, la problemática del diseño de desarenadores radica en el control de los sedimentos, puesto que se deben lograr altas eficiencias de remoción para impedir el ingreso de los mismos hacia la maquinaria hidroeléctricas. Por lo tanto, se considera necesario el desarrollo de modelos numéricos, así como el entendimiento y análisis de su desempeño como herramienta de soporte para la concepción, diseño y toma de decisiones en procedimientos de operación de estructuras hidráulicas tales como tanques desarenadores en PCH. Lo anterior, teniendo en cuenta que en Colombia, hasta la fecha, este trabajo no se ha identificado.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

Analizar el transporte de sedimentos en el desarenador de la planta Sancancio de la Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC, mediante modelización numérica.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar las condiciones hidráulicas y de sedimentación de la unidad de estudio.
- Simular mediante un modelo numérico el comportamiento y las condiciones hidrodinámicas del flujo del desarenador en mención.
- Validar la simulación realizada mediante la comparación de sus resultados con las observaciones de campo.
- Evaluar la operación del tanque desarenador en términos de remoción de sedimentos y sugerir alternativas para la descarga de los mismos.

## **1.4 Alcance**

El presente estudio tenía como propósito determinar las características de flujo y de sedimentos en un desarenador de una PCH existente, mediante la implementación del modelo numérico bidimensional Iber. Con el estudio propuesto se pretende dar un importante aporte al entendimiento, aplicación y desarrollo de herramientas de modelización numérica para diseño, optimización y operación de estructuras hidráulicas para aprovechamiento del recurso hídrico. Los resultados de la presente tesis se constituyen en un importante insumo para dar un aporte a problemas existentes de las PCH en cuanto al componente de control de sedimentos que ingresan a los sistemas de generación, así como también para el desarrollo futuro de documentos de divulgación técnica/científica.

## **1.5 Características del tanque desarenador planta Sancancio**

### **1.5.1 Descripción**

La mayor parte de la energía producida por la CHEC, corresponde al proceso de generación de energía hidráulica, este sistema se compone de dos (2) cadenas de generación denominadas Plantas menores y Plantas mayores clasificadas así según su capacidad; las plantas menores están conformadas por las Plantas Sancancio (1400 KVA), Intermedia (1400 KVA) y Municipal (1300 KVA), las cuales realizan aprovechamiento del recurso hídrico del río Chinchiná (CHEC, 2020). La planta de generación Sancancio se compone de bocatoma, canales de conducción, tanque desarenador, tanque de carga y planta de generación (turbina Pelton y turbina Francis). En la Figura 1 se observa la imagen del tanque desarenador dentro del esquema de generación de la planta Sancancio.



Figura 1: Tanque desarenador Sancancio.

Fuente: elaboración propia.

El tanque desarenador Sancancio, localizado aguas abajo de la bocatoma sobre el río Chinchiná, se compone de un canal de entrada, dos unidades de desarenado y un canal de salida, ambas unidades tienen compuertas de entrada de caudal y de descarga de sedimentos al río Chinchiná independientes (ver Figura 2). La estructura tiene una longitud total de 40.9 m, un ancho total de 9.9 m y una capacidad útil para la remoción de sedimentos de 989 m<sup>3</sup>.

Con el fin de evitar el ingreso de sedimentos al área de máquinas (turbinas, generadores, entre otros.) de la planta, una vez captada el agua del río Chinchiná, esta ingresa a cada una de las unidades de desarenado de manera independiente y cuando el agua cumple su tiempo de permanencia en cada una de ellas, pasa al canal de salida por medio de vertederos y es dirigida posteriormente al siguiente proceso de generación hidroeléctrica (tanque de carga). Como elemento de control de caudal de entrada al tanque desarenador, se cuenta con un limnómetro instalado en el canal de entrada el cual permite estimar el caudal líquido según la altura de la lámina de agua en el canal, con base en los registros históricos de caudal, la operación del tanque se realiza con caudales que oscilan entre los 0.5 m<sup>3</sup>/s y 4.0 m<sup>3</sup>/s.

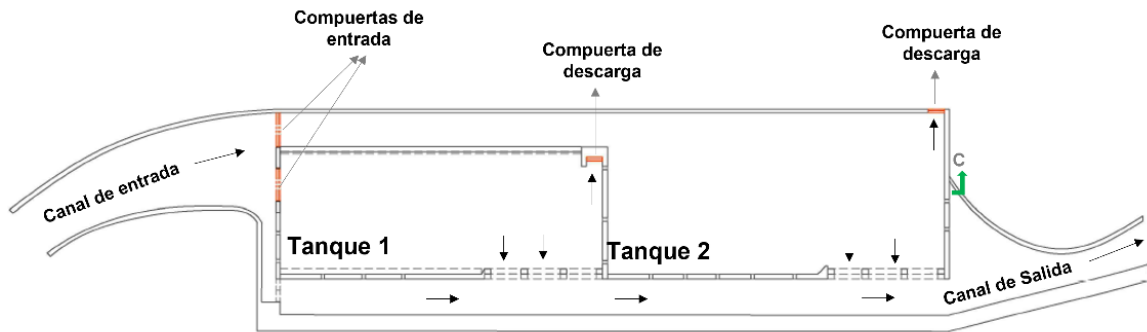


Figura 2: Esquema general tanque desarenador Sancancio.

Fuente: elaboración propia.

La periodicidad del mantenimiento del tanque desarenador es semanal, sin embargo, con base en los históricos de mantenimiento de los últimos 8 (años), esta periodicidad no se cumple y se realiza cuando la profundidad de los lodos acumulados supera los 1.5 m, condición que se establece con el fin de no suspender generación de la planta con tal regularidad. El mantenimiento del tanque desarenador consiste en el vaciado de los lodos a través de la apertura de compuertas de descarga, las cuales conducen el material acumulado al río Chinchiná. Para realizar esta actividad se acciona el cierre total de la compuerta de entrada de una de las dos unidades y una vez se evacuan los sedimentos, se procede a realizar el mismo procedimiento con la unidad faltante.

### 1.5.2 Localización

La planta de generación hidroeléctrica Sancancio de la Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC, se localiza en el municipio de Manizales, departamento de Caldas, Colombia; dentro del área perteneciente a la planta se ubica el tanque desarenador Sancancio en las coordenadas 1176418.6 este y 1049409.56 norte, hacia la margen derecha del río Chinchiná a la altura de 1916 msnm (ver Figura 3).



Figura 3: Localización tanque desarenador Sencancio.

Fuente: Google Earth.

### 1.5.3 Problemática

El tanque desarenador de la planta Sencancio se encuentra en funcionamiento desde el año 1929 aproximadamente; actualmente, con más de 90 años de operación, esta estructura de remoción de sedimentos no presenta un funcionamiento óptimo para el que fue diseñado, pues se ha visto a través de los años que los constantes cambios de uso del suelo de la cuencas han generado un aumento significativo en los sedimentos que ingresan a los sistemas de sistema de generación hidroeléctrica. Dada la antigüedad de esta estructura, no se cuenta con memorias de diseño o insumos técnicos que permitan el desarrollo de actividades de optimización acertadas frente al manejo de sedimentos, situación de la cual surge la necesidad de implementar modelos numéricos para evaluar su aplicabilidad a aspectos de diseño y toma de decisiones en procedimientos de operación. Las tres principales problemáticas del tanque desarenador Sencancio se describen a continuación.

1. Proceso de resuspensión de sólidos: con base en monitoreos de calidad y cantidad realizados por la CHEC (GIAS, 2014), la concentración de sólidos suspendidos totales a la salida del tanque es mayor que en la entrada para determinados caudales. Esta situación se presenta por la cantidad de sedimentos acumulados en el tanque y la periodicidad de las jornadas de mantenimiento del mismo, es decir que la altura de los lodos acumulados supera la condición óptima de funcionamiento y el agua que ingresa al sistema arrastra los sólidos ya sedimentados, lo cual no representa un proceso eficiente de remoción de sólidos para la planta de generación.

2. Ineficiencia en los procesos de descarga de sedimentos: las compuertas de descarga existentes no permiten el proceso de vaciado de los lodos, dado que no es suficiente con la configuración de apertura de compuertas de entrada y de descarga y requiere movimientos de lodos manuales para facilitar la conducción del mismo por las compuertas de descarga, lo cual prolonga el tiempo de mantenimiento y por ende el detenimiento de la producción hidroeléctrica.

3. Impacto ambiental sobre río Chinchiná por descarga de sedimentos: al no contar con un sistema de descarga eficiente, la descarga de sedimentos del tanque se realiza de forma constante sobre el río Chinchiná, lo cual ocasiona picos de concentración de sólidos sobre el río y afecta las condiciones de calidad de agua, aguas abajo de dicha descarga.



a. Movimientos de lodo manual para su descarga.



b. Descarga de sedimentos al río Chinchiná.

Figura 4: Problemáticas tanque desarenador Sancancio.

Fuente: elaboración propia.

## 1.6 Metodología de la investigación

Para el desarrollo del presente trabajo se realizaron diferentes actividades que permitieron el cumplimiento de los objetivos planteados. A continuación se presenta el consecutivo de estas actividades, las cuales se mostrarán en 5 etapas:

### 1. Caracterización física del tanque desarenador Sancancio:

- Levantamiento topográfico del tanque desarenador.
- Medición de caudal de entrada al tanque desarenador, por medio de aforos por vadeo.
- Toma de muestras de agua en la entrada y salida del tanque desarenador para análisis de parámetros de Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Sólidos Sedimentables (SSED).
- Toma de muestra de sedimento de fondo para análisis granulométrico del material.

### 2. Revisión de datos históricos de caudal de entrada del tanque desarenador Sancancio.

### 3. Revisión bibliográfica de temática específica de acuerdo con la problemática abordada.

### 4. Aplicación del modelo matemático Iber.

- Construcción de la geometría.
- Asignación de condiciones hidrodinámicas.
- Asignación de valores de rugosidad.
- Selección y asignación de parámetros para el transporte de sedimentos.
- Construcción de mallado.
- Selección de datos del problema.
- Ejecución de cálculo.

### 5. Análisis de resultados del modelo y evaluación del comportamiento hidráulico y de transporte de sedimentos del tanque desarenador, así como el análisis y planteamiento de alternativas de manejo, según los resultados, para mejorar las condiciones de remoción.

## 1.7 Conclusión

En el capítulo 1 se explicó que el proyecto de investigación surge a partir de los problemas que genera el ingreso de sedimentos a las PCH y su manejo a través de estructuras de remoción como tanques desarenadores. Los objetivos planteados en el proyecto, apuntan hacia el análisis del transporte de los sedimentos en el tanque desarenador existente de la planta Sancancio de la CHEC, por medio de modelación numérica dado que es una herramienta útil para este tipo de análisis, y para lo cual se estableció una metodología de investigación con dos fases principales: 1. Caracterización física del tanque desarenador y 2. Aplicación del modelo numérico Iber. A continuación, se presentará el estado del arte, en el cual se compilan principalmente otros estudios desarrollados, relacionados con la presente investigación.





## **2. Capítulo 2 – Estado del arte**

### **2.1 Introducción**

El capítulo 2 presenta la revisión bibliográfica asociada al contexto general de las PCH, las ventajas y desventajas con respecto a su funcionamiento y como los procesos de remoción de sedimentos en tanques desarenadores son de gran importancia para un proceso de generación de energía hidroeléctrica eficiente. Se describen las características de funcionamiento y de diseño de los tanques desarenadores y se explica el concepto básico de los mecanismos de transporte de sedimentos, haciendo especial énfasis en como la modelación numérica ha logrado describir dicho fenómeno. Finalmente, se presenta un resumen de las investigaciones que se han llevado a cabo en los últimos años con relación a estudios de modelación hidráulica de tanques desarenadores o estructuras similares. El desarrollo del capítulo se da en cuatro componentes: PCH, tanques desarenadores, transporte de sedimentos y modelos numéricos.

### **2.2 PCH – descripción y problemáticas**

A nivel mundial, las centrales hidroeléctricas son la mayor fuente de generación de energía renovable, del total de producción de energía para el año 2018, 25.6% corresponde a energías renovables, con un aporte del 15.9 % por parte de las hidroeléctricas (IHA, 2019). Colombia se encuentra dentro de los principales países en capacidad instalada de energía hidroeléctrica, ocupando el tercer lugar para Suramérica, después de Brasil y Venezuela; de acuerdo con lo investigado por Morales et al. (2015), de 122 proyectos instalados en Colombia en el año 2013, 89 corresponden a PHC, representado un porcentaje de participación dentro de la categoría de proyectos hidroeléctricos del 73%.

Según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), una PCH es una instalación donde se utiliza la energía hidráulica para generar reducidas cantidades de electricidad (hasta 5000 Kw aproximadamente) por medio de uno o más grupos de conjuntos turbina/generador. Estas se clasifican según su potencia o caída en metros con base en las siguientes especificaciones (Morales et al., 2014):

- Según potencia:

Tabla 1: Clasificación de las PCH según su potencia.

<b>Tipo</b>	<b>Potencia</b>
Picocentrales	0.5 – 5 Kw
Microcentrales	5 – 50 Kw
Minicentrales	50 – 500 Kw
Pequeñas centrales	500 – 5000 Kw

- Según caída en metros:

Tabla 2: Clasificación de las PCH según la altura de caída.

<b>Tipo</b>	<b>Bajo</b>	<b>Medio</b>	<b>Alto</b>
Microcentrales	<15m	15 – 50m	>50m
Minicentrales	<20m	20 – 100m	>100m
Pequeñas centrales	<25m	25 – 130m	>130m

El principio de funcionamiento de una PCH consiste en la transformación de la energía hidráulica en energía mecánica a través de turbinas, la cual es posteriormente convertida en energía eléctrica por medio de transformadores y suministrada a las redes de transmisión. Este proceso de transformación de energía requiere de la construcción y funcionamiento de diferentes componentes interconectados entre sí, haciendo uso del recurso hídrico superficial. En la Figura 5 se muestran los principales componentes de una PCH y se describen a continuación de acuerdo con ACIEM (2015).

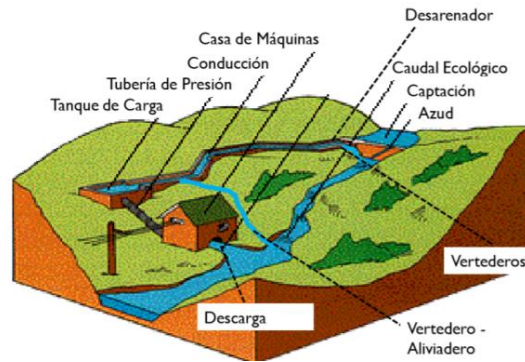


Figura 5: Componentes principales de una PCH.

Fuente: (ACIEM, 2015).

**Obra de captación:** permite captar el caudal requerida para el funcionamiento del sistema, generalmente se cuenta con un azud que facilita la desviación del caudal a sitio de captación.

**Desarenador:** permite el asentamiento de las partículas sólidas contenidas en el agua.

**Conducción:** puede ser un canal, túnel o tubería y tiene como propósito transportar el agua desde la bocatoma hasta el tanque de carga.

**Tanque de carga:** estructura que recibe el agua antes de su ingreso a la tubería de presión, su principal función es la eliminación de burbujas de aire en el agua y garantizar un adecuado paso por la tubería de presión.

**Tubería de presión:** transporta el agua desde el tanque de carga hasta la turbina, permitiendo aprovechar la energía potencial del salto.

**Casa de máquinas:** compuesta principalmente por las turbinas y generadores, encargados de la transformación de energía potencial en mecánica y luego en eléctrica. Una vez se realiza este proceso, el agua es descargada nuevamente la fuente hídrica superficial.

**Compuertas:** dispositivos para controlar el flujo en las tomas, canales y tanques.

**Aliviaderos/vertederos:** permiten controlar y regresar el exceso de caudales al río o quebrada.

Las PCH's son consideradas como tecnologías limpias y renovables y por lo tanto, su implementación representa una serie de ventajas operativas, ambientales y económicas en comparación con otros sistemas de generación (Morales et al., 2014), sin embargo, con el paso del tiempo se han documentado igualmente desventajas e impactos negativos de estos sistemas de generación, Duque, Patino, & Velez (2016) señalan que las principales ventajas de las PCH con respecto a otras fuentes de energía disponibles, son la facilidad de operación, menores impactos ambientales y el esquema de funcionamiento a filo de agua, el cual no demanda de la construcción de embalses. No obstante, este esquema de funcionamiento implica el paso directo de sedimentos transportados por los cuerpos de agua desde las captaciones hasta los equipos electromecánicos, reduciendo su vida útil por efectos erosivos (Mishra, Singal, & Khatod, 2013). Diferentes autores, entre ellos Neopane (2010), Padhy & Saini (2012) y Thapa, Thapa, & Dahlhaug (2012), han comprobado en sus investigaciones los impactos que producen las partículas sólidas en los equipamientos electromecánicos, específicamente en las turbinas, evidenciando daños por desgaste erosivo, lo cual se traduce en la reducción de la vida útil de los equipos y en los altos costos de operación y mantenimiento de las plantas. Por lo tanto, la presencia de altas concentraciones de sedimentos se ha convertido en uno de los principales problemas en el desarrollo de los recursos hidráulicos asociados a la generación de energía hidroeléctrica en PCH.

Teniendo en cuenta lo anterior, la planificación de proyectos de PCH debe incluir técnicas de manejo de sedimentos que permitan el ingreso de agua al sistema, con la menor concentración de sólidos posible y que a su vez faciliten una disposición final adecuada de los mismos. La construcción de tanques desarenadores es una de las medidas de control de sedimentos más utilizadas para PCH (G. Singh & Kumar, 2016), convirtiéndose en el método más común para el proceso de separación sólido-líquido mediante sedimentación gravitacional (Wang et al., 2011).

### **2.3 Alternativa para el control de sedimentos**

Los tanques desarenadores son estructuras diseñadas con el objetivo de separar y remover el material sólido que trae el agua superficial con el fin de evitar, para el caso específico de centrales hidroeléctricas, el desgaste acelerado de las turbinas por la acción de erosión de las partículas sólidas sobre los diferentes componentes de las mismas.

Para que este proceso ocurra se debe reducir la velocidad del flujo en la entrada, a través de la variación de pendiente antes del desarenador y el cambio en la sección del área transversal (INEA, 1997). Generalmente estas estructuras son canales abiertos de sección cuadrada o rectangular, puesto que facilitan la operación por medio de compuertas que permiten la liberación de los lodos sedimentados; el desarenado sirve normalmente para la remoción de partículas superiores a un diámetro de 0.2 mm (Organización Panamericana de la Salud, 2005). Según Zetina (2012), los tanques desarenadores convencionales (de flujo horizontal) se dividen en cuatro zonas principales:

1. **Zona de entrada:** estructura hidráulica de transición que permite una distribución uniforme del flujo dentro del desarenador.
2. **Zona de sedimentación:** parte de la estructura en la cual se realiza el proceso de depósito de partículas debido a la disminución de la velocidad producida por el aumento de la sección transversal. De acuerdo con Sparrow (2008), las velocidades límite por debajo de las cuales el agua cesa de arrastrar diversas materias son en el caso de arcilla: 0.081 m/s, arena fina: 0.16 m/s y arena gruesa: 0.216 m/s.
3. **Zona de salida:** conformada por un vertedero de rebose diseñado para mantener una velocidad que no altere el reposo del material sedimentado.
4. **Zona de lodos:** constituida por una tolva con pendiente mínima de 10% que permita deslizamiento de la arena hacia el canal de limpieza de los sedimentos.

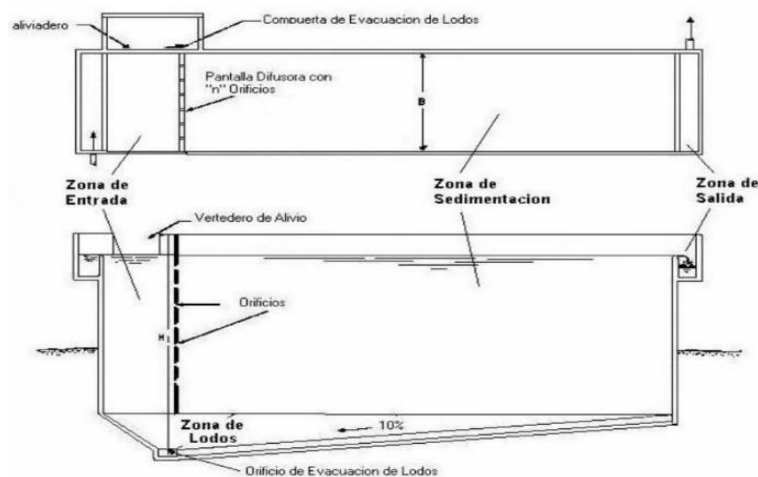


Figura 6: Componentes de un desarenador convencional.

Fuente: (Zetina, 2012).

De acuerdo con lo descrito por López (2013), los tanques desarenadores se pueden clasificar según sus características de operación, velocidad de escurrimiento y disposición, tal como se muestra a continuación.

- **En función de su operación (López, 2013):**

- Desarenador de lavado continuo: en este tipo de desarenador se elimina el material sólido sedimentado de manera continua, es decir que el proceso de sedimentación y de evacuación de lodos se hace de forma simultánea; para ello es necesario que el caudal disponible sea mayor al de diseño.
- Desarenador de lavado intermitente: los desarenadores de lavado intermitente almacenan y luego expulsan los sedimentos realizando ambas actividades de manera independiente. Este tipo de desarenador debe limpiarse periódicamente en el menor tiempo posible con el fin de evitar interrupciones en el servicio de energía eléctrica, todo dependiendo de la cantidad de sedimentos que contenga el agua.

- **En función de la velocidad de escurrimiento (López, 2013):**

- De baja velocidad: 0.2 – 0.6 m/s
- De alta velocidad: 1.0 – 1.5 m/s

- **En función de su disposición (López, 2013):**

- En serie: formado por dos o más unidades construidas una a continuación de la otra.
- En paralelo: formado por dos o más unidades distribuidas paralelamente y diseñadas para una fracción del caudal derivado.

Metcalf and Eddy (1995), Cualla (1995), Romero Rojas (2002), Corcho (2009), CEPIS (2005) y el RAS (2017) han propuesto metodologías de diseño que han sido tradicionalmente usadas para tanques desarenadores, principalmente para sistemas de tratamiento de agua potable y residual. Para el caso específico de tanques desarenadores de PCH, se han desarrollado a nivel mundial y nacional diferentes guías de diseño para todos los componentes que conforman el sistema de generación, dichas metodologías tienen criterios de diseño similares para los tanques desarenadores, basados principalmente en la selección del tamaño de partícula a remover y en la definición de la velocidad horizontal y velocidad de sedimentación.

