



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TEMA: ANÁLISIS NUMÉRICO DEL LAVADO HIDRÁULICO  
(FLUSHING) DE UN EMBALSE**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGISTER EN DISEÑO Y SIMULACIÓN**

**AUTOR: Ing. José Luis Galarza Hidalgo  
joseluisgh91@gmail.com**

**DIRECTOR: Ing. Edgar Hernán Cando Narvaez MSc. PhD.  
edgar.cando@epn.edu.ec**

**CODIRECTOR: Ing. Victor Hugo Hidalgo Diaz MSc. PhD.  
victor.hidalgo@epn.edu.ec**

**Septiembre, 2021**

# CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por José Luis Galarza Hidalgo, bajo mi supervisión.



Firmado electrónicamente por:  
**EDGAR HERNAN  
CANDO NARVAEZ**

---

Ing. Edgar Hernán Cando Narvaez MSc. PhD

**DIRECTOR DE PROYECTO**



Firmado electrónicamente por:  
**VICTOR HUGO  
HIDALGO DIAZ**

---

Ing. Victor Hugo Hidalgo Diaz MSc. PhD

**CODIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Yo, José Luis Galarza Hidalgo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



---

Ing. José Luis Galarza H.

## DEDICATORIA

A mi Madre por su incansable apoyo y fuerza, a mi Abuelita y a toda mi familia por su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme esta oportunidad de superarme y cumplir mi objetivo. Agradezco de manera especial a mis padres, Ximena y José, por todo el amor, el apoyo y paciencia que me dan cada día, a mi hermano Sebastián por su apoyo incondicional, a mi futura esposa Josselyn por compartir conmigo tantos momentos y por darme su amor incondicional y fuerza para culminar esta etapa de mi preparación profesional.

Agradezco al Doctor Marco Antonio Castro por darme la oportunidad de participar en el proyecto.

Gracias a mis profesores de la maestría por su dedicación para impartir sus conocimientos.

Especialmente quisiera agradecer al doctor Víctor Hidalgo y al Doctor Edgar Cando, por darme su guía y apoyo en el desarrollo de este proyecto.

# ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN .....	2
1.2	OBJETIVO GENERAL.....	3
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
2	MARCO TEÓRICO .....	4
2.1	LAVADO DE EMBALSES.....	4
2.2	VIABILIDAD PARA EL LAVADO DE SEDIMENTOS.....	5
2.2.1	RELACIÓN DEL BALANCE DE SEDIMENTOS (SBR).....	5
2.2.2	RELACIÓN DE CAPACIDAD DE LARGO PLAZO (LTCR).....	5
2.3	EFICIENCIA DE LAVADO .....	5
2.4	TRANSPORTE DE MATERIAL SÓLIDO .....	6
2.4.1	ECUACIÓN DE TRANSPORTE DE MEYER-PETER MÜLLER .....	8
2.5	DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD).....	9
2.5.1	DISCRETIZACIÓN ESPACIAL .....	11
2.5.2	MÉTODOS DE DISCRETIZACIÓN TEMPORAL .....	14
2.5.3	PREPROCESO .....	15
2.5.4	CONDICIONES DE CONTORNO O DE BORDE.....	15
2.6	TURBULENCIA.....	20
2.6.1	ECUACIONES DE FLUJO .....	21
2.6.2	ESCALAS DE TURBULENCIA .....	21
2.6.3	PROBLEMA DE CIERRE DE LA TURBULENCIA .....	23
2.7	MODELOS DE TURBULENCIA .....	23
2.7.1	REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES EQUATIONS.....	24
2.8	SOFTWARE COMERCIAL FLOW 3D- MODELO MULTIFASE.....	29
2.9	ESTADO EL ARTE .....	30
3	METODOLOGÍA.....	33
3.1	DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE FLOW-3D.....	33

3.2	EL MODELO DE TURBULENCIA EN EL SOFTWARE COMERCIAL FLOW 3D	36
3.3	CASO DE VALIDACIÓN.....	36
3.3.1	DOMINIO COMPUTACIONAL.....	40
3.3.2	CARACTERIZACIÓN DE LA FASE SÓLIDA.....	41
3.3.3	MODELO DE ARRASTRE DE SEDIMENTO.....	42
3.3.4	MALLADO.....	44
4	CASO DE ESTUDIO: PROYECTO HIROELÉCTRICO TOACHI-PILATÓN.....	50
4.1.1	LAVADO DEL EMBALSE TOACHI.....	52
4.1.2	DOMINIO COMPUTACIONAL.....	55
4.1.3	CAUDALES DE SIMULACIÓN.....	57
4.1.4	CARACTERÍSTICAS DE LA FASE SÓLIDA.....	58
4.1.5	RESISTENCIA AL FLUJO EN EL DOMINIO COMPUTACIONAL.....	60
4.1.6	MODELO DE ARRASTRE DE SEDIMENTO.....	66
4.1.7	MALLADO.....	67
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	69
5.1	CONTINUIDAD.....	69
5.1.1	CASO DE VALIDACIÓN.....	69
5.1.2	CASO DE ESTUDIO.....	70
5.2	FLUJO.....	72
5.2.1	CASO DE VALIDACIÓN.....	72
5.2.2	CASO DE ESTUDIO.....	74
5.3	DISPOSICIÓN FINAL DE SEDIMENTO.....	74
5.3.1	CASO DE VALIDACIÓN.....	74
5.3.2	CASO DE ESTUDIO.....	75
5.4	ESTABILIDAD NUMÉRICA.....	78
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b> Tipos de lavado de embalses .....	4
<b>Figura 2.2:</b> Movimiento de material sólido o sedimento. ....	7
<b>Figura 2.3:</b> Diagrama de Shields .....	8
<b>Figura 2.4:</b> Malla estructurada .....	12
<b>Figura 2.5:</b> Malla no estructurada .....	13
<b>Figura 2.6:</b> Funciones de pared .....	18
<b>Figura 2.7:</b> Distribución logarítmica de velocidades a) Superficie Lisa. b) Superficie Rugosa.....	20
<b>Figura 2.8:</b> Promediado muestra a muestra (ensamble) de varias trazas de velocidad.....	26
<b>Figura 3.1:</b> Diagrama de flujo del proceso aplicado .....	34
<b>Figura 3.2:</b> Conformación en planta del área de arrastre del material suelto provocado en la prueba I3.....	38
<b>Figura 3.3:</b> Vista de la zona de limpieza producida por la operación de los dos desagües de fondo con un caudal de 750.48 m <sup>3</sup> /s.....	39
<b>Figura 3.4:</b> Vista de la zona de limpieza para la prueba I3. Se observa la conformación de dunas de gran tamaño en la margen derecha .....	39
<b>Figura 3.5:</b> Elementos que conforman el modelo físico de la presa Toachi y el tramo de embalse representado para la investigación experimental. ....	40
<b>Figura 3.6:</b> Geometría del dominio computacional para la simulación de validación.....	41
<b>Figura 3.7:</b> Curva Granulométrica .....	41
<b>Figura 3.8:</b> Estructura de mallado.....	45
<b>Figura 3.9:</b> Bloques de malla.....	46
<b>Figura 3.10:</b> Ubicación punto de evaluación de velocidad en el dominio computacional.....	47
<b>Figura 3.11:</b> Curva Velocidad vs. Relación de malla.....	47
<b>Figura 3.12:</b> Valores de Y+ para el caso de validación.....	49
<b>Figura 4.1:</b> Diagrama de Basson .....	54
<b>Figura 4.2:</b> Conformación de la geometría del tramo de embalse y presa Toachi de conformidad con la topografía actualizada del tramo de estudio. ....	56



<b>Figura 4.3:</b> Detalle de la geometría de la Presa Toachi y sus Obras complementarias construida para la simulación numérica.....	56
<b>Figura 4.4:</b> Geometría preliminar propuesta para la sección de corte de la ataguía.....	57
<b>Figura 4.5:</b> Geometría Final Dominio computacional.....	57
<b>Figura 4.6:</b> Zona de ingreso del río Toachi hacia el túnel de desvío.....	58
<b>Figura 4.7:</b> Material sólido considerado para la simulación numérica.....	59
<b>Figura 4.8:</b> Curva Granulométrica muestra M2 - $d_{50} = 0.144\text{ mm}$ .....	59
<b>Figura 4.9:</b> Curva Granulométrica curva M1 - $d_{50} = 0.155\text{ mm}$ .....	60
<b>Figura 4.10:</b> Planta del Río Toachi.....	61
<b>Figura 4.11:</b> Vista del cauce del río Toachi en la zona de estudio.....	63
<b>Figura 4.12:</b> Vista General del bloque de malla para todo el dominio computacional.....	67
<b>Figura 4.13:</b> Mallado y geometría.....	68
<b>Figura 5.1:</b> Curva de caudal.....	70
<b>Figura 5.2:</b> Curva de descarga.....	71
<b>Figura 5.3:</b> Comparación de la forma del Flujo.....	73
<b>Figura 5.4:</b> Patrón de flujo en la zona de aproximación.....	74
<b>Figura 5.5:</b> Comparación de la disposición final de sedimentos en modelo físico y en la simulación numérica FLOW-3D.....	75
<b>Figura 5.6:</b> Disposición inicial de sedimentos.....	76
<b>Figura 5.7:</b> Disposición final de sedimento.....	77
<b>Figura 5.8:</b> Masa de Sedimento vs. Tiempo.....	77
<b>Figura 5.9:</b> Curva de Estabilidad del desarrollo del algoritmo de solución para la simulación de validación.....	79

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.:</b> Tipología de elementos.....	13
<b>Tabla 3.1:</b> Información referencial sobre la zona de limpieza provocada en la prueba I3, para apertura total de los dos desagües de fondo simultáneamente.....	38
<b>Tabla 3.2:</b> Parámetros modelo de arrastre.....	43
<b>Tabla 3.3:</b> Resultados independencia de malla.....	47

Tabla 3.4: Resumen de valores calculados.....	49
<b>Tabla 4.1:</b> Parámetros evaluados para el embalse Toachi. ....	53
<b>Tabla 4.2:</b> Factores que influyen en la resistencia al movimiento .....	62
<b>Tabla 4.3:</b> Determinación de valores adoptados de $n_i$ para el cauce principal del río Toachi, en el tramo de interés.....	63
<b>Tabla 4.4:</b> Determinación de valores adoptados de $n_i$ para las márgenes laterales del río Toachi, en el tramo de interés.....	63
<b>Tabla 4.5:</b> Cálculos resistencia al flujo en el cauce principal del río.....	65
<b>Tabla 4.6:</b> Rugosidad absoluta del área de simulación numérica. ....	65
<b>Tabla 4.7:</b> Parámetros modelo de arrastre.....	66
<b>Tabla 4.8:</b> Características bloques de malla .....	68
<b>Tabla 4.9:</b> Independencia de malla para simulación de flujos prototipo. ....	69
<b>Tabla 5.1:</b> Resultados numéricos de Continuidad.....	70
<b>Tabla 5.2:</b> Condiciones de Simulación .....	71
<b>Tabla 5.3:</b> Análisis de continuidad .....	71
<b>Tabla 5.4:</b> Resultados de arrastre de sedimentos.....	78

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación desarrolla simulaciones numéricas del flujo de lavado del embalse, utilizando el método de diferencias finitas, a través del software comercial FLOW 3D. El modelo de turbulencia RANS de dos ecuaciones  $k - \omega$  fue utilizado para la predicción de la fase líquida, mientras el modelo de Meyer-Peter Müller fue aplicado para la estimación del arrastre de los sedimentos. Las simulaciones numéricas se llevaron a cabo tridimensionalmente en estado transitorio. Los resultados presentan un análisis del caso específico de la presa Toachi, localizada en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas en Ecuador. Los resultados presentan un análisis del flujo desde el embalse hacia los desagües de fondo, así como del sedimento removido, partiendo de una condición crítica de acumulación del material sólido depositado junto a la presa, una vez que los dos desagües de fondo entran en operación con una apertura del 100%. En este proceso se considera el tamaño predominante de los sedimentos acumulados, así como la altura de estos en la zona próxima a la presa. Un factor importante para el análisis corresponde a la forma del vaso del embalse que queda al cierre de la fase de construcción del proyecto. Para validación, se ha realizado una comparación cualitativa de resultados numéricos con los presentados en el estudio experimental en modelo físico, realizado por la Escuela Politécnica Nacional. Finalmente, se demuestra que la mejor alternativa para el proyecto Toachi-Pilatón es conformar un canal de aproximación hacia los desagües de fondo para mejorar la eficiencia del lavado hidráulico, ya que la geometría actual en canal genera una evacuación de sedimentos con baja eficiencia.

**Palabras clave:** CFD, FLOW 3-D, Flushing, Simulación Numérica, Lavado de Embalse

## **ABSTRACT**

This work develops the numerical simulations of the reservoir flushing, using the finite difference method, applied with the commercial software FLOW 3D. The RANS turbulence model k- $\omega$  was used to predict the liquid phase, while the Meyer-Peter Müller model was applied to estimate the sediment drag. The numerical simulations were carried out three-dimensionally in a transitory state. The results present an analysis of the specific case of the Toachi dam, located in the province of Santo Domingo de los Tsachilas in Ecuador. An analysis of the flow from the reservoir to the bottom drains is presented, as well as the sediment removed, starting from a critical condition of accumulation of solid material in the area near the dam, once the two bottom drains come into operation, with a 100% aperture. In this process, the predominant size of the accumulated sediments is considered, as well as their height in the area near the dam. An important factor for the analysis corresponds to the shape of the reservoir basin that remains at the close of the construction phase of the project, scheduled for 2021. For validation, the numerical results have been compared with the experimental study in physical model, carried out by the National Polytechnic School in 2012. Finally, it is shown that the best alternative for the Toachi-Pilatón project is to form an approach channel to the bottom drains to improve the efficiency of the hydraulic washing, since the current geometry in the canal generates a sediment evacuation with low efficiency.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics, FLOW-3D, Flushing, Toachi Pilatón

## 1. INTRODUCCIÓN

La información técnica disponible sobre el lavado hidráulico de embalses también conocido como “*flushing*” se basa en resultados experimentales, en gran parte de los estudios realizados, el “*flushing*” está relacionado con la magnitud del caudal de descarga, el tiempo de lavado, las características del sedimento, el patrón de flujo y las dimensiones del desagüe de fondo. Hasta hace pocos años, la única herramienta útil para obtener criterios sobre la eficiencia de los diseños propuestos se restringía a la modelación física. Sin embargo, ahora, la disponibilidad de modelos numéricos tridimensionales ofrece una interesante alternativa para analizar las características del flujo de lavado, así como su eficiencia en la expulsión de material sólido hacia el tramo de aguas abajo, e inclusive una cuantificación de la carga de material sólido evacuado y su variación en el tiempo. Esta última información, junto con la variación temporal de caudales líquidos de descarga resulta de mucho interés para predecir adecuadamente la probable afectación ambiental o ecológica que sufrirá el tramo inferior al embalse, por causa de un repentino incremento tanto en los caudales líquidos como en los caudales sólidos descargados desde la presa y su variación en el tiempo, que se esperan durante las operaciones programadas de mantenimiento.

El análisis de la viabilidad y eficiencia de los lavados (limpiezas) de sedimentos de un embalse, con ayuda de la modelación numérica, es aún motivo de esfuerzos y de investigaciones de casos particulares; muy a pesar de que han transcurrido ya varias décadas desde que aparecieron los modelos tipo HEC y HEC RAS en los USA, tipo MIKE del DHI, tipo IALLUVIAL, FLUVIAL, GSTARS, y similares en el ámbito norteamericano, europeo y asiático. En la última década es notable el avance logrado en el ámbito académico chino en la búsqueda de soluciones generales y útiles para la definición de la eficiencia de las operaciones de lavado de sedimentos.

La simulación numérica tridimensional aplicando la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD) del *flushing*, y la modelación física del fenómeno, son las dos únicas herramientas disponibles para obtener criterios sobre la eficiencia del lavado hidráulico de un embalse, considerando que esta operación es la que garantiza la vida útil del mismo. Muchas veces la modelación física del *flushing* con sedimento fino que llega hasta la zona proximal de la presa presenta graves dificultades. Por esta razón, la simulación numérica tridimensional ha ganado una mayor importancia en los últimos años debido a que es posible obtener resultados y criterios en tiempos relativamente cortos con menores costos.

En este trabajo de titulación se analiza el caso del proyecto hidroeléctrico Toachi Pilatón con la geometría construida en campo; los resultados de la simulación numérica tridimensional del lavado hidráulico del embalse Toachi son indispensables para determinar, en primer lugar, la necesidad de conformar obras de aproximación hacia los desagües de fondo y en segundo lugar para definir su geometría, de tal manera que la eficiencia operación aumente, logrando que se evacúe la máxima cantidad de sedimento acumulado con el menor tiempo de suspensión de la generación. El flushing permite así recuperar, en el menor tiempo posible, la totalidad del volumen útil del embalse y restablecer la seguridad y condiciones de operación previstas para el proyecto y específicamente para la central Alluriquín. (Castro, Hidalgo, Galarza, & Guachamín, 2021)

El análisis numérico CFD permite reproducir el comportamiento tridimensional de los flujos multifase predominantes en el proceso de lavado hidráulico, mediante la selección del modelo de turbulencia apropiado para reproducir los movimientos predominantes de la mezcla agua-sólidos, tanto durante la fase de desembalse controlado como durante la fase de lavado hidráulico propiamente dicha.

Para el caso de estudio que corresponde a la presa Toachi se considera que la geometría construida en campo incluye dos desagües de fondo con compuertas radiales de regulación ubicados en el tramo central de la presa. Estas obras permitirán el descenso controlado del nivel del embalse, sea para operaciones de inspección o de reparación. Los desagües de fondo además son indispensables para garantizar el lavado hidráulico del embalse evacuando los materiales sólidos acumulados en un período de tiempo y eliminando así la amenaza de que el material depositado en las cercanías de la obra de toma se ponga nuevamente en suspensión e ingrese hacia el sistema turbogenerador del proyecto. De igual manera, en este caso de estudio, la exclusión periódica de sedimentos desde el embalse permitirá recuperar el volumen útil previsto en el proyecto y garantizará la operación segura del sistema de generación. (Hagger, Schleiss, Boes, & Pfister, 2021)

## **1.1 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Es posible simular adecuadamente el flujo que se presenta en el proceso de lavado de un embalse?

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Realizar la simulación numérica del lavado hidráulico (flushing) de un embalse considerando las características geométricas de un caso de estudio construido en campo.

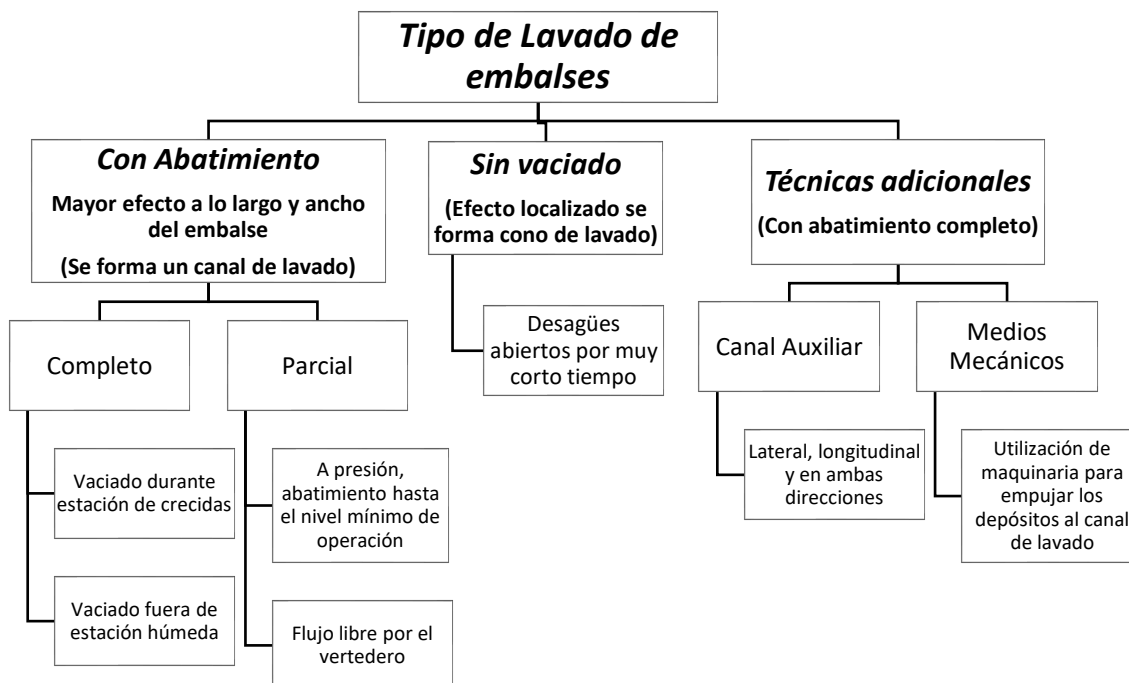
## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar la revisión y análisis de la información disponible para determinar las condiciones de borde e iniciales requeridas para la simulación.
- Definir las características físicas de las partículas sólidas que conforman el sedimento que se depositará en la zona proximal al cuerpo de la presa y a los desagües de fondo para el caso de estudio.
- Revisar y analizar la información generada en el estudio experimental realizado sobre la presa Toachi, en el Centro de Estudios e Investigaciones en Recursos Hídricos de la Escuela Politécnica Nacional en 2011, para la validación de la simulación numérica.
- Aplicar la simulación numérica para predecir el proceso de arrastre de sedimentos durante el lavado del embalse considerando la geometría construida en campo.
- Analizar la información obtenida en el estudio numérico para evaluar la eficiencia del proceso del lavado hidráulico con la geometría del caso de estudio construida en campo.
- Elaborar las recomendaciones para mejorar las operaciones de lavado hidráulico del embalse analizado como caso estudio.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 LAVADO DE EMBALSES

Con el fin de mejorar la eficacia en el manejo de sedimentos (limpieza o lavado del embalse) a través de la operación de las compuertas de los desagües de fondo existen diferentes enfoques y consecuentemente algunas técnicas, que se resumen en el siguiente esquema:



**Figura 2.1:**Tipos de lavado de embalses

**Fuente:** (Kantoush & Sumi, 2010), también indicado en (Heredia E. , 2018)

Según lo reportado en la literatura técnica (colocar referencia), el flushing con abatimiento completo, con la conformación de un canal de lavado, constituye uno de los métodos más eficientes para el tránsito y expulsión del material sólido desde embalse permitiendo una recuperación del volumen de almacenamiento en el embalse.

Una adecuada y eficiente operación del lavado de los sedimentos desde un embalse debe analizarse considerando el punto de vista técnico, socioeconómico y ambiental, de modo que se garantice que la vida útil del proyecto coincida con lo propuesto en los estudios, eliminando la necesidad de operaciones de dragado o de expulsión mecánica de los sedimentos por ser estos relativamente costosos. De igual manera, se busca reducir el peligro o la amenaza tanto de obstrucción de la obra de captación o de las obras de regulación, así como evitar el daño en las turbinas. Se procura alcanzar un manejo



sustentable del embalse, sin graves afectaciones al medio ambiente (Castro, Hidalgo, Galarza, & Guachamín, 2021)

## **2.2 VIABILIDAD PARA EL LAVADO DE SEDIMENTOS**

### **2.2.1 RELACIÓN DEL BALANCE DE SEDIMENTOS (SBR)**

La relación del balance de sedimentos SBR, está dada por la razón entre el volumen de sedimento lavado anualmente y el volumen del sedimento que ingresa al embalse por año.

De acuerdo con lo reportado en la literatura técnica, el valor de SBR califica a la operación de lavado de la siguiente manera:

- Según (Trigrek & Aras, 2012) y (Heredia E. , 2018), si  $SBR > 1$  la operación de lavado es exitosa.
- Según (Wallinford & Atkinson, 1996), si  $SBR > 7$  el lavado hidráulico es exitoso.

Adicionalmente, respetando la recomendación propuesta por (Wallinford & Atkinson, 1996) el caudal mínimo de lavado hidráulico en un embalse debe aproximarse a dos veces el caudal medio anual.

### **2.2.2 RELACIÓN DE CAPACIDAD DE LARGO PLAZO (LTGR)**

Un segundo criterio para la evaluación de la eficiencia sustentable a largo plazo en las operaciones de lavado de sedimentos de un embalse es propuesto (Wallinford & Atkinson, 1996). Este criterio se basa en la geometría simplificada del embalse y en las características del sedimento, particularmente en el ángulo de reposo del material sólido.