Así mismo, recomiendan algunos rangos para el dimensionamiento tales como una relación largo:ancho entre 3:1 y 5:1, profundidad mínima de 1.5 m y máxima de 4.5 m y pendiente de fondo entre el 5% y 8% (Zetina, 2012), (Organización Panamericana de la Salud, 2005) y (Mora & Hurtado, 2004); a continuación se enlistan algunas de las metodologías más mencionadas en el país:

- Guía de diseño para Pequeñas Centrales Hidroeléctricas, (INEA, 1997), Ministerio de Minas y Energía, Colombia, año 1997.
- Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant, (ESHA, 2004), European Small Hydropower Association – ESHA, Bélgica, año 2004.
- Guidelines for Hydraulic Design of SHP Projects, (RIIT, 2008), Indian Institute of Technology Roorkee, India, año 2008.
- Metodologías de diseño de obras hidráulicas en estudios de pre-factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas, (Quintero, 2009), Universidad Nacional de Colombia, Colombia, año 2009.
- Guía para estudios de prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos, (Mora & Hurtado, 2004) Pontificia Universidad Javeriana, Colombia, año 2004.

A pesar de la existencia e implementación de dichas metodologías de diseño, estas han sido cuestionadas con respecto a su validez por diferentes autores como Coe & Clevenger (1916), Imam, Mccorquodale, & Bewtra (1983) y Matko, Fawcett, Sharp, & Stephenson (1996), los cuales evaluaron el desempeño de tanques desarenadores existentes con respecto a los conceptos teóricos de diferentes métodos de diseño tradicionales, concluyendo que para la mayor parte de los casos estudiados, el funcionamiento real no es satisfactorio y que además, dichas metodologías no logran predecir, ni explicar, exactamente el comportamiento de los tanques desarenadores en condiciones reales de operación. En estudios más recientes como los desarrollados por Sanchez & Jerez (2018) y Fiesco & Arias (2016), se encontró igualmente como resultado bajas eficiencias de remoción reales, debido principalmente a las suposiciones teóricas de cada método durante el proceso de diseño, así como a aspectos de operación.



Se resalta que los métodos de diseño se basan en ecuaciones empíricas que no tienen en cuenta las características hidrodinámicas reales de los tanques, puesto que parten de asumir patrones de flujo uniformes que no siempre se presentan una vez son construidas las estructuras. Adicionalmente, dichos estudios evidenciaron que las condiciones de mantenimiento son esenciales para el buen funcionamiento de los tanques desarenadores, puesto que de un mal proceso de mantenimiento se pueden derivar procesos de resuspensión de sólidos.

Stamou (2008), quien empleó el modelo numérico CFX para la evaluación del campo de flujo de un tanque de suministro de agua potable bajo modificaciones en la geometría inicial, como alternativa de optimización de la eficiencia hidráulica del tanque, señala que en el área de estudio de la ingeniería química e hidráulica, el campo de flujo en los tanques, es a menudo muy diferente de las condiciones de flujo uniforme ideales y que por ende, teniendo en cuenta que la eficiencia del proceso depende de las características de flujo en los tanques, el diseño de estos no puede ser totalmente exitoso a menos que se proporcione información realista sobre la hidrodinámica de los mismos.

La correcta implementación de un tanque desarenador en una PCH's, desde su proceso de diseño y posterior construcción, se convierte en un proceso clave para garantizar la eficiencia de remoción de sólidos y por ende un adecuado funcionamiento del sistema de generación de energía. Siendo esto un objetivo claro para los diseñadores, comienza a surgir la necesidad de desarrollar nuevas herramientas para soportar el proceso de diseño y/o asegurar la optimización de estructuras existentes, haciendo especial énfasis en el uso de herramientas para el estudio del flujo y de sedimentos, tales como modelización numérica.

## **2.4 Dinámica del transporte de sedimentos**

Aunque existen muchos fundamentos teóricos, el estudio del transporte de sedimentos resulta ser un fenómeno complejo, debido a que depende de muchos factores, entre ellos las propiedades de las partículas sólidas y las condiciones del flujo. El transporte de sedimentos responde básicamente a dos funciones, una que representa las características de la cuenca, y otra a las del canal natural y/o artificial.

La primera indica la cantidad, naturaleza y propiedades físicas de los sedimentos y la otra, la capacidad del sistema hidráulico para su transporte. Los sedimentos que transporta una corriente de agua superficial son consecuencia natural de la erosión del suelo, la cual hace referencia al proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas del suelo causado por el agua y/o el viento. Si el agente es el agua, se habla de erosión hídrica donde la precipitación y la escorrentía son los principales agentes erosivos. (Zambrano, 2015).

Basile (2018), indica que en un río aluvial, para valores de la tensión de corte sobre el fondo mayores que la crítica, se establecerá el transporte de sedimentos y el lecho sufrirá ciertas deformaciones u ondulaciones. Consecuentemente, el flujo moldeará la geometría del cauce y modelará su rugosidad hidráulica, pero a su vez, esta perturbación inducirá cambios en las variables de flujo (de las cuales depende el transporte) y por extensión, cambios en el transporte de sedimentos. De acuerdo con el modo en que las partículas sólidas se mueven en un campo de flujo, el transporte de sedimentos se puede dar por transporte de fondo y transporte en suspensión (ver Figura 7).

Los materiales que se mueven a lo largo del fondo de una corriente constituyen la carga de fondo; las partículas se mueven por distancias comparables a su diámetro y se da de 3 formas principales: por saltación, rodamiento y/o arrastre. Una partícula transportada por saltación, salta de un punto a otro del lecho, primero es levantada por una corriente de agua turbulenta y si es demasiado pesada para mantenerse en suspensión, cae otra vez al fondo, corriente abajo; por otro lado algunas partículas son excesivamente grandes y pesadas para ser levantadas por la corriente, pero pueden ser empujadas y llevadas a lo largo del lecho de la corriente y, de acuerdo con su forma, moverse hacia adelante, ya sea por rodamiento o arrastre (Basile, 2018).

Por su parte, en el transporte en suspensión las partículas pierden contacto con el fondo efectuando trayectorias relativamente largas, es decir, no comparables al diámetro sino a la profundidad del flujo, sostenidas por las pulsaciones turbulentas de la corriente hídrica; la tendencia a la sedimentación de una partícula en suspensión es continuamente compensada por la acción difusiva del campo de flujo turbulento.

Este transporte depende sustancialmente de la relación entre la velocidad de corte y la velocidad de caída de las partículas, por lo tanto el transporte por suspensión siempre depende del diámetro del sedimento (Basile, 2018).

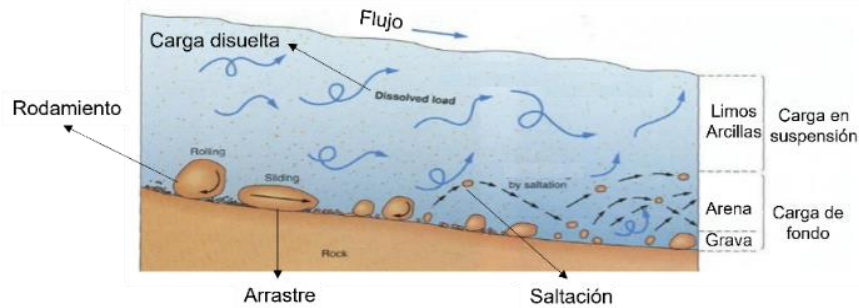


Figura 7: Esquema de mecanismos de transporte de sedimentos.

Fuente: adaptado de (Dominguez, 2015).

## 2.5 Modelos numéricos como herramienta de estudio

Dadas las modificaciones de origen antrópico en cuanto a la afectación de la cobertura vegetal, la cual juega un papel importante en diversos procesos del ciclo hidro-sedimentológico, se presentan procesos de erosión acelerada, con el consiguiente aumento de sedimentos en los cursos de agua, viéndose directamente reflejado en problemas asociados al ingreso de cargas de sedimentos significativas a las diferentes obras en el aprovechamiento de los recursos hidráulicos.

Los modelos numéricos representan una herramienta pertinente para el estudio de este fenómeno puesto que en comparación con los modelos físicos, pueden proporcionar resultados en menor tiempo, a un costo comparativamente inferior y con mayor flexibilidad, cubriendo todo el rango de tamaños de sedimentos (T. Singh, Chandrashekhar & Agrawal, 2007). A pesar de que los modelos físicos responden generalmente de manera satisfactoria, se ven limitados debido a los efectos que introduce el escalamiento y a los altos costos, personal y equipo especializado que demandan. Por lo anterior se considera práctico y adecuado el desarrollo de modelos numéricos, así como el entendimiento y análisis de su desempeño como herramienta de soporte para el diseño, construcción y toma de decisiones en procedimientos de operación de estructuras hidráulicas tales como tanques desarenadores en PCH.

Con base en el análisis de resultados de búsqueda de las bases de datos Scopus y Web of Science, en la literatura se reportan diferentes estudios que datan desde los años 90, relacionados con la evaluación del comportamiento de sedimentos en tanques desarenadores y estructuras similares, por medio del uso de herramientas de la Dinámica de Fluidos Computacional (por sus siglas en inglés: CFD), desarrollados principalmente en Estados Unidos, China y Francia. De acuerdo con los análisis de resultados de búsqueda de diferentes bases de datos bibliográficas, el número de publicaciones relacionadas con el uso de herramientas computacionales para estudios de sedimentos, aumentó significativamente desde el año 2019, duplicando el promedio de publicaciones anuales, lo que se traduce en un importante aporte científico en pro del conocimiento a la aplicación de diferentes herramientas para analizar el comportamiento de los sedimentos en estructuras hidráulicas como tanques desarenadores.

En la actualidad, existen para el campo de la ingeniería hidráulica, diferentes modelos numéricos de simulación disponibles en el mercado, los cuales ofrecen diferentes características según las necesidades de aplicación en cuanto a dimensionalidad (1D, 2D o 3D), regímenes de modelación, métodos de cómputo, contornos, entre otros. Como se mencionó anteriormente, a nivel mundial se reportan múltiples estudios de aplicación de modelos numéricos bajo diferentes condiciones de estudio y diferentes objetivos de aplicación. No obstante, las publicaciones en países sur americanos son pocas. Para Colombia se menciona entre lo más recientes, el estudio desarrollado por Griborio, McCorquodale, & Rodríguez (2014), quienes construyeron un estado del arte en cuanto a la aplicabilidad de modelos numéricos 2D y 3D en tanques de sedimentación primaria, concluyendo que en general los modelos 3D, son ideales para evaluar diseños detallados/complejos o modificaciones en zonas de entrada, y que por su parte los 2D son más adecuados para el análisis de modificaciones a escala macro. Con el objetivo de resumir los estudios desarrollados con respecto al estudio del flujo y de sedimentos en tanques desarenadores y estructuras similares, en la Tabla 3, presentada al final del capítulo, se enlistan algunas de las investigaciones reportadas en la literatura y que se mencionan a continuación.

En Ecuador, Salamea (2015), empleó el modelo numérico 2D Iber, para el análisis hidrodinámico y de transporte de sedimentos de un tramo del río Calabí y su ingreso a estructuras de captación y de sedimentación, utilizando las ecuaciones bidimensionales promediadas en la vertical de Saint-Venant, la ecuación de Exner de continuidad de sedimentos, Meyer-Peter y Müller para arrastre de fondo y un modelo de turbulencia de Prandtl, obteniendo resultados de simulación satisfactorios con respecto a las características reales del dominio simulado. Luzuriaga & Amaya (2014), utilizaron el modelo 3D SSIIM, que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes con el modelo de turbulencia K- $\epsilon$  y para el transporte de sedimentos la ecuación de Convección-Difusión, para establecer el patrón de flujo de agua y de sedimentos de un tanque desarenador del proyecto hidroeléctrico Coco Codo Sinclair. Se encontró que los resultados de la simulación fueron compatibles con los resultados obtenidos de un modelo físico desarrollado anteriormente por un laboratorio. Este mismo modelo SSIIM fue aplicado por Montoya (2013), en México, para el estudio del comportamiento de los sedimentos de diferentes diámetros durante el proceso de captación y sedimentación de un proyecto hidroeléctrico, en el estudio se concluye que la herramienta de simulación mostró resultados satisfactorios en cuanto a la simulación del comportamiento de sedimentos de 0.02 mm, 0.2 mm y 2.0 mm de diámetro.

Autores como Wang et al., (2011), en China, emplearon el modelo 3D Star-CD para la simulación de un tanque desarenador circular existente y sus resultados fueron comparados con las mediciones experimentales realizadas en campo. Los valores de velocidad de flujo y la distribución de sólidos dentro de la estructura, tuvieron un buen ajuste con respecto a los valores reales, reafirmando que no hay una distribución uniforme de la velocidad, con base en estos resultados, se evaluaron distintas alternativas de optimización, entre ellas la implementación de deflectores en la entrada, concluyendo que a medida que aumenta la longitud del deflector, aumenta la eficiencia de remoción, siendo 2 metros la longitud óptima del deflector.

Los autores Silva (2012) y Castillo, Alvarez & Carrillo (2013) centraron sus investigaciones en el análisis del proceso de sedimentación y descarga sólidos en los embalses de los proyectos hidroeléctricos Chimay en Perú y Paute-Cardenillo en Ecuador respectivamente. Para ambos estudios se emplearon modelos 1D y 2D.

Para el caso del embalse Chimay se desarrollaron modelos numéricos de programación propia (Matlab) y se encontraron limitantes con respecto a la modelación 1D. En este caso el modelo no representó de manera adecuada la variabilidad del proceso de sedimentación a lo ancho de la geometría ni los procesos de erosión lateral, mientras que el modelo 2D, con características de lecho móvil, respondió satisfactoriamente. Por su parte, la modelación del embalse en Ecuador, se realizó con los modelos Hec-Ras (1D) e Iber (2D) y se obtuvieron resultados no satisfactorios para las condiciones 1D en cuanto a la descarga de sedimentos, obteniendo simulaciones que no representaron adecuadamente el fenómeno. En el caso de los resultados con el modelo 2D Iber, el modelo representó apropiadamente el proceso de descarga de sedimentos. Mediante esta aplicación fue posible determinar con mayor precisión, la periodicidad de mantenimientos en pro de conservar la vida útil de los sistemas.

En términos generales, la mayor parte de los estudios llevados a cabo con el fin de evaluar condiciones hidrodinámicas y de sedimentos a través de modelación numérica, concluyen que la dinámica de fluidos computacional, puede ser una herramienta útil para resolver problemáticas asociadas con patrones de flujo en tanques de procesos o similares, proporcionando una nueva percepción del fenómeno, que puede utilizarse para proponer diseños más eficientes, optimizar o plantear diferentes condiciones de operación. Sin embargo, autores como Isenmann et al. (2017), aún revalidan que la principal dificultad con respecto a la utilización de este tipo de modelos reside en la condición de frontera utilizada para tener en cuenta la deposición y la resuspensión de una partícula que llega al fondo. El autor basa su investigación en la evaluación del desempeño de un tanque desarenador en cuanto a la captura de materia en suspensión a través del desarrollo y aplicación de un modelo numérico 3D basado en el código abierto de OpenFOAM mejorado con una modificación que incluye condiciones de interacción partícula/pared. Con respecto a mediciones realizadas en campo, el modelo presentó la capacidad de predecir la remoción de partículas con un error del 5% cuando las deposiciones de sedimentos ocurrían en todo el lecho, mientras que, para el caso de deposiciones localizadas en zonas específicas, el error fue del 10%, excluyendo los casos de partículas con muy baja densidad.

El uso de los modelos 2D para flujo y transporte de sedimentos se ha generalizado debido al avance computacional y sobre todo a la existencia de un número significativo de modelos disponibles comercialmente. La mayoría de estos modelos son de ecuaciones promediadas en la profundidad, significando que al despreciar la componente vertical de la velocidad podrían no ser adecuados para los problemas en los cuales la distribución de la velocidad vertical no es despreciable, debido a un frente agudo o con pendiente fuerte. Sin embargo, se han alcanzado muy buenos resultados aun cuando no se cumplen algunas de estas hipótesis (Peña et al., 2008).

Tamayol et al. (2010) y Razmi et al. (2013) desarrollaron modelos bidimensionales, ambos promediados en la profundidad y programados con la herramienta Matlab, para la optimización de tanques desaredores por medio de la implementación de diferentes configuraciones de deflectores, puesto que con ellos es posible reducir los efectos de los flujos preferenciales entre las entradas y salidas mejorando el rendimiento hidráulico y por ende las eficiencias de remoción de material particulado. Los resultados mostraron que la posición adecuada de los deflectores está relacionada con la importancia de las fuerzas boyantes; cuando estas no son importantes, un deflector puede mejorar el rendimiento, mientras que para los casos con fuertes fuerzas boyantes y corrientes de densidad, el deflector debe colocarse en el fondo del tanque; en general las predicciones de los modelos se compararon con los datos experimentales físicos y se consideraron satisfactorios.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, para el caso específico de estudios para tanques desarenadores de proyectos hidroeléctricos, han sido aplicados en la mayor parte de los casos, los modelos numéricos 3D. Singh et al. (2007), realizaron el análisis del flujo de agua y sedimentos de un tanque desarenador de un proyecto hidroeléctrico en India a filo de agua, por medio de modelación física y numérica para determinar la eficiencia de la sedimentación (Mismo estudio realizado por Mustafa & Ta (2013) para un proyecto hidroeléctrico en Pakistán); el modelo numérico aplicado en ambos estudios correspondió al SSIIM.

A través de estos estudios se concluye que la eficiencia de remoción en los modelos físicos reales de los tanques desarenadores es mejor que lo estimado por los modelos físicos a escala reducida y modelos matemáticos. Sin embargo, Luzuriaga & Amaya (2014), concluyen que el modelo numérico SSIIM es adecuado para el análisis y la simulación de procesos de flujo y procesos de transporte de sedimentos asociados a obras hidráulicas para sedimentación puesto que las diferencias son mínimas.

Otro modelo comercial 3D, como el CFX-5, ha sido aplicado por Stamou (2008) para la optimización de la eficiencia hidráulica de tanques de sedimentación para sistemas de potabilización de agua en Grecia, mediante la evaluación de cambios en la geometría, dado que para las geometrías iniciales se evidenciaron condiciones de flujo con altos niveles de flujo preferencias, regiones de recirculación y altos grados de mezcla; a través de la modificación de la geometría en el modelo numérico, a través de la implementación de muros, se evidenciaron mejoras en el campo de flujo de los tanques con mayores zonas de flujo uniforme y, por lo tanto, mejoras en sus eficiencias de remoción.

Cesare et al. (2014), realizaron estudios similares en Alemania con los modelos numéricos ANSYS CFX y FLOW-3D, en tanques desarenadores para el estudio del comportamiento de los sedimentos bajo condiciones de lavado, y evaluación de alternativas de optimización para la descarga de los mismos, afirman que este tipo de aplicaciones, se puede aplicar en todos los tipos de tanques de procesos con agua, dando como resultados, ahorros de costos significativos, puesto que las alternativas se examinan previamente con los modelos numéricos bajo un buen nivel de confiabilidad, antes de su implementación real en las estructuras.

Si bien los experimentos de laboratorio con modelos físicos, han aportado al desarrollo de importantes investigaciones, la aparición de nuevas herramientas de modelación numérica está siendo usadas con más frecuencia en el campo de la ingeniería hidráulica, permitido planificar y desarrollar proyectos con mejores soportes técnicos en menores tiempos.



Tabla 3: Aplicación de modelos numéricos al estudio hidrodinámico y de sedimentos en tanque de proceso.

AUTOR/AÑO	MODELO	DIMENSIÓN	APLICACIÓN	ÁREA DE ESTUDIO	CARACTERÍSTICAS MODELAMIENTO
Salamea (2015)	Iber	2D	Análisis de la hidrodinámica y de la capacidad de transporte de sedimentos de tramo del río Calabí y estructura de captación y sedimentación mediante modelación numérica, con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo en el río y en las estructuras.	Ecuador	Las ecuaciones empleadas son las ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant, la ecuación de Exner de continuidad de sedimentos, Meyer-Peter & Müller para arrastre de fondo y un modelo de turbulencia de Prandtl.
Luzuriaga & Amaya (2014)	SSIIM	3D	Estudio del patrón de flujo de agua y de sedimentos en el desarenador del proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair, con el fin de evaluar las condiciones de operación del tanque y comparar resultados de la modelación numérica con los obtenidos de un modelo físico a escala reducida desarrollado por un laboratorio de la zona.	Ecuador	Para el cálculo del flujo de agua se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes y para el transporte de sedimentos se resuelve la ecuación de Convección-Difusión.
Montoya (2013)	SSIIM	3D	Simulación del transporte de sedimentos de diferentes tamaños, sobre un tramo de río de que deriva determinado caudal para un proyecto hidroeléctrico, así como la simulación en estructura de captación y de sedimentación del proyecto, con el fin de establecer el comportamiento del sedimento, según su tamaño, en el sistema de generación de energía.	México	Se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes mediante la aplicación del método de volumen finito y la ecuación de convección – difusión para eficiencias de remoción.
Wang et al., (2011)	Star-CD	3D	Simulación del campo de flujo de agua y la concentración de sólidos suspendidos en un tanque de sedimentación circular, para analizar sus condiciones de operación y plantear y evaluar diferentes alternativas de optimización del tanque.	China	Se utiliza la ecuación de convección – difusión para los sedimentos en el tanque y se utilizó la ley de doble exponencial para describir la dependencia de la velocidad de sedimentación, de la concentración.
Castillo, Alvarez, & Carrillo (2013)	HEC-RAS	1D	Evaluación de los procesos de sedimentación y descarga de sedimentos en un embalse del	Ecuador	Para ambos modelos, se calcula el transporte de sedimentos con el método de Meyer-Peter&Müller.

AUTOR/AÑO	MODELO	DIMENSIÓN	APLICACIÓN	ÁREA DE ESTUDIO	CARACTERÍSTICAS MODELAMIENTO
	Iber	2D	proyecto hidroeléctrico Paute-Cardenillo, a través de modelación numérica, con el fin de estudiar los impactos de dichos procesos sobre el río Paute.		
Silva (2012)	Programación en Matlab	1D y 2D	Modelamiento matemático del proceso de sedimentación y descarga de sólidos en el embalse Chimay, con el objetivo de plantear estrategias de manejo del embalse para que su volumen útil no disminuya significativamente con el tiempo.	Perú	Se desarrolla un modelo matemático no permanente para cada dimensión usando un algoritmo que incluye el esquema explícito de MacCormack para resolver las ecuaciones hidrodinámicas y la ecuación de transporte de fondo de Aguirre – Pe.
Isenmann, Dufresne, Vázquez, & Mose (2017)	OpenFOAM	3D	Desarrollo y validación de una herramienta de simulación numérica para evaluar el desempeño de un tanque de sedimentación en cuanto a la eficiencia de remoción de sólidos en suspensión.	Francia	El movimiento del fluido se describe mediante las ecuaciones de Navier-Stokes. Se usa el modelo de turbulencia The k-ε SST (Shear Stress Transport) y para la trayectoria de las partícula en el fluido, se describe desde el punto de vista lagrangiano resolviendo la ecuación de Newton.
Peña et al., (2008)	Programación propia del autor	2D	Validación de un modelo numérico bidimensional para el estudio del transporte de sedimentos, haciendo énfasis en el estudio del lecho móvil.	España	Las expresiones utilizadas para caracterizar el flujo hidráulico, son las ecuaciones de aguas poco profundas obtenidas de las ecuaciones de Navier-Stokes. Para el transporte de sedimentos se usa la ecuación de continuidad de sedimentos y las expresiones empíricas de descarga sólida. La ecuación de continuidad sedimentaria fue formulada originalmente por Exner.
Tamayol et al., (2010)	Programación en Matlab	2D	Aplicación de un modelo numérico para optimizar el rendimiento de un tanque desarenador por medio de la implementación de disipadores (bafles) a la entrada de la estructura.	Estados Unidos	Las ecuaciones de continuidad, momento y difusión se resuelven para los componentes de velocidad y concentración. Se utiliza el modelo de turbulencia K-ε.
Razmi et al., (2013)	Programación en Matlab	2D	Modelación de diferentes configuraciones de bafles (ubicación y altura) en un tanque desarenador para mejorar rendimiento hidráulico.	Irán	El modelo se basa en las ecuaciones 2D de Reynolds-promedio Navier-Stokes junto con el modelo de turbulencia K-ε y se complementa con la ecuación de para el transporte de sedimentos.

AUTOR/AÑO	MODELO	DIMENSIÓN	APLICACIÓN	ÁREA DE ESTUDIO	CARACTERÍSTICAS MODELAMIENTO
Singh, Chandrashekhar, & Agrawal (2007)	SSIIM	3D	Análisis del flujo de agua y de sedimentos en un tanque desarenador de un proyecto hidroeléctrico a filo de agua por medio de modelación física y numérica para determinar eficiencia de sedimentación.	India	Se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes y se resuelve la ecuación Convección-Difusión para concentración de sedimentos.
Mustafa & Ta (2013)	SSIIM	3D	Estudio de la dinámica del flujo de agua y sedimentos en un tanque desarenador del proyecto hidroeléctrico Golden Gol, a través de la modelación numérica para determinar condiciones reales de operación con respecto a valores teóricos de diseño.	Pakistán	Se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes y se resuelve la ecuación Convección-Difusión para concentración de sedimentos.
Stamou (2008)	CFX-5	3D	Modelación numérica para plantear alternativas de optimización de la eficiencia hidráulica de tanques desarenadores para sistemas de potabilización mediante cambios en la geometría inicial.	Grecia	Las ecuaciones de continuidad y momento se resuelven para describir el flujo de agua, se emplea el modelo estándar de turbulencia K-ε y la ecuación de Convección-Difusión para sedimentos.
De Cesare et al., (2014)	ANSYS CFX and FLOW-3D	3D	Análisis de las características hidráulicas de un tanque desarenador bajo las condiciones de operación de descarga de sedimentos, con el fin de proponer y evaluar métodos de descarga más eficientes con respecto a la distribución uniforme de la velocidad de flujo.	Alemania	Los modelos resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes y Convección-Difusión para el análisis de sedimentos.
He, Marsalek & Rochfort (2004)	Fluent	3D	Estudio del comportamiento de flujo y sedimentos en tanques receptores de efluentes de alcantarillado combinado con el fin de evaluar alternativas de optimización para mejorar la sedimentación de partículas y evitar desbordamientos.	Canadá	La descripción matemática del flujo consta de la ecuación de continuidad y tres componentes de las ecuaciones de Reynolds. Se resuelven las ecuaciones resultantes de conservación de masa, momento, energía.

Fuente: elaboración propia.

## 2.6 Conclusión

En este capítulo se presentaron las características y limitantes de las PCH y de los tanques desarenadores como uno de sus componentes para la remoción de sedimentos. Se explicó cómo se da el transporte de sedimentos y como los modelos numéricos se han usado explicar dicho fenómeno. La revisión bibliográfica sobre el uso específico de modelos numéricos para analizar las dinámicas de tanques desarenadores y estructuras similares, indica que se han aplicado modelos 1D, 2D y 3D, basados en diferentes ecuaciones para el estudio de la hidráulica y del transporte de sedimentos, obteniendo mejores resultados en los modelos 2D y 3D que en los 1D, no obstante, aunque los modelos 2D han funcionado adecuadamente, aún se reportan limitantes con respecto a diferencias entre datos reales y modelados; todos los casos de aplicación de modelos 3D han sido satisfactorios para este tipo de análisis. A continuación, en el capítulo 3 se describirá el proceso experimental llevado a cabo para el análisis de la dinámica del transporte de sedimentos del tanque desarenador Sancancio.

## **3. Capítulo 3 – Proceso experimental y modelación hidrodinámica**

### **3.1 Introducción**

La presentación de este capítulo tiene como fin describir el proceso experimental desarrollado para cumplir con los objetivos del estudio y para ello el capítulo se subdivide en cuatro secciones. La primer parte describe las actividades realizadas en las diferentes campañas de medición in situ así y el análisis de caudales históricos operados en el tanque. En la segunda sección se presentan los aspectos relacionados con la descripción general y ecuaciones empleadas en el modelo Iber. La tercer parte describe el método numérico de resolución del modelo y por último, en la cuarta sección se describe la fase de procesamiento del modelo en Iber y la selección de escenarios a simular.

### **3.2 Caracterización del tanque desarenador Sancancio**

#### **3.2.1 Geometría**

La geometría del tanque desarenador fue determinada mediante levantamiento topográfico con tecnología GPS diferencial (DGPS), del cual se obtuvieron como productos los planos de localización y detalle, y así mismo, el modelo 3D con el procesamiento de datos en la herramienta AutoCAD Civil 3D.



Figura 8: Levantamiento topográfico – tanque desarenador Sancancio (Oct-30-18).  
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 9 se presenta el modelo 3D del tanque y la Figura 10 presenta los componentes y detalles de corte de la geometría del desarenador Sancancio. El caudal captado del río Chinchiná ingresa al tanque por medio de un canal de entrada en concreto, el cual distribuye el caudal a dos unidades de desarenado (tanque 1 y tanque 2) que tienen compuertas de entrada y de descarga de sedimentos independientes. Ambos tanques cuentan con vertederos hacia el costado derecho de la estructura (en el sentido del flujo) a través de los cuales el agua pasa al canal de salida una vez cumplido el proceso de sedimentación.

En términos de área útil, el tanque 1 tiene una longitud de 19.85 m, un ancho de 7 m y una profundidad promedio de 2.57 m, por su parte, el tanque 2 tiene una longitud de 20.7 m, un ancho de 9.6 m y una profundidad promedio de 3.18 m para una capacidad total del tanque desarenador de la planta Sancancio de 989 m<sup>3</sup>. Ambas unidades de desarenado tienen una pendiente longitudinal de fondo del 3%.

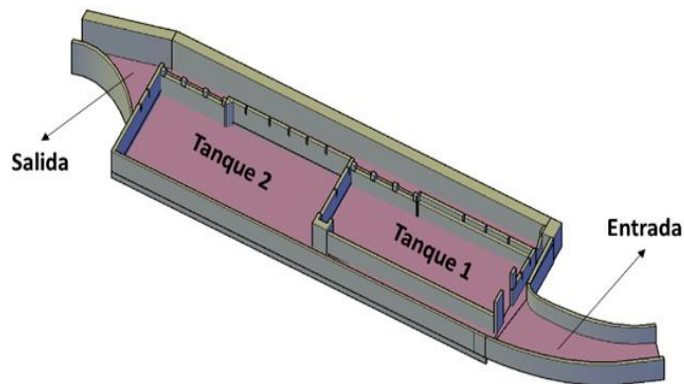


Figura 9: Modelo 3D - tanque desarenador Sancancio.  
Fuente: elaboración propia.

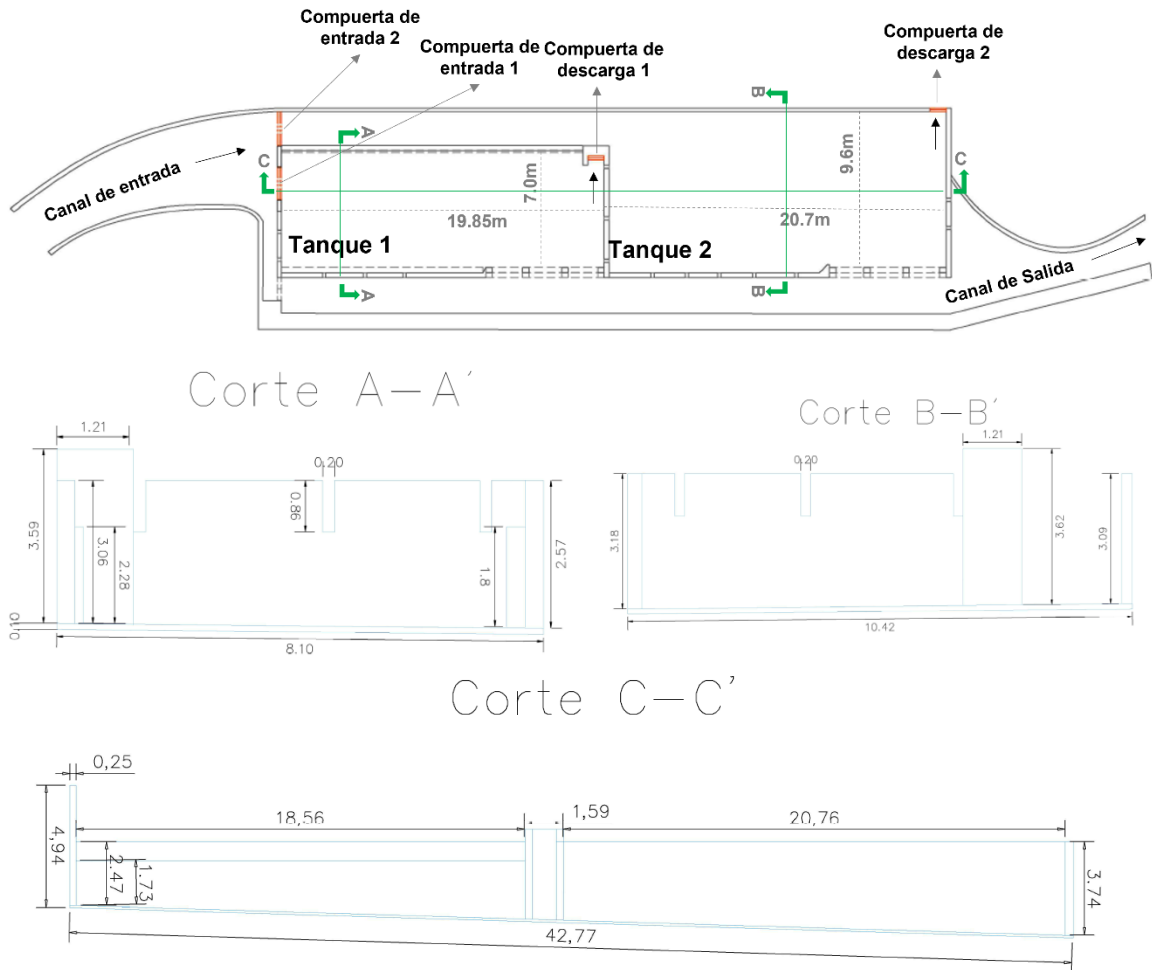


Figura 10: Geometría - tanque desarenador Sancancio.

Fuente: elaboración propia.

### 3.2.2 Mediciones en campo y toma de muestras

En el marco del proyecto “Evaluación de las eficiencias de los sistemas desarenadores de plantas menores y mayores” desarrollado por la CHEC y el Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento de la Universidad Tecnológica de Pereira, en el año 2014, se ejecutaron 7 campañas de monitoreo en el tanque desarenador Sancancio (GIAS, 2014).

Se realizaron mediciones de caudal de entrada, velocidades de flujo en el tanque, toma de muestras de agua para análisis de concentración de Sólidos Suspending Totales (SST) y Sólidos Sedimentables (SSED) y toma de muestras de sedimentos de fondo para análisis granulométrico. La Figura 11 muestra los sitios en los que fueron realizadas las diferentes mediciones.

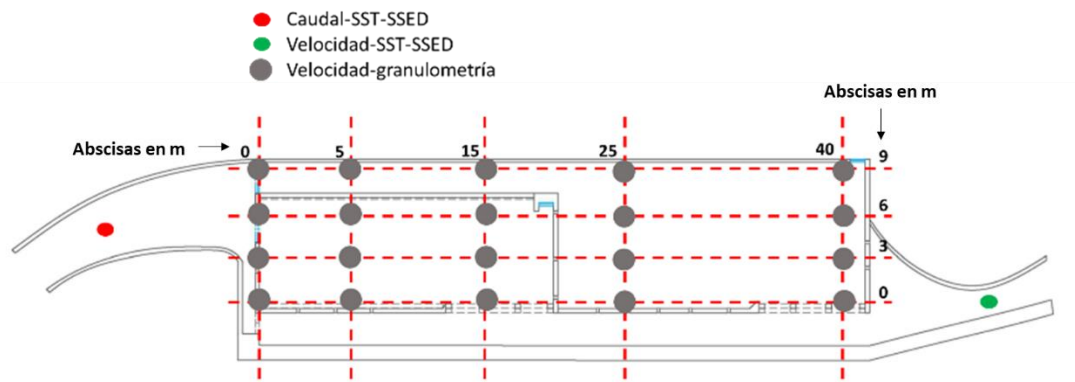


Figura 11: Localización de puntos de medición.

Fuente: elaboración propia.



Figura 12: Mediciones in situ y recolección de muestras.

Fuente: elaboración propia.



La Tabla 4 se presenta los resultados obtenidos para las campañas de monitoreo con respecto al caudal de entrada, concentración de sólidos a la entrada y salida y los valores de gravedad específica y D50 obtenidos para las muestras de sedimentos. Así mismo, se especifican en la tabla los métodos de análisis.

Tabla 4: Resultados campañas in situ: caudal, concentración de sólidos y granulometría.

Muestra	Caudal entrada (m <sup>3</sup> /s) (aforo por vadeo)	SSED (ml/l) (cono imhoff)		SST (mg/l) (secado entre 103 - 105 c°)		Gravedad específica (γ) (i.n.v. e - 128 - 07)	D50 (mm) (granulometría por tamiz)
		Entrada	Salida	Entrada	Salida		
1 (07-may)	0.46	1.8	1.5	97.0	106.0	2.651	0.36
2 (15-jul)	1.78	1.5	1.6	87.1	91.5	2.649	0.51
3 (14-ago)	1.39	4.5	4.5	160.0	170.0	2.560	0.49
4 (18-sep)	2.70	2.0	2.0	145.0	180.0	2.590	0.40
5 (08-oct)	1.98	4.3	4.2	174.0	162.0	2.650	0.55
6 (22-nov)	2.26	0.1	0.2	60.5	63.2	2.592	0.41
7 (16-nov)	3.46	1.6	2.7	334.0	355.5	2.594	0.38

Fuente: (GIAS, 2014).

Con respecto a datos de caudal de entrada, se observan valores que oscilan entre 0.46 y 3.46 m<sup>3</sup>/s. Para la concentración de SSED a la entrada y salida del tanque, se evidencian únicamente valores menores en la salida para las muestras 1 y 5, y para los SST en la muestra 5. Para el resto de las muestras, las concentraciones de sedimentos a la salida son mayores o iguales que en la entrada, evidenciando las problemáticas mencionadas del tanque desarenador, con respecto a efectos de resuspensión. Para el análisis granulométrico se observan valores de gravedad específica similares con un valor promedio de 2.61, por su parte el valor del D50 varía entre 0.36 y 0.55 mm, correspondiendo a arenas medias y gruesas de acuerdo con la clasificación del ISSS (Sociedad Internacional de la Ciencia del Suelo).

En la Tabla 5 se muestran las velocidades de flujo obtenidas en las diferentes campañas de monitoreo. Estas velocidades se midieron con un molinete de referencia OTT-C34 en un punto medio de la profundidad de cada uno de los puntos de medición descritos anteriormente en la Figura 11.

En general, se observa que para todas las condiciones de caudal de entrada, las velocidades mayores se presentan en la zona de entrada del tanque hasta los 15 – 25 m de longitud, por su parte las velocidades menores se registran hacia el centro de las dos unidades de desarenado y hacia la salida.

Tabla 5: Resultados de velocidad de flujo (m<sup>3</sup>/s) en el tanque desarenador para las diferentes campañas.

Muestra	Entrada	Longitud (m)					Salida	Ancho (m)
		0	5	15	25	40		
1	0.10	Velocidad (m/s)					0.00	0
		0.04	0.00	0.00	0.00	0.00		3
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		6
		0.08	0.04	0.00	0.00	0.00		9
		0.10	0.10	0.07	0.00	0.00		
2	0.28	Velocidad (m/s)					0.12	0
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		3
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		6
		0.29	0.22	0.00	0.00	0.00		9
		0.31	0.28	0.25	0.19	0.00		
3	0.26	Velocidad (m/s)					0.00	0
		0.04	0.04	0.00	0.00	0.00		3
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		6
		0.24	0.18	0.00	0.00	0.00		9
		0.22	0.21	0.19	0.19	0.04		
4	0.35	Velocidad (m/s)					0.15	0
		0.08	0.04	0.04	0.00	0.08		3
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.08		6
		0.33	0.28	0.08	0.00	0.09		9
		0.35	0.35	0.34	0.33	0.13		
5	0.29	Velocidad (m/s)					0.15	0
		0.07	0.00	0.00	0.00	0.00		

Muestra	Entrada	Longitud (m)					Salida	Ancho (m)
		0	5	15	25	40		
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		3
		0.25	0.19	0.00	0.00	0.00		6
		0.33	0.30	0.30	0.25	0.00		9
Muestra	Entrada	Longitud (m)					Salida	Ancho (m)
		0	5	15	25	40		
6	0.30	Velocidad (m/s)					0.15	0
		0.07	0.00	0.00	0.00	0.00		
		0.00	0.00	0.00	0.00	0.07		
		0.34	0.19	0.00	0.00	0.07		
		0.35	0.33	0.34	0.25	0.07	9	
Muestra	Entrada (m/s)	Longitud (m)					Salida (m/s)	Ancho (m)
		0	5	15	25	40		
7	0.43	Velocidad (m/s)					0.25	0
		0.09	0.00	0.00	0.00	0.12		
		0.00	0.00	0.10	0.00	0.12		
		0.48	0.43	0.08	0.00	0.13		
		0.50	0.49	0.49	0.46	0.13	9	

Fuente: (GIAS, 2014).

### 3.2.3 Caudales históricos

El tanque desarenador Sancancio cuenta con un instrumento de medición y control (limnómetro), ubicado en el canal de entrada del tanque a través del cual es posible determinar el caudal según la altura de la lámina de agua en el canal y le permite a la CHEC recolectar registros diarios del caudal de entrada para fines de control y seguimiento. Con el objetivo de definir los caudales típicos de operación (medio, mínimo y máximo) del tanque, se realizó un análisis de los registros históricos de caudal de 6 años (2014 – 2019). A continuación se presentan los valores obtenidos; el caudal promedio de operación del tanque se encuentra entre los 2 y 3 m<sup>3</sup>/s, para los caudales mínimos se observan valores entre 0.5 y 1.7 m<sup>3</sup>/s y para el caso de los caudales máximos de operación se observan valores superiores a los 3 m<sup>3</sup>/s.

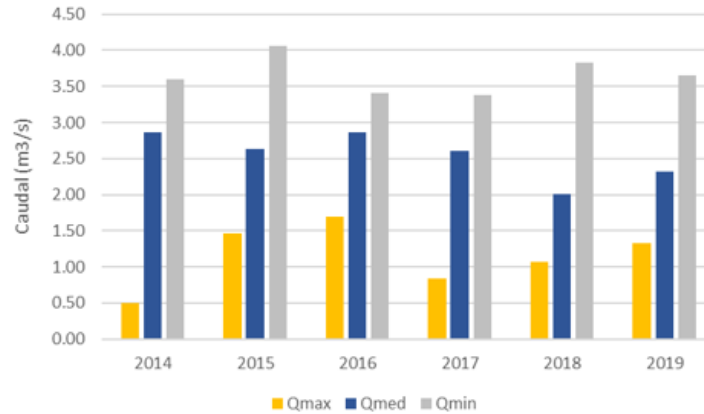


Figura 13: Registros históricos de caudal.

Fuente: (Información suministrada por la CHEC, año 2019).

De acuerdo con las características descritas, el tanque desarenador Sancancio es un tanque de flujo horizontal, que cuenta con las cuatro zonas principales de este tipo de tanque: zona de entrada, zona de sedimentación, zona de lodos y zona de salida. De acuerdo con su operación, corresponde a un tanque desarenador de baja velocidad, de lavado intermitente y construido con una disposición en paralelo donde predomina el transporte por suspensión.

### 3.3 Modelación hidrodinámica mediante Iber

Iber es un modelo numérico bidimensional plano en la horizontal, de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen permanente o no, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El modelo consta de 3 módulos de cálculo principales correspondientes al módulo hidrodinámico, módulo de turbulencia y módulo de transporte de sedimentos, los cuales trabajan sobre una malla no estructurada de volúmenes finitos formada por elementos triangulares y/o cuadriláteros.

El módulo hidrodinámico, que constituye la base de Iber, resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad (ecuaciones de St. Venant 2D), por su parte, el módulo de turbulencia permite incluir las tensiones turbulentas en el cálculo hidrodinámico, pudiéndose utilizar para ello diferentes modelos de turbulencia para aguas someras con diferente grado de complejidad, para esto, Iber incluye un modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y un modelo  $k-\epsilon$ .

Finalmente el módulo de transporte de sedimentos resuelve las ecuaciones de transporte de fondo y transporte turbulento en suspensión, calculando a partir del balance de masa de sedimento la evolución de la cota de fondo (FLUMEN, 2014). A continuación se presenta un resumen de las diferentes ecuaciones empleadas por Iber, resaltando únicamente las utilizadas para el estudio del tanque desarenador Sancancio.