La relación de capacidad de largo plazo se define como el cociente entre la capacidad sustentable del embalse y la capacidad original del mismo. La capacidad sustentable corresponde al volumen de almacenamiento del embalse que puede ser mantenido con las operaciones del lavado a largo plazo

La relación *LTGR* debe ser mayor a 1 para que la operación de lavado sea sustentable a largo plazo. Se considera aceptable, cuando el valor es mayor a 0,5. (Wallinford & Atkinson, 1996)

## **2.3 EFICIENCIA DE LAVADO**

Para determinar la eficiencia de lavado hidráulico de sedimentos acumulados en un embalse se plantea la siguiente expresión que relación el volumen total de sedimentos

evacuados con volumen de agua que se utiliza para esta operación (Morris & Fan, 2009), el término de eficiencia se lo determina de la siguiente manera:

$$F_e = \frac{V_s}{Q_f \cdot t}$$

Donde:

$V_s$ : Volumen de Sedimentos

$Q_f$ : Caudal de lavado

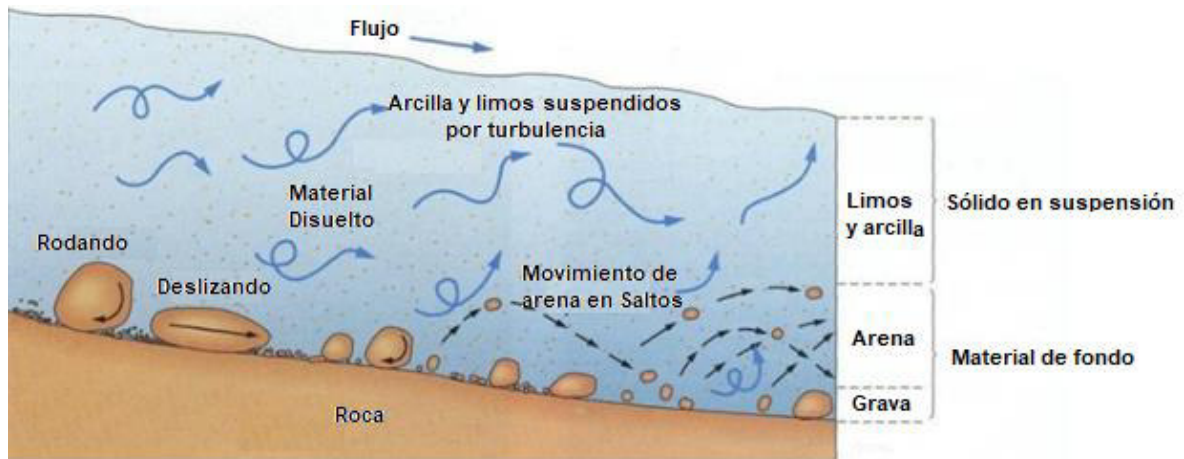
$t$ : Tiempo de la operación

Los niveles de eficiencia del lavado hidráulico dependen mucho del tipo de embalse y del tipo de sedimento que se encuentra azolvado en el fondo de este. Es muy importante tomar en cuenta que los valores de eficiencia más altos no siempre son los mejores, debido a que un lavado con eficiencias muy altas puede generar exceso de material sólido aguas debajo de la presa, lo que implica problemas ambientales. Se considera que lavados hidráulicos con altas eficiencias corresponden a los que alcanzan valores que se encuentran en el rango entre 50% - 65%, mientras que eficiencias menores al 10% son inaceptables. (Morris & Fan, 2009)

## **2.4 TRANSPORTE DE MATERIAL SÓLIDO**

El transporte de material sólido en flujos de agua depende de la capacidad de transporte y del material sólido disponible. (Bravo-Espinoza, Osterkamp, & Lopes, 2004), está conformado por

- a) El arrastre de fondo: es la fracción de material que se mueve sobre o muy cerca del fondo del cauce rodando, arrastrándose o saltando, ver Figura 2.2



**Figura 2.2:** Movimiento de material sólido o sedimento.

**FUENTE:** <https://prezi.com/v22xxcoxkz7w/arrastre-de-sedimentos-en-fuentes-superficiales/>

b) Arrastre en suspensión: corresponde al material sólido suspendido en el flujo.

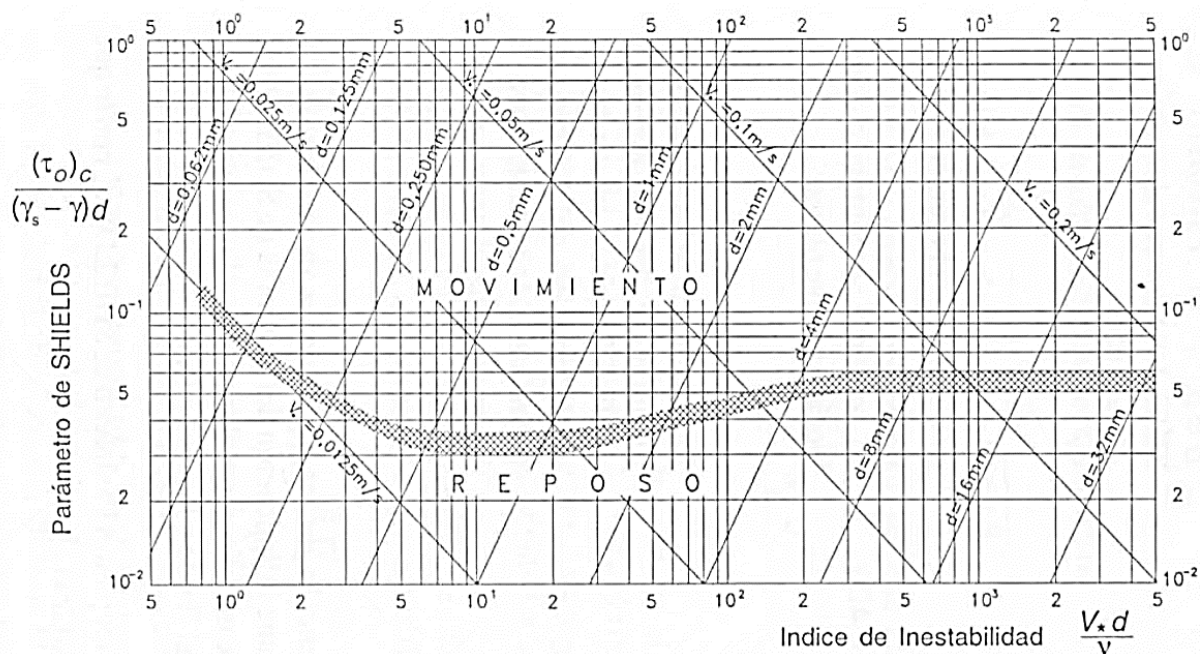
El lavado de un embalse fundamentalmente corresponde al movimiento del material sólido por arrastre de fondo, sin embargo, existe una fracción de material sólido que, a pesar de estar azolvado en el fondo, entra en suspensión debido al alto grado de turbulencia del flujo. Para el análisis del transporte de fondo de sedimentos se debe tomar en cuenta el umbral de movimiento de sedimentos. Para realizar el análisis de umbral de movimiento se deben considerar parámetros como el esfuerzo cortante de fondo ( $\tau_o$ ), la densidad relativa del material sólido ( $s$ ), la densidad del fluido ( $\rho$ ), el tamaño característico del sedimento ( $d_s$ ) y la gravedad ( $g$ ), variables que están relacionadas en el denominado parámetro de Shields.

$$\tau_* = \frac{\tau_o}{\rho \cdot (s - 1) \cdot g \cdot d_s}$$

El arrastre de fondo ocurre cuando se supera las condiciones definidas para el umbral de movimiento, definido a través del parámetro crítico de Shields ( $\tau_*)_c$  que relaciona las fuerzas de arrastre sobre la partícula y las fuerzas resistivas a su movimiento.

$$\tau_* > (\tau_*)_c$$

Este parámetro se lo obtiene del diagrama de Shields, expuesto en la siguiente figura.



**Figura 2.3:** Diagrama de Shields

**FUENTE:** (Vide, 2003)

### 2.4.1 ECUACIÓN DE TRANSPORTE DE MEYER-PETER MÜLLER

Las ecuaciones de estimación del arrastre de fondo son en su mayoría empíricas y se basan en los esfuerzos cortante del fondo que actúan sobre las partículas sólidas del lecho. Una de las expresiones más utilizadas para definir el arrastre de fondo en cauces con pendientes relativamente fuertes y material sólido no cohesivo es la propuesta por Meyer-Peter Müller en 1949, que es utilizada ampliamente hasta la fecha.

La expresión propuesta para esta ecuación es la siguiente:

$$q_B = 8\gamma_s D_m^{3/2} g^{1/2} \Delta^{1/2} \left[ \left( \frac{n'}{n} \right)^{3/2} \cdot \frac{RS}{\Delta D_m} - 0,047 \right]^{3/2}$$

Donde:

$q_B$ : Caudal sólido de arrastre de fondo por unidad de ancho

$\gamma_s$ : Peso específico del sólido

$D_m$ : Diámetro representativo del material suelto de fondo

$\Delta$ : Densidad relativa del material sólido sumergido.

$n'$ : Rugosidad debida al material sólido suelto.

$n$ . Rugosidad representativa en la zona de análisis.

$R$ . Radio hidráulico, aproximadamente la profundidad de flujo.

$S$ : Pendiente longitudinal del tramo.

## **2.5 DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**

El CFD es una parte de la mecánica de fluidos en la que se maneja la simulación numérica para la solución de fenómenos que involucran movimiento de fluidos con ayuda de las computadoras. Para resolver problemas más grandes y complejos y obtener una representación del fenómeno físico más cercana a la realidad son necesarios computadoras con una alta capacidad que, a pesar del desarrollo tecnológico alcanzado en la actualidad, todavía representa una restricción en desarrollo de las simulaciones.

La investigación desarrollada hasta la fecha en el ámbito de CFD ha proporcionado softwares que mejoran la precisión y el rendimiento en simulaciones de fenómenos complejos, como los flujos turbulentos multifásicos.

La validación inicial del software que se implementará se realiza normalmente utilizando información experimental. Además, es posible también fundamentarse en el análisis analítico o empírico realizado previamente sobre el problema particular de interés para la simulación. Una validación final se realiza a menudo utilizando pruebas a escala completa, en el desarrollo del fenómeno real estudiado.

Es de suma importancia tener en cuenta siempre que en mecánica de fluidos existen tres posibles enfoques para analizar un problema.

- I. Enfoque Euleriano o Volumen de control (Análisis integral).
- II. Enfoque Lagrangiano o de Partícula fluida (Análisis diferencial).
- III. Modelación física o estudio experimental (Análisis dimensional).

En todos los enfoques anteriormente mencionados, el flujo debe cumplir con los principios de conservación de la mecánica newtoniana tradicional (conservación de masa y conservación de momentum lineal) además de una relación termodinámica o de estado con condiciones iniciales y de contorno adecuadas, así como los contornos sólidos e interfases del fluido

En los enfoques euleriano y lagrangiano, los requisitos descritos anteriormente están expresados como relaciones matemáticas y deben ser resueltos utilizando métodos

numéricos. En los estudios experimentales es obvio que el fluido que está en movimiento cumple con estos requisitos ya que estos son leyes fundamentales de la física.

En la simulación numérica CFD se debe mencionar que, para la simulación de fenómenos complejos, como el flujo en el flushing de un embalse, se pueden considerar varias opciones para su representación, los modelos de modelado de turbulencia (RANS),  $k - \varepsilon$  estándar, el modelo  $k - \varepsilon$  (RNG) y últimamente el modelo  $k - \omega$  se han utilizado conjuntamente con el método “*volume of fluid*” (VOF) para representar del flujo en superficie libre. El método VOF + RANS es capaz de reproducir la superficie libre de acuerdo con los resultados experimentales. (Chen, Dai, & Liu, 2002), (Cheng, Chen, & Luo, 2006) (Hidalgo, y otros, 2019).

La metodología utilizada en el CFD se basa en reemplazar un fenómeno continuo por uno definido en un dominio discreto utilizando una malla. En el fenómeno real, las variables del flujo se definen en cada punto del espacio, mientras que en la zona de estudio discretizada, los parámetros de flujo se definen únicamente en los nodos que forman la red, por lo que para obtener la representación aproximada de un fenómeno físico descrito por ecuaciones diferenciales parciales, es necesario, en primer lugar transformar el dominio continuo en una malla, para luego transformar a las ecuaciones diferenciales parciales continuas y a las condiciones de frontera, en un conjunto de expresiones algebraicas simultáneas que son las que se resuelven. Además de la discretización espacial también se debe realizar la discretización temporal del fenómeno.

Existen varios métodos para realizar la discretización del dominio continuo, siendo los más habituales:

- Elementos finitos (FEM), creado originalmente en 1956 para análisis estructural, para 10 años después aplicarse en el análisis de las ecuaciones medios continuos. El FEM se inicia con la división del dominio en elementos que pueden ser tetraédricos o triangulares generando una malla no estructurada. El tamaño de estos elementos depende del tipo y de la exactitud deseada. Además, se necesita definir como varía la solución en el interior de los elementos para lo cual se utilizan funciones de forma, generalmente se utilizan funciones de forma lineales que consideran únicamente los nodos que forman parte de la malla y que el valor de cero fuera del elemento correspondiente a la función. El FEM se utiliza para el analizar comportamientos de fluidos No Newtonianos.

- Diferencias finitas (FDM), que aplica el desarrollo en series de Taylor con el fin de discretizar las derivadas parciales de los parámetros de flujo que conforman las ecuaciones diferenciales. Se pueden tener aproximaciones de primer orden al desprestigiar los términos de orden superior que se obtienen del desarrollo de la serie de Taylor, introduciendo un error, llamado “*error de truncamiento*”, que es proporcional al término de mayor orden considerado en la serie. Para aumentar la exactitud de la aproximación obtenida con este método se requiere considerar más términos de la serie de Taylor. Este método requiere una malla estructurada lo podría limitar su aplicación a casos con geometrías sencillas. Este método exige que las ecuaciones propuestas por Navier Stokes se expresen en coordenadas cartesianas para resolver el problema. Por este motivo las diferencias finitas se utilizan principalmente en la simulación numérica directa del fenómeno de turbulencia.

Es importante aclarar que el FDM es equivalente al método de volúmenes finitos (FVM), que es ampliamente utilizado en softwares de simulación numérica CFD en la actualidad. Este método divide al dominio computacional en un número finito de celdas sobre las cuales se impone la conservación de la variable de flujo de manera discreta, los puntos de la malla que se consideran en el FDM son los centroides de cada elemento. (Fernández, 2012)

### **2.5.1 DISCRETIZACIÓN ESPACIAL.**

La discretización espacial de un dominio continuo consiste en transformarlo en un dominio discretizado por varios elementos, cuyo conjunto conforma la malla de la geometría.

El mallado de la geometría es muy importante ya que está directamente ligado con la calidad de resultados. Considerando el costo computacional se debe buscar un mallado que sea eficiente, debe ser más fino las zonas donde puede esperarse una mayor variación de las variables del flujo. Es importante tomar en cuenta que el mallado es solo una parte del pre-proceso.

Las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo, generalmente, no tienen solución analítica, por esta razón el dominio computacional total se divide en subdominios, de formas sencillas:

- Para dominios 3D - Hexaedros y Tetraedros.
- Para dominios 2D - Cuadriláteros y triángulos.

Las ecuaciones de flujo se discretizan y solucionan en cada subdominio, los métodos de solución aproximada son:

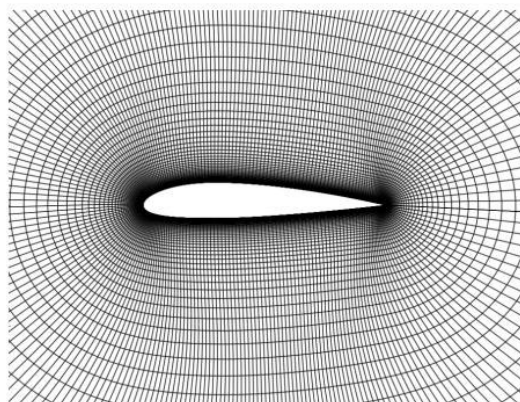
- I. Diferencias finitas
- II. Elementos finitos.
- III. Volúmenes finitos

Una malla es la representación discretizada del modelo virtual de la geometría de estudio, la malla está conformada por una serie de puntos llamados “*nodos*” y “*aristas*” que al unirse forman las superficies de la malla, las cuales se van colocando sobre el modelo virtual de la geometría hasta representarlo completamente. Estas superficies, también llamadas elementos, pueden ser triángulos, cuadriláteros o una combinación de ambos dependiendo del software que se utilice para desarrollar el mallado. (De Vehi Sarrazin, 2016)

Mientras más nodos y elementos tenga la malla, el resultado numérico se aproximará de mejor manera al fenómeno real. Sin embargo, es necesario definir límites en este aspecto, ya que, si la cantidad de celdas es muy grande, el funcionamiento del software se ralentizará ya que el costo computacional se elevará, pudiendo en ocasiones impedir la solución. Es importante destacar que, llegado a un punto de refinamiento, el grado de mejora de los resultados aumenta muy poco, lo que no justifica seguir refinando la malla. (De Vehi Sarrazin, 2016)

Consecuentemente el objetivo del mallado es dividir al dominio computacional en pequeños elementos dentro de los cuales se van a resolver las ecuaciones de gobierno. El criterio más común de clasificar una malla es la conectividad de la malla.

**Mallas Estructuradas:** Se caracteriza por la regularidad en la forma y conexión entre las celdas que conforman la malla (de cuatro lados en 2D y de seis lados en 3D). (Gómez Gonzalez, 2017)

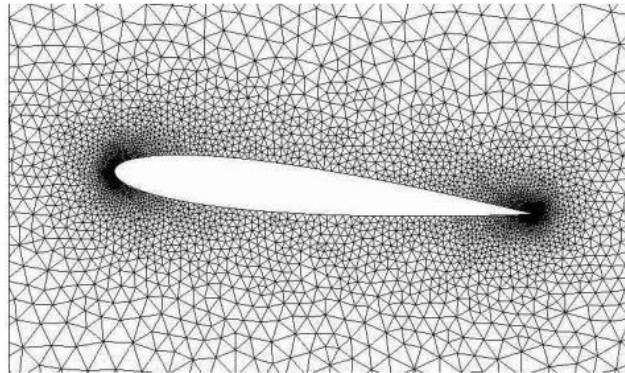


**Figura 2.4:** Malla estructurada

**FUENTE:** (Gómez Gonzalez, 2017)



**Malla No Estructurada:** Caracterizada por una forma irregular de los elementos, además de una conectividad irregular que complica el tratamiento numérico como una matriz de dos o tres dimensiones. Los requisitos de almacenamiento de una malla no estructurada pueden ser sustancialmente mayores. (Gómez Gonzalez, 2017)



**Figura 2.5:** Malla no estructurada

**FUENTE:** (Gómez Gonzalez, 2017)

Al momento de realizar el mallado es importante tomar en cuenta la cantidad de nodos de los elementos que se utilizan para resolver las ecuaciones, ya que, mientras más nodos se tenga por elemento, mayor será la precisión alcanzada por la solución al interior.

Como se presenta en la Tabla 2.1, un mallado hexaédrico cuenta con mayor número de nodos por volumen de control, razón por la cual su resolución interna será más precisa, además de reducir considerablemente la cantidad de celdas del dominio mejorando la aproximación de la solución (menores tiempos de simulación) (Carrillo Sánchez & Castillo Elsitdié, 2011).

**Tabla 2.1:** Tipología de elementos

<b>FORMA DEL ELEMENTO</b>	<b>NODOS POR VOLUMEN DE CONTROL</b>
Tetraedrico	4
Piramidal	5
Cuña o prisma	6
Hexaedrico	8

**FUENTE:** (Carrillo Sánchez & Castillo Elsitdié, 2011)

La precisión y el tiempo de resolución son aspectos críticos en la simulación numérica, ambos dependen mucho de las características de la malla. Se necesitan varios tipos de

elementos para poder resolver diversas geometrías y regímenes de flujo. Sin embargo, la transición entre diferentes tipos de elementos ha sido un desafío. La zona de transición generalmente se ha basado en interfases no conformes o en tetraedros, pero éstos crean problemas con respecto a la calidad de la malla y el recuento excesivo de elementos. Como resultado, los ingenieros han tenido que comprometerse con un tipo de elemento común para minimizar las transiciones de malla. (Versteeg & Malalasekera, 2007)

## 2.5.2 METODOS DE DISCRETIZACIÓN TEMPORAL

La discretización del tiempo se utiliza en el análisis de fenómenos transitorios. (Villamizar A. , 2014). En problemas dependientes del tiempo se integra la ecuación de gobierno respecto al tiempo  $t$  en un intervalo  $\Delta t$ . Las integrales temporales se pueden resolver aplicando un método explícito o un método implícito. (Lamas & Rodríguez, 2014)

### 2.5.2.1 EXPLÍCITO DE EULER

La discretización explícita del tiempo, fija el paso de tiempo máximo para permitir que la rapidez de difusión de las variaciones a través del mallado avance únicamente el tamaño de una celda por cada intervalo, si avanza más de una celda la información se pierde y la solución no converge. (Fernández, 2012). Un ejemplo de la aplicación del método explícito se presenta con la ecuación de onda unidimensional:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$$

Para discretizarla en el nodo  $i$  y en el instante  $n$ , se plantea diferencias finitas para obtener.

$$\frac{\phi_i^n - \phi_i^{(n-1)}}{\Delta t} + c \frac{\phi_i^{(n-1)} - \phi_{i-1}^{(n-1)}}{\Delta x} = 0$$

Como se observa en la ecuación anterior, la derivada espacial está evaluada en el instante  $(n - 1)$ , para obtener  $\phi_i^n$  de manera explícita. Este esquema es estable si se cumple con la condición de que del número de Courant sea menor o igual a 1. El número de Courant, es la variable que define el intervalo de tiempo máximo para que la velocidad de propagación de las fluctuaciones en el mallado, avance como máximo el tamaño de una celda por paso temporal. (Fernández Oro, 2012)

$$Co = \frac{c \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq 1$$

### 2.5.2.2 IMPLÍCITO DE EULER

En este método la derivada espacial se evalúa en el instante  $n$  que se trata de resolver (Fernández, 2012).

$$\frac{\phi_i^n - \phi_i^{(n-1)}}{\Delta t} + c \frac{\phi_i^n - \phi_{i-1}^n}{\Delta x} = 0$$

En este método no es posible resolver cada nodo independientemente, sino que se resuelve un sistema algebraico de ecuaciones acoplado, del cual se obtiene los valores en todos los nodos simultáneamente (Fernández, 2012). Una particularidad importante de este método es que se lo considera incondicionalmente estable, independientemente del tamaño del intervalo de tiempo. (Villamizar A. , 2014)

Las características matemáticas de las ecuaciones de flujo no permiten obtener una estabilidad incondicional para los esquemas implícitos, pero posibilita la obtención de intervalos de tiempo grandes y se obtienen números de Courant mayores a 1. Para este método el máximo número de Courant admisible dependerá del problema que se esté analizando.

### 2.5.3 PREPROCESO

En la dinámica de fluidos mediante simulación numérica, todos los pasos previos a la resolución de las ecuaciones fundamentales del fenómeno se le denomina pre-proceso. Los pasos son los siguientes:

- I. Definición de la geometría del modelo (2D ó 3D).
- II. Definición de la malla.
- III. Identificación de los fenómenos físicos a modelarse.
- IV. Definición de las propiedades de los fluidos
- V. Determinación de las condiciones de frontera e iniciales del problema
- VI. Definición de parámetros para la simulación.

### 2.5.4 CONDICIONES DE CONTORNO O DE BORDE

Las condiciones de borde son esenciales para acotar un problema de simulación numérica, son las condiciones en los límites del dominio computacional que se utilizan para resolver las ecuaciones que gobiernan el fenómeno. (Fernández, 2012)

Las condiciones de contorno dependen de una coordenada espacial, las condiciones típicas son:

- Entrada (inlet): En las condiciones de entrada se define la distribución de las variables en los nodos de la malla que se encuentran en el borde o contorno considerado como inicio del dominio. A partir de los datos definidos en la condición

de entrada para el contorno, se inicia la resolución de las ecuaciones de transporte ya discretizadas para las primeras celdas internas del dominio. El mallado normalmente debe iniciarse en una sección donde se conozcan las condiciones de entrada que pueden ser: campo de velocidades o de caudal, el gradiente de presión o presión específica. Para fenómenos con flujo turbulento se necesita definir los valores de las variables que caracterizan la turbulencia a la entrada. En ciertos casos no existe información disponible sobre estos datos, en este caso los valores característicos de intensidad turbulenta y longitud de escala integral deben ser asumidos.

- Salida (outlet): Las condiciones de salida deben considerar dos aspectos principales, se pueden utilizar con las condiciones de entrada y deben ubicarse en zonas alejadas de perturbaciones geométricas donde el flujo sea estable y completamente desarrollado. Además, las condiciones de salida deben definirse de forma estén en dirección perpendicular a la dirección de flujo, para que los gradientes de la variable sean nulos.
- Plano de simetría (symmetry): esta condición se aplica cuando no hay flujo pasando a través de dicho contorno o cuando no se admite el transporte de ninguna variable escalar a través de esa superficie de malla. Al aplicar esta condición las velocidades normales a la superficie de simetría son cero y los valores de las magnitudes escalares en los nodos adyacentes externos al contorno son iguales a los valores en los nodos adyacentes dentro del dominio.
- Pared (wall): Considera un contorno sólido antideslizante a través del cual no hay flujo. El fluido en contacto con la pared se mueve con la velocidad de ésta. Para aplicar esta condición de contorno se debe considerar las características de la pared como tal, ya que a través de esta puede existir varios fenómenos que pueden afectar al flujo, como transferencia de calor debido un gradiente de temperatura, por lo que según las características intrínsecas de la pared es necesario definir diferentes términos fuente específicos para la velocidad de flujo. El caso de interés se refiere a una pared fija.