### **3.3.1 Ecuaciones hidrodinámicas**

Si bien las ecuaciones de Navier-Stokes son aun ampliamente aceptadas como la base universal para modelar el movimiento de los fluidos y con frecuencia se resuelven utilizando métodos computacionales numéricos, se sabe que dada su complejidad no poseen una solución analítica salvo en ciertos casos particulares y que además se ha demostrado que no describen con precisión algunos fluidos compresibles (Reddy et al., 2019). En las últimas décadas dichas ecuaciones han sido objeto de modificación y/o ampliación y a partir de ellas se ha obtenido, asumiendo diversas hipótesis simplificativas, el sistema de ecuaciones en dos dimensiones conocido como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales. En la actualidad, los modelos numéricos basados en las ecuaciones de Saint-Venant son los más utilizados en estudios de dinámica fluvial y litoral, evaluación de zonas inundables y cálculo de transporte de sedimentos y contaminantes (FLUMEN, 2014).

Con base en lo descrito en el manual de referencia hidráulico de Iber (FLUMEN, 2014), las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en la profundidad; la hipótesis de presión hidrostática se cumple razonablemente en el flujo de ríos, así como en las corrientes generadas por la marea en estuarios. Igualmente, la hipótesis de distribución uniforme de velocidad en la profundidad se cumple habitualmente en ríos y estuarios, aunque pueden existir zonas en las que dicha hipótesis no se cumpla debido a flujos locales tridimensionales, razón por la cual en algunos casos es necesario estudiar la extensión de dichas zonas y su posible consecuencia en los resultados del modelo. En el módulo hidrodinámico se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de momentum en las dos direcciones horizontales:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s \quad \text{Ec. (1).}$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h t_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h t_{xy}^e}{\partial y} + M_x \quad \text{Ec. (2).}$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g h^2}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + 2 \Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h t_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h t_{yy}^e}{\partial y} + M_y \quad \text{Ec. (3).}$$

Donde  $h$  es la altura de agua (calado),  $U_x$  y  $U_y$  las velocidades horizontales promedias en la profundidad,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $Z_s$  la elevación de la lámina libre,  $T_s$  la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento,  $T_b$  la fricción debido al rozamiento del fondo,  $\rho$  la densidad del agua,  $\Omega$  la velocidad angular de rotación de la tierra,  $\lambda$  la latitud del punto considerado,  $T_{xx}^e$ ,  $T_{xy}^e$ ,  $T_{yy}^e$  las tensiones tangenciales efectivas horizontales y  $M_s$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  son respectivamente los términos fuente/sumidero de masa y de momento, mediante los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros (FLUMEN, 2014).

### 3.3.1.1. Fricción de fondo

De acuerdo con lo definido en FLUMEN (2014), el fondo ejerce una fuerza de rozamiento sobre el fluido que es equivalente al rozamiento con una pared; la fricción del fondo tiene un doble efecto en las ecuaciones de flujo, por un lado produce una fuerza de fricción que se opone a la velocidad media, y por otro lado, produce turbulencia, ambos efectos se pueden caracterizar por la velocidad de fricción  $U_f$ , que no es más que una forma de expresar la tensión tangencial de fondo con unidades de velocidad:

$$U_f = \sqrt{\frac{T_b}{\rho}} \quad \text{Ec. (4).}$$

Donde  $T_b$  es el módulo de la fuerza de fricción de fondo y  $\rho$  es la densidad del agua.

En los modelos promediados en profundidad no es posible calcular la velocidad de fricción por medio de funciones de pared estándar, tal y como se hace en los contornos tipo pared, dado que las ecuaciones no se resuelven en la dirección vertical. Por lo tanto, es necesario relacionar la velocidad de fricción  $U_f$  con la velocidad media promediada en profundidad mediante un coeficiente de fricción. La tensión de fondo se puede expresar como:

$$T_b = \rho U_f^2 = \rho C_f |U|^2 \quad \text{Ec. (5).}$$

Donde  $C_f$  es el coeficiente de fricción de fondo. En la literatura existen diferentes expresiones para la aproximación de este coeficiente, no obstante, la mayoría de ellas asumen flujo uniforme en canal con un perfil logarítmico de velocidad en la profundidad Calzas Perez (2013) y FLUMEN (2014).

La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning, la cual utiliza el coeficiente de Manning  $n$  como parámetro:

$$C_f = g \frac{n^2}{h^{1/3}} \quad \text{Ec. (6).}$$

### 3.3.2 Modelo de turbulencia

Gran parte de los estudios desarrollados en la ingeniería hidráulica implican el análisis de flujos a lámina libre, muchos de cuales pueden considerarse poco profundos, es decir que existe una relación entre las dimensiones vertical y horizontal, pequeña. En general, se considera que la totalidad de flujos en lámina libre son turbulentos, condición que juega un papel fundamental en los procesos de transporte y mezcla de contaminantes y sedimentos (FLUMEN, 2014) y por consiguiente, considerar un modelo de turbulencia garantiza resultados más precisos en las simulaciones hidráulicas.

Matemáticamente, un modelo de turbulencia aproxima el término de las tensiones de Reynolds relacionándolas con las variables medias, de modo que estos no describen los detalles de las fluctuaciones turbulentas, sino el efecto de dichas fluctuaciones sobre las variables medias (Bladé, 2005).

Los tipos de modelo de turbulencia que emplea Iber, son RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), los cuales resuelven las ecuaciones de Navier Stokes.

El modelo de turbulencia tipo RANS seleccionado para el estudio corresponde al modelo de longitud de mezcla. En estructuras hidráulicas como canales en lámina libre con codos pronunciados y zonas de recirculación, suele ser necesario utilizar por lo menos un modelo de longitud de mezcla, pudiendo ser necesario utilizar un modelo k-ε. (FLUMEN, 2014) (Rastogi y Rodi, 1978). El objetivo de los modelos de turbulencia es calcular las tensiones de Reynolds, para su cálculo se utiliza la aproximación de Boussinesq que relaciona las tensiones de Reynolds con los gradientes de velocidad media a través de la viscosidad turbulenta como se muestra en la Ec. (8); el modelo de turbulencia proporciona la viscosidad turbulenta para utilizarla en la expresión.

$$\frac{-\tau_{ij}}{\rho} = V_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad \text{Ec. (7).}$$

En el modelo de longitud de mezcla para aguas someras, la viscosidad turbulenta se calcula a partir de las características locales del flujo como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_t = [\min(0.267 k h, Kd_{wall})]^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2.34 \frac{U_f}{kh}\right)^2} \quad \text{Ec. (8).}$$

Donde k es la constante de Von Karman, correspondiente a un valor de 0.41. Es un modelo algebraico relativamente sencillo, que permite obtener resultados aceptables en flujos en los que la turbulencia está generada de manera local, principalmente por el rozamiento del fondo. Tiene en cuenta la producción de turbulencia debido a gradientes horizontales de velocidad, pero no considera el transporte convectivo ni la disipación de turbulencia. En flujos con zonas de recirculación fuertes los resultados obtenidos con el modelo de longitud de mezcla empeoran (FLUMEN, 2014).



### 3.3.3 Modelo de transporte de sedimentos

Para este módulo, Iber resuelve las ecuaciones de transporte de sedimentos no-cohesivos en régimen no estacionario. Aquí se resuelven tanto las ecuaciones de transporte de fondo como las ecuaciones de transporte en suspensión, modelando el acoplamiento entre la carga de fondo y la carga en suspensión mediante un término de sedimentación/resuspensión. El caudal sólido de fondo se calcula mediante una formulación empírica, entre los cuales Iber permite la selección del modelo de Meyer-Peter Muller o la de Van Rijn. Por su parte, para el transporte de sedimentos en suspensión se modela mediante una ecuación de transporte turbulento promediada en profundidad.

La variación de la cota del fondo se calcula mediante la ecuación de conservación del sedimento de Exner:

$$(1 - p) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{sb,x}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sb,y}}{\partial y} = D - E \quad \text{Ec. (9).}$$

Donde  $p$  es la porosidad de los sedimentos que forman el lecho,  $Z_b$  es la cota del fondo,  $q_{sb,x}$  y  $q_{sb,y}$  son las dos componentes del caudal sólido de fondo y la diferencia  $D-E$  representa un balance entre carga de fondo y carga en suspensión.

#### 3.3.3.1. Transporte de fondo

El caudal sólido de fondo se calcula a partir de formulaciones empíricas, existen varias formulaciones ampliamente conocidas y utilizadas entre las cuales se encuentra la de Meyer-Peter Müller empleada en el presente estudio. Dicha ecuación, deducida para fondos de grava de hasta 30 mm de diámetro, calcula el caudal sólido de fondo con la siguiente expresión:

$$q_{sb}^* = 8 (\tau_{bs}^* - \tau_c^*)^{3/2} = 8 (\tau_{bs}^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad \text{Ec. (10).}$$

Donde el caudal sólido adimensional se calcula como:

$$q_{sb}^* = \frac{q_{sb}}{\sqrt{\left(\frac{p_s-1}{p}\right)g D_s^3}} \quad \text{Ec. (11).}$$

En caso de fondo plano se considera una tensión crítica de fondo adimensional de  $T_c^* = 0.047$ . Tras volver a analizar los datos utilizados para derivar la ecuación anterior, Wong (2003) y Wong & Parker (2006) sugieren la siguiente corrección:

$$q_{sb}^* = 3.97 (\tau_{bs}^* - \tau_c^*)^{3/2} \quad \text{Ec. (12).}$$

En caso de fondo plano se considera  $T_c^* = 0.0495$ . Esta última formulación corregida es la incluida en Iber.

### 3.3.3.2. Transporte en suspensión

El transporte de sedimentos en suspensión se modela mediante una ecuación promediada en la profundidad. La ecuación implementada en el código de Iber es la siguiente:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hU_xC}{\partial x} + \frac{\partial hU_yC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left[ \Gamma + \frac{v_t}{S_{c,t}} \right] h \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] + \frac{\partial D_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial D_{sy}}{\partial y} + (E - D) \quad \text{Ec. (13).}$$

Donde  $C$  es la concentración de sólidos en suspensión promediada en profundidad,  $U_x$ ,  $U_y$  son las dos componentes de la velocidad horizontal promediadas en profundidad,  $v_t$  es la viscosidad turbulenta,  $\Gamma$  es el coeficiente de difusión molecular de sólidos en suspensión, y  $S_{c,t}$  es el número de Schmidt, que relaciona el coeficiente de difusión turbulenta de momento con el coeficiente de difusión turbulenta de sólidos en suspensión (FLUMEN, 2014).

$D_{sx}$  y  $D_{sy}$  modelan la dispersión de sedimento en suspensión debido a la no homogeneidad del perfil de velocidades y de concentración de sedimento en la dirección vertical. Normalmente su efecto se desprecia en los modelos 2D de aguas someras, a pesar de que su importancia puede ser relevante cuando las concentraciones y velocidades varíen en profundidad, como por ejemplo en canales con codos o radios de curvatura pequeños.

Los términos E y D modelan respectivamente la puesta en suspensión de sólidos que se encuentran en el fondo (resuspensión de sedimento) y la deposición de sólidos en suspensión en el fondo del lecho. Su diferencia representa un balance, y por lo tanto un acoplamiento, entre carga de fondo y carga en suspensión (FLUMEN, 2014).

Para cálculo del término de resuspensión/deposición (E-D), Iber cuenta con 3 formulaciones: Van Rijn (1987), Smith (1977) y Ariathurai y Arulanandan (1978), para el presente estudio se emplea la primera de ellas la cual se evalúa a partir de la siguiente expresión:

$$E - D = W_s(c_a^* - C_a) = \alpha W_s(C^* - C) \quad \text{Ec. (14).}$$

Donde de acuerdo con (FLUMEN, 2014),  $\alpha$  es un coeficiente que relaciona la concentración media de partículas en suspensión y la concentración cerca del lecho del río,  $W_s$  es la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas,  $C$  es la concentración de sólidos en suspensión promediada en profundidad,  $C^*$  es la concentración de sólidos en suspensión promediada en profundidad en condiciones de equilibrio (capacidad de transporte de sólidos en suspensión),  $C_a$ , y  $C_a^*$  son respectivamente la concentración instantánea y la concentración de equilibrio a una altura  $z=a$  sobre el lecho del río, siendo "a" el espesor de la capa en la cual se produce el transporte de fondo. Dicho espesor se puede evaluar de forma aproximada a partir del diámetro del sedimento. El coeficiente  $\alpha$  se calcula a partir de la distribución de concentración en la vertical (perfil de Rouse) a partir de la siguiente integral:

$$\alpha = \frac{h-a}{\int_a^h \left( \frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^{W_s/k.U_*} dz} \quad a = 3xD_{50} \quad \text{Ec. (15).}$$

Siendo  $K=0.41$  la constante de Von Karman.

La concentración de equilibrio cerca del lecho del río propuesta por van Rijn (1987) es:

$$c_a^* = 0.015 \frac{D_{50} T^{1.5}}{a D_s^{0.3}} \quad \text{Ec. (16).}$$

$$a = k_s \quad K_s = 3 D_s \quad D_* = D \left( \frac{gR}{v^2} \right)^{1/3}$$

### 3.4 Resolución numérica

Existen diversos métodos de aproximación numérica que permiten resolver problemas en la dinámica de fluidos, el modelo numérico Iber resuelve tanto las ecuaciones hidrodinámicas, como las correspondientes a los modelos de turbulencia y de transporte de sedimentos, en forma integral por el método de volúmenes finitos, el cual es uno de los métodos más utilizados en los estudios de dinámica de fluidos computacional (FLUMEN, 2014).

De forma general, el método consta de los siguientes pasos: 1: descomposición del dominio en volúmenes de control, 2: formulación de las ecuaciones integrales de la conservación para cada volumen de control del dominio, 3: aproximación numérica de las diferentes ecuaciones integrales, 4: aproximación de los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables nodales, y 5: Solución el sistema algebraico obtenido. Con respecto a ventajas, es importante mencionar que dicho método realiza la discretización espacial directamente en el espacio físico del problema y evita problemas de transformación en cambios de coordenadas, lo cual permite la utilización de mallas estructuradas o no, haciéndolo idóneo para la resolución de problemas de flujo con geometrías complejas (Vinaroz, 2018).

A diferencia de otros métodos, como lo es el de diferencias finitas, en el método de volúmenes finitos se toman como punto de discretización los centros de las celdas y no los nodos, condición que implica que en ningún nodo de la malla se satisfacen las condiciones de contorno directamente y por lo tanto, se toma la forma integral de la ecuación y se hacen las aproximaciones sobre las caras de los volúmenes de control (Vinaroz, 2018).

### 3.5 Pre-proceso en el modelo Iber

La modelación hidrodinámica en Iber se desarrolla a través de las siguientes fases:

### 3.5.1 Creación de la geometría y malla de cálculo

La creación de la geometría del tanque Sancancio se realiza mediante el software Civil 3D, con la información de las coordenadas X, Y y Z de los puntos levantados con topografía (ver Figura 14), para posteriormente crear las superficies del tanque. Una vez realizado este paso se procede a importar la información de puntos desde el modelo Iber, y mediante las opciones de dibujo del programa (unión de puntos y creación de superficies) se construye la geometría del tanque como se muestra en la Figura 15. Con todas las superficies del modelo definidas se completa la creación de la geometría y procede con la siguiente fase.

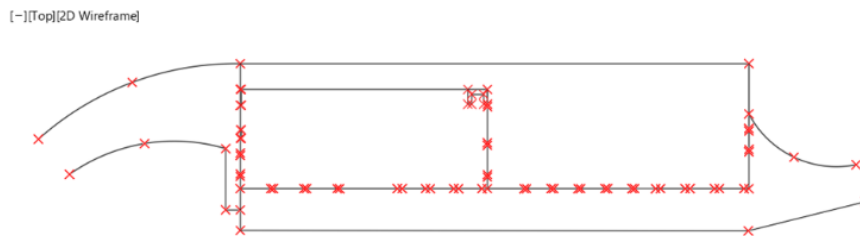


Figura 14: Procesamiento de geometría en Civil 3D.

Fuente: elaboración propia.

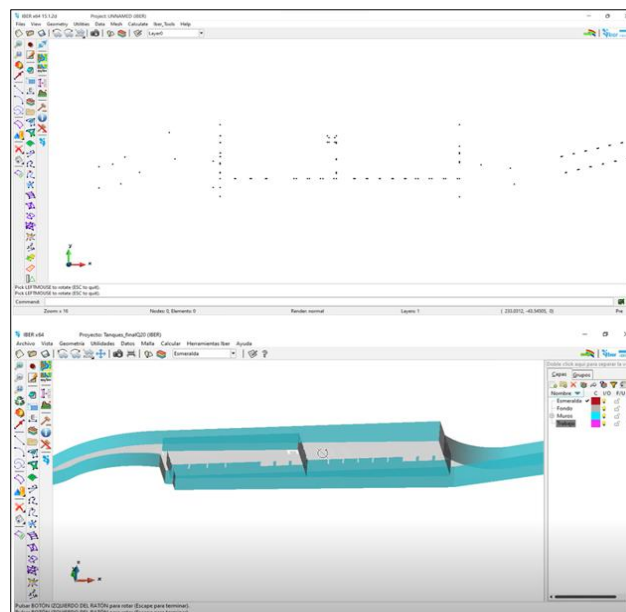


Figura 15: Creación de geometría en Iber mediante importación de puntos de Civil 3D.

Fuente: elaboración propia.

Resolver una ecuación diferencial por el método de volúmenes finitos implica realizar una discretización espacial del dominio a estudiar, para lo cual se divide el dominio en celdas de tamaño relativamente pequeño (malla de cálculo). El modelo Iber puede trabajar tanto con elementos triangulares como con cuadriláteros, o con mallas mixtas de triángulos y cuadriláteros. Las mallas de cálculo pueden ser a su vez regulares o irregulares así como estructuradas o no estructuradas, la principal ventaja de trabajar con mallas no estructuradas es la facilidad con que se adaptan a cualquier geometría, puesto que no es necesario que la malla tenga ningún tipo de organización o estructura interna, por lo tanto son más utilizadas en casos de modelación de cauces naturales, los cuales no tienen formas precisas (FLUMEN, 2014). Sin embargo, de acuerdo con la literatura científica consultada, para la creación de la malla del presente caso de aplicación, se recomienda asignar una malla estructurada debido a que esta es una estructura conformada por formas geométricas precisas. Por lo tanto, se hace más sencillo la asignación de este tipo de mallas que se crean únicamente en superficies de 4 lados como las que fueron conformadas en el modelo.

Para el tamaño de la malla del modelo se define un valor de 0.25 divisiones por líneas en cada una de las superficies creadas. Este valor se asigna con el fin de obtener una buena precisión en los resultados y se considera como un valor adecuado para el dominio a modelar. En la Figura 16 se muestra la malla generada para un tamaño de 0.25 el cual resulta adecuado para la modelación de los escenarios 1 al 6, no obstante, al momento de realizar la simulación del escenario 7 con datos de sedimentos, fue necesario realizar un cambio en el tamaño de la malla a 0.5 dado que con el valor de 0.25 el módulo de sedimentos presenta un error de cómputo.

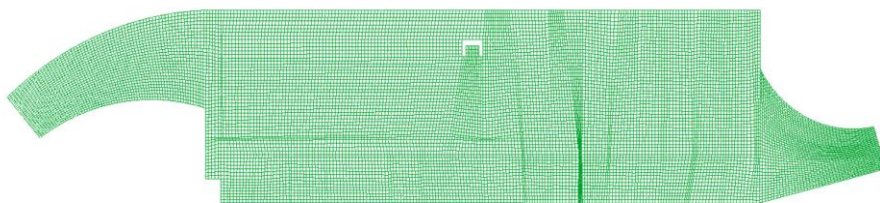


Figura 16: Generación de malla de cálculo (tamaño: 0.25).

Fuente: elaboración propia.

### 3.5.2 Asignación de condiciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos

Para la modelación del tanque Sancancio se asignaron condiciones internas y de contorno como se describe a continuación.

- **Condiciones de contorno:**

Como condición de contorno se define la entrada y la salida del flujo. Para la entrada del flujo es posible asignar un caudal total, un caudal específico o una cota de agua, en función del régimen (subcrítico, crítico, o supercrítico). Para el modelo del tanque Sancancio se asigna un caudal total y régimen crítico/subcrítico como se presenta en la Figura 18.

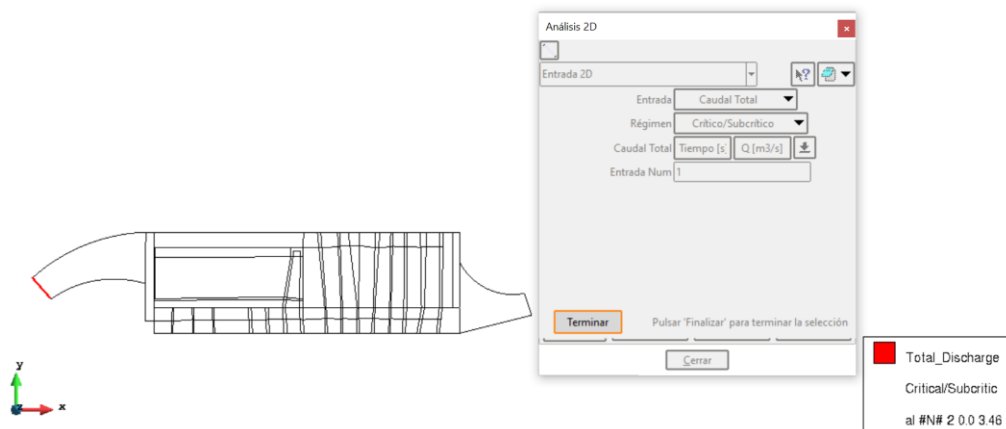


Figura 17: Definición de condición de contorno a la entrada.

Fuente: elaboración propia.

Para las condiciones de contorno de salida solo se especifica si el régimen es subcrítico y seleccionar una condición de tipo vertedero, de cota o calado específico o una curva de gasto. Para el presente estudio se selecciona una condición de flujo subcrítico y se asume una condición tipo vertedero de 1.6 m de altura y se asigna en la zona que representa la salida (ver Figura 18). Esta condición de salida se aplica porque aguas abajo del tanque desarenador se localiza el tanque de carga de la planta y este condiciona el nivel del flujo a la salida del desarenador. Para la definición de la cota de 1.6 m se realizan múltiples corridas del modelo hasta encontrar coherencia entre el calado real y el simulado.

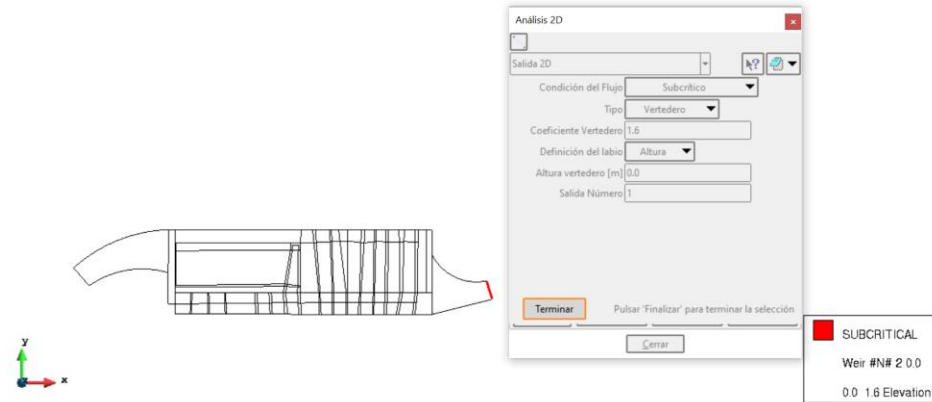


Figura 18: Definición de condición de contorno a la salida.  
Fuente: elaboración propia.