La capa límite es una zona que se encuentra muy cercana al contorno sólido, en donde los efectos de las fuerzas viscosas son dominantes. En flujo turbulento totalmente desarrollado se identifican tres subcapas diferentes dentro de la capa límite: la subcapa viscosa, subcapa de transición y la subcapa inercial o logarítmica.

La subcapa viscosa y la subcapa de transición conforman la región interna de la capa límite. El parámetro adimensional que permite identificar a estas subcapas se denomina  $y^+$ , expresado de la siguiente manera:

$$y^+ = \frac{u^* \cdot y}{\mu}$$

Donde  $\mu$  representa la viscosidad absoluta del fluido y  $u^*$ , la velocidad de corte, definida por la siguiente expresión:

$$u^* = \sqrt{\tau_w/\rho}$$

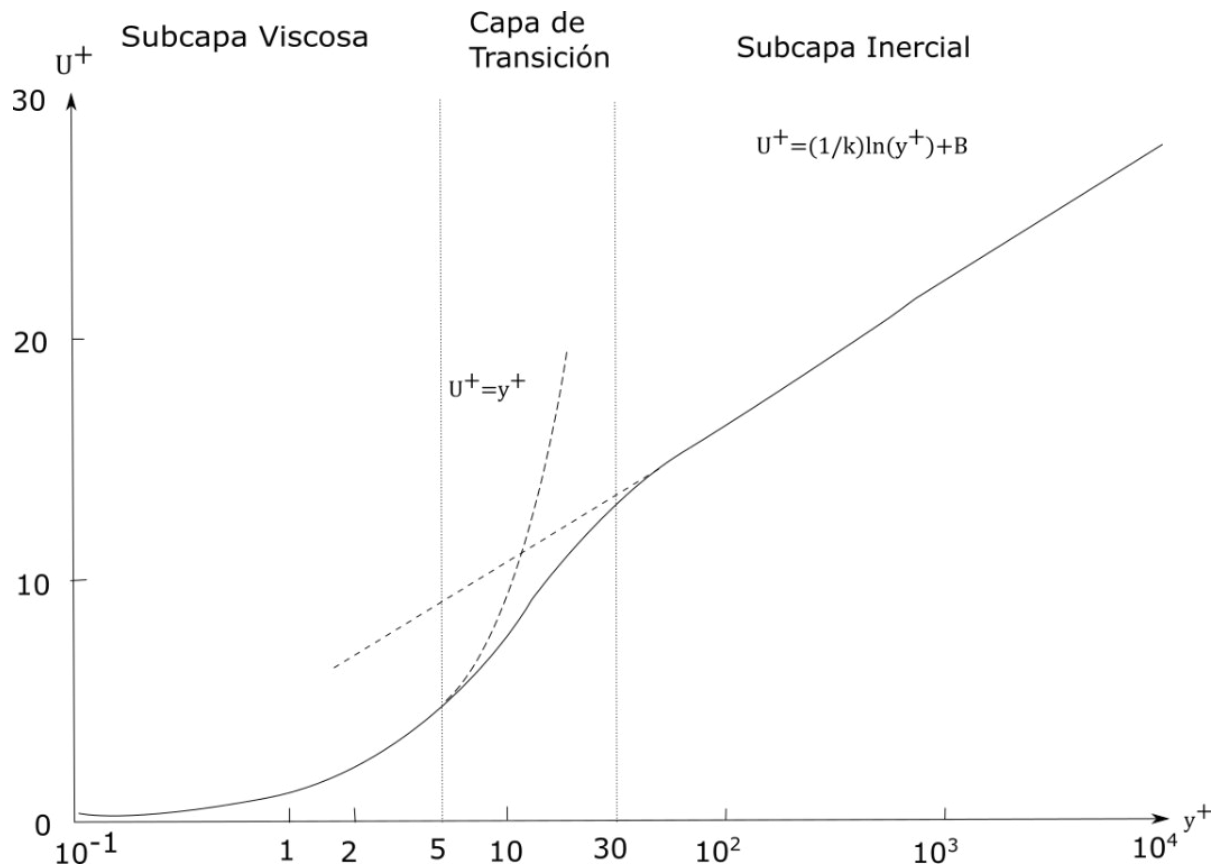
Donde  $\rho$  representa la densidad del fluido y  $\tau_w$ , el esfuerzo cortante en el contorno sólido. El parámetro  $u^*$  también permite definir un nuevo parámetro  $u^+$  que es la relación de la velocidad de flujo y de la velocidad de corte

$$u^+ = \frac{u}{u^*}$$

- La **subcapa viscosa** ( $y^+ < 5$ ), Se desarrolla junto al contorno sólido; las fuerzas viscosas son totalmente dominantes sobre las inerciales (comportamiento laminar). En esta zona se cumple que  $u^+ = y^+$ .
- La **subcapa de transición** ( $5 < y^+ < 30$ ), en esta zona las componentes de tensión de Reynolds y las tensiones viscosas son similares, por lo que ocurre una transformación gradual o transición desde la subcapa viscosa hacia la logarítmica.
- La **subcapa inercial o logarítmica** ( $30 < y^+ < 500$ ), en esta zona predominan las tensiones de Reynolds sobre las viscosas. La distribución de velocidades se ajusta a un perfil logarítmico. (Tennekes & Lumley , 1972) Lo cual es sustentable analíticamente mediante el análisis dimensional o con la integración de las ecuaciones de conservación de masa y momentum, incluyendo la expresión de la longitud de mezcla propuesta por (von Kármán , 1930). En esta zona se cumple:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+)$$

Donde  $E$  y  $\kappa$  son constantes, y corresponden a la constante universal y a la constante de Von Karman respectivamente. Para Reynolds altos y contornos lisos.  $E$  toma un valor de 9.8 y  $\kappa$  es igual a 0.41.



**Figura 2.6:** Funciones de pared

**Fuente:** (Vladislav, 2006)

La simulación del flujo en la zona cercana al contorno sólido se realiza aplicando las denominadas funciones de pared hasta la distancia adimensional  $y^+$  que está de la subcapa inercial ( $30 < y^+ < 500$ ). La modelación para la zona externa aplica en cambio relaciones experimentales definidas que relacionan la velocidad y el el esfuerzo cortante en el contorno sólido.

Los parámetros  $\varepsilon$  y  $k$ , dentro de la subcapa viscosa se definen a partir de las ecuaciones siguientes:

$$k = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_u}}$$

$$\varepsilon = \frac{(u^*)^3}{\kappa y}$$

Donde  $C_u$  es una constante de valor 0.09. La función de pared logarítmica es aplicable para contornos sólidos en los que su rugosidad absoluta queda cubierta completamente por la subcapa laminar, amortiguándose así todo indicio de perturbación y eliminando todo efecto sobre el flujo exterior.

Las investigaciones experimentales desarrolladas en 1950 por Nikuradse en 1950 demostraron que una pared con rugosidad absoluta de mayor tamaño que la subcapa laminar provoca un desplazamiento hacia afuera del perfil logarítmico de velocidades aumentado así el efecto de resistencia al flujo que genera la pared. La siguiente expresión corresponde al perfil adimensional de velocidades:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) - \Delta B$$

Donde  $\Delta B$  corresponde a una relación que cuantifica desplazamiento del perfil de velocidad por efecto de la rugosidad y que es función del tamaño y tipo de esta rugosidad. Para rugosidades absolutas del tamaño y tipo de granos de arena  $\Delta B$  se correlaciona con la altura adimensional de la rugosidad  $Ks^+$ . La investigación experimental demuestra que existen tres comportamientos: *hidráulicamente liso, en transición e hidráulicamente rugoso*. Para rugosidades uniformes se presenta a continuación las ecuaciones paramétricas que definen  $\Delta B$  para estos tres comportamientos. (Cebeci & Bradshaw , 1977):

$$\Delta B = \begin{cases} 0 & \text{si } Ks^+ < 2.25 \\ \frac{1}{\kappa} \ln \left( \frac{Ks^+ - 2.25}{87.75} + Cs \cdot Ks^+ \right) \sin(0.4258(\ln Ks^+ - 2.25)) & \text{si } 2.25 < Ks^+ < 90 \\ \frac{1}{\kappa} \ln(1 + Cs \cdot Ks^+) & \text{si } 90 < Ks^+ \end{cases}$$

La rugosidad adimensional está en función de la altura de rugosidad física  $Ks$ , la velocidad de corte y la viscosidad, y se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$Ks^+ = \frac{Ks \cdot u^*}{\mu}$$

La constante  $Cs$ , es la llamada *constante de rugosidad* que varía de 0.5 – 1. Para rugosidades no uniformes se recomienda adoptar el valor medio de la rugosidad física, es decir  $Cs = 0,5$ . Para estos casos no se ha obtenido una forma para definir el valor de la constante de rugosidad (Badano & Menéndez , 2014).

Como se expuso anteriormente describiendo la ley de pared, se supone que el flujo en la capa interna está determinado por la viscosidad. Esto es cierto solo en superficies hidráulicamente lisas, para lo cual la altura media de los elementos de rugosidad superficial es menor que el grosor de la subcapa viscosa.

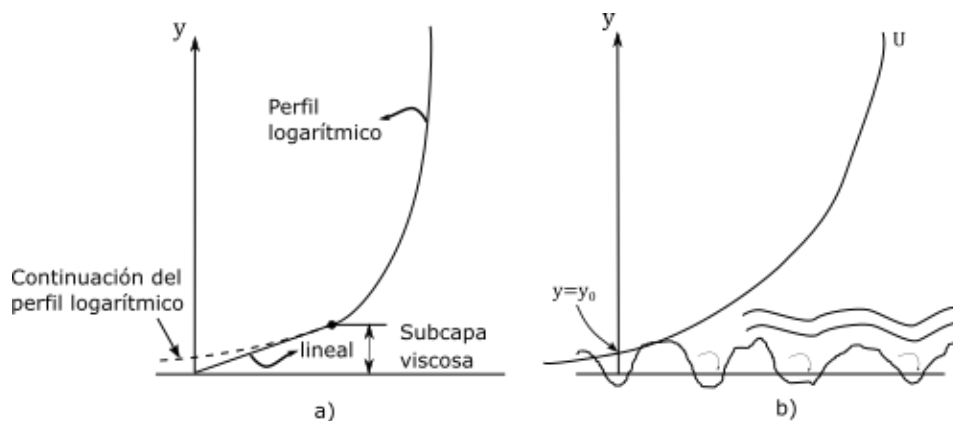
Para una superficie hidráulicamente rugosa, la rugosidad superficial del contorno sólido sobrepasa el espesor de la subcapa viscosa. Esto provoca una estela detrás de cada elemento de rugosidad, y la tensión se transmite a la pared por el "arrastre de presión" sobre los elementos de rugosidad. La viscosidad se vuelve irrelevante para determinar la distribución de la velocidad o la resistencia general en la superficie.

La distribución de velocidad cerca de una superficie rugosa es logarítmica. Para encontrar su forma, se analiza la ley general de velocidad logarítmica.

$$U = \frac{u_*}{k} \ln y + const$$

La constante de integración se determina considerando que se espera que la velocidad media  $U$  sea insignificante en algún lugar dentro de los elementos de rugosidad. Por tanto, la ecuación anterior se aplica para  $y > y_0$ , donde  $y_0$  es una medida de las alturas de rugosidad y se define como el valor de  $y$  en el que la distribución logarítmica de velocidades es igual a cero ( $U = 0$ ). Obteniendo la ecuación para la distribución de velocidades para una superficie rugosa: (Kundu & Cohen, 2008)

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{y_0}$$



**Figura 2.7:** Distribución logarítmica de velocidades a) Superficie Lisa. b) Superficie Rugosa

**FUENTE:** (Kundu & Cohen, 2008)

## 2.6 TURBULENCIA

Un flujo turbulento es aquel en el que predomina el efecto de la inercia asociada con la velocidad del movimiento sobre el efecto de la viscosidad relacionado con la disipación; el resultado de esta característica es un movimiento caótico o desordenado con fluctuaciones de las variables de flujo. El parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas en el flujo es el número de Reynolds, cuyo valor permite clasificar al flujo en: laminar, transicional y turbulento. (Fernández Oro, 2012)



Hasta el momento no ha sido posible encontrar una expresión matemática sencilla que describa aceptablemente las características complejas del movimiento turbulento, por lo que los estudios numéricos son útiles para su análisis.

Por esta razón, actualmente se realizan simulaciones numéricas con las escalas grandes de turbulencia usando simultáneamente modelos que reproduzcan adecuadamente las escalas pequeñas, disminuyendo la cantidad de cálculos numéricos.

## 2.6.1 ECUACIONES DE FLUJO

La descripción instantánea de un flujo se realiza utilizando las expresiones matemáticas llamadas “*Ecuaciones de Navier-Stokes*”, que resultaron de la introducción del transporte viscoso en las ecuaciones planteadas por Euler, cuyo resultado se expresa a continuación:

- Continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0$$

Si se considera flujo incompresible, entonces la densidad es constante en el tiempo y en el espacio del dominio computacional, con lo que la ecuación de continuidad se expresa como la divergencia del vector velocidad igualada cero

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

- Cantidad de Movimiento

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau_{ij}$$

Las variables que describen un flujo son la densidad ( $\rho$ ), las componentes de la velocidad ( $\vec{v}$ ), presión ( $p$ ) y el tensor de esfuerzos viscosos ( $\tau_{ij}$ ), estas variables dependen del tiempo y del espacio.

## 2.6.2 ESCALAS DE TURBULENCIA

Las ecuaciones de Navier – Stokes tienen solución cuando sus términos no lineales pueden ser eliminados, lo que es posible para el caso de los flujos irrotacionales o ideales, en los que la viscosidad es nula y en flujos turbulentos totalmente desarrollados en los que el efecto viscoso prácticamente se desprecia. Para el caso de flujos turbulentos los términos no lineales no pueden ser despreciados, requiriendo métodos numéricos para obtener soluciones (Fernández Oro, 2012)

La modelación de la turbulencia busca representar adecuadamente los efectos de la turbulencia sin que sea necesario llegar a una discretización extremadamente fina del dominio computacional o a la aplicación de la simulación numérica directa DNS. (Carrillo J. , 2014)

Para la comprensión del fenómeno de turbulencia y la simulación numérica del mismo, han resultado claves los aportes hechos por Kolmogorov en 1941, al proponer la modelación de la turbulencia a través de un conjunto de ecuaciones de transporte, así como Prandtl que postuló la ley de capa límite y su definición de longitud de mezcla turbulenta y la ley universal de von Karman.

Hasta la fecha se han desarrollado varios modelos de turbulencia, pero ninguno de ellos ha sido aceptado como adecuado para resolver cualquier tipo de problema. La selección del modelo más adecuado debe considerar algunos aspectos como: el tipo de fenómeno físico, el grado de exactitud buscado, disponibilidad de recursos informáticos, el tiempo disponible, etc.

En el fenómeno turbulento, los torbellinos más grandes interactúan con el movimiento principal extrayendo de él su energía. La magnitud de estos torbellinos está relacionada con la escala del flujo. Los torbellinos de gran tamaño son inestables, ya sea por efecto del cortante o por la influencia mutua entre ellos, tienden a romperse generando torbellinos más pequeños, los mismos que vuelven a subdividirse. Este proceso continuo de subdivisión de los vórtices, desde los más grandes hasta los más pequeños, explica que en todo movimiento turbulento existen simultáneamente un sin número de escalas, que corresponden a los diferentes tamaños de los torbellinos, que al mismo tiempo son transportados y deformados a causa de los gradientes de velocidad del flujo principal y por su continuo intercambio con los demás vórtices. Esta división continua de los vórtices se da hasta que se alcanza un tamaño de vórtice tan pequeño que el efecto de las fuerzas de inercia sobre las fuerzas viscosas es suficientemente grande para mantener esta inestabilidad. En estos vórtices de menor tamaño, finalmente ocurre la disipación viscosa transformándose la energía cinética en energía térmica. A todo el proceso anteriormente descrito se lo denomina "*cascada de energía*". (Fernández Oro, 2012).

La dinámica de los vórtices de pequeña escala, donde realmente se produce la disipación de energía, no depende del movimiento de los grandes vórtices ni de las características representativas del del flujo principal.

Para flujos altamente turbulentos, con valores de Reynolds muy altos, la cascada de energía no depende del nivel energético contenido en los vórtices ni de los efectos directos

de la viscosidad molecular (Carrillo J. , 2014), y de los. Richardson en 1922 estableció tres subdominios de la cascada de energía, los cuales se describen a continuación:

- **Macroescala**, está asociada a los vórtices de mayor tamaño, con valores de Reynolds iguales a los del flujo principal. Las particularidades de la macro escala son función de las condiciones de borde del movimiento y de su dirección.
- **Escala intermedia** ó subrango inercial, es aquella en la que se ocurre un intercambio continuo de energía hacia los vórtices de menor tamaño. Los valores de Reynolds típicos de esta escala todavía son altos por lo que la disipación de energía no es predominante. De acuerdo con la ley universal de Kolmogorov la disipación energética corresponde a un desarrollo lineal con pendiente  $(-5/3)$  en escala logarítmica.
- **Microescala**. Es la de menor tamaño y se caracteriza porque el valor del Reynolds local es cercano a la unidad. En la microescala se produce la disipación energética como resultado de los efectos difusivos que son provocado por la viscosidad del fluido.

De acuerdo con la "*Teoría del equilibrio universal*" de Kolmogorov de 1941, la microescala se mantiene en un estado en el que la cantidad de energía recibida de las escalas de mayor tamaño es prácticamente igual a la razón de cambio con la que se disipa la energía en los vórtices más pequeños. El movimiento en la microescala depende de:

- La tasa de disipación,  $\varepsilon = -dk/dt [L^2/T^3]$ .
- La viscosidad cinemática,  $\nu [L^2/T]$ .

### 2.6.3 PROBLEMA DE CIERRE DE LA TURBULENCIA

Tomando en cuenta que en las ecuaciones de Navier Stokes el número de incógnitas supera al de ecuaciones, es evidente que no hay solución. A esta dificultad se le denomina como "*problema de cierre de la turbulencia*". (Fernández Oro, 2012) Este inconveniente es causado por el término difusivo no lineal presente en las expresiones que rigen el flujo. Por esta razón se requiere la aplicación de modelos de turbulencia que permitan simplificar el problema con hipótesis apropiadas. (Fernández Oro, 2012)..

## 2.7 MODELOS DE TURBULENCIA

Las primeras investigaciones relacionadas con los modelos de turbulencia corresponden a las realizadas a inicios de la década de 1940 por Kolmogorov, que a su vez se basaron en las conclusiones alcanzadas en 1883 por Osborne Reynolds. El análisis de la dinámica de

fluidos mediante simulación numérica necesita descripción numérica del fenómeno de turbulencia, lo que se consigue mediante la implementación de modelos numéricos de turbulencia, los cuales se agrupan en:

- Modelos de Simulación Numérica Directa (DNS).
- Modelos de Simulación de Grandes Vórtices (LES).
- Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier – Stokes (RANS).
- Modelos Parcialmente promediados de las ecuaciones de Navier – Stokes (PANS)

En el desarrollo del presente trabajo se pone especial atención en los modelos RANS ya que son los más adecuados para el tratamiento de problemas de aplicación en ingeniería.

### 2.7.1 REYNOLDS AVERAGED NAVIER-STOKES EQUATIONS

El modelado de la turbulencia es un intento de diseñar o plantear una serie de ecuaciones diferenciales parciales para el cálculo del flujo turbulento, basándose en aproximaciones apropiadas de las expresiones exactas de Navier-Stokes.

En el enfoque RANS, el punto de partida es la separación propuesta por Reynolds de tal manera que cada variable tendrá una parte media y una fluctuante. La inserción de las variables separadas en las ecuaciones de Navier-Stokes, seguida de un promedio de las ecuaciones en sí mismas, da lugar al tensor de tensión de Reynolds, un término desconocido que debe modelarse para que las ecuaciones RANS puedan resolverse. El problema del cierre del sistema de las ecuaciones de Navier-Stokes consiste esencialmente en esta operación. (Fernández, 2012) El modelado RANS emplea el promedio o filtrado temporal de las ecuaciones de transporte:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t) dt$$

En donde,  $T$  corresponde a un paso de tiempo mayor al de las escalas integrales de flujo turbulento. El valor medio temporal, descrito anteriormente, hace posible separar a todo parámetro en un valor promedio y en una parte fluctuante de la siguiente manera:

$$f' = f - \langle f \rangle$$

Al aplicar el operador de promedio temporal, mencionado anteriormente, a las ecuaciones que describen el flujo, se tiene como resultado las ecuaciones RANS que representa el desarrollo de los parámetros medios. La influencia de las fluctuaciones se expresa en un

nuevo término, llamado “*Tensiones de Reynolds*” (Fernández Oro, 2012), el mismo que será representado a través de un modelado numérico para cerrar el sistema.

Para que la operación descrita anteriormente sea representativa del fenómeno turbulento, el tiempo en el que se promedian los valores debe ser mucho mayor que el período de las fluctuaciones turbulentas. La filosofía de las aproximaciones RANS se adapta perfectamente a las aplicaciones ingenieriles del CFD (I-CFD), debido a que en las aplicaciones de ingeniería lo que se busca es entender el comportamiento del flujo promedio, reduciendo la importancia del efecto exclusivo de las fluctuaciones.

Al hablar de flujo medio se hace referencia a la parte promedio de las variables de flujo, es decir, a las partes sin fluctuaciones de las variables que describen el flujo, el hecho de que se haga referencia a las partes promedio de las variables de flujo no implica que se hable necesariamente de un estado estacionario.

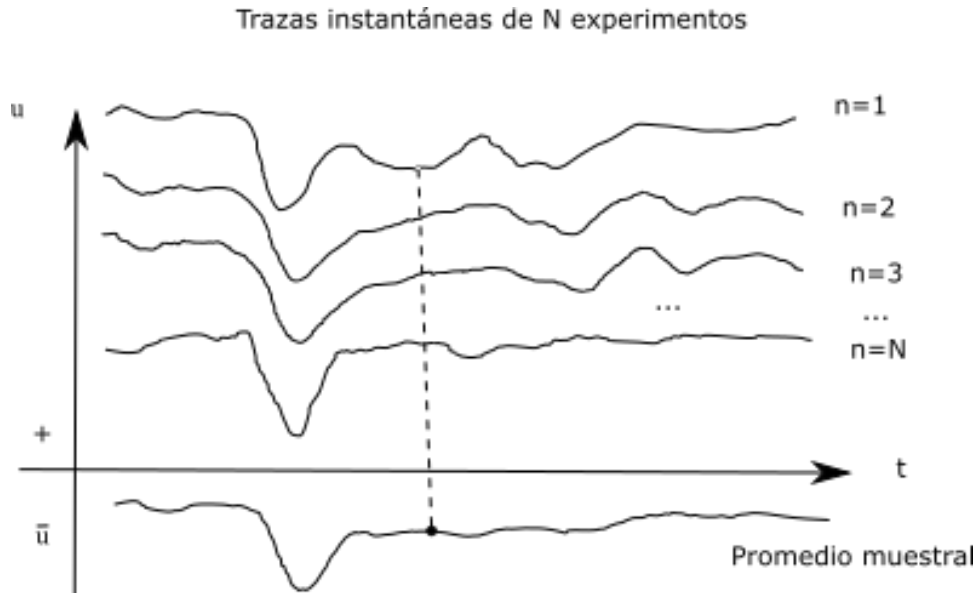
Al aplicar el promedio temporal a la velocidad de flujo se tiene la siguiente expresión

$$\bar{u}(\vec{x}, t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(\vec{x}, t) dt$$

El operador está diseñado para tener un número infinito de mediciones, pero esto no es siempre posible, razón por la cual es necesario tener un número  $N$  mínimo representativo de medidas con el que  $\bar{u}(\vec{x}, t)$  ya sea casi estadísticamente invariable. En la Figura 2.8, se presentan los resultados de  $N$  mediciones de una variable como resultado de  $N$  experimentos idénticos, el promedio muestral será:

$$\bar{u}(\vec{x}, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_n(\vec{x}, t)$$

En esta expresión  $N$  corresponde a un número discreto de mediciones, por lo que la integral se transforma en una sumatoria. Como son resultados de experimentos idénticos de un mismo fenómeno se tiene que  $u(\vec{x}, t) = u_n(\vec{x}, t)$ .



**Figura 2.8:** Promediado muestral de velocidad.

**FUENTE:** (Fernández Oro, 2012)

De manera general, las ecuaciones de Navier Stokes promediadas para un movimiento estacionario de un fluido newtoniano se pueden escribir como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \left( \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}_j}{\partial x_i^2} \right) - \tau_{ij}'$$

Donde  $\tau_{ij}' = \overline{u_i' u_j'}$  es el tensor de esfuerzo viscoso de Reynolds. (Cando & Luo, 2018). Este término de esfuerzo no lineal de Reynolds requiere un modelado adicional para el cierre de las ecuaciones RANS a resolver, lo que ha generado la propuesta de varios modelos diferentes de turbulencia. (Fernández, 2012)

En las ecuaciones de transporte de masa, momento y energía se expresa esta influencia incluyendo términos de difusión adicionales a los promedios de las magnitudes de flujo.

Los modelos que ocupan dos ecuaciones son los denominados RANS. En aplicaciones de ingeniería se utiliza muy frecuentemente este tipo de modelos para la simulación de flujos turbulentos debido a su eficiencia, su aceptable aproximación y exigencias razonables en cuanto al costo computacional.

### 2.7.1.1 **MODELO $k - \epsilon$**

Este es considerado como el modelo estándar para la modelación de la turbulencia, por esta razón es muy frecuentemente utilizado en las simulaciones CFD. Este modelo es

estable, numéricamente robusto y ha demostrado suficiente aproximación con resultados reales.

El modelo se fundamenta en la energía cinética turbulenta ( $k$ ), que se define como la varianza de las fluctuaciones de velocidad y la tasa de disipación turbulenta ( $\varepsilon$ ) definida como la razón de cambio de la energía cinética turbulenta respecto del tiempo, que amortigua las fluctuaciones de velocidad se disipan. (Versteeg & Malalasekera, 2007)

Las ecuaciones de este modelo han sido obtenidas considerando en primer lugar la suposición propuesta Boussinesq en 1877, la cual propone que el tensor de Reynolds y las tasas medias de deformación tienen una relación proporcional. El modelo  $k - \varepsilon$  no alcanza resultados aceptables para algunas aplicaciones específicas de interés ingenieril como: “flujos con separación de capa límite, flujos con cambios repentinos en la velocidad media de deformación, flujos de fluidos en rotación, flujos sobre superficies curvas” (Versteeg & Malalasekera, 2007).

#### **2.7.1.2 Modelo RNG $k - \varepsilon$**

Este modelo aparece como una variante del modelo estándar  $k - \varepsilon$  incluyendo una pequeña mejora en la definición de los coeficientes de las ecuaciones del modelo estándar. (Fernández Oro, 2012) Este modelo se fundamenta en un análisis grupal renormalizado de las ecuaciones de Navier-Stokes (RNG – Re-Normalization Group)  $k - \varepsilon$ . (Versteeg & Malalasekera, 2007)

Para el análisis de flujos en estudios de hidráulica, este modelo de turbulencia es considerado como el modelo base, sin embargo, se recomienda validarlo con resultados experimentales. (Versteeg & Malalasekera, 2007)

#### **2.7.1.3 Modelo realizable $k - \varepsilon$**

El modelo “realizable  $k - \varepsilon$ ” es otra variante del modelo  $k - \varepsilon$  estándar, las principales diferencias entre estos modelos radican en la formulación para la viscosidad turbulenta, se plantea una nueva expresión para la razón de cambio de la disipación,  $\varepsilon$ , la misma que es derivada de una ecuación exacta para el transporte de la variación de la vorticidad cuadrática media.

Como resultado, proporciona principalmente predicciones mejoradas para algunos casos de análisis que resultan de interés en aplicaciones de ingeniería, como son: distribución de velocidades en el fenómeno de dispersión de chorros, flujo en obras hidráulicas complejas, flujos que implican curvaturas permanentes de líneas de corriente.

El modelo realizable y el estándar utilizan funciones de pared. Entonces, no importa si usa el modelo  $k - \varepsilon$  standard o realizable, debe asegurarse de que los valores  $y^+$  en su primera celda cerca de la pared no deben estar por debajo de 30 y no deben exceder excesivamente los valores de 100. Si la malla no cumple con estos requisitos que necesita, se debe volver a combinar su geometría para obtener resultados razonables. No puede superar una malla de baja calidad con el cambio a otro modelo de turbulencia, especialmente si el otro utiliza igualmente las funciones de pared.

#### 2.7.1.4 Modelo $k - \omega$

Otro modelo RANS de 2 ecuaciones es el modelo de  $k - \omega$ , este es considerado el primer modelo completo, debido a que además de modelar la energía cinética turbulenta, tiene un término para la disipación de energía por unidad de volumen y tiempo. En este modelo se consideran las características turbulentas del movimiento introduciendo dos ecuaciones de transporte adicionales, que incluyen las variaciones por convección y difusión de la energía cinética turbulenta. (Versteeg & Malalasekera, 2007).

En el modelo  $k - \omega$ , la variable de transporte  $k$  determina la energía cinética turbulenta y  $\omega$  determina la escala de turbulencia ( $\ell = \sqrt{k}/\omega$ ), la viscosidad es

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}$$

Los esfuerzos de Reynolds son calculados de manera similar a lo que se realiza en todos los modelos RANS de 2 ecuaciones, utilizando la relación de Boussinesq:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u_i' u_j'} = 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = \mu_t \left( \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}$$

Las ecuaciones de transporte para  $k$  y  $\omega$  son:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho k \vec{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega$$

Donde  $P_k$  es la razón de cambio de la producción de energía cinética turbulenta y se define como

$$P_k = \left( 2\mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right)$$

La ecuación de transporte para  $\omega$  es:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla(\rho \omega \vec{v}) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \gamma_1 \left( 2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_1 \rho \omega^2$$



Las ecuaciones de transporte del modelo  $k - \omega$  estándar, tienen los coeficientes  $\sigma_k = 2.0$ ;  $\sigma_\omega = 2.0$ ;  $\gamma_1 = 0.533$ ;  $\beta_1 = 0.075$ ;  $\beta^* = 0.09$ . (Versteeg & Malalasekera, 2007) El modelo  $k - \omega$ , incluye cambios menores en la concepción básica de los modelos  $k - \varepsilon$  para mejorar su enfoque al caso de flujos turbulentos con bajos números de Reynolds. (Fernández, 2012)

El modelo  $k - \omega$ , desarrollado por Wilcox en 1998, presenta modificaciones en el planteamiento base del modelo  $k - \varepsilon$ . La expresión de transporte para la energía cinética turbulenta  $k$  en el modelo  $k - \omega$ , es determinada mediante una ecuación similar a la utilizada en los modelos  $k - \varepsilon$  o  $k - \varepsilon RNG$ , presentando únicamente variaciones en los términos de producción y disipación. Se adiciona una expresión de transporte para la tasa específica de disipación  $\omega$  ( $\omega = \frac{\varepsilon}{k}$ ). Fernández (2012) reporta que el modelo  $k - \omega$ , responde de manera adecuada “...en condiciones de flujo en transición incluso con presencia de gradientes de presión importantes...”. (Fernández Oro, 2012)

## 2.8 SOFTWARE COMERCIAL FLOW 3D- MODELO MULTIFASE

El software comercial Flow 3D utiliza el método “*Volume of Fluid*” (VOF) para simular los fenómenos multifásicos. El modelo VOF puede modelar dos o más fluidos que no se mezclan, a través de la solución de un grupo de ecuaciones para la conservación de masa, cantidad de movimiento y energía.

La fracción volumétrica de cada una de las fases es calculada con una expresión de transporte, con la que se define la ubicación y evolución de las interfases. (Fernández, 2012) Un caso frecuente de aplicación corresponde al análisis de problemas con flujo a superficie libre o con grandes burbujas de aire atrapadas que se mueven junto con las corrientes fluidas (Villamizar A. , 2014). El VOF define una expresión que determina que porcentaje de cada fluido ocupa una celda. (Cando & Luo, 2018)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (U\alpha) = 0$$

Donde  $\alpha$  corresponde a la fracción de volumen que se interpreta la siguiente forma:  $\alpha = 1$  cuando el punto considerado se ubica al interior del fluido líquido;  $\alpha = 0$ , cuando el punto considerado se ubica al interior del fluido gaseoso; y  $0 < \alpha < 1$ , cuando el punto considerado se ubica en una zona con presencia de ambos fluidos. (Cando & Luo, 2018). El parámetro  $\alpha$  se obtiene para cada fase, aplicando las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (U_l \alpha) = 0$$

$$\frac{\partial(1 - \alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot [U_g(1 - \alpha)] = 0$$

Se asume que las velocidades de líquido y gas aportan proporcionalmente al desarrollo de la superficie libre según sus correspondientes fracciones de volumen; de igual manera se determina la velocidad del flujo único en un modelo VOF convencional como la media ponderada de los fluidos que están dentro del volumen considerado, así:

$$\bar{U}_m = \alpha \bar{U}_l + (1 - \alpha) \bar{U}_g$$

Por lo que la ecuación se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U}_m \alpha) + \nabla \cdot [\bar{U}_r \alpha (1 - \alpha)] = 0$$

Donde  $\bar{U}_r = \bar{U}_l - \bar{U}_g$ , representa la velocidad de compresión, siendo un tipo de contribución artificial a la convección de la fracción de volumen. (Versteeg & Malalasekera, 2007) “*El término convectivo adicional actúa solamente en la interfaz, ya que está multiplicado por el factor  $\alpha(1 - \alpha)$ , con el fin de contribuir representativamente en un mejoramiento de la resolución*”. (Cando & Luo, 2018).

El modelo VOF, resulta de mucha importancia en las zonas de flujo asociados fenómenos de auto aireación en los que se generan alta turbulencias y disipación de energía como es el caso del resalto hidráulico, que es un fenómeno que aparece cuando flujo supercrítico ( $Fr > 1$ ) cambia a uno subcrítico ( $Fr < 1$ ). (Montoya et al, 1999).

## 2.9 ESTADO EL ARTE

Numerosas investigaciones relacionadas a la predicción del movimiento del sedimento acumulado en el fondo de un embalse se han realizado a nivel mundial como respuesta a la necesidad de entender los procesos que se desarrollan dentro del arrastre y expulsión del material sólido durante las operaciones de lavado de un embalse. En 2012, (Manenti, Sibilla, Gallati, Agate, & Guandalini) presentan los resultados de su investigación enfocada a la simulación numérica del lavado de sedimentos no cohesivos, con el objetivo de encontrar una predicción confiable de la dinámica producida en la mezcla agua-sedimento existente en el fondo de un reservorio artificial. En el estudio se representa tanto la fase sólida como la fase líquida con un modelo de fluido viscoso cuyo movimiento resulta de la solución simultánea de las ecuaciones de conservación discretizadas de acuerdo con la formulación estándar del método Smooth Particle Hydrodynamics (SPH). Se analiza el efecto de dos criterios de erosión alternativos en la descripción del mecanismo de arrastre de los sedimentos azolvados en el fondo, que corresponden al criterio de esfuerzo cortante de Mohr-Coulomb y a la teoría de Shields.

En 2013, (Ahn, Yang, Boyd, Pridal, & Remus)., analizan numéricamente el lavado hidráulico del sedimento azolvado en el fondo del embalse Lewis and Clark lake en el ramal principal del río Missouri en Estados Unidos. El embalse se forma por la presencia de la presa Gavins Point cerca de Yankton, Dakota del Sur con un desarrollo de aproximadamente 40 km desde presa Gavins Point. En este embalse se ha perdido el 21% del volumen útil debido a procesos de sedimentación que han ocurrido desde la construcción de la presa en 1955. Este caso de estudio presenta una situación crítica de la gestión de sedimentos y su influencia en la sostenibilidad de los aprovechamientos hidroeléctricos. En este caso se recomendó el análisis numérico del lavado hidráulico previa su implementación. En la investigación de Ahn et al se utilizó el modelo unidimensional de frontera móvil GSTARS4 y se calibró usando datos medidos en el embalse de 1975 a 1995. Las modificaciones en la geometría del canal y la cantidad de sedimento lavado se predijeron con cuatro escenarios hipotéticos de flujo. Las eficiencias de lavado de todos los escenarios se estimaron comparando las relaciones entre el caudal líquido de lavado y el sedimento expulsado.

En el ámbito local, también se han realizado algunos trabajos relacionados con la simulación numérica del lavado hidráulico de embalses. En febrero de 2018, el Dr. Edison Heredia presenta el trabajo "*Estudios de Operación de Compuertas para Prevención y Contingencia del Llenado y Vaciado de los Embalses y Estudio Sedimentológico, Evacuación de Sedimentos y Lavado de Sedimentos del Embalse Toachi*" (Heredia E. , 2018). Este estudio buscó analizar la cantidad de sedimentos azolvados, su evacuación y lavado desde el embalse, recomendar la operación para las obras de control y regulación de la presa Toachi como son las compuertas de los vertederos y desagües de fondo. De igual manera se recomendó la operación de las compuertas del azud Pilatón, considerando el efecto del tránsito de los caudales evacuados sobre las obras del proyecto y sobre las zonas que se encuentran aguas abajo de la presa, hasta la población de Alluriquín. Se propuso las medidas de control, supervisión y alarmas correspondientes, que fundamenten la operación del sistema SCADA del proyecto, como parte del sistema de alerta temprana requerido para establecer los diferentes criterios de operación de las compuertas, así como la información que debe ser entregada a la población. En este estudio se realiza la simulación numérica unidimensional del lavado hidráulico del embalse Toachi utilizando software HEC-RAS. Uno puntos de mayor importancia de este estudio es la recomendación de que se realice un estudio numérico tridimensional de la operación de lavado hidráulico del embalse.

En 2020, Ochoa y Cevallos realizan “*La simulación numérica tridimensional del flujo de lavado hidráulico del modelo físico del embalse Toachi, construido en 2012, en el Centro de Investigaciones y estudios en Recursos Hídricos de la Escuela Politécnica Nacional*” (Cevallos & Ochoa, 2020). En este estudio se aplicó el software comercial FLOW-3D, enfocado específicamente a la geometría del modelo construido con escala 1:50, en el que se utilizó material sólido no cohesivo. En este estudio se determinaron las condiciones de la simulación numérica buscando reproducir los resultados experimentales hallados en el estudio de modelo físico.

A pesar de los esfuerzos realizados, el fenómeno del lavado hidráulico de embalses no está totalmente entendido ni ha sido rigurosamente reproducido mediante modelación física o simulación numéricas. Sin embargo, la simulación numérica apoyada en los estudios experimentales corresponde a la mejor herramienta para poder determinar las acciones adecuadas tanto para diseño de obras complementarias, así como programas de operación y mantenimiento de embalses. En este contexto, el presente trabajo analiza el lavado hidráulico de embalses mediante la simulación de un caso de estudio real considerando la geometría de prototipo existente en el aprovechamiento hidroeléctrico Toachi-Pilatón. Se establece una metodología para simular el fenómeno de lavado hidráulico, aplicada a un caso de estudio, esta metodología se ha validado comparando cualitativamente los resultados obtenidos experimental y numéricamente, se ha puesto especial énfasis en la reproducción del flujo de la fase líquida y así como en la disposición final del material sólido una vez que ha finalizado la operación de lavado.

### **3 METODOLOGÍA**

En este capítulo se describe la metodología aplicada al análisis del flujo de lavado hidráulico de un embalse, aplicando CFD. Se inicia con una descripción del software utilizado, así como una descripción del caso utilizado para la validación de la metodología aplicada. En la

Figura 3.1. se presenta el flujograma de procesos para la simulación, validación y aplicación al caso de estudio.

#### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE FLOW-3D.**

FLOW-3D es un software CFD comercial que emplea técnicas numéricas especialmente desarrolladas para resolver las ecuaciones de movimiento de fluidos en estado transitorio y tridimensional. Este software trabaja dispone de varias opciones para la configuración del fenómeno a simular, lo que permite al usuario aplicar el software a una gran variedad de casos en muchas ramas de la ingeniería.

FLOW-3D resuelve numéricamente las ecuaciones de movimiento de fluidos utilizando aproximaciones en diferencias y volúmenes finitos. La región donde se desarrolla el flujo se discretiza usando una malla de celdas hexagonales fijas. En cada celda se calculan valores promedio locales asociados de todas las variables dependientes, todas las variables están calculadas en los centros de las celdas, excepto las velocidades, que se definen en las caras de las celdas.

Los perfiles curvos, las paredes y otras características geométricas se incluyen dentro de la malla definiendo las fracciones de volumen sólido en las caras y las fracciones de volumen de las celdas que está abierta al flujo usando el método FAVOR.

Para definir las aproximaciones numéricas discretas a las ecuaciones de movimiento, los volúmenes de control se definen alrededor de cada ubicación de variable dependiente. Para cada volumen de control, los flujos superficiales, las tensiones superficiales y las fuerzas de masa se pueden calcular en términos de valores de las variables circundantes. Estas cantidades se combinan luego formando aproximaciones a las leyes de conservación expresadas por las ecuaciones de movimiento.

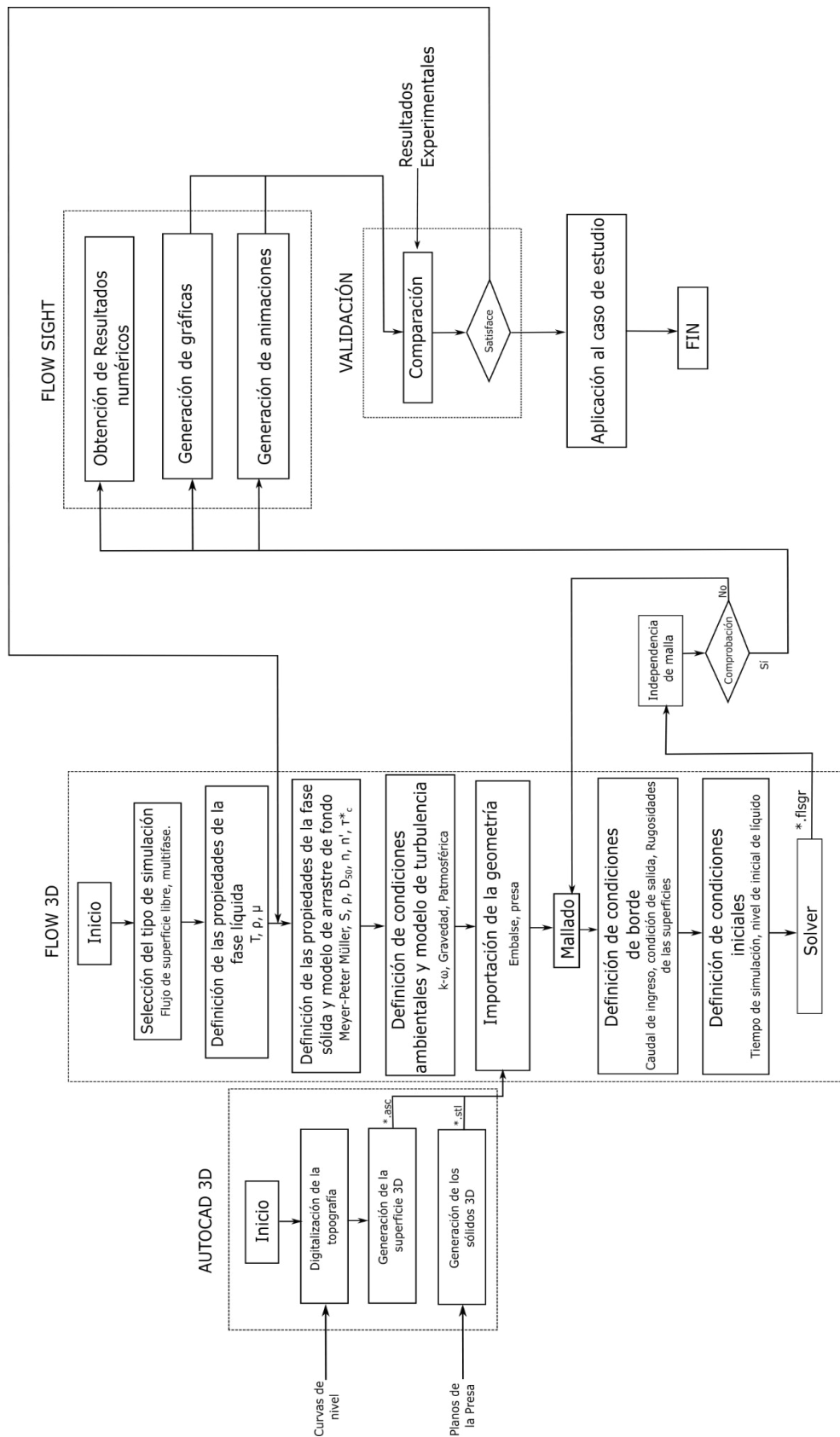


Figura 3.1: Diagrama de flujo del proceso aplicado

FUENTE: Propia

La mayoría de los términos de las ecuaciones de movimiento se evalúan utilizando los valores instantáneos de las variables locales, es decir, explícitamente, aunque también existen algunas opciones implícitas. Esto produce un esquema computacional simple y eficiente para la mayoría de los propósitos, pero requiere el uso de un tamaño de paso de tiempo limitado para mantener resultados computacionalmente estables y precisos.

Una excepción a esta formulación explícita es el tratamiento de las fuerzas de presión. Las presiones y velocidades se acoplan implícitamente mediante el uso de la variación de presión con respecto al tiempo en la ecuación de momento y la variación de velocidades respecto al tiempo, en la ecuación de continuidad. Esta formulación implícita de las ecuaciones en diferencias finitas permite la solución eficiente y estable de problemas de flujo compresible e incompresible a baja velocidad.

La formulación implícita presión-velocidad permite obtener conjuntos acoplados de ecuaciones que deben resolverse mediante iteración. En FLOW-3D, se proporcionan tres de estas técnicas. El más simple es un método de sobre relajación sucesiva (SOR). En algunos casos, donde se requiere un método de solución más implícito, está disponible un método lineal implícito en dirección alternativa especial (SADI). La técnica SADI se puede utilizar en una, dos o en las tres direcciones dependiendo de las características del problema a resolver. Por último, también está disponible un método de residuo mínimo generalizado (GMRES). El solucionador GMRES tiene propiedades de convergencia superiores a los métodos SOR y SADI, especialmente en presencia de términos fuente grandes y en cuadrículas con tamaños de celda variables. El solucionador de GMRES también es más adecuado para la paralelización de memoria compartida; por esta razón este es el solucionador predeterminado y recomendado.

El método numérico básico utilizado en FLOW-3D tiene una precisión formal de primer orden con respecto a los incrementos de tiempo y espacio. Se han tomado precauciones especiales para mantener este grado de precisión incluso cuando la malla de diferencias finitas no es uniforme. También se encuentran disponibles opciones precisas de segundo orden.

Generalmente, los valores de entrada de presión y temperatura se convierten a unidades absolutas. Si se usa presión manométrica para configurar la simulación, entonces se convierte a escala absoluta usando la presión de referencia definida por el usuario, siendo el valor predeterminado una atmósfera en las unidades de simulación. La conversión se realiza para que los modelos que utilizan una ecuación de estado, como el modelo de flujo

compresible, el cambio de fase o los modelos de burbuja adiabática, se puedan integrar sin problemas en la simulación.

## **3.2 EL MODELO DE TURBULENCIA EN EL SOFTWARE COMERCIAL FLOW 3D**

El software FLOW-3D dispone de 6 tipos de modelos de turbulencia, que se listan a continuación:

- a) El modelo de longitud de mezcla de Prandtl, de una ecuación.
- b) El modelo de la energía turbulenta de una ecuación.
- c) El modelo  $k - \varepsilon$ , de 2 ecuaciones.
- d) El modelo  $k - \varepsilon$ , RNG de 2 ecuaciones.
- e) El modelo  $k - \omega$ , de 2 ecuaciones.
- f) El modelo LES.

La selección del modelo de turbulencia para el caso de estudio ha tomado en cuenta las características propias del proceso de desembalse, que se inicia con el dominio computacional lleno de agua en estado prácticamente de reposo, lo cual implica un inicio de movimiento con bajos números de Reynolds.

De conformidad con las recomendaciones de la literatura técnica (Fernández, 2012) el modelo  $k - \omega$  es adecuado para simular las condiciones de flujo turbulento con números de Reynolds relativamente bajos, así como flujos en zonas cercanas a contornos sólidos presentando un mejor comportamiento que los modelos  $k - \varepsilon$  o  $k - \varepsilon$  RNG.

Según el análisis anterior se selecciona al modelo de turbulencia  $k - \omega$  como el más adecuado para cumplir con los objetivos del análisis numérico para el caso de estudio. El modelo seleccionado es un modelo RANS, y por lo tanto trabaja con la viscosidad turbulenta, y por lo tanto, esto implica se debe tomar en cuenta la longitud de mezcla turbulenta (TLEN), para evitar valores equivocados en el cálculo del término de disipación de energía turbulenta, el software FLOW-3D, aplica una longitud de mezcla turbulenta estimada como un valor comprendido entre el 7% al 15% de la longitud característica, considerada a la profundidad del flujo en la zona de análisis como longitud característica del flujo.