- **Condiciones internas:**

Como condiciones internas se pueden asignar vertederos, compuertas, combinación de vertedero y compuerta o un coeficiente de pérdidas localizadas. Para el presente ejercicio se asignan como condición los vertederos que existen en el tanque. Para ello es necesario conocer la cota del vertedero e introducirlo en el modelo (ver Figura 19).

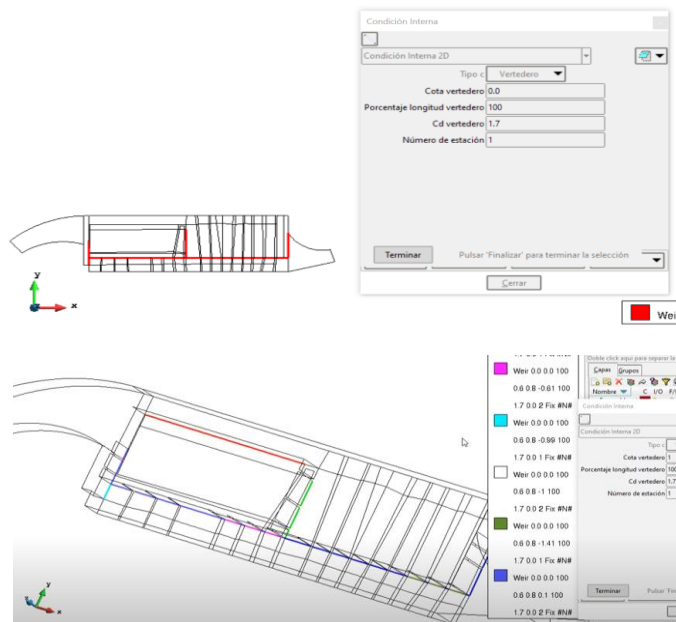


Figura 19: Asignación de condiciones internas – vertederos.  
Fuente: elaboración propia.



Para el transporte de fondo en el tanque desarenador, se selecciona como caudal sólido la opción de *Capacidad de arrastre*. Con esta opción se le indica al modelo que el caudal sólido de entrada corresponde a la capacidad de arrastre del flujo en la entrada (ver Figura 20), la cual depende del modelo de transporte de fondo seleccionado: Meyer-Petter&Muller. Este modelo se selecciona con base en los antecedentes de modelación descritos en el capítulo 2 y dado que los tamaños de partícula muestreados en el tanque no superan los 30 mm de diámetro, condición que se adapta a dicho modelo.

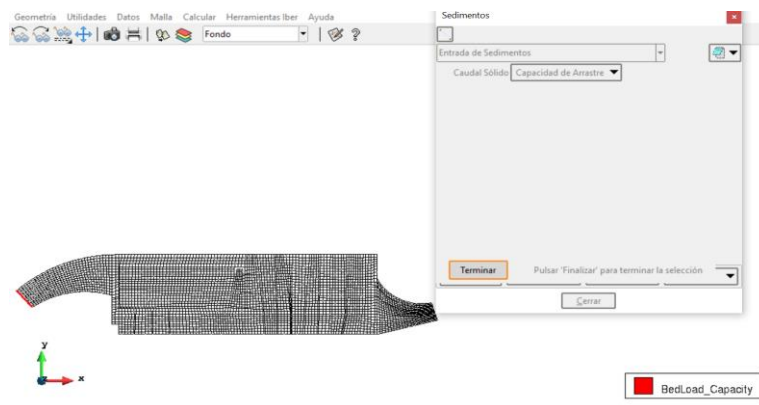


Figura 20: Condición de entrada de sedimentos de fondo.

Fuente: elaboración propia.

Para el transporte en suspensión, se asigna una concentración inicial de sedimento en suspensión, correspondiente a la concentración obtenida de las mediciones en campo (ver Figura 21). El modelo escogido para el transporte de sedimentos en suspensión es el de Van Rijn.

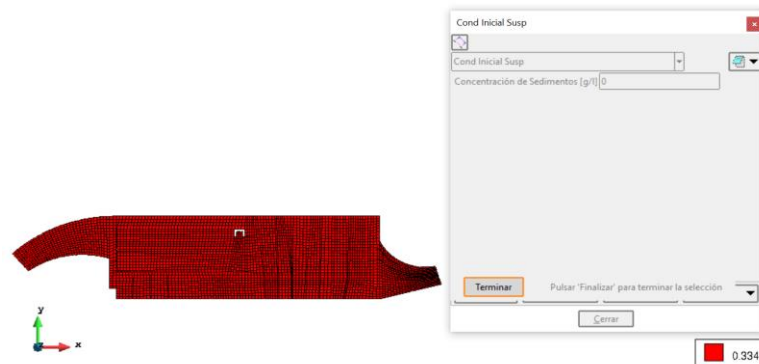


Figura 21: Condición inicial de sedimentos en suspensión.

Fuente: elaboración propia.

### 3.5.3 Asignación de valores de rugosidad

La rugosidad se asigna a través del coeficiente de rugosidad de Manning. Iber permite hacer una selección de acuerdo con un uso del suelo y después se asigna a las superficies que forman la geometría. Teniendo en cuenta que el tanque es construido en concreto reforzado, se define un valor del coeficiente de Manning de 0.025 para todas las superficies como se muestra a continuación.

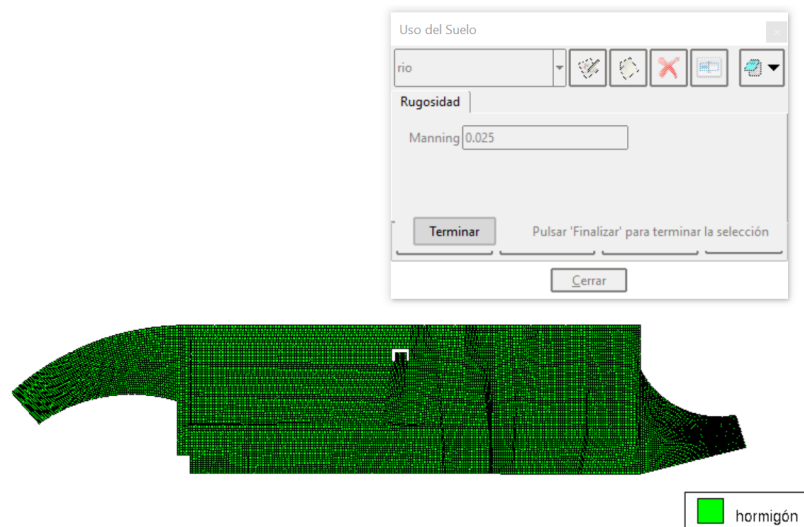


Figura 22: Asignación de rugosidad.

Fuente: elaboración propia.

### 3.5.4 Escenarios de simulación

Previo a la selección y asignación de parámetros de modelación para la ejecución del cálculo, se define que para la modelación se correrán siete escenarios correspondientes a las campañas de monitoreo descritas anteriormente descritas (numeral 3.2.2). Seis escenarios, corresponderán a la modelación hidráulica, sin sedimentos, de las primera seis campañas realizadas, con el fin de evaluar el comportamiento hidráulico para diferentes condiciones de operación. Por último, el séptimo escenario, corresponderá a la modelación hidráulica con sedimentos de la última campaña de medición correspondiente al valor de caudal de 3.46 m<sup>3</sup>/s (ver Tabla 6).

Esto se define de acuerdo con el análisis de caudales históricos, donde se evidenció que los caudales máximos de operación del tanque son del orden de 3 a 4 m<sup>3</sup>/s y por lo tanto, se considera relevante conocer el comportamiento del transporte de sedimentos bajo un escenario de operación con condición de capacidad máxima.

Tabla 6: Escenarios de simulación hidráulica.

Escenario	Caudal de entrada (m <sup>3</sup> /s)	Módulo hidrodinámico	Módulo de sedimentos
1	0.46	x	
2	1.39	x	
3	1.78	x	
4	1.98	x	
5	2.26	x	
6	2.70	x	
7	3.46	x	x

Fuente: elaboración propia.

### 3.5.5 Selección y asignación de parámetros de cálculo

- **Parámetros de tiempo y generales:**

En la Tabla 7 se presentan los parámetros generales asignados a cada uno de los escenarios.

Tabla 7: Parámetros de tiempo y generales de las simulaciones.

Esc	Módulo hidrod.	Módulo sedim.	Tamaño cuadrícula malla (m)	Cantidad de elementos cuadrilaterales	Cantidad de nodos	Tiempo máximo de simulación (seg)	Intervalo de resultados (seg)	N° Courant
1	X							0.45
2	X							
3	X							
4	X		0.25	14588	14970	1200	100	
5	X							
6	X							
7	X	X	0.5	3836	4030	500000	10000	

Fuente: elaboración propia.

- **Modelo de turbulencia y sedimentos:**

Para el escenario 7, en el cual se corre el módulo de sedimentos, se asigna el modelo de turbulencia de longitud de mezcla y se asignan los modelos y parámetros mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8: Parámetros de cálculo módulo de sedimentos – escenario 7.

Transporte sedimentos de fondo				Transporte sedimento en suspensión					
Modelo	D50 (mm)	Poros.	Dens. relativa T. Fondo	Modelo	Coef. de difusión (m <sup>2</sup> /s)	Nº Schmidt	Diam. Sed. en susp. (mm)	Poros.	Densidad relativa SS
Meyer-Petter&Mu ller	0.4	0.4	2.59	Van Rijn	0.001	1.1	0.15	0.4	2.59

Fuente: elaboración propia.

### 3.6 Conclusión

El capítulo 3 explicó la forma en que se desarrollaron las fases metodológicas del estudio, agrupadas en dos fases principales. 1) mediciones en campo, donde se realizó un trabajo de levantamiento topográfico y siete campañas de mediciones de aforos y velocidades de flujo, toma de muestras de agua para análisis en laboratorio y toma de muestra de lodos para análisis granulométrico. 2) Modelación mediante Iber, donde se describieron las ecuaciones de los métodos seleccionados para la simulación y los pasos desarrollados durante la fase de pre-proceso y ejecución de cálculo del modelo. Se definieron siete escenarios de simulación para el análisis de la hidrodinámica de todos caudales medidos y del módulo de sedimentos para el caudal máximo. En el siguiente capítulo presentarán los resultados de la modelación y su análisis.

## **4. Capítulo 4 – Resultados de modelación**

### **4.1 Introducción**

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos a través del modelo numérico Iber. Para ello se presentan los resultados más relevantes de la hidráulica como lo son el calado y velocidad del flujo, y del transporte de sedimentos, como la concentración de sólidos en suspensión y la erosión/deposición. Posteriormente, se presenta una sección de análisis de resultados, en la cual se describe principalmente la dinámica del transporte de sedimentos en el tanque desarenador y se analizan otros aspectos relacionados con su diseño, operación y mantenimiento, limitantes y otros estudios de aplicación.

### **4.2 Resultados de la modelación Hidráulica.**

La simulación hidrodinámica realizada presenta los resultados de calado obtenidos según el caudal simulado. En la Figura 23 se observa que para todos los caudales la profundidad menor se presenta en el canal de entrada y en la zona de sedimentación del tanque 1, la profundidad aumenta a medida que el flujo avanza hacia salida, observándose las profundidades mayores en el canal de salida.

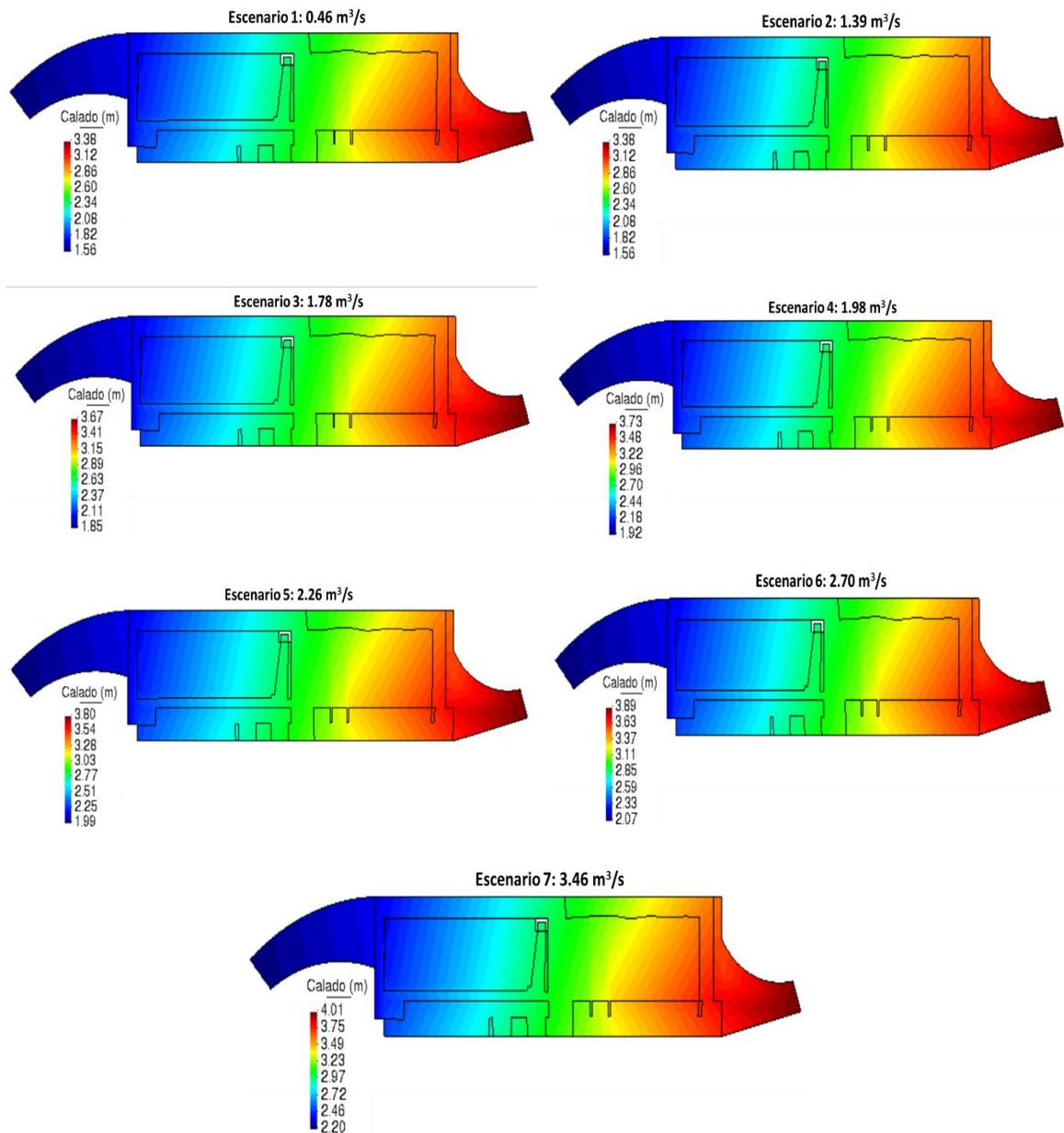
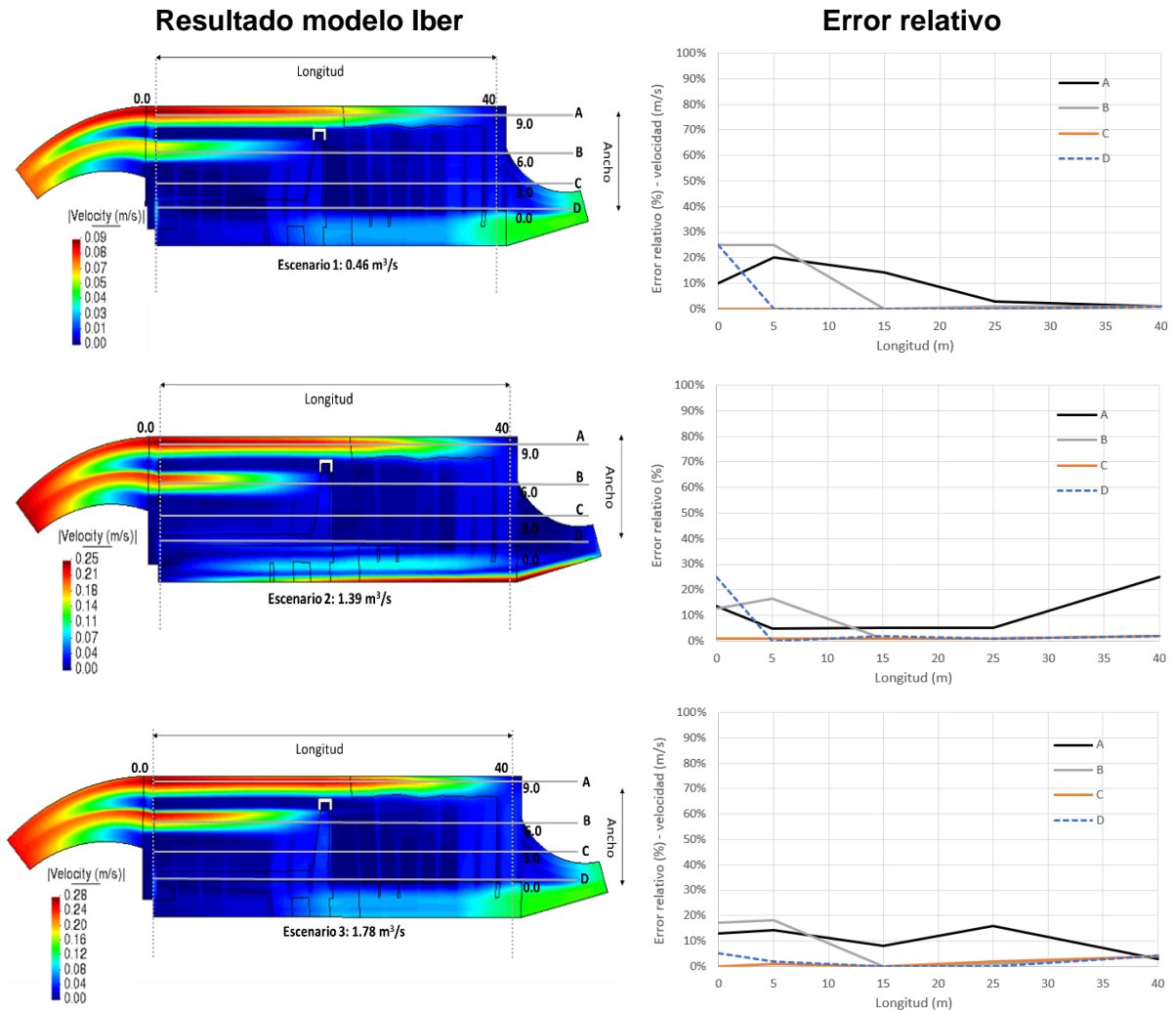


Figura 23: Resultados de la hidrodinámica tanque Sancancio – Calado (m).

Fuente: elaboración propia.

A continuación en la Figura 24 se presentan los resultados obtenidos con el modelo Iber para la variable de velocidad y el error relativo porcentual calculado para cada uno de los perfiles analizados (A, B, C y D) señalados en la imágenes de resultados de Iber.

Este error relativo porcentual se calcula a partir de los resultados obtenidos con Iber y los resultados obtenidos del estudio de referencia "Evaluación de las eficiencias de los sistemas desarenadores de plantas menores y mayores" desarrollado por la CHEC y el Grupo de Investigación en Agua y Saneamiento de la Universidad Tecnológica de Pereira.



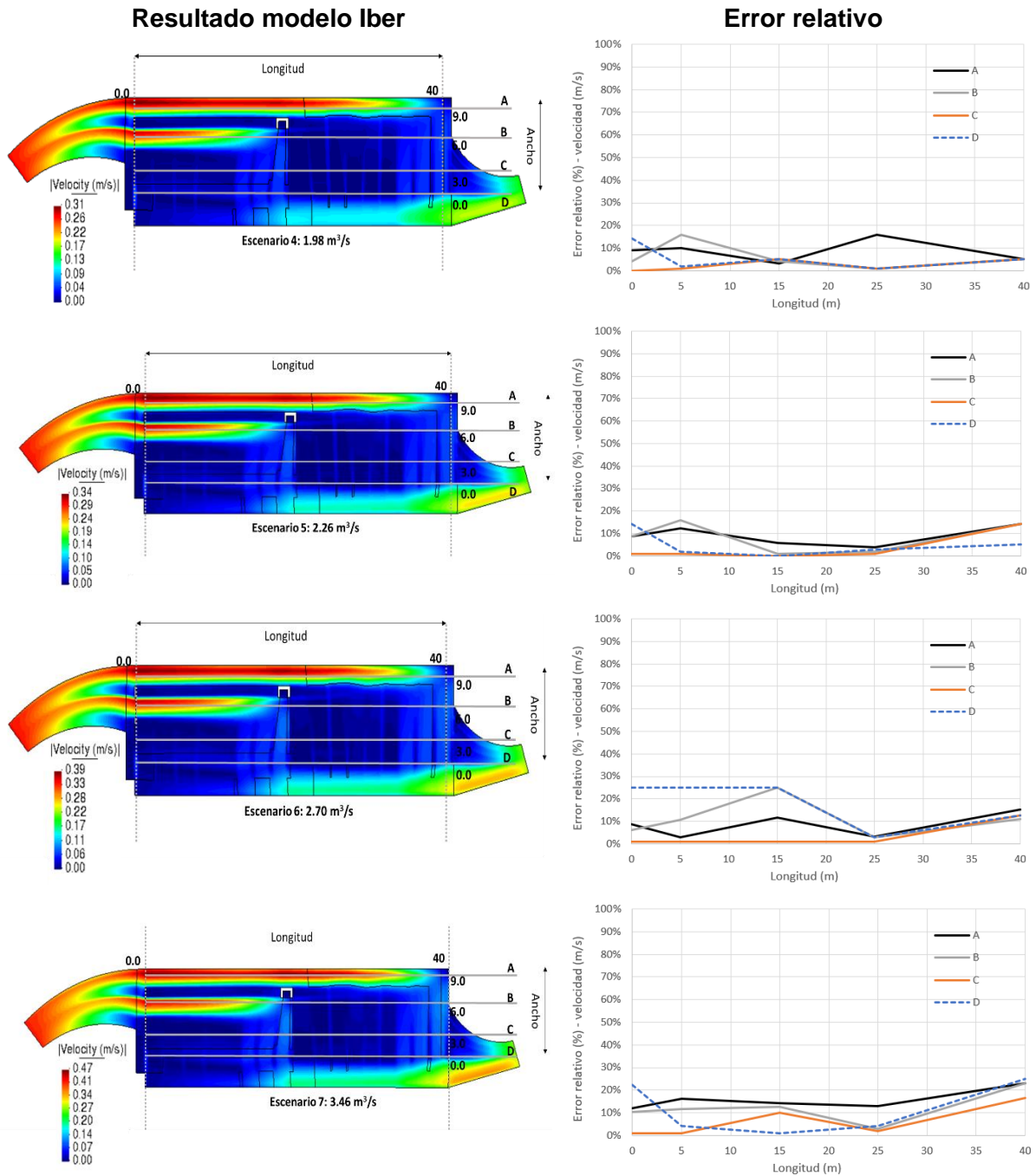


Figura 24: Resultados de velocidad de flujo longitudinal (m/s) y error relativo porcentual.