## **3.3 CASO DE VALIDACIÓN**

El evento de validación es la prueba I3 realizada en el modelo físico escala 1:50, realizado en el Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos de la Escuela Politécnica



Nacional, que se realiza con un caudal de  $750.48 \text{ m}^3/\text{s}$ , que corresponde a un caudal en modelo físico escala. 1: 50 de  $0.4245 \text{ m}^3/\text{s}$  ó  $42.45 \text{ l/s}$ , con la operación simultánea de los dos desagües de fondo totalmente abiertos. (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - DICA, 2012)

Se colmata el fondo del cauce principal y embalse hasta la cota de fondo de los desagües, es decir 927 msnm, previo al inicio de la prueba I3, se llena el embalse muy lentamente, de tal manera que el sedimento conserve su posición de colmatación inicial en la cota antes indicada. El nivel de la superficie libre que corresponde al inicio de la prueba es el máximo de operación ubicado en la cota 970 msnm, para el cual se abren totalmente los dos desagües de fondo, mientras ingresa al embalse el caudal de prueba que vierte sobre la ataguía.

Se produce el desembalse hasta alcanzar y mantener el funcionamiento de los dos desagües a superficie libre. Se identifica la forma y profundidad del sedimento que queda después de la prueba I3 en la zona de aproximación hacia los desagües de fondo en el embalse.

El área que ha sido limpiada con una apertura del 100 % de ambos desagües de fondo cubre todo el tramo de aproximación desde la presa hasta la ataguía. Junto al paramento de la presa, hacia el estribo derecho se observa una acumulación del material sólido que ha sido depositado hacia la margen derecha como resultado de la curvatura en planta que presenta el tramo en esta sección. Este material sólido no alcanza a ser evacuado a través de los desagües de fondo. En la Figura 3.2 se reporta la conformación de la zona de arrastre producidas luego de la operación de la prueba I3

Se observa que luego de la operación de lavado se mantiene una zona de acumulación de sedimento hacia la margen derecha. En la siguiente Tabla se resume la información referencial en la zona de aproximación hacia los desagües de fondo obtenida en la prueba experimental de lavado de sedimentos, que fue realizada en el modelo físico.



**Figura 3.2:** Conformación en planta del área de arrastre del material suelto provocado en la prueba I3.

**FUENTE:** (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - DICA, 2012)

**Tabla 3.1:** Información referencial sobre la zona de limpieza provocada en la prueba I3, para apertura total de los dos desagües de fondo simultáneamente.

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PROTOTIPO	MODELO
Longitud máxima del área de limpieza	m	137.00	2.74
Ancho máximo del área de limpieza	m	44.00	0.88
Nivel mínimo del área de limpieza	msnm	918.50	0.70
Profundidad máxima del área de limpieza	m	8.50	0.17
Nivel máximo de acumulación	msnm	932.75	0.98

**FUENTE:** (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - DICA, 2012)

En las siguientes figuras se presentan las fotografías de la zona de aproximación hacia la presa luego de la Prueba I3 realizada en el modelo físico.

Se observa que la mayor parte del sedimento del cauce en el tramo que se desarrolla desde la ataguía hasta el paramento de la presa ha sido lavada, permaneciendo apenas una pequeña cantidad de éste en la zona de la curvatura del cauce. Se observa que el

sedimento se mantiene acumulado en el extremo derecho, junto al desagüe derecho, alcanzando en esta zona las máximas alturas de acumulación de sedimento.



**Figura 3.3:** Vista de la zona de limpieza producida por la operación de los dos desagües de fondo con un caudal de 750.48 m<sup>3</sup>/s.

**FUENTE:** (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - DICA, 2012)

En la Figura 3.3 se observa un arrastre efectivo en gran parte del embalse incluyendo el cauce del tramo de aproximación, así como gran acumulación de sólidos hacia la margen derecha.



**Figura 3.4:** Vista de la zona de limpieza para la prueba I3. Se observa la conformación de dunas de gran tamaño en la margen derecha

**FUENTE:** (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - DICA, 2012)

### 3.3.1 DOMINIO COMPUTACIONAL

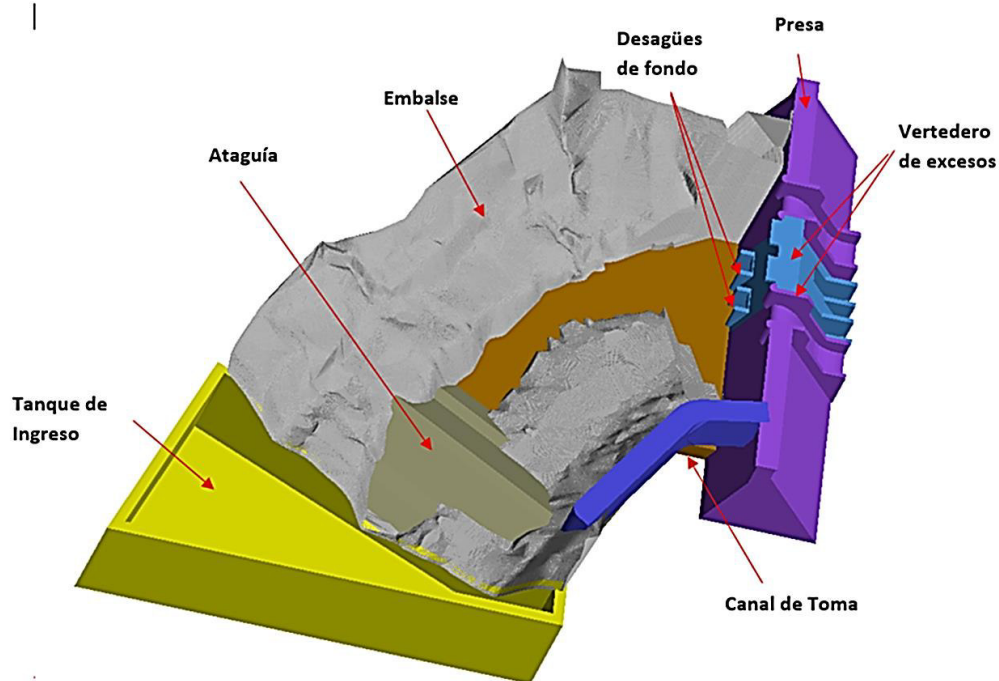
El dominio computacional definido para la simulación de validación toma en cuenta todos los elementos descritos anteriormente. En la siguiente figura se observan los elementos que conforman el dominio computacional construido para la simulación de validación.



**Figura 3.5:** Elementos que conforman el modelo físico de la presa Toachi y el tramo de embalse representado para la investigación experimental.

**FUENTE:** (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - DICA, 2012)

El tramo que corresponde al modelo físico construido para la investigación experimental, con todos los elementos que la conforman corresponden al dominio computacional construido para la simulación de validación. Las partes mostradas en la figura anterior fueron construidas en el software de modelado 3D AUTOCAD 3D para los sólidos y AUTOCAD CIVIL 3D para la conformación de la topografía del modelo. Los componentes de la presa, así como la geometría de corte de la ataguía, fueron importados al software FLOW-3D en formato STL, mientras que la topografía del embalse se importó en formato ASC. El formato STL es un tipo de archivo usado para crear sólidos tridimensionales. El formato ASCII se utiliza para migrar información entre sistemas basados en celdas y es frecuentemente usado para transferir información topográfica relacionadas superficies de terreno. En la Figura 3.6 se presenta el dominio computacional construido para la simulación del lavado del embalse en modelo físico.

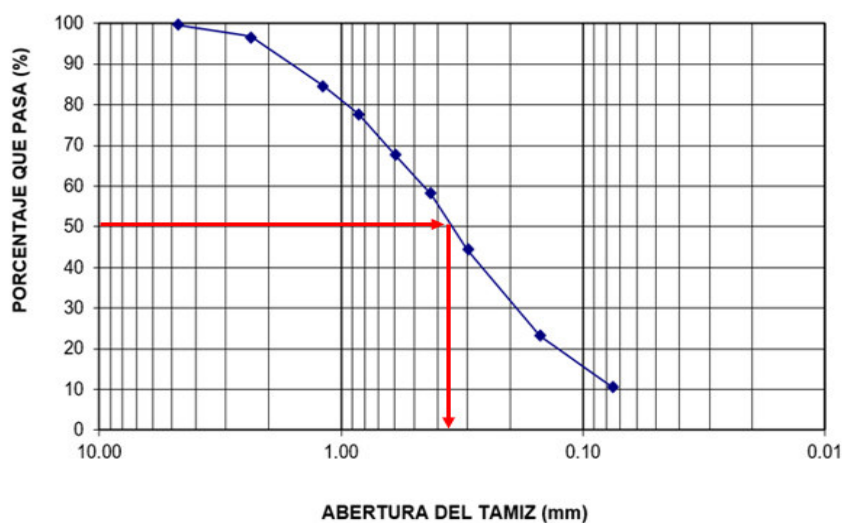


**Figura 3.6:** Geometría del dominio computacional para la simulación de validación.

**FUENTE:** Propia

### 3.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA FASE SÓLIDA.

El material sólido utilizado en la Prueba I3 para el estudio experimental tiene una granulometría que corresponde a la siguiente curva granulométrica. El diámetro representativo de este material corresponde a  $0.35\text{ mm}$ . Este valor es el que se usará para el módulo de arrastre de sedimentos.



**Figura 3.7:** Curva Granulométrica

**FUENTE:** (ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - DICA, 2012)

### **3.3.3 MODELO DE ARRASTRE DE SEDIMENTO**

El arrastre y socavación se refiere al proceso en que los remolinos turbulentos desplazan las partículas sólidas del paquete del lecho móvil y también las ponen en suspensión. Esta situación ocurre cuando el esfuerzo cortante en el fondo del lecho excede el valor del esfuerzo cortante crítico (umbral del movimiento). El desarrollo de este proceso tiene el efecto combinado de la gravedad, la flotabilidad y la fricción.

Del análisis de la evaluación de las ecuaciones empíricas para determinar la tasa de transporte de sedimentos en cauces naturales se reporta en la literatura técnica, que un requisito importante para la aplicación adecuada de una o varias de las ecuaciones empíricas desarrolladas hasta la fecha con la finalidad de predecir la tasa de transporte, corresponde a la comprensión del régimen de movimiento de los sedimentos en el fenómeno que se analiza. Hasta la fecha se conocen varias expresiones empíricas que permiten determinar cuantitativamente las tasas de transporte de sedimentos, sean de fondo, de suspensión o totales. Todas ellas han sido obtenidas a través de análisis de comportamientos de cauces o canales con diferentes condiciones de turbulencia, de resistencia al movimiento y de ubicación de secciones de control, disponibilidad limitada o ilimitada de sedimentos, entre otros factores influyentes en el fenómeno de transporte.

Los resultados que se reportan en la literatura técnica establecen que la ecuación de Meyer-Peter y Müller presentan una mejor capacidad predictiva en cauces macro rugosos, con flujos turbulentos totalmente desarrollados en los que se produce un transporte preferente de fondo, con un tamaño dominante de las partículas sólidas que las caracteriza como elementos no cohesivos.

Para el análisis del lavado hidráulico en el embalse Toachi, en el tramo de estudio, que es muy próximo a la presa, se tienen partículas que se clasifican como arenas finas no cohesivas, las mismas que en su mayoría serán movidas como una carga de fondo. El canal de aproximación que se ha propuesto presenta también una pendiente longitudinal relativamente fuerte y será conformado por enrocado, lo que generará durante el proceso de lavado hidráulico flujos turbulentos y los contornos se comportarán como hidráulicamente rugosos. Por esta razón se ha seleccionado la ecuación de MPM como la adecuada para la simulación del fenómeno de arrastre de sedimento en el lavado hidráulico.

El software FLOW-3D, dispone de un módulo en el cual se configura las condiciones del para el arrastre del sedimento, este módulo opera mediante un proceso de arrastre y



depósito simultáneo del sedimento, el transporte de carga en el fondo y el transporte de los sedimentos en suspensión.

Los parámetros que se consideraron para la representación del movimiento de los sedimentos se determinan mediante un estudio granulométrico del material obtenido en la visita de campo realizada al proyecto y se muestran a continuación:

- Ecuación de modelo de arrastre: Meyer-Peter & Müller
- Diámetro medio de sedimento  $d_{50}$ : 0.00035 mm
- Tipo de sedimento: Arena húmeda
- Densidad del sedimento: 1800 kg/m<sup>3</sup>
- Parámetro crítico de Shields: 0.05
- Coeficiente de arrastre: 0,018
- Coeficiente de carga de fondo: 8
- Ángulo de reposo: 40°
- Rugosidad del lecho/ $d_{50}$ : 2.5

A continuación, se presenta una tabla resumen donde se detallan y describe con más detalle estos parámetros.

**Tabla 3.2:** Parámetros modelo de arrastre

Parámetro	Selección	Descripción
Ecuación seleccionada de Transporte de fondo	Meyer-Peter & Müller	Ecuación de transporte de fondo. válida para diámetro máximo de sedimento igual a 30mm
Diámetro	0,00035	Tamaño representativo del sedimento, (d50)
Densidad	1800	Arena fina húmeda (Instituto Chileno del Acero, 2002)
Parámetro crítico de Shields	0,05	Para el caso de lechos móviles horizontales con flujo turbulento y tamaño de grano uniforme se recomienda el valor de $\theta_{cr}=0,05$ .
Coeficiente de arrastre	0,018	Para transporte de sedimentos en suspensión
Coeficiente de carga de fondo	8	Se recomienda adoptar valores entre: 5 para transporte bajo; 8 para transporte medio y hasta 12 para transporte muy alto.

Angulo de reposo (°)	40	Se define en función del tipo de sedimento. Para el proyecto se tiene un sedimento relativamente fino
Rugosidad del lecho/d <sub>50</sub>	2,5	Relación entre rugosidad de Nikuradse de la superficie del lecho y el diámetro de grano medio

**FUENTE:** Propia

### 3.3.4 MALLADO

El software FLOW-3D utiliza una malla estructurada que puede definirse a través de un sistema de coordenadas cartesiano o cilíndrico. Las geometrías interactúan con la malla siguiendo el método FAVOR.

FAVOR es un método disponible en FLOW 3D, que incorpora los efectos geométricos en las ecuaciones gobernantes. Este método, al ser un método de discretización espacial se ve afectado por la resolución de la malla computacional. Esto se debe a que el preprocesador genera fracciones de área para cada cara de celda en la malla al determinar qué esquinas de la cara están dentro de una geometría definida.

Si las cuatro esquinas de una cara de celda están dentro de la geometría, entonces toda la cara se define para estar dentro de la geometría. De igual manera, si todas las esquinas se encuentran fuera, se supone que toda la cara está fuera de la geometría. Cuando algunas esquinas de la cara están dentro de una geometría y otras están fuera, se calcula la intersección de la geometría con los bordes de la cara. (Flow Science, 2020)

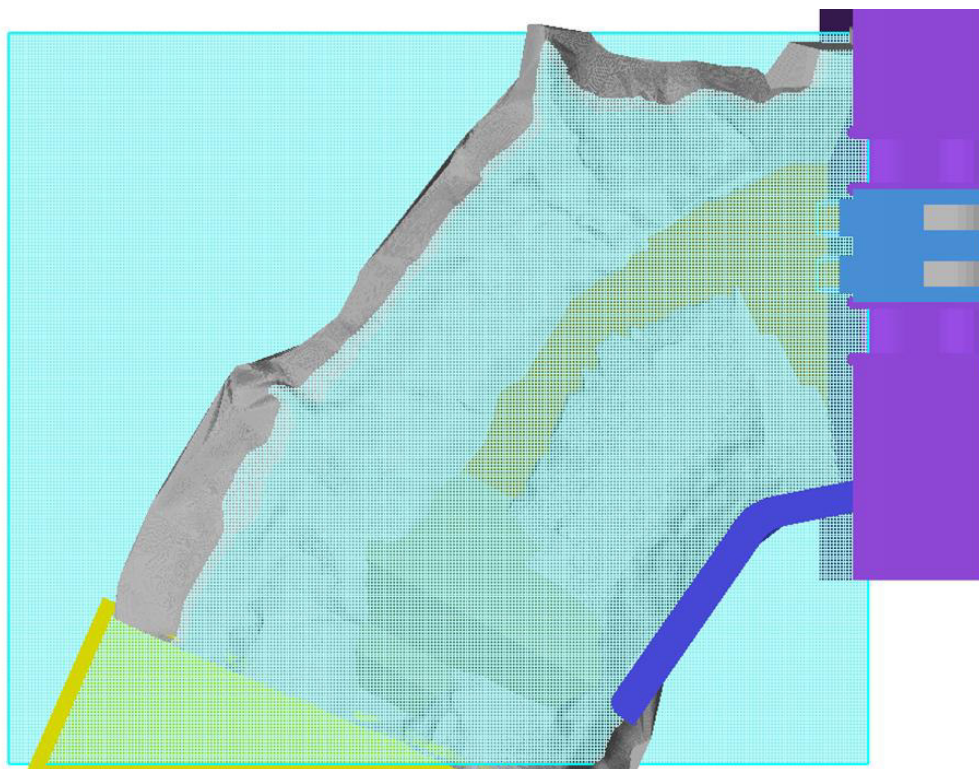
Las fracciones de área se calculan a partir de estos puntos de intersección asumiendo conexiones en línea recta entre los puntos de intersección dentro de la cara. El supuesto de línea recta introduce un pequeño error en el área fraccionaria cuando el límite de la geometría se curva dentro de la celda. La aproximación es consistente con los otros supuestos en el desarrollo de las ecuaciones y mejora a medida que se refina la resolución de la cuadrícula. Esto favorece para que las configuraciones complejas puedan ser discretizadas fácilmente. Esto permite definiciones completamente independientes de la malla y la geometría, por lo que la geometría se puede modificar sin redefinir la malla. Por lo tanto, el enfoque FAVOR proporciona una generación de malla mucho más simple y rápida que para el caso de mallas ajustadas a la geometría. Esta característica que ofrece el FLOW-3D, es una ventaja importante para cualquier aplicación práctica.



El mallado en FLOW 3D, se genera como bloques de malla. Es posible definir múltiples bloques de malla para crear mallas más eficientes al modelar dominios de flujo complejos. Los bloques de malla adicionales se pueden definir para que estén completamente dentro de otro bloque de malla (bloque anidado), pueden colindar en un límite de otro bloque de malla (bloque vinculado) o pueden superponerse parcialmente. Estas características favorecen y facilitan la aplicación práctica para el mallado de geometrías complejas.

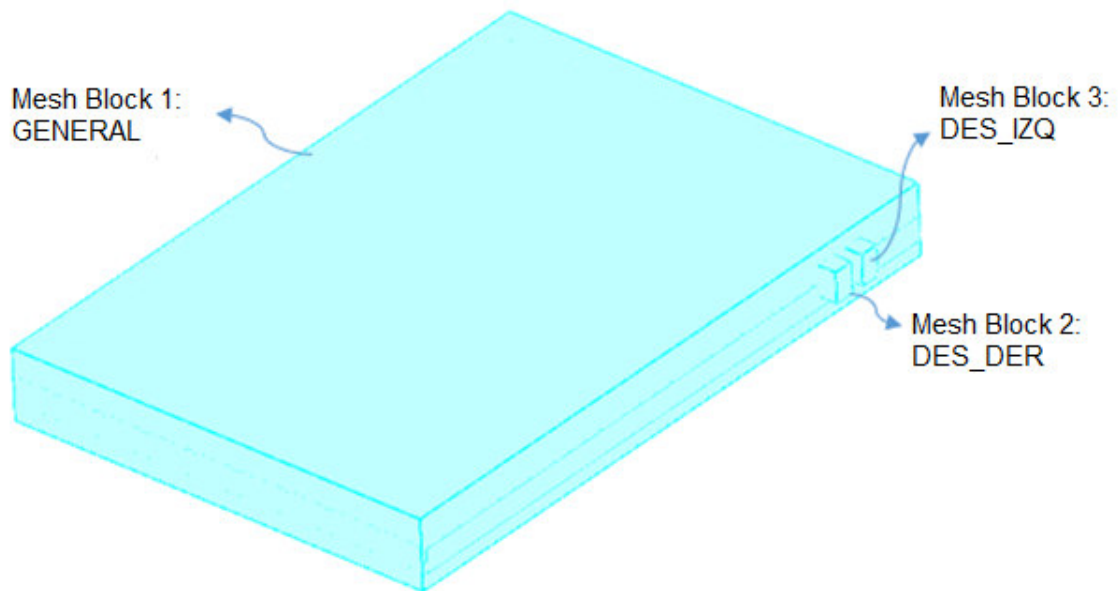
Para el caso de estudio, que corresponde a la porción de embalse de la presa Toachi en la proximidad de esta, se puede considerar a la geometría del dominio computacional como muy compleja y debe ser discretizada tomando en cuenta los límites y condiciones iniciales del flujo, por lo que es sumamente importante la forma en la que se debe conformar el mallado.

Para el caso de la validación, que corresponde a la geometría del modelo físico escala 1:50, se ha desarrollado una configuración del mallado que permite definir con claridad la región de fluido en su condición inicial de reposo que corresponde al embalse en operación normal con los desagües de fondo cerrados. Por esta razón se ha configurado un bloque general que define en su totalidad el dominio computacional, con dos bloques que permiten estudiar el flujo a través de cada desagüe de fondo, como se indica en la siguiente figura.



**Figura 3.8:** Estructura de mallado.

**FUENTE:** Propia



**Figura 3.9:** Bloques de malla

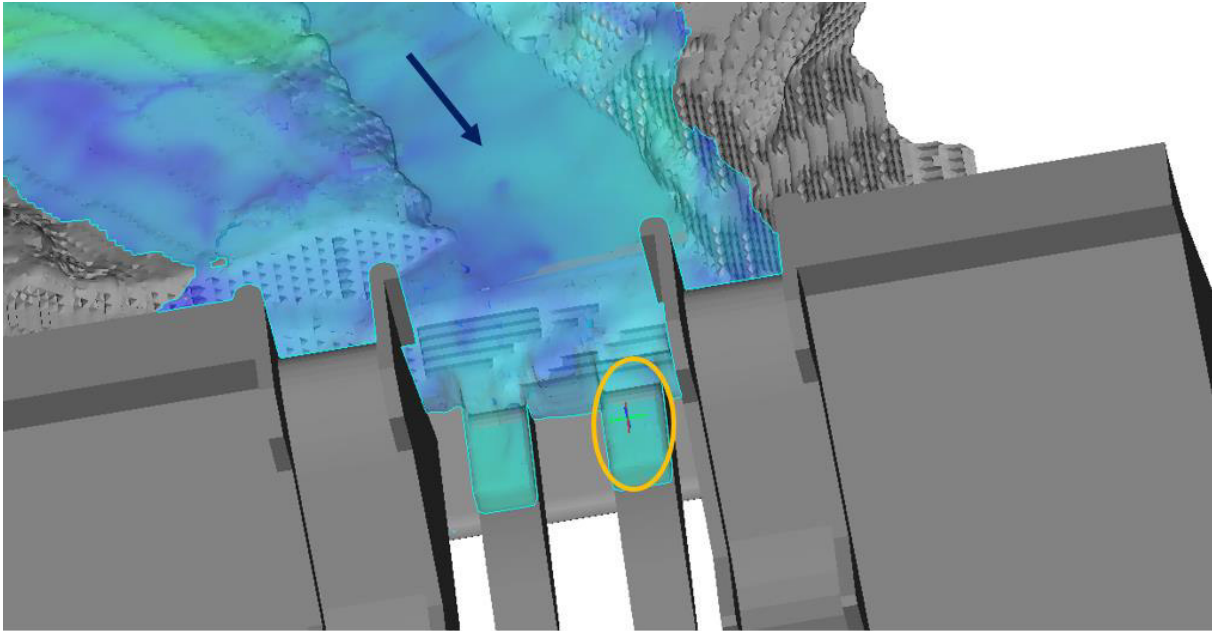
**FUENTE:** Propia

Para definir el tamaño de celda que no afecta al resultado de la simulación numérica, se ha realizado un estudio de “*independencia de malla*”, el mismo que define el tamaño de celda para el cual la incertidumbre producida por la malla es insignificante en los resultados finales de la simulación.

Para la realización de este estudio se ha seleccionado como variable principal del fenómeno a la velocidad del flujo. Se determina su variación para tres simulaciones con diferentes tamaños de celda. Según (Celik, y otros, 2008), se recomienda empezar por un tamaño de celda grueso y refinarlo de manera uniforme, tomando datos de la variable principal y del número de elementos que se generan en cada mallado.

Con los datos descritos anteriormente se procede al cálculo del valor de extrapolación de Richardson, que permite construir a partir de una secuencia convergente otra secuencia más rápidamente convergente. Esta técnica se usa para mejorar los resultados de métodos numéricos a partir de una estimación previa.

A continuación, se presentan los datos recopilados para 3 simulaciones realizadas con tres tamaños de malla diferentes. En la siguiente figura se presenta el punto dentro del dominio computacional donde se determina el valor del parámetro velocidad de flujo, con el que se realiza el estudio de independencia de malla.



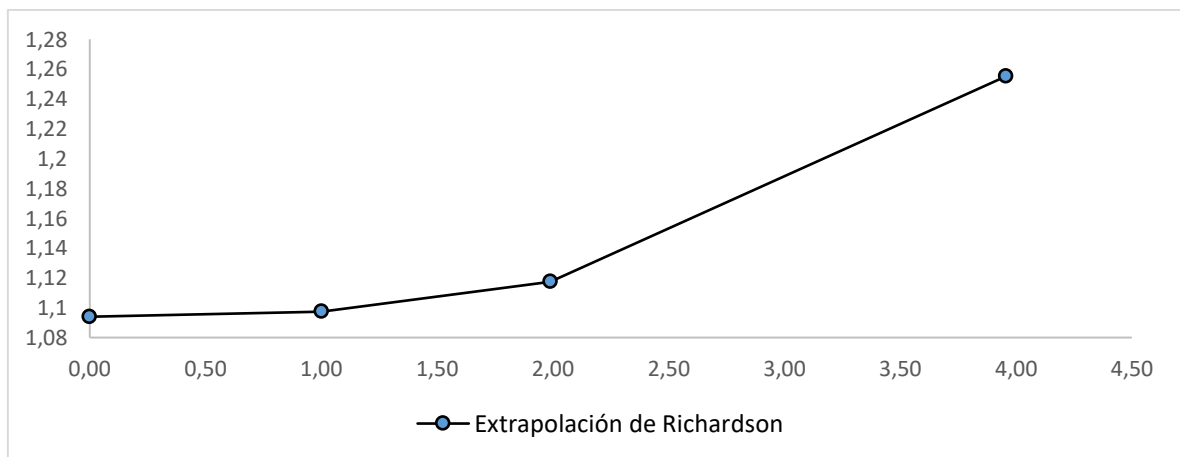
**Figura 3.10:** Ubicación punto de evaluación de velocidad en el dominio computacional.

**FUENTE:** Propia

**Tabla 3.3:** Resultados independencia de malla.

Tipo celda	Descripción	Tamaño de celda	# elementos	Volumen Real dominio	Relación de malla	Velocidad	GCI %
		mm	-	m <sup>3</sup>		m/s	
1	Malla fina	20	3045728	5,64	1,0	1,0974	
2	Malla media	40	387008	5,64	2,0	1,1174	0.389
3	Malla gruesa	80	49196	5,64	4,0	1,2551	2.63

**FUENTE:** Propia



**Figura 3.11:** Curva Velocidad vs. Relación de malla

**FUENTE:** Propia

En la tabla anterior se observa que el valor de GCI para la malla media y para la malla fina tienen valores menores al 5%, lo que significa que la inestabilidad e incertidumbre generadas debido al mallado para ambos casos son insignificantes (Celik, y otros, 2008), En consecuencia, ambas mallas podrían ser utilizadas para la simulación del lavado y se obtendrán valores confiables desde el punto de vista del mallado. Sin embargo, debido a los criterios expuestos para el modelo de turbulencia se realiza el mallado fino.

Adicionalmente se ha seleccionado una sección transversal ubicada dentro del dominio computacional, en la zona cercana al ingreso hacia los desagües de fondo. En esta sección se ha determinado el valor de  $y^+$  utilizando las siguientes ecuaciones:

- Número adimensional de Reynolds:

$$Re = \frac{u h \rho}{\mu}$$

- Coeficiente de fricción de Schilchting:

$$C_f = (2 \log_{10}(Re_x) - 0,65)^{-2,3}$$

Para  $Re < 10^9$

- Esfuerzo cortante en el contorno:

$$\tau_0 = C_f \frac{1}{2} \rho u^2$$

- Velocidad de corte:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

- Parámetro adimensional  $y^+$ :

$$y^+ = \frac{u_* y}{\frac{\mu}{\rho}}$$

A continuación, se presenta una tabla con todos los valores calculados para la sección seleccionada.

Tabla 3.4: Resumen de valores calculados.

CALCULO $Y^+$			
Parametro	Símbolo	Unidades	Valor Modelo
Tamaño de celda	$y$	m	0,02
Longitud representativa	$h$	m	0,123428571
Densidad del fluido	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1000
Velocidad de flujo	$u$	m/s	0,254217391
Viscosidad dinámica	$\mu$	kg/ms	0,001
Reynolds	$Re$	[-]	31377,68944
Cf	$C_f$	[-]	0,007602035
Esfuerzo cortante	$\tau_0$	Pa	0,245646395
Velocidad de corte	$u_*$	m/s	0,015673111
$y^+$	$y^+$	[-]	313

FUENTE: Propia.

El valor obtenido para la sección analizada corresponde a 313, lo cual está dentro del rango recomendado en el manual de usuario de FLOW 3D (Flow Science, 2017). Se entiende entonces que, en la simulación numérica, la representación del flujo en la zona cercana al contorno sólido es aceptable.

En la siguiente figura se presenta la distribución de valores de  $y^+$  calculados por el FLOW 3D en una vista inferior del dominio computacional.

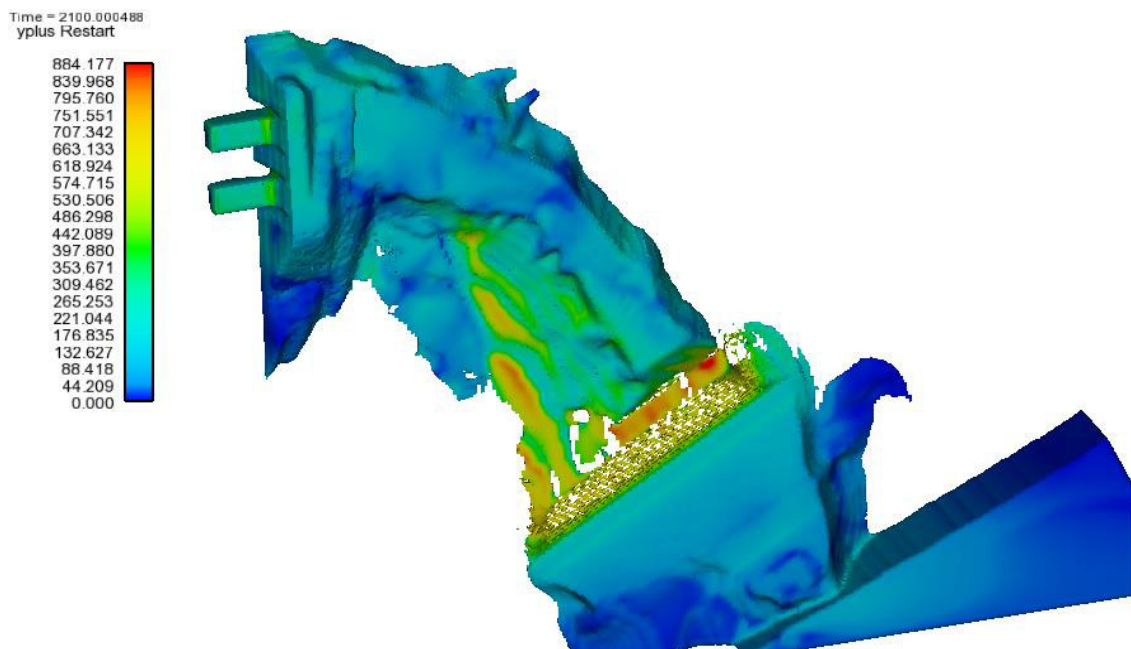


Figura 3.12: Valores de  $Y^+$  para el caso de validación.

FUENTE: Propia

## 4 CASO DE ESTUDIO: PROYECTO HIROELÉCTRICO TOACHI-PILATÓN

El aprovechamiento hidroeléctrico Toachi – Pilatón es desarrollado por CELEC EP, Unidad de Negocio HIDROTOAPI, dentro del plan nacional de hidrogenación, con el fin de aportar al Sistema Nacional Interconectado alrededor de 1100 *GWh* por año, que representa un 6% del consumo a nivel nacional (CELEC, 2020).

Adicionalmente el proyecto Toachi – Pilatón, al ser alimentado por dos ríos de la vertiente del pacífico, contribuirá al abastecimiento del país en la época de estiaje de los ríos de la vertiente amazónica.

Para el desarrollo del presente trabajo de titulación, se ha realizado una revisión de los estudios relacionados con el lavado hidráulico de sedimentos en embalses y específicamente en el embalse Toachi, así como de la modelación hidráulica de este fenómeno. La información relevante se resume a continuación:

*“Estudio Hidrológico - Hidráulico Complementario, que Determine los Caudales de Crecida y Defina las Afectaciones de estos Caudales, Aguas Abajo de las Obras Principales del Proyecto Hidroeléctrico Toachi – Pilatón “ (CIERHI-EPN, 2011):*

- Los caudales de crecida para diferentes períodos de retorno, específicamente el caudal medio anual con un valor de  $41.3 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Mapas de Peligros por Inundaciones, en el río Toachi.
- Recomendación sobre la necesidad sobre estudiar las reglas de operación y mantenimiento de las estructuras de descarga, que permitan su correcta operación y reduzcan la amenaza de inundaciones hacia aguas debajo de la presa; en particular, en el caso de la apertura total de las compuertas con embalse lleno.

*“Manual de Operación y Mantenimiento de la Presa Toachi” (ASTECC - Carrillo & Carrillo - Lombardi):*

- Definición de los procedimientos y controles de las obras y equipos de la presa para su puesta en operación.
- Procedimientos de operación y para las labores de mantenimiento programado a realizarse durante el período de funcionamiento.

- Operación y mantenimiento de la presa de hormigón, obras de evacuación de crecidas, obras de toma y desagües de fondo.

*“Informe de Aprobación de los Estudios y Diseños Definitivos del Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón 254,4 MW” (CELEC-EP 2016)*

- Es urgente realizar los siguientes estudios:
  - I. Estudio de operación de las compuertas para prevención y Contingencia del Llenado y Vaciado de los Embalses.
  - II. Estudio Sedimentológico, Evacuación de Sedimentos y Lavado de sedimentos de los Embalses.

*“Estudios de Operación de Compuertas para Prevención y Contingencia del Llenado y Vaciado de los Embalses y Estudio Sedimentológico, Evacuación de Sedimentos y Lavado de Sedimentos del Embalse Toachi” (Heredia E. , 2018)*, cuyos principales resultados configuran el fundamento para el desarrollo del presente trabajo. Entre las conclusiones y recomendaciones obtenidas de los análisis ejecutados por el Dr. E. Heredia se puntualiza lo siguiente:

- Un lavado cada 3 años con condiciones hidrológicas húmedas provoca que el frente de sedimentación se aproxime demasiado a la presa, aumentando el riesgo de ingreso de sedimento a la obra de captación.
- Se recomienda el lavado cada año en el período húmedo (febrero -abril) para tener alcanzar una mejor eficacia, con énfasis en los primeros años de operación.
- Se recomienda el caudal mínimo de lavado igual al doble del caudal medio anual, es decir,  $82,6 \text{ m}^3/\text{s}$ .
- Se realiza una simulación matemática unidimensional, que genera un grado de incertidumbre, por esta razón se recomienda el análisis numérico con modelos tridimensionales aplicando la dinámica de fluidos computacional validado con modelación física.
- Se recomienda las operaciones de lavado manteniendo una apertura total de las compuertas instaladas en los desagües de fondo para garantizar condiciones de tránsito de caudales a flujo libre.

## **4.1.1 LAVADO DEL EMBALSE TOACHI**

### **4.1.1.1 CRITERIOS GENERALES**

Las restricciones que deben ser tomadas en cuenta para lograr la operación eficiente de lavado de sedimentos desde el embalse Toachi, son:

- Las operaciones de lavado deben realizarse en época de caudales altos.
- El nivel del embalse debe ser abatido totalmente en un periodo de tiempo corto hasta conseguir flujo libre para garantizar el tránsito de los sedimentos en el embalse.
- La velocidad máxima admisible para el abatimiento del nivel del agua en el embalse debe tomar en cuenta las condiciones de estabilidad de los taludes del embalse.
- Los desagües de fondo deben tener la capacidad suficiente para evacuar los sedimentos
- Los desagües de fondo deben disponer de compuertas para el vaciado del embalse y lavado controlado de los sedimentos.

### **4.1.1.2 CRITERIOS ESPECÍFICOS**

- Con base en las investigaciones de (Wallinford & Atkinson, 1996), se establece que el procedimiento de lavado de sedimentos llega a ser efectivo únicamente en reservorios ubicados en valles estrechos, como es el caso del embalse Toachi.
- El lavado del embalse Toachi deberá ser realizado con el abatimiento total del embalse y con las compuertas totalmente abiertas de los desagües de fondo. (Heredia E. , 2018).
- Los caudales máximos que pueden ser descargados a través de los desagües de fondo de la presa Toachi ( $1600 \text{ m}^3/\text{s}$  por cada desagüe) garantiza la evacuación de grandes caudales líquidos y sólidos, sin obstrucción.
- Es importante mencionar que el parámetro *SBR* para el embalse Toachi llega a ser igual 27, por lo que se concluye que el lavado de sedimentos para el caso de estudio tiene una alta probabilidad de éxito.
- La hidrología del río Toachi demuestra que los caudales iguales o mayores a dos veces el caudal medio anual se presentarán unos 47 días al año. Este período es razonable porque permite la ejecución de los lavados programados en la época de lluvias (entre marzo y abril de cada año). (Escuela Politécnica Nacional - FICA, 2012)
- En el caso de estudio se alcanza un valor del *LTCR* igual a 0,715 (Heredia E. , 2018); por lo que el lavado hidráulico es viable y sustentable a largo plazo
- El caudal mínimo de lavado debe aproximarse a dos veces el caudal medio anual del río Toachi, es decir  $82,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . (Wallinford & Atkinson, 1996)



- La limpieza en condiciones de flujo a presión a través de las estructuras de descarga es poco eficiente y genera normalmente un mayor costo por la pérdida de volumen útil para la generación de energía. (Wallinford & Atkinson, 1996)
- Según (Annandele, 1984), si las condiciones geométricas, topográficas e hidráulicas del embalse en la presa Toachi cumplen con la expresión:

$$V_T/V_{QM} \leq 1/50$$

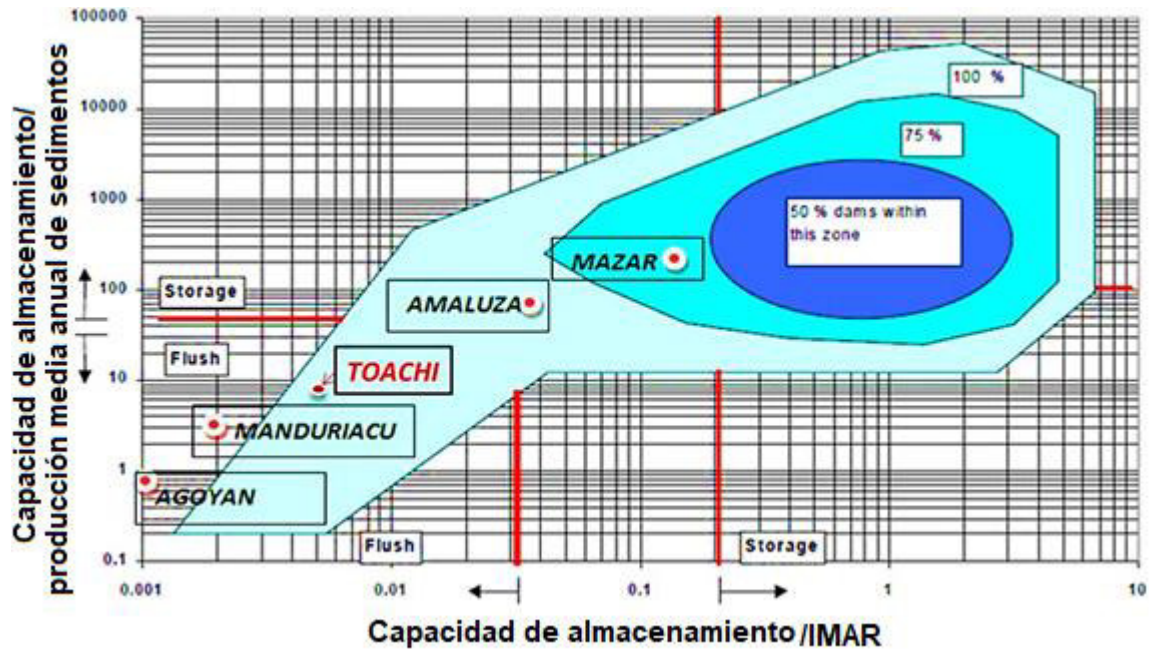
donde  $V_T$  es la capacidad del embalse,  $V_{QM}$  es el volumen medio anual de agua que ingresa al embalse. se cumple esta desigualdad, el lavado del embalse puede llegar a ser efectivo.

- Basson desarrolla un diagrama basándose en los resultados de lavado hidráulico en aproximadamente 50 presas alrededor del mundo, este diagrama relaciona la capacidad del embalse con el volumen de agua que ingresa anualmente al embalse y el aporte anual de sedimentos. Se considera que este diagrama permite estimar la factibilidad de que el lavado hidráulico en un embalse sea efectivo. (Trigrek & Aras, 2012). En la **Tabla 4.1** los parámetros correspondientes al embalse Toachi, que permiten su ubicación dentro del diagrama de Basson.
- En la **Figura 4.1**. se observa que el lavado hidráulico para el embalse Toachi es factible.

**Tabla 4.1:** Parámetros evaluados para el embalse Toachi.

PARAMETRO	UNIDAD	VALOR
Aporte anual de sedimentos	hm <sup>3</sup>	0,71
Caudal medio anual	m <sup>3</sup> /s	41
Volumen anual de agua	hm <sup>3</sup>	1302,4
Capacidad del embalse	hm <sup>3</sup>	6,7
Capacidad embalse / Volumen Anual de agua	(-)	0,005
Capacidad embalse / Aporte Anual sedimentos	(-)	9,437

**FUENTE:** (Heredia, 2018)



**Figura 4.1:** Diagrama de Basson

**FUENTE:** (Heredia, 2018)

Adicionalmente, Atkinson en 1996 aportó con un criterio complementario para calificar la factibilidad del lavado hidráulico en un embalse: (Wallinford & Atkinson, 1996).

- i. Cuando se alcanza el equilibrio de largo plazo entre la cantidad de sedimento que ingresa al embalse y el que sale a través de los desagües de fondo.
- ii. Cuando el volumen de depósitos que permanece en el embalse sea suficientemente pequeño que permita la recuperación del volumen útil.
- iii. Cuando el costo del lavado no exceda los beneficios. (Trigrek & Aras, 2012)

Para el caso de estudio, se dispone de información experimental obtenida de un ensayo de lavado hidráulico del embalse, realizado en el modelo físico Escala 1:50 de la Presa Toachi y sus Obras Complementarias, que fue construido y operado en el Laboratorio del Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos de la Escuela Politécnica Nacional en 2012. El proceso de validación se lo realiza aprovechando la información experimental de esta prueba y reproduciendo el mismo flujo de lavado en la simulación CFD. De esta manera ha sido posible ajustar las condiciones de contorno e iniciales en la simulación, de tal forma que los resultados numéricos y experimentales sean coherentes y se aproximen con desviaciones que estén dentro de rangos aceptables.

El evento de validación, por lo tanto, corresponde a la prueba I3, descrita en el estudio denominado “*Estudio en modelo hidráulico escala 1:50 presa Toachi y sus obras*”

*complementarias*". El principal objetivo de la validación es definir las condiciones y configuraciones que permitan representar numéricamente el fenómeno de lavado del embalse Toachi con aproximación suficiente a los resultados obtenidos en el modelo físico. Con la validación de los parámetros de simulación se aplicará al caso de estudio del lavado del embalse Toachi real.

#### **4.1.2 DOMINIO COMPUTACIONAL**

Para la implementación de la simulación CFD del proceso de lavado hidráulico en un dominio computacional que representa el estado actual del embalse Toachi, a continuación, se definen las condiciones geométricas consideradas para su desarrollo.

La simulación numérica realizada considera la topografía actual del vaso, con la cota inferior en el corte preliminar de ataguía de aguas arriba ubicada en la cota 930,5 *msnm*. La geometría preliminar propuesta para el corte de la ataguía se presenta en la **Figura 4.4**. Además, en las siguientes figuras se presenta la conformación de la geometría del dominio computacional construida para la simulación numérica del flujo de lavado, en la que se observa el tramo de interés del embalse de acuerdo con la topografía actualizada. De igual manera, se presenta el detalle de la presa Toachi y sus obras complementarias.

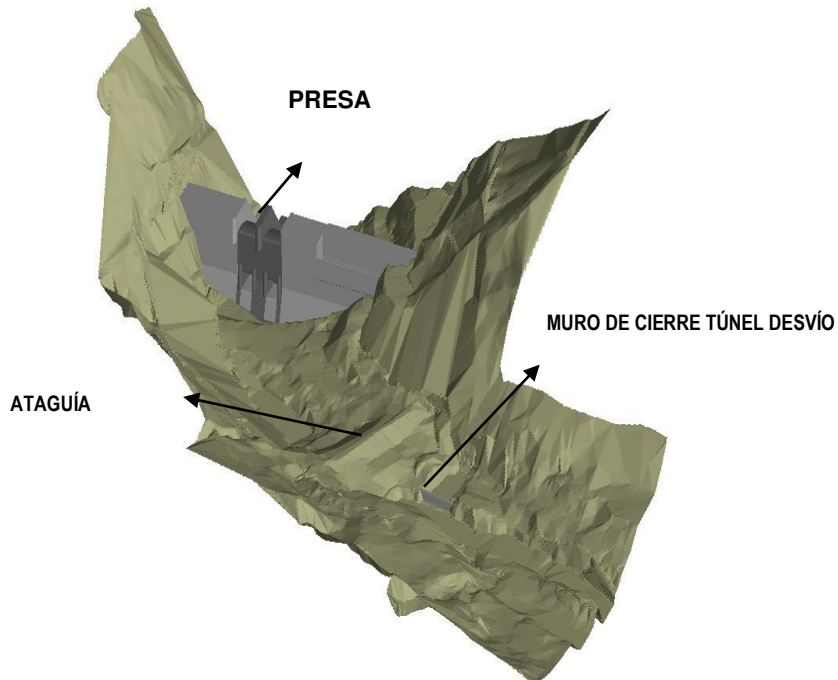
Para el desarrollo de esta simulación, se ha considerado la geometría preliminar propuesta para el corte de ataguía, que corresponde a una sección doble trapezoidal, como se observa en la **Figura 4.2**. La base inferior de esta sección de corte se ubica en la cota 930,5 *msnm* y tiene un ancho de 26 *m*. (Castro, Hidalgo, Galarza, & Guachamín, 2021)

La conformación geométrica definitiva de esta sección de corte de la ataguía será realizada en base del estudio geológico geotécnico que se desarrolla paralelamente al estudio de simulación numérica cumplido hasta la presente fecha. Las modificaciones en la geometría de la sección de corte de la ataguía serán implementadas en las simulaciones numéricas que se desarrollarán para optimizar la geometría del canal de aproximación, una vez que se haya aprobado la recomendación del trazado propuesto en este documento.