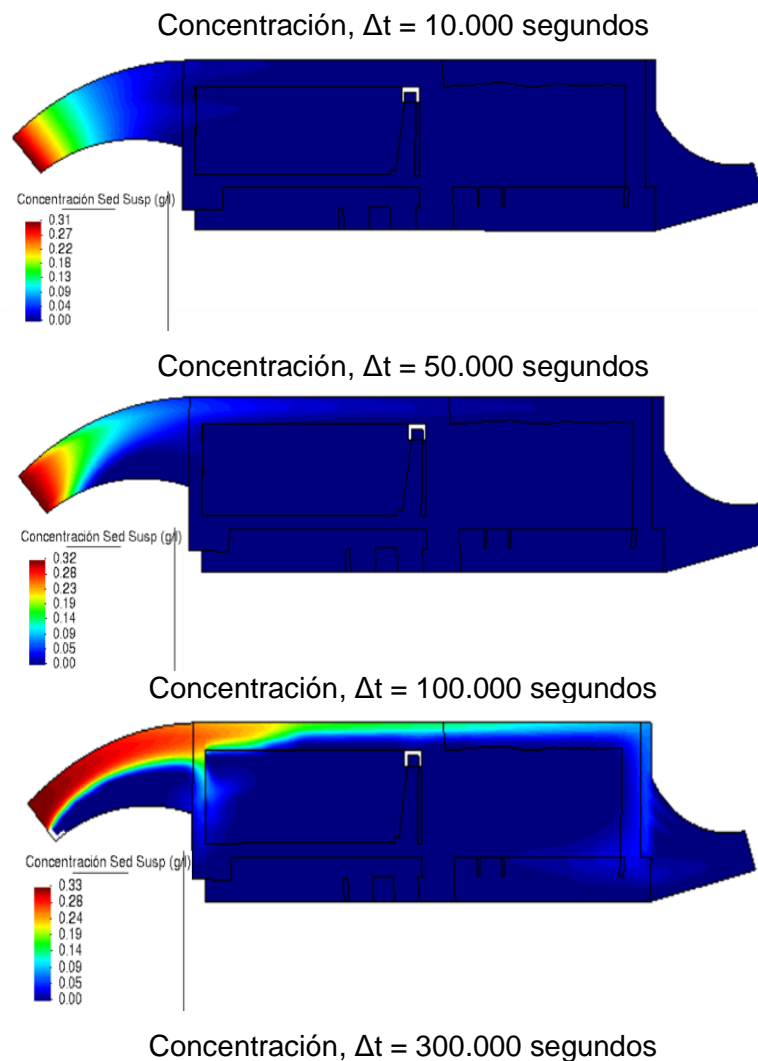
Fuente: elaboración propia.

Como se observó en la Figura 24, el error relativo máximo presentado fue del 25% para los escenarios 1, 2, 6 y 7, del 18% para el escenario 3 y del 16% para los escenarios 4 y 5. Por su parte, el error mínimo se encontró entre 0% y 1% para todos los escenarios.



### 4.3 Resultados de la dinámica de transporte de sedimentos.

La simulación del módulo de sedimentos (escenario 7), permite observar la concentración de los sólidos suspendidos, de acuerdo con las condiciones iniciales asignadas y la selección de parámetros de cálculo mostrada anteriormente en la Tabla 8. En la Figura 25 se muestra los resultados de la evolución de la concentración de sólidos suspendidos en el tiempo para el caudal simulado de 3.46 m<sup>3</sup>/s.



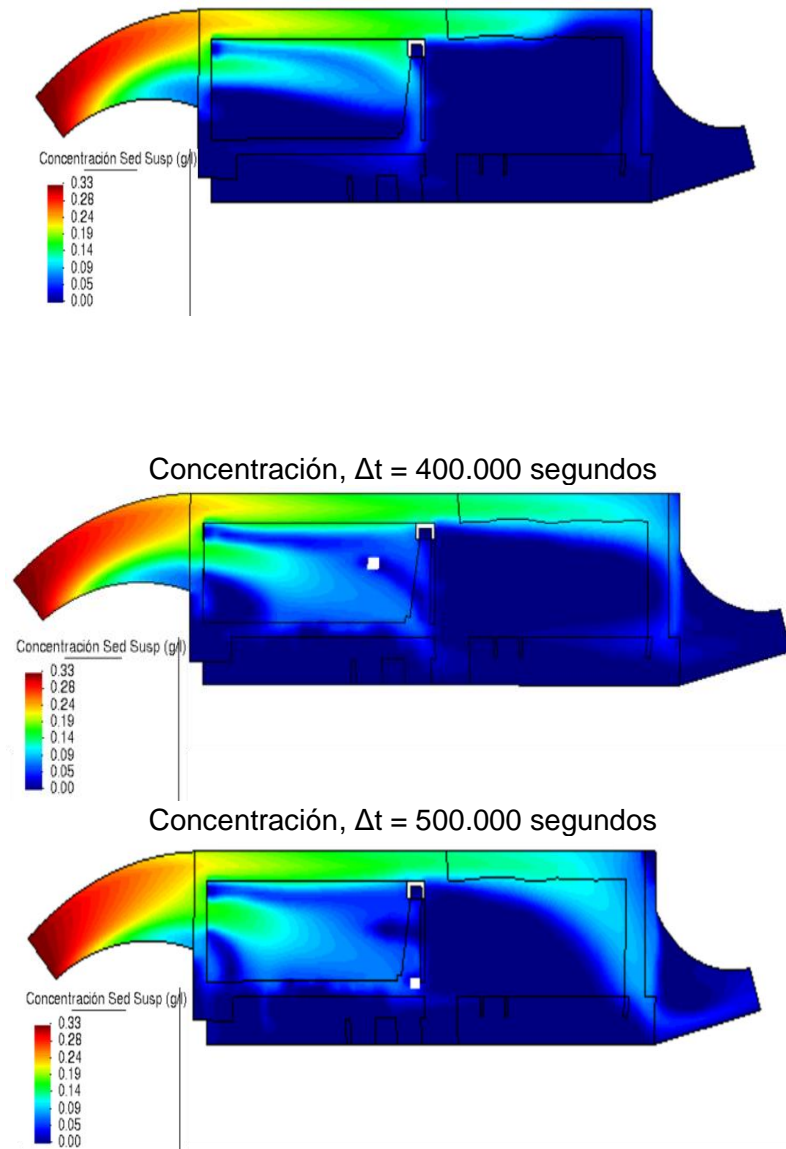


Figura 25: Resultados de concentración de sólidos suspendidos (mg/l) para diferentes pasos de tiempo.

Fuente: elaboración propia.

El módulo de sedimentos permite identificar las zonas donde se produce erosión (valores positivos) y sedimentación (valores negativos) tal como se presenta en la Figura 26. Allí se observan los resultados obtenidos para el tanque Sancancio, correspondiente al tiempo final de simulación de 500.000 segundos.

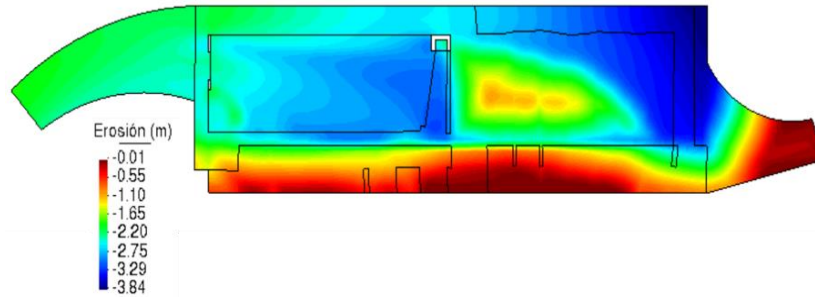


Figura 26: Resultados de erosión (m) para el tanque desarenador.

Fuente: elaboración propia.

## 4.4 Análisis de resultados

### 4.4.1 Análisis de la Hidrodinámica del tanque

Los resultados para el calado mostraron valores entre 1.56 y 4.0 metros para todos los escenarios simulados, evidenciando aumentos directamente proporcionales al aumento del caudal en la entrada, en ningún momento el calado del flujo superó los valores de profundidad reales de tanque (ver Figura 27). El valor de calado menor se observó siempre en la entrada y fue aumentando a medida avanzaba hacia la salida donde se presentaron los valores mayores, con lo cual las profundidades obtenidas guardan coherencia con la geometría real del tanque.

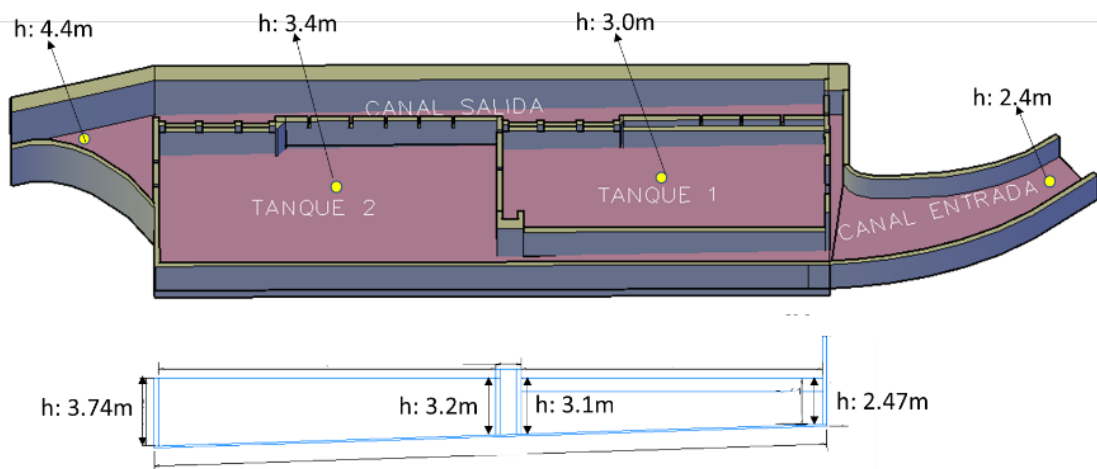


Figura 27: Profundidades reales del tanque desarenador.

Fuente: elaboración propia.

El comportamiento del transporte de sedimentos depende directamente de las propiedades de las partículas sólidas y las características hidráulicas del flujo como la velocidad. La simulación del módulo hidrodinámico de los siete (7) escenarios permitió observar el comportamiento de la velocidad del flujo en el tanque desarenador, para lo cual en comparación con las mediciones de velocidad realizadas en campo, se obtuvo un error relativo máximo del 25% (ver Tabla 9).

Tabla 9. Error relativo porcentual de la velocidad de flujo.

Escenario	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Error relativo (%)		
		Mínimo	Medio	Máximo
Esc 1	0.46	0%	6%	25%
Esc 2	1.39	0%	6%	25%
Esc 3	1.78	0%	6%	18%
Esc 4	1.98	0%	6%	16%
Esc 5	2.26	0%	6%	16%
Esc 6	2.70	1%	10%	25%
Esc 7	3.46	1%	11%	25%

Fuente: elaboración propia.

El valor de error máximo se presentó en el perfil D, abscisa 0 de los escenarios 1, 2, 6 y 7. En el escenario 1 por ejemplo (ver Figura 28), se muestra la zona donde se presentó el máximo error, correspondiente a la unión de dos muros a 90° y a la zona de ingreso de agua por medio de un vertedero. El error máximo en este punto se presenta dado que las velocidades medidas en campo fueron superiores a las simuladas por el modelo, no obstante, el término de valores de velocidad en m/s, esta diferencia fue de apenas 0.01 y 0.02 m/s, lo que evidencia el error absoluto en este caso. En general, el comportamiento de la velocidad simulada fue similar a lo observado en campo para todos los escenarios como se muestra en los gráficos de la Figura 29.

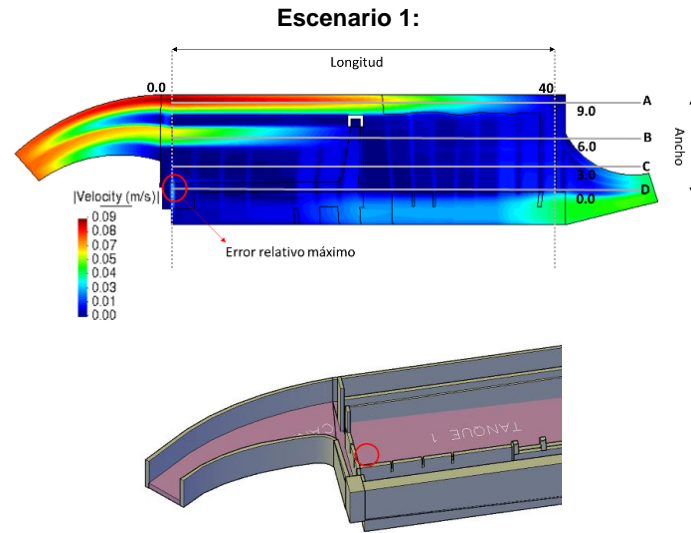
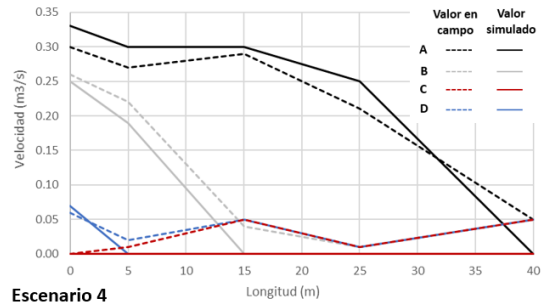
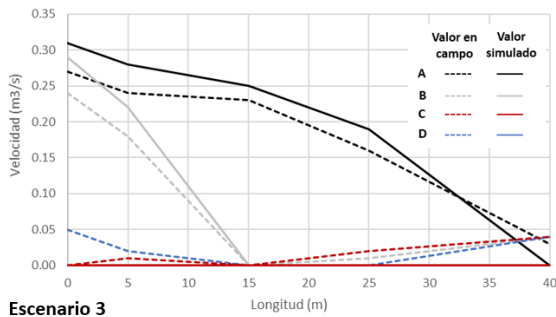
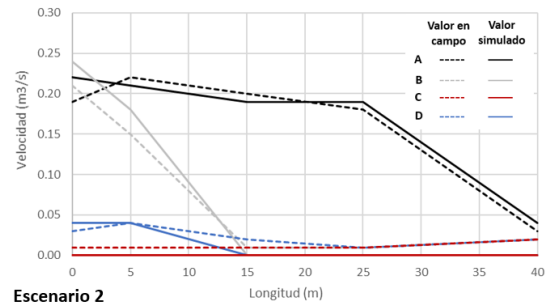
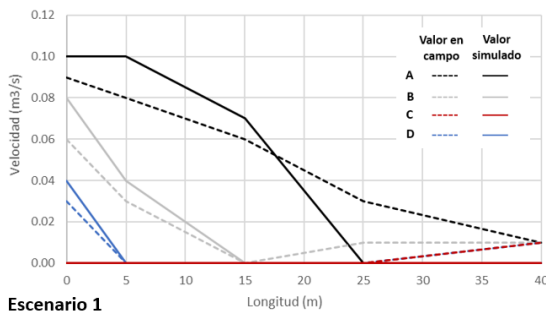


Figura 28: Localización error relativo máximo en la velocidad del flujo.  
Fuente: elaboración propia.



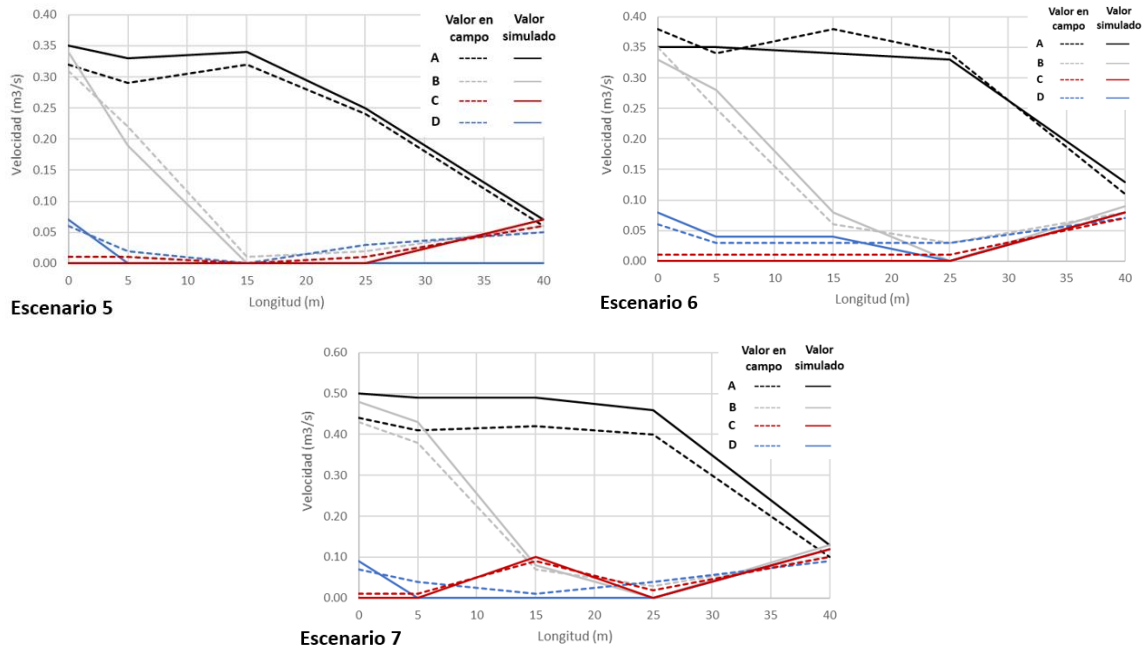


Figura 29: Comparación de velocidad medida en campo y modelada para los diferentes escenarios analizados.

Fuente: elaboración propia.

Con los resultados de la velocidad de flujo, se identifica que en las zonas donde se presentan las velocidades de flujo más bajas, es donde el error relativo porcentual entre los datos medidos y simulados por el modelo resultó menor (0% a 1%). Para todas las mediciones In situ, donde el valor de velocidad fue 0 m/s, el modelo Iber obtuvo velocidades entre 0 y 0.04 m/s, lo cual está atribuido al equipo de medición empleado durante la caracterización del tanque desarenador (Molinete OTT C-31), puesto que, de acuerdo con los certificados de calibración, el rango de validez de la ecuación es para velocidades mayores a 0.1 m/s. Por lo tanto, es muy probable que los equipos para la realización de aforos y mediciones de velocidad no tengan la capacidad de identificar velocidades menores a 0.04 m/s.

Como se mostró anteriormente en la Figura 24, se observó un comportamiento igual en la distribución del campo de velocidad para todos los caudales simulados. Las velocidades mayores se presentan en el canal de entrada y se extienden en la longitud por cada una de las entradas a las dos unidades internas de desarenado (tanque 1 y tanque 2), en las zonas de sedimentación la velocidad disminuye y posteriormente, una vez el agua pasa al canal de salida por los diferentes vertederos, la velocidad aumenta nuevamente.

Esta distribución se puede observar en la Figura 30, donde se muestran los resultados en vectores de la velocidad del flujo para el caudal máximo de  $3.46 \text{ m}^3/\text{s}$ . Allí es posible visualizar como se distribuyen los vectores al interior del tanque, evidenciando una zona de flujo preferencial entre las entradas y salidas del tanque y dos zonas de recirculación de flujo en el tanque 1 y en el tanque 2. La formación de estas zonas de recirculación resulta de la existencia de flujo preferencial en ambos tanques hacia el costado derecho. Eso significa que hay un paso directo del flujo desde cada entrada hasta el canal de salida del tanque y que se genera una zona por donde el flujo recircula. La presencia de estas características en el flujo, muestran que no es posible asegurar una velocidad de sedimentación adecuada.

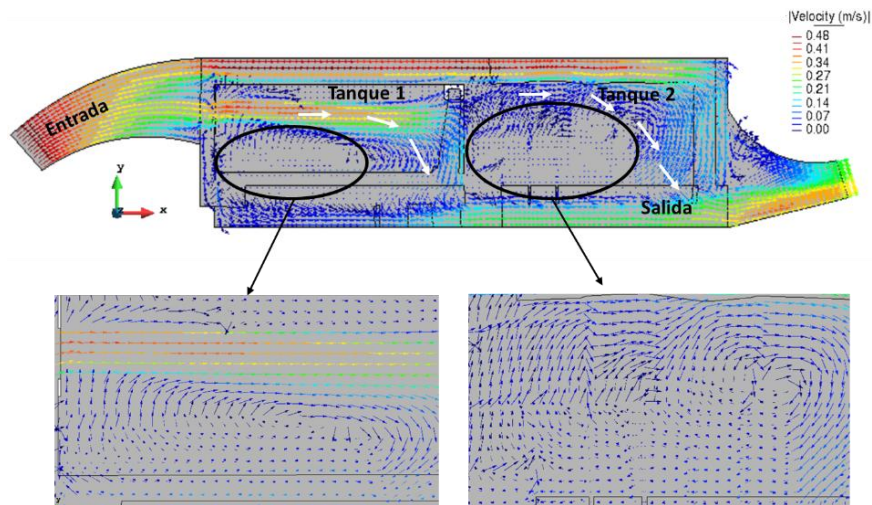


Figura 30: Vectores de velocidad para caudal máximo. Escenario 7 ( $3.46 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Fuente: elaboración propia.

Como se describió en el capítulo 3, las ecuaciones de Saint-Venant bidimensionales asumen una distribución de presión hidrostática y una distribución relativamente uniforme de la velocidad en la profundidad, hipótesis que se cumple razonablemente en flujos de ríos. Sin embargo, con los resultados obtenidos en la hidrodinámica del tanque desarenador Sancancio, especialmente en las zonas de recirculación, se evidencia que probablemente estas condiciones no se cumplen. Razón por la se podría deducir que las diferencias entre las mediciones reales y lo simulado son atribuidas a la suposición de estas hipótesis.