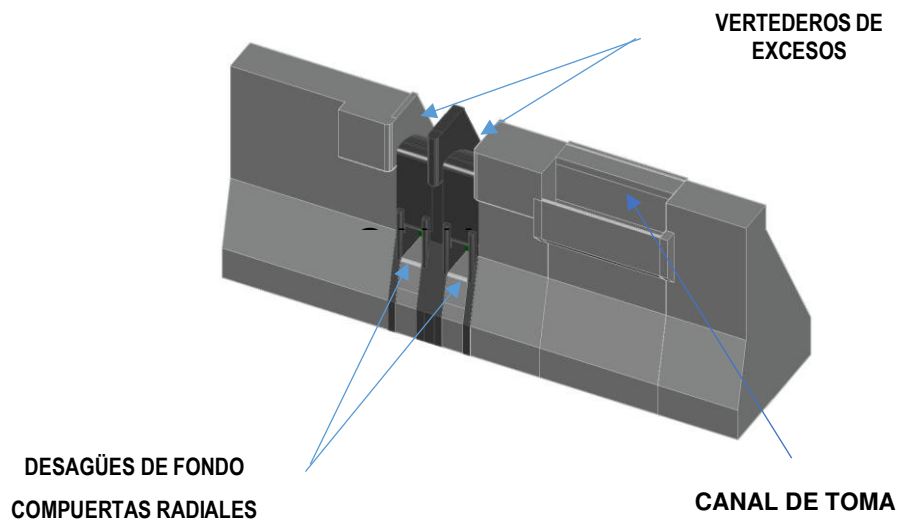
La geometría del dominio computacional está compuesta por los siguientes elementos:

- I. PRESA
- II. DESAGUES
- III. VERTEDEROS DE EXCESOS
- IV. FONDO DE ATAGUÍA
- V. MURO DE CIERRE DE CANAL DE DESVÍO
- VI. TOPOGRAFÍA DEL EMBALSE

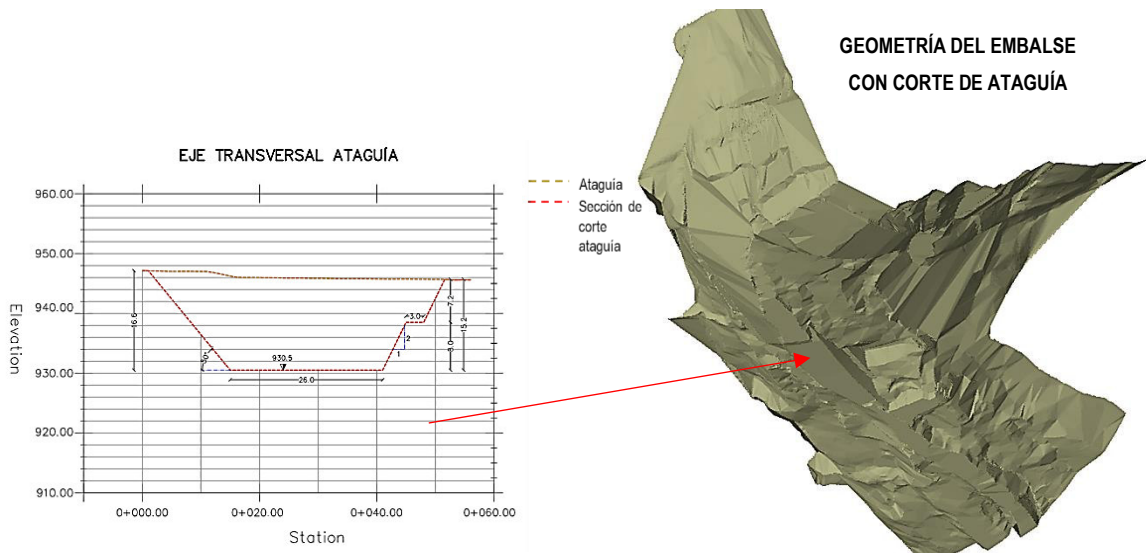
Los componentes de la presa, así como la geometría de corte de la ataguía, fueron importados al software FLOW-3D en formato STL, mientras que la topografía del embalse se importó en formato ASC.



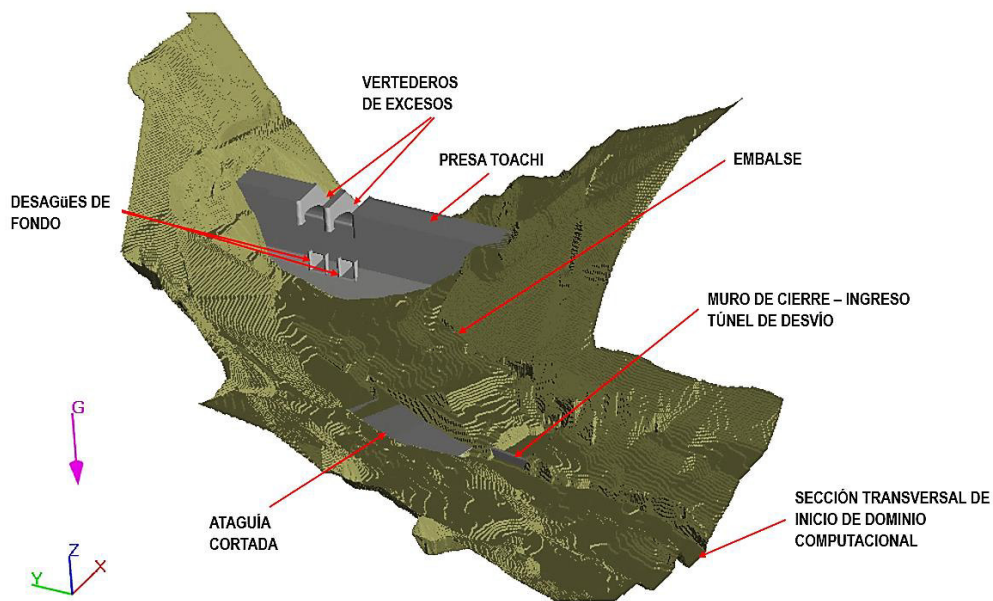
**Figura 4.2:** Conformación de la geometría del tramo de embalse y presa Toachi de conformidad con la topografía actualizada del tramo de estudio.  
**FUENTE:** Propia



**Figura 4.3:** Detalle de la geometría de la Presa Toachi y sus Obras complementarias construida para la simulación numérica.  
**FUENTE:** Propia



**Figura 4.4:** Geometría preliminar propuesta para la sección de corte de la ataguía.  
**FUENTE:** Propia



**Figura 4.5:** Geometría Final Dominio computacional.  
**FUENTE:** Propia

### 4.1.3 CAUDALES DE SIMULACIÓN

Los caudales considerados para la simulación numérica del flushing del tramo en el embalse Toachi, se ha seleccionado de acuerdo con el requerimiento de Hidrotoapi EP. Se define como caudal de operación del lavado el correspondiente al doble del caudal medio; es decir se simulará con un caudal igual a  $82,6 \text{ m}^3 / \text{s}$ . (Castro, Hidalgo, Galarza, & Guachamín, 2021)



#### 4.1.4 CARACTERÍSTICAS DE LA FASE SÓLIDA

El tamaño y características del material sólido que se ha considerado en la modelación numérica del lavado a través de los desagües de fondo han sido definidas considerando el efecto de control que ejercerá el embalse sobre el flujo del río Toachi.

En la visita técnica realizada al proyecto, se observó que el cauce del río Toachi está cubierto de material pétreo o canto rodado de tamaño variable, como se observa en Figura 4.6 y Figura 4.7.



**Figura 4.6:** Zona de ingreso del río Toachi hacia el túnel de desvío  
**FUENTE:** Propia

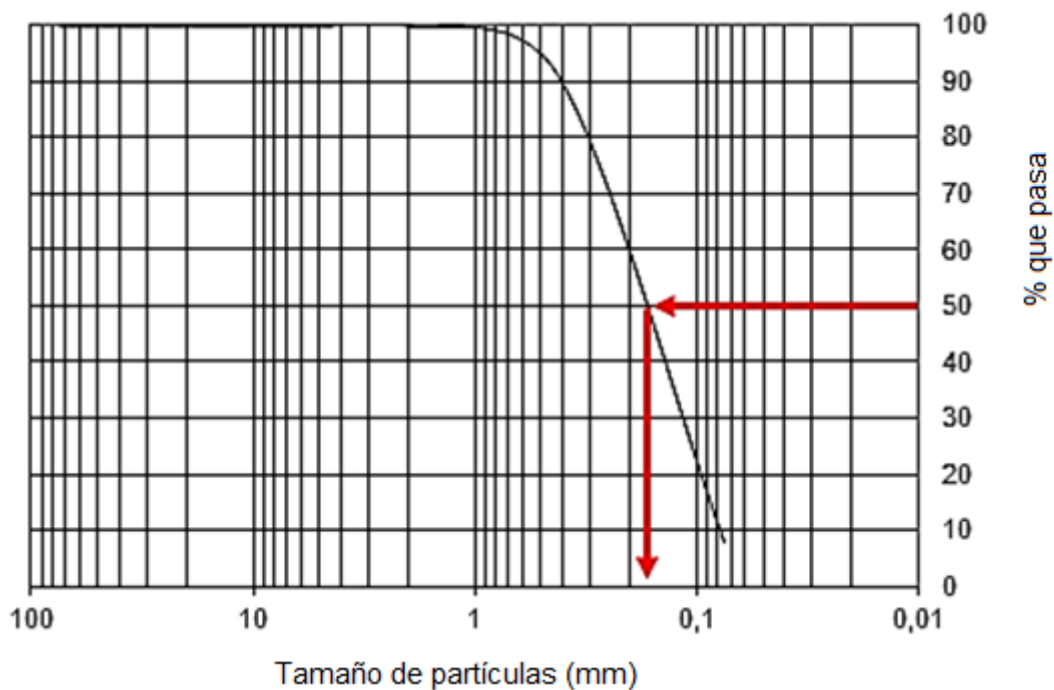
En las zonas de desaceleración de flujo, como se observa junto al cierre del cauce del río Toachi producido por la ataguía de aguas arriba, así como alrededor de la entrada al túnel de desvío, se observa depósito de material sólido de menor tamaño, como se presenta en las siguientes fotografías, que en condiciones normales son fácilmente arrastrados por el flujo a lo largo del cauce natural.



**Figura 4.7:** Material sólido considerado para la simulación numérica.

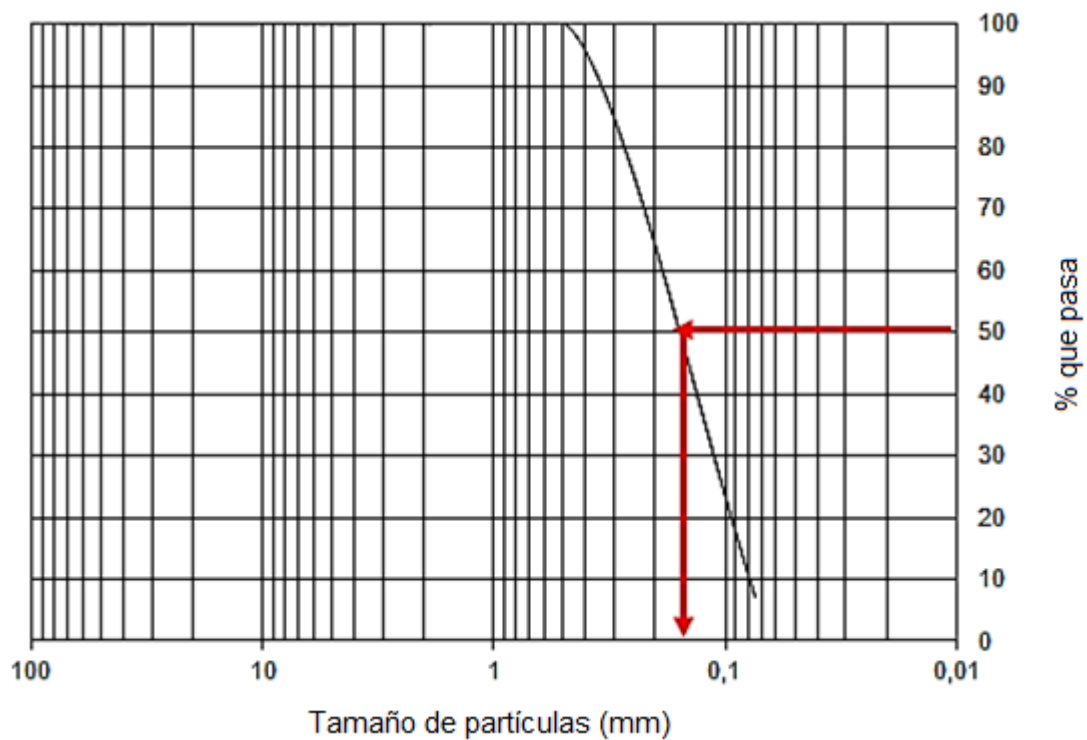
**FUENTE:** Propia

Este material es predominante fino. De acuerdo con la información granulométrica obtenida para las dos muestras del material mencionado se define el diámetro representativo del sedimento para la simulación numérica,  $d_{50} = 0,15 \text{ mm}$ . En las siguientes figuras se presentan curvas granulométricas obtenidas para las dos muestras de sedimento tomadas al pie de la ataguía en la sección de cierre y en la zona próxima, sobre la margen izquierda, junto a la entrada del túnel de desvío.



**Figura 4.8:** Curva Granulométrica muestra M2 -  $d_{50} = 0.144 \text{ mm}$

**FUENTE:** Propia

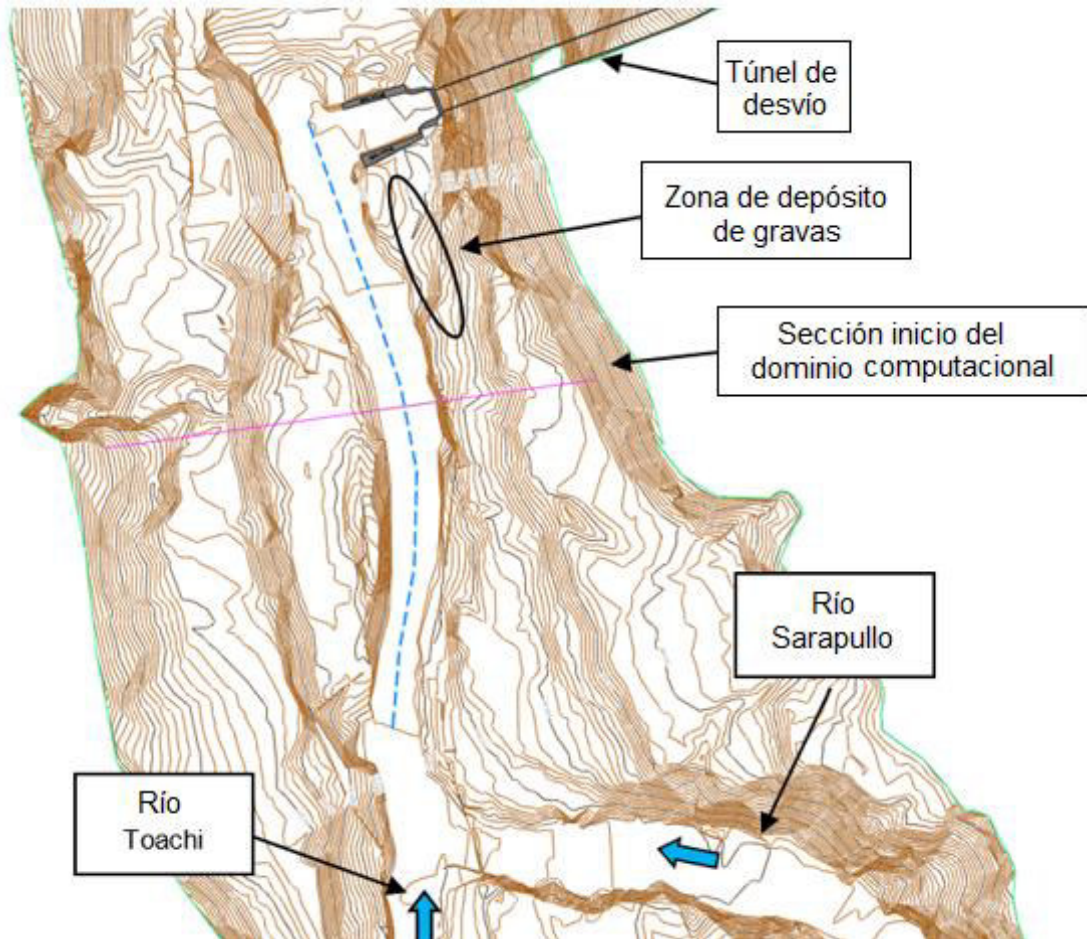


**Figura 4.9:** Curva Granulométrica curva M1 -  $d_{50} = 0.155 \text{ mm}$   
**FUENTE:** (Castro, Hidalgo, Galarza, & Guachamín, 2021)

#### 4.1.5 RESISTENCIA AL FLUJO EN EL DOMINIO COMPUTACIONAL.

El dominio computacional inicia en la sección transversal del río Toachi ubicada a 100 m aguas arriba del ingreso al túnel de desvío. La pendiente longitudinal ponderada del tramo del río Toachi desde la junta con el río Sarapullo hasta el inicio del canal de aproximación a los desagües de fondo es igual a 0,9%, de acuerdo con la información del levantamiento topográfico. La Figura 4.10 muestra el desarrollo en planta del río Toachi desde la unión con el río Sarapullo hasta el ingreso al túnel de desvío.





**Figura 4.10:** Planta del Río Toachi

**FUENTE:** (Castro, Hidalgo, Galarza, & Guachamín, 2021)

El tramo analizado del río Toachi, presenta una curva natural de aproximadamente 350 m de radio como se observa en la Figura 4.10. Se observa la presencia de material sólido como gravas y arenas depositados en la parte interna de la curva. El cauce principal se encuentra bien delimitado, por donde circulan las crecidas o los caudales extraordinarios.

Partiendo de las recomendaciones existentes en la literatura técnica, se realiza la valoración del coeficiente de resistencia de Manning “n” para la sección transversal típica del tramo de interés, tomando en cuenta además las características geométricas y morfológicas de los respectivos tramos vecinos, hacia aguas arriba y hacia aguas abajo del curso natural del río Toachi.

De acuerdo con el procedimiento recomendado por Cowan (Chow V. T., 1990), se presenta a continuación la estimación del coeficiente n en función de los factores predominantes, que se describen en la Tabla 4.2, y que son los que ocasionan la resistencia al movimiento, aplicando la siguiente expresión:

$$n_i = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

donde el valor de  $n_i$  se define en función del efecto de cada factor, para el tramo analizado del río Toachi.

**Tabla 4.2:** Factores que influyen en la resistencia al movimiento

<b>Factor <math>n_i</math></b>	<b>Efecto considerado</b>
$n_0$	Uniformidad del material que conforma el cauce
$n_1$	Grado de irregularidad de la superficie de la sección
$n_2$	Variaciones en forma y tamaño de la sección transversal
$n_3$	Presencia de obstrucciones
$n_4$	Presencia de cobertura vegetal en el cauce
$n_5$	Grado de meandro del tramo

**FUENTE:** (Chow V. T., 1990)

En la Figura 4.11, se muestran las condiciones generales del cauce principal y márgenes laterales que predominan en el tramo de interés del río Toachi y que han sido considerados para determinar los valores de aquellos factores físicos relevantes para la cuantificación del coeficiente de resistencia “n”, se observan las siguientes características:

- A. Se observa que el cauce está conformado en roca.
- B. Se observa que el cauce mantiene en el tramo secciones transversales semejantes sin que se tenga cambios importantes en el ancho ni en la forma.
- C. No se evidencia presencia de obstáculos u obstrucciones significativas.
- D. Se observa poca presencia de vegetación en el cauce principal y márgenes laterales del río.
- E. El tramo se desarrolla sin curvaturas pronunciadas.



**Figura 4.11:** Vista del cauce del río Toachi en la zona de estudio.

**FUENTE:** Propia

**Tabla 4.3:** Determinación de valores adoptados de  $n_i$  para el cauce principal del río Toachi, en el tramo de interés.

Factor $n_i$	Efecto considerado	Calificación	Valor adoptado
$n_0$	Material que conforma el cauce	Corte en roca	0.020
$n_1$	Grado de irregularidad	Menor.	0.005
$n_2$	Variaciones de la sección transversal	Ocasionalmente alternada	0.005
$n_3$	Presencia de obstrucciones	Insignificante	0.000
$n_4$	Vegetación	No existe	0.005
$m_5$	Grado de meandros	Menor	1.000

**FUENTE:** Propia

El valor del coeficiente “ $n$ ” para el cauce principal del río Toachi bajo análisis es igual a:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 = 0,035$$

**Tabla 4.4:** Determinación de valores adoptados de  $n_i$  para las márgenes laterales del río Toachi, en el tramo de interés

Factor $n_i$	Efecto considerado	Calificación	Valor adoptado
$n_0$	Material que conforma los márgenes laterales	Grava fina	<b>0.024</b>
$n_1$	Grado de irregularidad	Moderado	<b>0.010</b>
$n_2$	Variaciones de la sección transversal	Ocasionalmente alternada	<b>0.005</b>
$n_3$	Presencia de obstrucciones	Menor	<b>0.010</b>
$n_4$	Vegetación	Media	<b>0.010</b>
$m_5$	Grado de meandros	Menor	<b>1.000</b>

**FUENTE:** Propia

El valor del coeficiente “ $n$ ” para las márgenes de inundación del río Toachi en el tramo bajo análisis es:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 = \mathbf{0,059}$$

Para determinar el valor de la rugosidad absoluta en el cauce principal del tramo de estudio del río Toachi, en primer lugar, se define el valor del factor de fricción equivalente al valor estimado del coeficiente de Manning  $n = 0.035$ , de acuerdo con la siguiente expresión, que relaciona el coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach y el coeficiente de Manning, válida para el comportamiento de contornos hidráulicamente rugosos con flujo totalmente desarrollado.

$$n = \sqrt{\frac{f}{8g}} R_h^{1/6}$$

Donde:

$n$  = Coeficiente de Manning

$f$  = factor de fricción de Darcy Weisbach

$g$  = aceleración de la gravedad

$R_h$  = Radio hidráulico.

Una vez determinado el valor del factor de fricción se calcula la rugosidad absoluta aplicando la ecuación de Colebrook y White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log \left( \frac{\epsilon/D}{33.71} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Los parámetros hidráulicos necesarios se obtuvieron empleando el paquete computacional Flow Master, que se basa en las ecuaciones anteriormente mencionadas.

En la **Tabla 4.5** se presenta un resumen de los principales parámetros del flujo en el río para la condición de flujo uniforme. La profundidad de flujo corresponde a la condición de borde al inicio del dominio computacional.

**Tabla 4.5:** Cálculos resistencia al flujo en el cauce principal del río.

<b>Datos</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>	<b>Descripción</b>
$Q$	$m^3/s$	82,6	Caudal
$n$	(-)	0,035	Rugosidad de Manning
$I$	$m/m$	0,009	Pendiente del cauce
<b>Cálculos</b>			
$y_c$	$m$	1,34	Profundidad crítica
$y_n$	$m$	1,45	Profundidad normal
$Rh$	$m$	1,09	Radio hidráulico
$v$	$m/s$	2,91	Velocidad del flujo
$Re$	(-)	$1,27E + 07$	Número de Reynolds
$f$	(-)	0,0904	Factor de fricción de Darcy
$\epsilon$	$m$	0,35	Rugosidad Absoluta

**FUENTE:** Propia

El dominio computacional definido para la simulación numérica incluye también la presa Toachi y los vertederos de excesos, construidos en hormigón, y los desagües de fondo que tienen un blindaje de acero. Para el desarrollo de las simulaciones numéricas se adoptan para estos contornos los valores de la rugosidad absoluta con base en los valores recomendados en la literatura técnica para estas superficies (Sotelo, 1990).

**Tabla 4.6:** Rugosidad absoluta del área de simulación numérica.

<b>Material</b>	<b>Rugosidad absoluta (mm)</b>
Hormigón	10
Blindaje de acero	3
Cauce río Toachi	350

**FUENTE:** Propia

#### 4.1.6 MODELO DE ARRASTRE DE SEDIMENTO

Los parámetros que se consideraron para la representación del movimiento de los sedimentos se determinan mediante un estudio granulométrico del material obtenido en la visita de campo realizada al proyecto, así como en el estudio de validación. En la siguiente tabla se muestran los parámetros que corresponden a las condiciones definidas para el modelo de arrastre en la simulación de los diferentes escenarios de simulación:

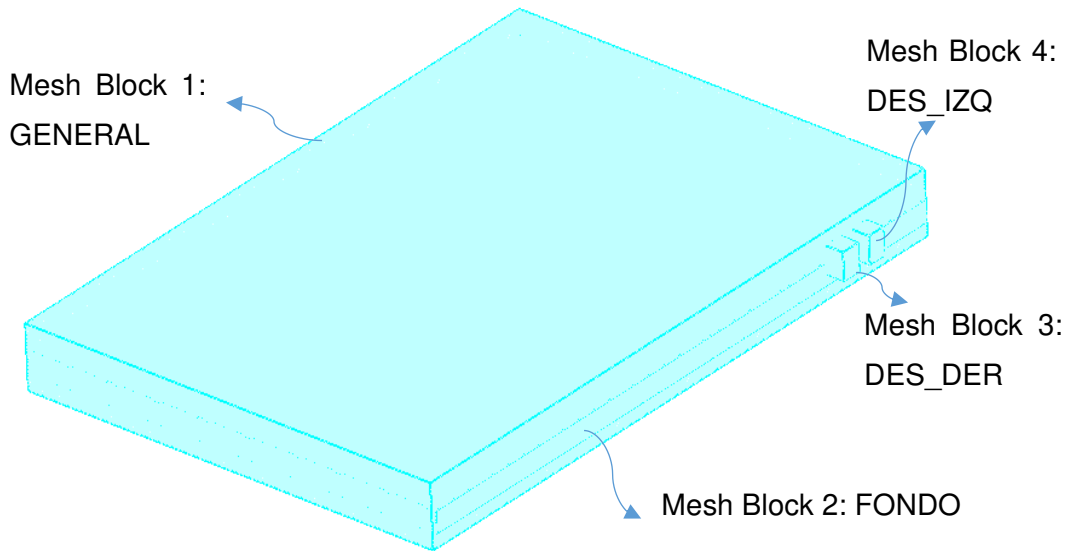
**Tabla 4.7:** Parámetros modelo de arrastre

Parámetro	Valor defecto	Descripción
Ecuación seleccionada de Transporte de fondo	Meyer-Peter & Muller	Ecuación de transporte de fondo. válida para diámetro máximo de sedimento igual a 30mm
Diámetro (m)	0,00015	Tamaño representativo del sedimento, (d <sub>50</sub> )
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1800	Arena fina húmeda (Instituto Chileno del Acero, 2002)
Parámetro crítico de Shields	0,05	Para el caso de lechos móviles horizontales con flujo turbulento y tamaño de grano uniforme se recomienda el valor de $\theta_{cr}=0,05$ .
Coefficiente de arrastre	0,018	Para transporte de sedimentos en suspensión
Coefficiente de carga de fondo	8	Se recomienda adoptar valores entre: 5 para transporte bajo; 8 para transporte medio y hasta 12 para transporte muy alto.
Angulo de reposo (°)	40	Se define en función del tipo de sedimento. Para el proyecto se tiene un sedimento relativamente fino
Rugosidad del lecho/d <sub>50</sub>	2,5	Relación entre rugosidad de Nikuradse de la superficie del lecho y el diámetro de grano medio

FUENTE: Propia

### 4.1.7 MALLADO

Para el mallado del dominio computacional se han elaborado 4 bloques de malla, según los resultados del estudio de validación, los bloques se encuentran dispuestos como se indica a continuación.