### 4.4.2 Análisis del transporte de sedimentos

Los resultados obtenidos para la hidrodinámica mostraron un buen ajuste con respecto a las características y dinámicas observadas en el tanque desarenador. Se procede con el análisis de los resultados de la dinámica de transporte de sedimentos obtenidos para el escenario 7 (caudal:  $3.46 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Iber permite obtener resultados de concentración de sólidos en suspensión que muestran cómo se moviliza la carga de sólidos en suspensión en el tanque a través del tiempo (ver Figura 31). Se observa que una vez ingresa la concentración de sólidos en suspensión al tanque, esta se transporta primero por el canal de alimentación del tanque 2, donde se presentaron las velocidades de flujo más altas, después la carga en suspensión continúa su recorrido por este mismo costado y llega hasta la salida del tanque donde se observa la menor concentración. Posteriormente la carga comienza a distribuirse por el tanque 1 hasta abarcar toda la zona de sedimentación, finalmente, después de su paso por el tanque 1, los sólidos suspendidos comienzan a aumentar en la salida a medida que avanza el tiempo de simulación.

En la Figura 31, se observa las líneas de contorno que representan la distribución de los sedimentos en suspensión para el paso de tiempo final de simulación (500.000 segundos), donde la pluma de distribución se puede visualizar en la salida.

Como se observó anteriormente en la Figura 30, la presencia de las dos zonas de recirculación y de flujo preferencial, es una situación que también se evidencia en el transporte de sedimentos por suspensión. Eso se puede explicar, dado que, principalmente en el tanque 2, se muestra una zona por donde no se transportan las partículas en suspensión y pasan directamente a la salida por una corriente preferencial. Por su parte, en la zona de recirculación identificada en el tanque 1, se observa presencia de sólidos en suspensión en una concentración mínima.



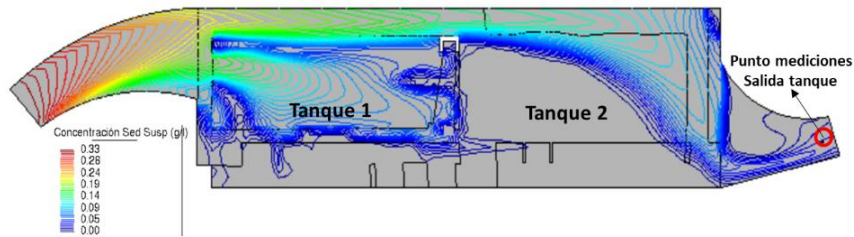


Figura 31: Distribución de carga de sólidos en suspensión en el tanque.

Fuente: elaboración propia.

El resultado del transporte por suspensión resulta ser coherente con los resultados de velocidad y distribución de vectores obtenidos en el módulo hidrodinámico. Adicionalmente, el análisis de la evolución en el tiempo permite identificar que la concentración de sólidos en suspensión comienza a aumentar a la salida del tanque. Se evidencia un proceso de resuspensión de sólidos dado que la concentración se mantiene en 0 g/l a la salida, pero al sobrepasar un tiempo límite, la concentración comienza a aumentar de nuevo en la salida. Esta evolución de la concentración a la salida se puede observar en la Figura 32, allí se evidencia que para el caudal de  $3.46 \text{ m}^3/\text{s}$ , a partir de los 360.000 segundos (4.2 días) es donde la concentración de sólidos comienza a aumentar, lo que significa que a partir de este tiempo, para este caudal y concentración, se presenta paso de material particulado al tanque de carga de la planta.

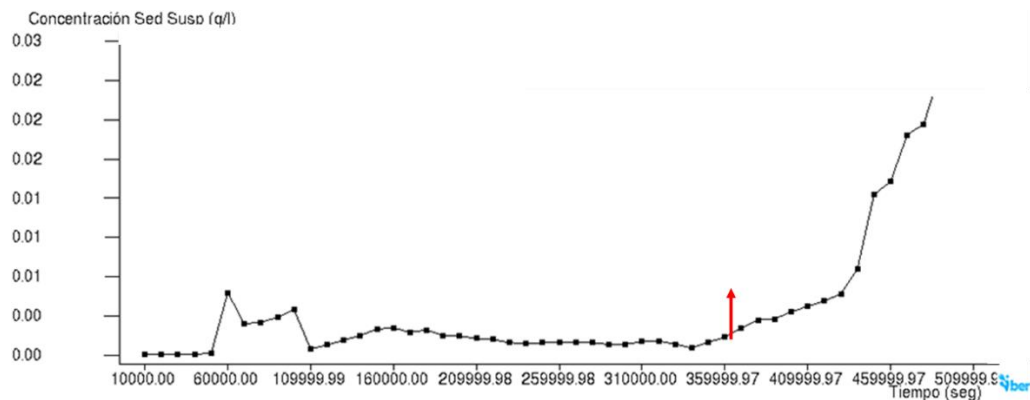


Figura 32: Evolución de la concentración de sólidos suspendidos a la salida.

Fuente: Iber.

Con respecto a las zonas donde se presenta la acumulación de sedimentos, Iber permite obtener el resultado de “erosión” que indica con valores negativos donde se da la sedimentación y con valores positivos la erosión. Con base en el material del tanque (concreto) y con su geometría, la cual pretende reducir la velocidad del flujo y sedimentar partículas, se obtiene un resultado de erosión negativo para toda la geometría. La explicación de este resultado se da por que Iber en el cálculo del arrastre de fondo, incluye la posibilidad de considerar una superficie no erosionable por debajo de la cual no puede evolucionar el fondo, criterio que se aplica para este caso dado que se trata de un tanque revestido en concreto. Con los valores negativos se prevé que haya sedimentación de partículas en todo el tanque, ocurriendo menor sedimentación en las áreas señaladas de color rojo a verde tales como el canal de entrada y salida, y mayor en las áreas azules identificadas en las zonas de sedimentación (Figura 33 y Figura 34).

En la Figura 33 se presentan los resultados del modelo en términos de zonas de erosión-sedimentación y un registro fotográfico del tanque 1 vacío, previo a un proceso de mantenimiento (desarenado). Aquí es posible identificar y comparar las zonas donde se da la acumulación de sedimentos. Se evidencia que tanto en el modelo como en el sitio, la zona de entrada al tanque en la dirección  $x$  y  $y$ , presenta menor sedimentación que en los costados opuestos. Es decir que las condiciones reales del tanque se reflejan de manera ajustada en el modelo, evidenciando la acumulación de los lodos en el costado del muro que limita con el canal de salida. Este comportamiento se relaciona con las características de la velocidad del flujo la cual para el tanque 1 es mayor en la entrada, minimizando la posibilidad de sedimentación de partículas.

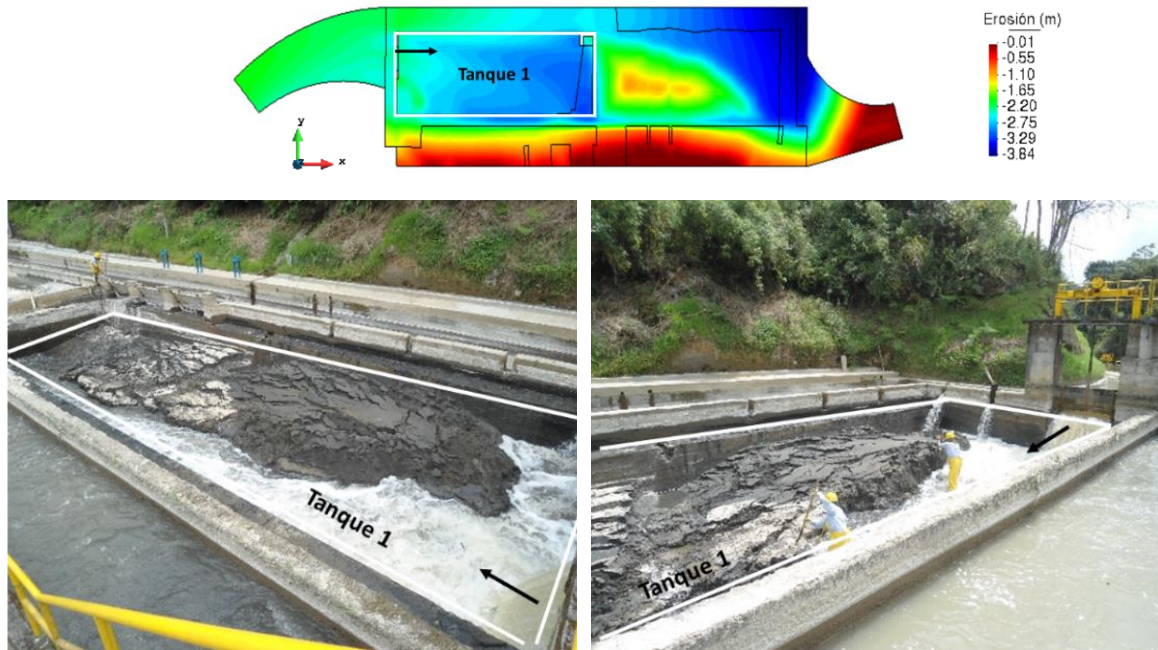


Figura 33: Comparación de zonas de acumulación de sedimentos obtenidas con Iber y las observadas en campo – tanque 1.

Fuente: elaboración propia.

Para el caso del tanque 2 (ver Figura 34), se observa en los resultados del modelo, que a diferencia del tanque 1, se presenta una zona de color amarillo y verde indicando que hay menor sedimentación, por el contrario, en la zona marcada en color azul, se presenta mayor acumulación de lodos. En comparación con las condiciones reales del tanque, se valida que efectivamente sobre dicha zona amarilla, no se evidencia acumulación de lodos y que hacia el costado final de tanque 2, en la dirección  $x$ , se observan los lodos sedimentados.

El primer análisis de este resultado, se da a partir de la presencia de la zona amarilla en el tanque 2, lo cual no guarda relación con los valores de velocidad, pues en ambas unidades de desarenado los valores de velocidad fueron menores en esa zona. Eso indicaría que por la disminución de la velocidad del flujo se sedimentarían determinadas partículas como ocurre en el tanque 1. No obstante, según el análisis de vectores presentado, se evidenció una zona de recirculación y una zona de flujo preferencial que están directamente relacionados con este comportamiento.

La zona de recirculación evita la adecuada sedimentación de las partículas y el flujo preferencial ocasiona que la mayor parte de la carga de sólidos en suspensión pase por allí. Teniendo en cuenta esto, se puede inferir en que el modelo genera esta zona amarilla a partir de la distribución vectorial de la velocidad (zona de recirculación y flujo preferencial) del módulo hidrodinámico.

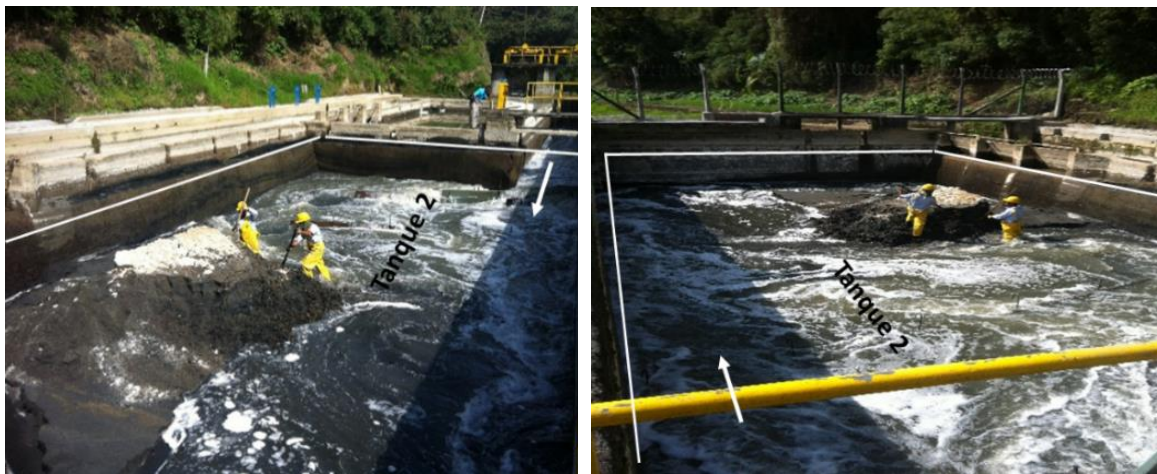
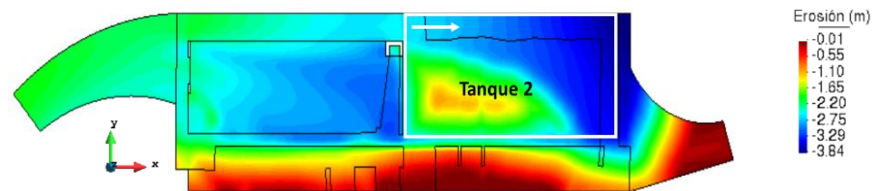


Figura 34: Comparación de zonas de acumulación de sedimentos obtenidas con Iber y las observadas en campo – tanque 2.

Fuente: elaboración propia.

Lo anterior tiene relación con que Iber en el módulo de transporte de sedimentos, calcula el término de resuspensión/deposición (E-D), el cual modela respectivamente la puesta en suspensión de sólidos que se encuentran en el fondo y la deposición de sólidos en suspensión a través de la fórmula de Van Rijn (1987) (ver Ec.(14)). Esta fórmula contiene el coeficiente  $\alpha$ , que relaciona la concentración media de partículas en suspensión, la velocidad de sedimentación de las partículas sólidas y la concentración de sólidos en suspensión promediada en profundidad.

Por lo tanto, para su resolución se emplean los datos de concentración de sólidos en suspensión que fueron de 0 g/l sobre la zona en mención del tanque 2 y por el ende, sumado a la distribución de la velocidad, la deposición de sólidos en suspensión en el fondo del lecho sobre esta zona, es mínima.

De acuerdo con los análisis presentados, los resultados del módulo de sedimentos guardan coherencia con los resultados del módulo hidrodinámico, el cual muestra un buen ajuste con respecto a los datos medidos y observados en campo. En el proceso de análisis de resultados obtenidos con el modelo Iber, se identifica que un buen ajuste en la variable de velocidad del flujo es fundamental para el proceso de simulación del transporte de sedimentos y que través de esta es posible entender las características de sedimentación del tanque. Por lo tanto, se considera que la velocidad del flujo es un buen indicador del comportamiento del transporte de sedimentos para los demás caudales simulados en el módulo hidrodinámico.

#### 4.4.3 Otras consideraciones

- **Diseño del tanque desarenador**

Debido a la antigüedad del tanque desarenador Sancancio, no se tienen memorias de diseño ni información relacionada que permita verificar el diseño del mismo. No obstante, a partir de cálculo de la velocidad de sedimentación en función del caudal y de las dimensiones del tanque (Ec.(17)), es posible determinar según ley de Stokes (Ec.(18) y Ec.(19)), el tamaño de partícula para el cual fue diseñado el tanque.

$$V_s = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. (17).}$$

Donde  $V_s$  es la velocidad de sedimentación (m/s),  $Q$  es el caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) y  $A$  es el área ( $\text{m}^2$ ).

$$V_s = \frac{g \times (\rho_p - \rho) d_p^2}{18\mu} \quad \text{Ec. (18).}$$

$$d_p = \sqrt{\frac{V_s \times 18\mu}{g \times (\rho_p - \rho)}} \quad \text{Ec. (19).}$$

Donde  $V_s$  es la velocidad de sedimentación (m/s),  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ),  $\rho_p$  es la densidad de la partícula ( $kg/m^3$ ),  $\rho$  es la densidad del agua ( $kg/m^3$ ),  $d_p$  es el diámetro de la partícula (m) y  $\mu$  es la viscosidad dinámica del agua ( $kg/m\cdot s$ ).

Con la longitud, ancho y profundidad del tanque, se encuentra que para todos los caudales analizados, la velocidad de sedimentación en el tanque oscila entre 0.001 y 0.01 (m/s), con lo cual teóricamente el tanque debería remover partículas de diámetro entre 0.05 y 0.12 mm como se muestra en la Figura 35. Allí se evidencia que en la realidad, los tamaños de partícula removidos por el tanque son mayores a los teóricos, demostrando que su funcionamiento no es eficiente como se observó en las campañas de medición.

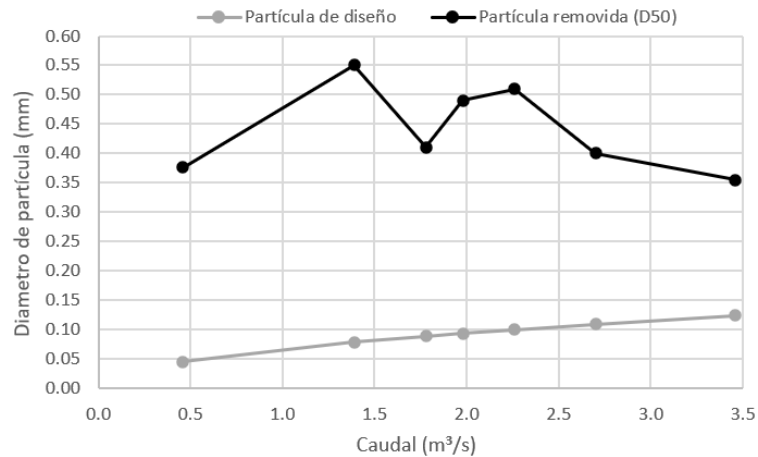


Figura 35. Tamaño de partículas de diseño y removidas en función del caudal.

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con la verificación teórica, se observa que a caudal menor, menor tamaño de partícula removida. Es decir, que entre mayor sea el caudal de entrada, mayor es el tamaño de partícula removida, los diámetros más finos pasarán a las fases siguientes de la planta sin depositarse. Sin embargo, en los datos reales no se da esta relación, lo cual se atribuye a los constantes cambios en los caudales y características de las partículas que entran a la planta. Aunque se infiere en que el tanque desarenador Sancancio no está optimizado por el caudal o el diámetro de partículas que se requiere remover, no es posible conocer verdaderamente el caudal y tamaño de partícula de su diseño.

Si bien el tamaño real de partículas que están siendo removidas por el tanque, son superiores a las teóricas de diseño, el uso del modelo numérico permite verificar que la geometría del tanque desarenador funciona para la remoción de sedimentos, según el caudal, para un determinado tiempo entre actividades de mantenimiento. Lo que significa que es posible mejorar la remoción de sedimentos en el tanque a través de la definición de periodos de mantenimientos acordes con los caudales y cargas de sólidos suspendidos en la entrada. Esto, puesto que para el caso del caudal máximo simulado ( $3.46 \text{ m}^3/\text{s}$ ), después de aproximadamente 4 días, la concentración de sólidos en suspensión comienza a aumentar en la salida por procesos de resuspensión.

En adición a lo anterior, aunque con el diseño del tanque existente se puede realizar una remoción de sedimentos con determinados periodos de mantenimiento, toda el área de sedimentación del tanque desarenador no funciona en su totalidad puesto que se identificaron ciertos espacios donde la sedimentación de partículas es mínima o casi nula. Este comportamiento se pudo evidenciar tanto en las observaciones de campo como en los resultados de modelación y se relaciona principalmente con la presencia de altas velocidades de flujo en las entradas que producen zonas de flujo preferencial y zonas de recirculación.

- **Aspectos de mantenimiento y descarga de sedimentos.**

De acuerdo con los periodos y actividades de mantenimiento que se realizan en el tanque desarenador de la planta Sancancio, el vaciado de los tanques debe realizarse una vez por semana. A pesar de que se tiene una periodicidad establecida para la descarga de sedimentos, esta no se cumple, dado que dependiendo de las condiciones climáticas y sedimentológica de la cuenca, el comportamiento de la acumulación de lodos en el tanque no siempre es igual en todas las semanas. Por lo tanto, el criterio de selección para la realización de la descarga de sedimentos, ha sido la profundidad de lodos sedimentados, la cual una vez se superan los 1.5 m de altura, se procede con la descarga.

Durante las campañas de monitoreo realizadas en diferentes épocas del año, se evidencio que tanto los sólidos suspendidos totales como los sólidos sedimentables a la salida del tanque fueron similares o mayores que en la entrada, significando bajas y nulas eficiencias de remoción.

Para todas las muestras de SSED se obtuvo únicamente una eficiencia positiva de remoción del 16% y 2.32% para los caudales de 0.46 m<sup>3</sup>/s y 1.98 m<sup>3</sup>/s respectivamente, por su parte para los SST únicamente se obtuvo una eficiencia de remoción para el caudal de 1.98 m<sup>3</sup>/s del 6.9%. Por lo anterior se concluye que los criterios de selección de la periodicidad de mantenimiento del tanque no son las adecuadas. Los resultados obtenidos durante el desarrollo del estudio permiten establecer que en el tanque se produce un fenómeno de resuspensión de sólidos después de determinado tiempo de operación según el caudal y la carga de sólidos que ingresa al tanque y por lo tanto, el uso de herramientas de modelación numérica, tal como la empleada en la presente tesis podrían aportar a la toma de decisiones con respecto a periodicidad de mantenimientos, con el fin de garantizar una mejor eficiencia de remoción de sedimentos.

En relación con recomendaciones de remoción y descarga de sedimentos del tanque, el uso del modelo permite identificar que con la geometría existente y un control de las condiciones de operación en términos de caudal y concentración de sólidos a la entrada, es posible garantizar una adecuada periodicidad de mantenimiento, para mejorar la eficiencia de remoción y la descarga de sedimentos. El uso de herramientas de simulación permite al corto plazo, optimizar el funcionamiento del tanque, sin demandar acciones macro que impliquen modificaciones en la estructura. No obstante, otras alternativas de optimización a largo plazo podrían ser igualmente evaluadas a través de la modelación numérica, pues de acuerdo con la revisión bibliográfica presentada en el capítulo 2, la optimización de estructuras hidráulicas con previa validación en modelos de simulación, ha sido exitosa en muchos casos de estudio.

- **Limitaciones**

Durante el proceso de caracterización física del tanque desarenador Sancancio y el posterior uso del modelo numérico, se logra identificar que a pesar de que el comportamiento de la velocidad medida y simulada fue similar, los lugares donde se presentaron las velocidades más bajas, fue en donde mayor error relativo porcentual se obtuvo (hasta del 25%). Esto se atribuye al equipo de medición empleado para las campañas, dado que correspondió a un molinete (OTT – C31), que aunque en algunos casos logra la identificación de velocidades del orden de 0.04 m/s, este tiene un rango de validez para velocidades mayores a 0.1 m/s según las características de su hélice.



Por lo tanto, los valores por debajo de este, no logran ser medidos con exactitud y por ende no caracterizan de forma adecuada las velocidades mínimas que se presentan en el tanque, las cuales en los resultados del modelo numérico si se reconocen.

Es importante mencionar que una de las grandes limitantes del uso del modelo numérico, específicamente al simular el transporte de sedimentos, resultó ser el tamaño de malla asignado y el tiempo computacional demandado para la corrida del modelo. Para los escenarios simulados únicamente con el módulo hidrodinámico (escenarios 1 al 7: 1.200 segundos de tiempo máximo de simulación) se estableció un tamaño de cuadrícula de la malla de 0.25 metros, con la cual los modelos corrieron en un tiempo aproximado de 50 minutos sin errores en los resultados. Al momento de correr el escenario con el módulo de sedimentos (escenario # 7: 500.000 segundos de tiempo máximo de simulación), el tamaño de cuadrícula de 0.25 metros no funcionó, generando un error de lectura en algunas celdas de la geometría, indicando que el tamaño sobrepasaba el límite mínimo para resolver correctamente las ecuaciones del transporte de sedimentos. Por lo tanto, mediante un ejercicio de iteración se llegó a un valor de tamaño de 0.5 metros con el cual el escenario corrió de manera adecuada pero en un tiempo correspondiente a 96 horas continuas (5 días), tiempo durante el cual, por diferentes motivos computacionales, ajenos al modelo, se generaron suspensiones en la corrida y por ende reinicio de la misma.

Es claro con respecto a lo anterior, que dependiendo de la disponibilidad de maquina computacional, los tiempos de simulación no siempre serán una limitante, sin embargo, con base en la experiencia de la presente aplicación, se considera de gran importancia disponer de un equipo computacional adecuado para que este tipo de modelos puedan correr de manera óptima en los tiempos requeridos para la toma de decisiones de los diferentes procesos.

El proceso de validación de los resultados obtenidos con el modelo, se realizó a partir de la comparación de resultados modelados con los observados en campo, no obstante, para referirse propiamente de una calibración del modelo, es necesario contar con más muestras de datos observados en campo, con le fin de afinar el modelo de simulación de tal forma que refleje con mejor aproximación las condiciones reales del tanque.

- **Comparación con otras aplicaciones**

Con los resultados obtenidos se identifica que el uso del modelo numérico Iber es adecuado para el análisis de alternativas de mejora, tales como la definición de periodos de mantenimiento según las características de operación del tanque. El estudio de aplicación desarrollado por Griborio, McCorquodale, & Rodríguez (2014), concluye que en general, los modelos 3D son ideales para evaluar diseños detallados/complejos o modificaciones en zonas de entrada, y que por su parte los 2D son más adecuados para el análisis de modificaciones a escala macro. No obstante, la geometría del tanque Sancancio se modeló en 2D a escala de detalle real y se logró explicar la dinámica del transporte de sedimentos adecuadamente y a establecer alternativas de mejora en relación con su mantenimiento.

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada, los modelos 3D son los que mejor representan el transporte de sedimentos en tanques desarenadores o estructuras similares, sin embargo, al momento de evaluar los errores entre los datos medidos y los simulados, autores como Isenmann et al. (2017) quienes emplearon un modelo 3D, reportaron errores entre el 5% y el 10%. Para el presente caso de modelación 2D, se evidenciaron errores entre 0% y 25%.

Al igual que el presente estudio, autores como Tamayol et al. (2010) y Razmi et al. (2013), quienes desarrollaron y evaluaron modelos 2D para la optimización de tanques desarenadores, concluyen que las predicciones de los modelos con respecto a los datos experimentales físicos, son satisfactorias. Para el caso específico del modelo Iber, Salamea (2015), lo usó en otra investigación para el análisis del ingreso de sedimentos a estructuras de captación y sedimentación y en coherencia con el presente estudio, los resultados simulados fueron satisfactorios con respecto a las características reales del dominio simulado. Esto fue evidenciado también por los autores Castillo, Alvarez, & Carrillo (2013), quienes a través de Iber lograron representar apropiadamente los procesos de descarga de sedimentos en un proyecto hidroeléctrico.

## 4.5 Conclusión

En el capítulo 4 se presentaron los resultados de la hidráulica y del transporte de sedimentos en el tanque desarenador Sancancio. Para la variable velocidad se encontró un error relativo porcentual máximo con respecto a los valores reales del 25%, sin embargo en términos generales, se evidenció un buen ajuste entre los datos simulados y los medidos y observados en campo. Con esto fue posible la descripción del funcionamiento del tanque, donde se observaron zonas de recirculación y de flujo preferencial, lo cual se vio reflejado en los resultados del transporte de sedimentos. Se evidenció que el tamaño de partícula real que remueve el tanque, es superior al diámetro teórico de diseño y que por medio del uso del modelo es posible evaluar los tiempos de mantenimiento más eficientes con relación a la remoción de sedimentos. a pesar de que tuvieron algunas limitantes en el desarrollo del estudio, los resultados obtenidos guardan coherencia con otros casos de aplicación encontrados en la literatura.



# 5. Capítulo 5- Conclusiones y recomendaciones

## 5.1 Conclusiones

El propósito del estudio desarrollado fue analizar las características hidráulicas y de la dinámica del transporte de sedimentos en el tanque desarenador de la planta Sancancio. Esto con el fin de entender su funcionamiento y plantear alternativas para mejorar su eficiencia. Para este propósito se llevó a cabo una metodología experimental basada en la modelación numérica del tanque desarenador a través del software de modelación 2D Iber, para la cual se utilizaron datos reales del tanque medidos en siete campañas de monitoreo. Los resultados indican que la modelación representó adecuadamente el comportamiento del tanque desarenador, dado que mostró un buen ajuste entre los datos simulados y los medidos en campo. A partir de las simulaciones fue posible identificar características hidráulicas como zonas de recirculación y flujo preferencial que limitan el buen funcionamiento del tanque en el proceso de deposición de partículas, lo cual se evidenció en los resultados del transporte de sedimentos. Sin embargo, a través del modelo fue posible establecer que según el caudal y la carga de sólidos en suspensión, es posible determinar periodos de manteniendo que garanticen una mejor eficiencia de remoción.

Con base en los análisis y resultados obtenidos en el estudio, se concluye lo siguiente:

- El comportamiento hidráulico del tanque desarenador Sancancio, se caracteriza por la presencia de altas velocidades en los costados de las zonas de entrada al tanque, las cuales generan zonas de recirculación y de flujo preferencial en cada una de las unidades de sedimentación.

- A pesar de que para la velocidad de flujo se obtuvo un error relativo porcentual máximo del 25% entre los datos simulados y medidos, específicamente en las zonas de menor velocidad, el comportamiento tendencial entre ambos datos fue similar para todos los escenarios simulados. Por lo tanto, la variable de velocidad de flujo mostró ser un buen indicador en el análisis del comportamiento del transporte de los sedimentos.
- Los resultados de la dinámica del transporte de sedimentos en el tanque, guardaron coherencia con las características hidráulicas halladas. Con respecto al transporte por suspensión, se evidenció que la mayor parte de la carga de sólidos que ingresa al tanque, se desplaza hacia la salida por la zona de flujo preferencial y que por su parte, la deposición de partículas (transporte de fondo) es mínima en las zonas de recirculación y mayor hacia los demás costados, principalmente hacia el límite con el canal de salida.
- El funcionamiento del tanque no es eficiente, dado que en las mediciones de campo la concentración de sólidos suspendidos a la salida fue siempre similar o mayor que en la entrada, representando baja o nula remoción. Este comportamiento se logró explicar mediante el modelo, donde a través del resultado de concentración de sólidos en suspensión, se evidenció que con un determinado paso de tiempo (4.2 días para un caudal de 3.46 m<sup>3</sup>/s), se genera un fenómeno de resuspensión de sólidos en el tanque que produce que la concentración a la salida aumente. Por lo tanto, este análisis permite concluir que las bajas eficiencias de remoción del tanque están relacionadas con aspectos de mantenimiento y descarga de sedimentos.
- La aplicación y uso del modelo numérico es una herramienta útil para definir periodos de mantenimiento del tanque adecuados, acordes con las características de caudal y concentración de sólidos en suspensión en la entrada, lo cual se encuentra directamente relacionado con las eficiencias de remoción del tanque. Sin embargo, es importante precisar que el uso de la herramienta implica que la empresa de generación de energía cuente con datos específicos de mediciones en campo que sirvan como datos de entrada al modelo.

- Con los resultados obtenidos y la información disponible del tanque desarenador Sancancio, no es posible conocer con certeza sus parámetros de diseño. Sin embargo, de acuerdo con las verificaciones teóricas realizadas y los caudales analizados, los tamaños de partícula removidos por el tanque son mayores a tamaños los teóricos (entre 0.05 y 0.12 mm), lo que demuestra que el tanque no está funcionando adecuadamente en la remoción de partículas finas y que probablemente las condiciones de aporte de caudal y de sedimentos de la cuenca, han cambiado en los últimos años.
- Durante la comparación de datos de velocidad medidos y los obtenidos de la modelación, fue posible identificar que los equipos con los que se realizaron aforos y mediciones de velocidad en el tanque desarenador Sancancio por medio de la CHEC, no lograron predecir con exactitud los valores de velocidad más bajos en el tanque (menores a 0.04 m/s), dado que su rango de validez es para valores mayores. Por lo tanto, con los datos medidos no se logra describir con precisión el comportamiento de las zonas de sedimentación donde se presentan las velocidades más bajas, lo cual si fue observado con el modelo.
- Si bien se podrían plantear diferentes alternativas de remoción y descarga de sedimentos, se evidencia que la geometría y configuración existente del tanque desarenador Sancancio, tiene la capacidad de remover y descargar adecuadamente los sedimentos siempre y cuando se establezcan periodos de mantenimiento acordes con las características del flujo de entrada, lo cual es posible realizar desde el uso de modelos numéricos tales como Iber y se convierte en una alternativa de bajo costo por su uso libre y ejecutable en el corto plazo.
- El uso del modelo numérico Iber (2D), el cual resuelve las ecuaciones de St. Venant promediadas en la profundidad, permite representar de manera adecuada las condiciones hidráulicas y de transporte de sedimentos en geometrías como la del tanque desarenador Sancancio y por lo tanto, se considera como una herramienta útil en los procesos de diseño y toma de decisiones al interior de las PCH.

- Una de las limitantes presentadas en la tesis fue la demanda del equipo computacional para la correcta simulación del módulo de sedimentos, motivo por el cual se limitó su simulación a un solo escenario que representó las condiciones de caudal máximo, no obstante, a pesar de dicha limitante, mediante los resultados del módulo hidrodinámico y su relación con los resultados de sedimentos, se concluye que el campo de velocidad es un importante indicador de cómo se comporta el transporte de sedimentos en el tanque. Por lo tanto, teniendo en cuenta que para todos los caudales se obtuvo un resultado válido para la variable de velocidad, se infiere en que la modelación del transporte de sedimentos para los demás caudales, representará igualmente de manera adecuada su comportamiento.

## 5.2 Recomendaciones

- Se recomienda que para el uso de herramientas de simulación, tal como la utilizada en el presente estudio, se realicen las mediciones in situ necesarias y acordes con las necesidades de información de entrada de cada modelo. Para el caso específico del tanque desarenador Sancancio, se recomienda realizar mediciones continuas para diferentes temporadas climáticas, de variables como el caudal de entrada y salida, análisis de sólidos suspendidos totales en el canal de entrada, tanque 1, tanque 2 y canal de salida, velocidad del agua en puntos distribuidos de la superficie para diferentes profundidades y toma de muestras del material sedimentado para análisis granulométrico, en por lo menos 3 puntos de cada unidad de desarenado; esto con el fin de contar con un modelo mejor calibrado para diferentes condiciones de operación.
- Para el levantamiento de información in situ en el tanque desarenador Sancancio, específicamente para las mediciones de velocidades de flujo, se recomienda hacer uso de equipos como ecosondas o molinetes de hélices con rangos de validez para valores mayores a 0.02 m/s aproximadamente.



- Anqué el presente estudio contiene los resultados de la aplicación de una herramienta de simulación a un caso de estudio real, aun se pueden complementar aspectos relacionados con los impactos de toma de agua y descarga de sedimentos sobre el río Chinchiná. Por lo tanto, se recomienda integrar a la geometría modelada, el tramo del río Chinchiná sobre el cual se realizan las descargas de sedimentos con el fin de evaluar los impactos que se generan en la fuente hídrica y de esta forma planificar de forma controlada las descargas de sedimentos del tanque.
- Se recomienda que para el uso de modelos numéricos tales como Iber, se cuente con un equipo de cómputo apto y eficiente que permita que las corridas de los diferentes escenarios a evaluar se hagan en el menor tiempo posible.
- De acuerdo con el estado del arte, diferentes tipos de modelos han sido aplicados al estudio de estructuras hidráulicas como tanques desarenadores, resultando no siempre adaptables según la dimensionalidad del modelo, por lo tanto, se recomienda que esta misma geometría sea simulada con otro modelo numérico con el fin de determinar cuáles de las herramientas de simulación se adaptan mejor al caso de estudio.
- Se recomienda a la Central Hidroeléctrica de Caldas, CHEC, tomar como base la información resultante de la presente tesis, con el objetivo de encaminar acciones para la toma de decisiones con respecto al uso del tanque desarenador Sancancio, el cual constituye un elemento fundamental para el manejo y control de los sedimentos que ingresan al sistema de generación de energía.

## 6. Referencias bibliográficas

- ACIEM. (2015). Pequeñas Centrales Hidroeléctricas. Cundinamarca: ACIEM.
- Basile, P. A. (2018). *Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales*. *Biomass Chem Eng*.
- Bladé, E. (2005). Modelación del flujo en lámina libre sobre cauces naturales análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones. *Tesis Doctoral*.
- Calzas Perez, M. (2013). *Modelización del canal de la planta TEL en la U . P . T . de As Pontes*.
- Castillo, L. G., Alvarez, M. A., & Carrillo, J. M. (2013). Modelación numérica de sedimentación y lavado de sedimentos mediante " flushing " en el embalse Paute-Cardenillo. *III Jornadas e Ingeniería Del Agua*, 1–8.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria Y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (2005). *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores*. Lima.
- CHEC. (2020). *Informe técnico del generador CHEC 2020*. Manizales.
- Coe, H. ., & Clevenger, G. . (1916). Methods for determining the capacities of slime-settling tanks. *Trans. Am. Inst. Min. Metallurgical Eng.*, 356e384., 55.
- Corcho, F. H. (2009). *Acueductos teoría y diseño*. (Universidad de Medellín, Ed.). Medellín.
- Cualla, R. A. (1995). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillado*. (Escuela Colombiana de Ingeniería, Ed.). Bogotá.
- De Cesare, G., Munch-Aligné, C., Schwindt, S., & Biaggi, F. (2014). Psamathe - Alternatives Konzept der Entsanderspülung. *WasserWirtschaft*, 104(4), 44–49.
- Dominguez, A. (2015). *Estudio de la evolución morfodinámica del río Llobregat en su tramo final*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Duque, E., Patino, J., & Velez, L. (2016). Implementation of the ACM0002 Methodology in Small Hydropower Plants in Colombia Under the Clean Development Mechanism. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(1), 21–33.
- ESHA, E. S. H. A. –. (2004). *Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant*. Bélgica: European Small Hydropower Association – ESHA.

- Fiesco, F. H., & Arias, H. A. (2016). *Estudio de la eficiencia en desarenadores ligados a un nivel de complejidad mediante un modelo físico a escala reducida*. Universidad de la Salle.
- FLUMEN. (2014). Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas - Manual de referencia hidráulico.
- GIAS. (2014). *Evaluación de las eficiencias de los sistemas desarenadores de plantas menores y mayores*. Universidad Tecnológica de Pereira. Manizales.
- Griberio, A., Alex McCorquodale, J., & Rodriguez, J. A. (2014). CFD modeling of primary clarifiers: The state-of-the-art. In *87th Annual Water Environment Federation Technical Exhibition and Conference, WEFTEC 2014* (Vol. 9, pp. 1926–1949).
- IHA. (2019). *Hydropower status report 2019: Sector trends and insights. Hydropower Status Report*. Londres.
- Imam, E., Mccorquodale, J. A., & Bewtra, J. K. (1983). Numerical Modelling of Sedimentation Tanks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(12), 1740–1754.
- Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas - INEA. (1997). *Guía de diseño para pequeñas centrales hidroeléctricas*. Bogota: Ministerio de Minas y Energía.
- Isenmann, G., Dufresne, M., Vazquez, J., & Mose, R. (2017). Bed turbulent kinetic energy boundary conditions for trapping efficiency and spatial distribution of sediments in basins. *Water Science and Technology*, 76(8), 2032–2043.
- López, A. P. (2013). *Bases para el diseño hidráulico de la estructura de salida, canal de recolección y tanque de carga entre  $20 \text{ m}^3/\text{s} \geq q \geq 2 \text{ m}^3/\text{s}$  para desarenadores en aprovechamientos hidroeléctricos*. Universidad Central de Ecuador.
- Luzuriaga, B., & Amaya, D. (2014). *Simulación Numérica Del Flujo De Sedimentos En El Desarenador Del Proyecto Hidroeléctrico Coca Codo Sinclair*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Cuenca.
- Matko, T., Fawcett, N., Sharp, A., & Stephenson, T. (1996). Recent progress in the numerical modelling of wastewater sedimentation tanks. *Process Safety and Environmental Protection*, 74(4), 245–258.
- Metcalf and Eddy INC. (1995). *Tratamiento, vertido y reutilización*. (McGraw-Hill/Interamericana de España S.A., Ed.). Madrid.
- Ministerio de Vivienda, C. y T. Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS (2017). Colombia.
- Mishra, S., Singal, S. K., & Khatod, D. K. (2013). Sizing and quantity estimation for desilting tank of small hydropower projects - An analytical approach. *International Journal of Green Energy*, 10(6), 574–587.
- Montoya, M. I. (2013). *Aplicación de un modelo numérico (3d) a la modelación del comportamiento del sedimento en la toma y descarga de un río a un tanque sedimentador*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- 
- Mora, D. C., & Hurtado, J. M. (2004). *Guía Para Estudios De Prefactibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas como parte de sistemas híbridos*. Pontificia Universidad Jveriana.
- Morales, S., Álvarez, C., Acevedo, C., Diaz, C., Rodriguez, M., & Pacheco, L. (2015). An overview of small hydropower plants in Colombia: Status, potential, barriers and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1650–1657.
- Morales, S., Corredor, L., Paba, J., & Pacheco, L. (2014). Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementacion. *DYNA (Colombia)*, 81(184), 178–185.
- Mustafa, M. R., & Ta, C. (2013). Investigation on Dynamics of Sediment and Water Flow in a Sand Trap, 31–36.
- Neopane, H. P. (2010). Sediment Erosion in Hydro Turbines. Norwegian University of Science and Thechnology.
- OLADE. (2013). *Potencial de Recursos Energéticos y Minerales en América del Sur: Coincidencias jurídicas hacia una estrategia regional*. Organización Latinoamericana de Energía. Quito, Ecuador.
- Organización Panamericana de la Salud. (2005). Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores (p. 34). Lima.
- Padhy, M. K., & Saini, R. P. (2012). Study of silt erosion mechanism in Pelton turbine buckets. *Energy*, 39(1), 286–293.
- Peña, E., Marques, J., Sanchez, F., Puertas, G., & Gomez, L. (2008). Experimental validation of a sediment transport two-dimensional depth-averaged numerical model using PIV and 3D Scanning technologies. *Engineering*, 00(0), 1–15.
- Quintero, K. B. (2009). *Metodologías de diseño de obras hidráulicas en estudios de pre factibilidad de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Razmi, A. M., Bakhtyar, R., Firoozabadi, B., & Barry, D. A. (2013). Experiments and numerical modeling of baffle configuration effects on the performance of sedimentation tanks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(2), 140–150.
- Romero Rojas, J. A. (2002). *Calidad del agua*. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogota.
- RIIT. (2008). *Guidelines for Hydraulic Design of SHP Projects Sponsor: Ministry*. India: Ministry of New and Renewable Energy Govt. of India.
- S. Morales, L. Corredor, J. Paba, L. P. (2014). Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: contexto y criterios básicos de implementación. *DYNA (Colombia)*, 81(184), 178–185.
- Salamea, T. (2015). Modelamiento bidimensional hidrodinámico del flujo y transporte de sedimentos a través del río calabá y obras hidráulicas. Octubre -2015 Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, 117.

- Sanchez, J. P., & Jerez, L. K. (2018). *Estudio del porcentaje de eficiencia de la remoción de arenas en desarenadores de flujo horizontal contruidos respecto a teorías de diseño*. Universidad de La Salle.
- Silva, M. R. (2012). *Estudio Y Modelamiento Matematico De Los Procesos de sedimentación y purga de un reservorio*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Peru.
- Singh, G., & Kumar, A. (2016). Performance evaluation of desilting basins of small hydropower projects, *5010*(January).
- Singh, T., Chandrashekhar, J., & Agrawal, A. (2007). Analysis of water and sediment flow in desilting basin of a run-of-river hydroelectric project. *International Conference on Small Hydropower*, 22(October), 24.
- Sparrow, E. (2008). *El Desarenador*. Universidad Nacional del Santa. Peru.
- Stamou, A. I. (2008). Improving the hydraulic efficiency of water process tanks using CFD models. *Cationhemical Engineering and Processing: Process Intensific*, 47(8), 1179–1189.
- Tamayol, A., Firoozabadi, B., & Ashjari, M. A. (2010). Hydrodynamics of Secondary Settling Tanks and Increasing Their Performance Using Baffles. *Journal of Environmental Engineering*, 136(1), 32–39.
- Thapa, B. S., Thapa, B., & Dahlhaug, O. G. (2012). Empirical modelling of sediment erosion in Francis turbines. *Energy*, 41(1), 386–391.
- Vinaroz, M. (2018). *Aplicación del método de volúmenes finitos a la ecuación de difusión- advección*. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. Universitat Jaumei.
- Wang, X., Zhou, S., Li, T., Zhang, Z., Sun, Y., & Cao, Y. (2011). Three-dimensional simulation of the water flow field and the suspended-solids concentration in a circular sedimentation tank. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 836(November), 825–836.
- Wong, M. (2003). Does the bedload equation of Meyer-Peter and Müller fit its own data? *International Association of Hydraulic Research, Thessaloniki, J.F.K. Competition*.
- Wong, M., & Parker, G. (2006). "Reanalysis and Correction of Bed-Load Relation of Meyer-Peter and Müller Using Their Own Database." *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11): 1.
- Zambrano, J. D. C. (2015). *Estimación de la producción y transporte de sedimentos en cuencas urbanas pequeñas a escala de evento mediante un modelo de base física basado en SIG*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Zetina, G. (2012). *Criterios de diseño de desarenadores a filo de corriente*. Universidad Nacional Autónoma de México.