**Figura 4.12:** Vista General del bloque de malla para todo el dominio computacional.

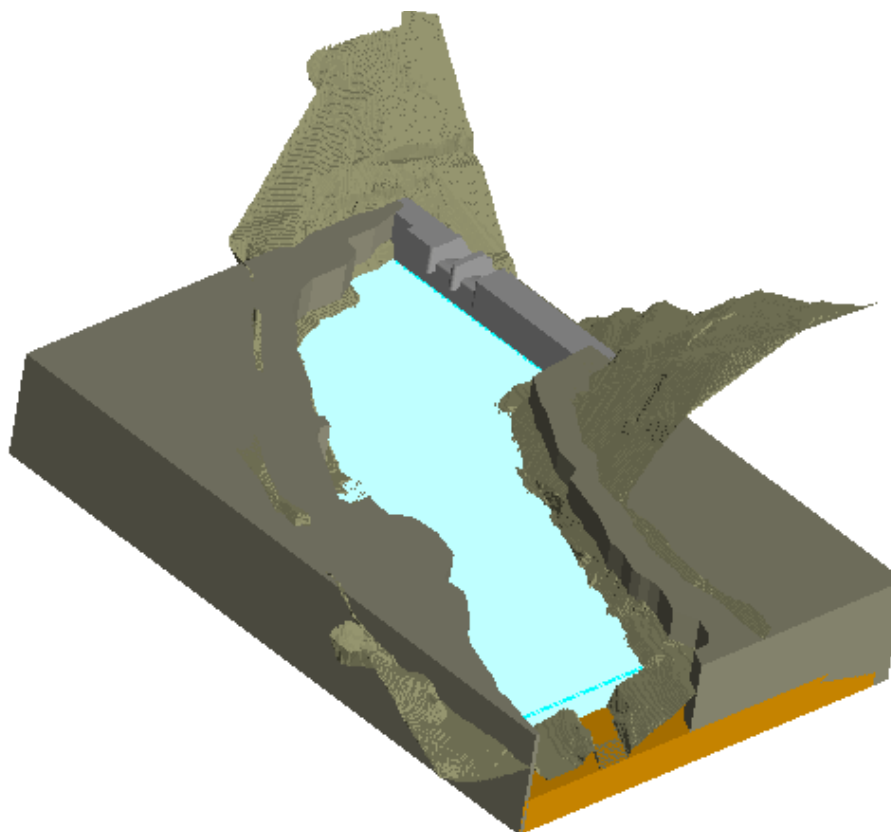
**FUENTE:** Propia

Al momento de determinar los tamaños de celda, dimensiones y posicionamiento de los bloques de malla se ha verificado que los bloques estén empatados adecuadamente, sin que se presenten desfases entre los mismos. Para garantizar este requerimiento es necesario que los tamaños de celda sean múltiplos entre sí, evitando de esta manera que al momento de ejecutar la revisión previa con el solver del software FLOW 3D, aparezcan inconvenientes.

El mallado se realiza con dos tamaños de celda: el mayor correspondiente a 1 m y que se lo implementa para el bloque de malla 1, denominado GENERAL, que cubre la totalidad del volumen del dominio computacional, excepto las porciones de salida de los dos desagües de fondo y el menor, con elementos de 0.5 m que se lo implementa en el bloque anidado 2, que cubre la porción inferior del dominio computacional hasta la cota 932 msnm, incluyendo íntegramente el volumen del dominio donde se desarrolla el ingreso de flujo al dominio computacional así como todo el flujo de lavado del embalse. Con el tamaño de celda igual a 0.5 m se ha conformado también los bloques 3 y 4 que contienen a los desagües de fondo generando el refinamiento en las zonas de salida de flujo.



El mallado construido cubre de manera óptima al dominio computacional definido para la simulación del flujo de desembalse y lavado hidráulico, como se indica en la siguiente figura.



**Figura 4.13:** Mallado y geometría

**FUENTE:** Propia

En las zonas laterales del dominio computacional se han agregado bloques que eliminan las celdas que no son de interés para la simulación, con lo que se optimiza el costo computacional de la simulación.

Las características y dimensiones de cada bloque de malla se presentan a continuación.

**Tabla 4.8:** Características bloques de malla

BLOQUE DE MALLA	TAMAÑO DE CELDA (m)	LÍMITES DE MALLA					
		$x_{min}$ (m)	$x_{max}$ (m)	$y_{min}$ (m)	$y_{max}$ (m)	$z_{min}$ (m)	$z_{max}$ (m)
GENERAL	1	80	332	40	385	914	947
FONDO	0,5	80	320	41	385	921	932



DESAGUE DERECHO	0,5	320	345	316	327	926	940
DESAGUE IZQUIERDO	0,5	320	345	334	344	926	940

**FUENTE:** Propia

El tamaño de mallado descrito en esta sección fue seleccionado tomando en consideración el estudio de independencia de malla, en el que se determina la incertidumbre debido a la discretización espacial. Se observa que, para los tamaños de celdas adoptados, la incertidumbre inducida en los resultados totales no es significativa. A continuación, se presentan los resultados de este estudio implementado para el mallado.

**Tabla 4.9:** Independencia de malla para simulación de flujos prototipo.

Tipo celda	Descripción	Tamaño de celda	# elementos	Volumen Real dominio	Relación de malla	Velocidad	GCI %
		mm	-	m <sup>3</sup>		m/s	
1	Malla fina	500	16092116	297580	1,0	0.9326	
2	Malla media	1000	2968610	297580	2,0	0.9450	1.321
3	Malla gruesa	2000	417530	297580	4,0	0.9761	3.26

**FUENTE:** Propia

El valor obtenido para la interpolación de Richardson es de  $0.923 \text{ m/s}$ . Además, se observa que el valor de GCI entre la malla media y fina es de 1,32% asegurando que el cambio entre malla media y fina no genera incertidumbre de manera significativa, otro resultado importante obtenido de este análisis es que el factor de comprobación de que las respuestas se encuentran en la zona estable o rango asintótico es de 1,08, siendo este valor cercano a 1, asegurando que las respuestas están el rango estable o asintótico. (Celik, y otros, 2008)

Con base en lo anteriormente descrito se ratifica que la discretización espacial aplicada para la simulación cumple con las recomendaciones de la literatura técnica.

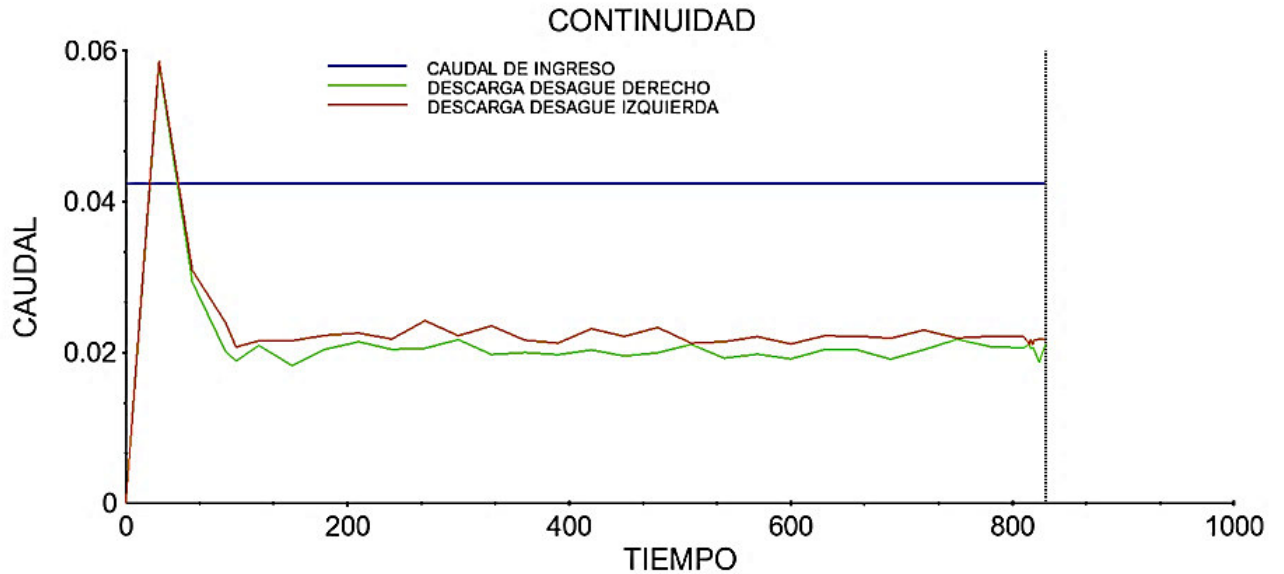
## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 CONTINUIDAD

#### 5.1.1 CASO DE VALIDACIÓN

La primera revisión corresponde al cumplimiento del principio de continuidad en la simulación del fenómeno representado en el modelo físico. En la siguiente Figura 5.1 y Tabla 5.1 se presentan las curvas de caudal de ingreso y de salida del dominio

computacional. La desviación registrada corresponde a  $-0,94\%$ , por lo que la simulación cumple satisfactoriamente con la continuidad.



**Figura 5.1:** Curva de caudal

**FUENTE:** Propia

**Tabla 5.1:** Resultados numéricos de Continuidad

Caudal de Ingreso <i>l/s</i>	Desagüe Derecho <i>l/s</i>	Desagüe Izquierdo <i>l/s</i>	Caudal de Salida <i>l/s</i>	Desviación %
42,45	21,13	21,72	42,85	-0,94

**FUENTE:** Propia

El principio de continuidad es el primer indicador de resultados satisfactorios de la simulación. Se considera que la representación de la geometría, el mallado y las condiciones iniciales y de contorno adoptadas para la simulación son adecuadas y permiten representar satisfactoriamente el fenómeno de flujo que ocurre en el proceso de lavado del embalse.

### 5.1.2 CASO DE ESTUDIO

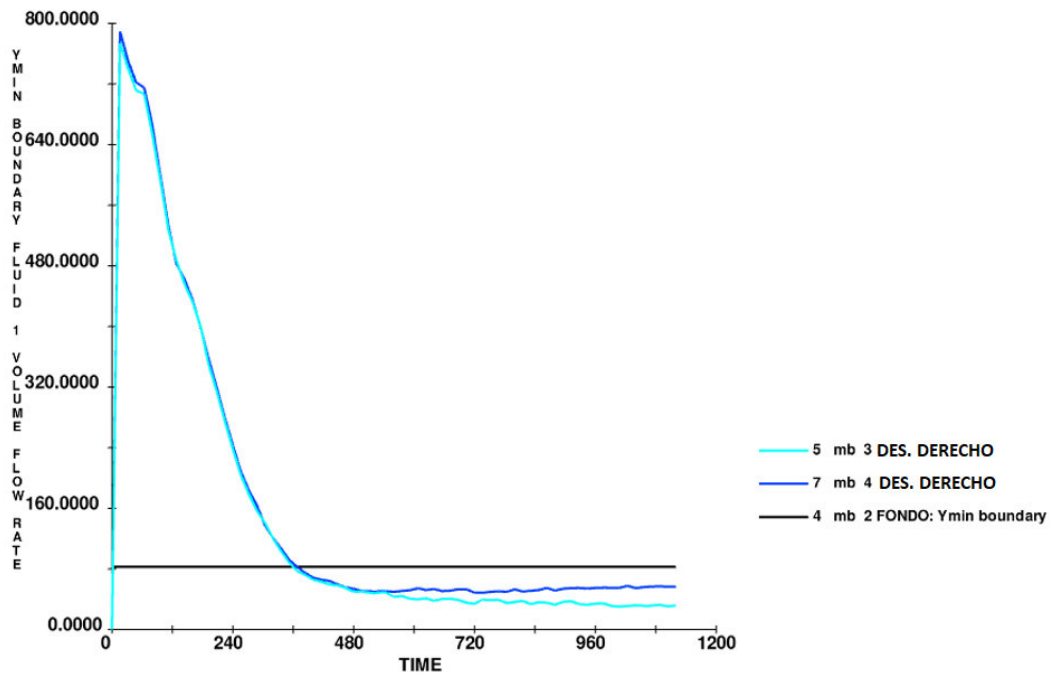
Las condiciones consideradas para el análisis del caso de estudio se resumen a continuación:

**Tabla 5.2:** Condiciones de Simulación

Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Desagües Abiertos	Apertura (%)	Cota de colmatación de sedimento (msnm)
82,6	Derecho +Izquierdo	100	929

FUENTE: Propia

La geometría del dominio computacional corresponde a la presentada en la Figura 4.5. El tiempo simulado es 1132 segundos. Se establece que los caudales de descarga de los desagües derecho e izquierdo, presentan una desviación, con respecto al caudal de ingreso, de 5,8 %. Este valor está dentro de rangos aceptables.



**Figura 5.2:** Curva de descarga

FUENTE: Propia

**Tabla 5.3:** Análisis de continuidad

TIEMPO (s)	Q <sub>ENTRADA</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>DESCARGA</sub> DESAGUE DERECHO (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>DESCARGA</sub> DESAGUE IZQUIERDO (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>SALIDA</sub> (m <sup>3</sup> /s)	DESVIACIÓN
1132	82,6	31,3	56,1	87,4	5,8%
		35,8% de la descarga	64,2% de la descarga		

FUENTE: Propia

El caudal descargado por el desagüe izquierdo es 44% mayor al descargado por el desagüe derecho. En la siguiente Figura se observa el desarrollo de las curvas de descarga de los desagües, así como el caudal de ingreso.

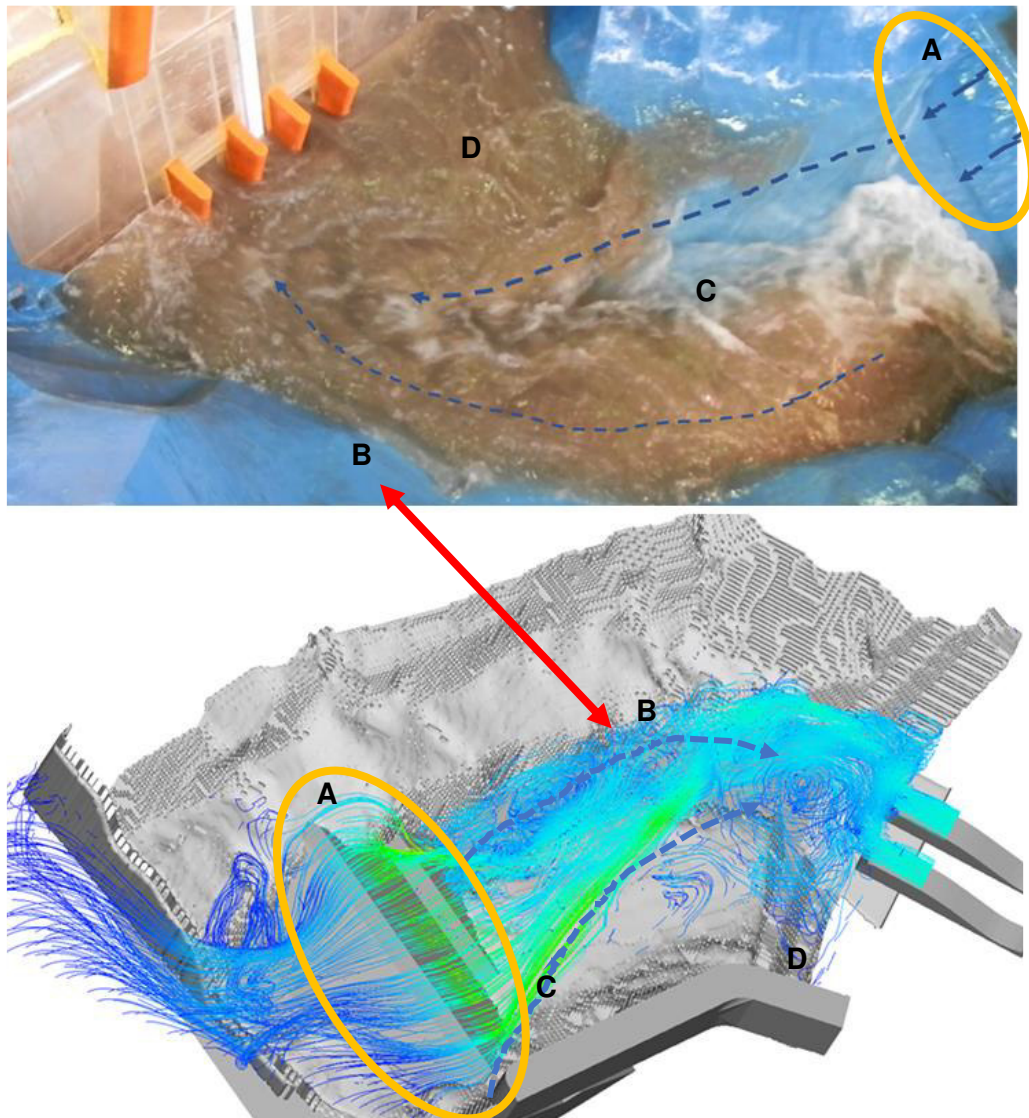
## **5.2 FLUJO**

### **5.2.1 CASO DE VALIDACIÓN**

En la **Figura 5.3** se observa el comportamiento del flujo durante la operación de lavado tanto en modelo físico como en la simulación numérica. La comparación de estos resultados permite identificar las siguientes características:

- A. El flujo de entrada sobre la ataguía que se observa en el modelo físico coincide con el obtenido en la simulación numérica y corresponde a un flujo de alta velocidad.
- B. En el modelo físico se observa que el flujo se concentra siguiendo la curvatura del cauce del río Toachi en el tramo comprendido entre la ataguía y la presa que coincide aceptablemente con las líneas de corriente obtenidas en la simulación numérica.
- C. En el modelo físico se observa un flujo de alta velocidad que circula sobre la terraza derecha del cauce del río Toachi y que finalmente confluye con el cauce a poca distancia del desagüe izquierdo. esta configuración de flujo se reproduce con una buena aproximación en el resultado obtenido con la simulación numérica.
- D. En los externos laterales izquierdo y derecho junto a la presa se observa en modelo físico zona de recirculación que también aparecen en el flujo obtenido mediante simulación numérica.

Por lo tanto, el comportamiento del flujo ha sido representado de manera aceptable



**Figura 5.3:** Comparación de la forma del Flujo.

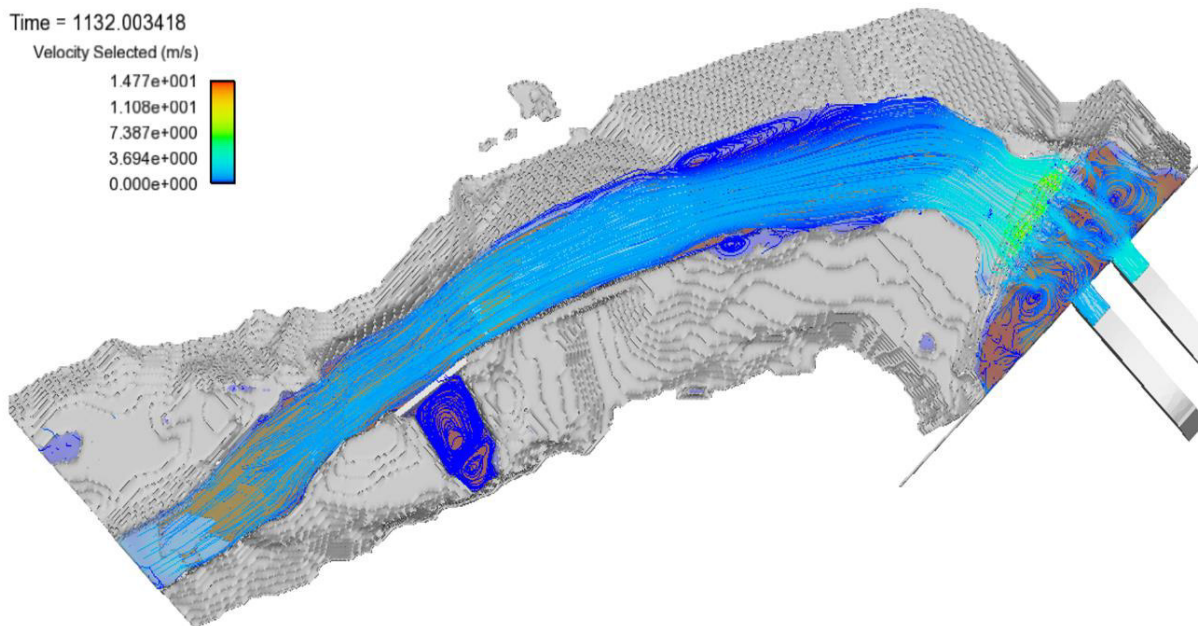
**FUENTE:** Propia

Del análisis de la Figura 5.3, anteriormente presentado, se puede decir entonces que el flujo obtenido en la simulación es similar al observado en modelo físico. Coincide la ubicación y forma de las zonas de mayor velocidad sobre la terraza de la margen derecha, aguas abajo de la ataguía. De las zonas de aceleración al pie de la ataguía y de la zona altamente turbulencia a en las proximidades del ingreso hacia los desagües de fondo.

Este resultado indica que la selección del modelo de turbulencia ha permitido alcanzar una aproximación aceptable al flujo de lavado que se observa en la Prueba I3 realizada en el modelo físico. El modelo de turbulencia que permitió una representación adecuada del flujo que se presenta en el flushing en modelo físico es el modelo  $k - \omega$ .

## 5.2.2 CASO DE ESTUDIO

Para la simulación del caso de aplicación se presenta la siguiente figura donde se presenta el patrón de flujo de lavado del embalse cuando se tiene un movimiento a superficie libre. Se observa un flujo relativamente direccionado a lo largo del cauce principal del río hasta la plataforma de corte de la ataguía. Hacia aguas abajo se presentan flujos secundarios en los extremos laterales. Aguas abajo de la zona de acumulación de material se observa que el flujo se acelera y desciende con velocidades altas hasta el ensanchamiento brusco conformado inmediatamente aguas arriba del paramento de la presa. En esta zona se forman varios torbellinos y flujos secundarios que justifican la diferencia observada en los caudales de descarga de los desagües de fondo izquierdo y derecho.



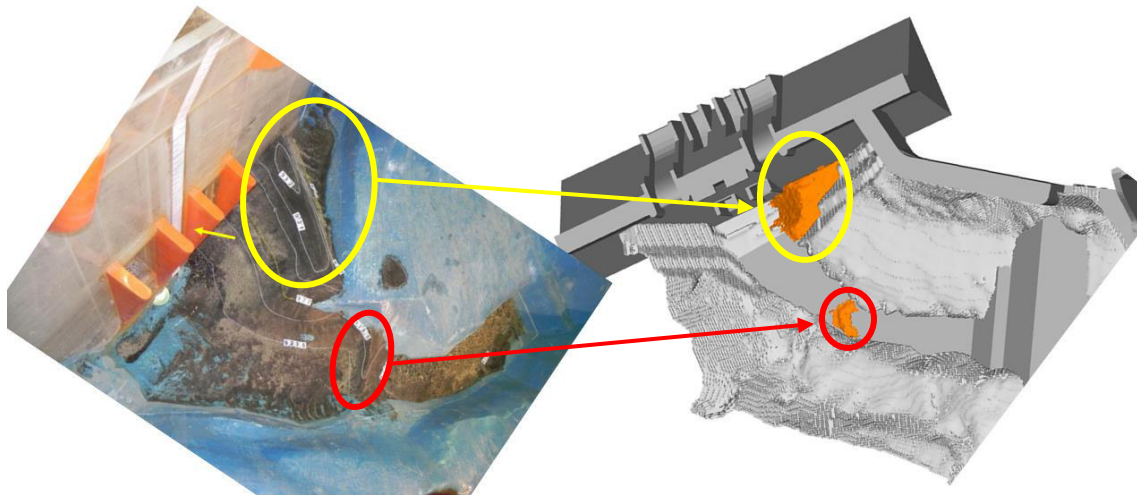
**Figura 5.4:** Patrón de flujo en la zona de aproximación  
**FUENTE:** Propia

## 5.3 DISPOSICIÓN FINAL DE SEDIMENTO

### 5.3.1 CASO DE VALIDACIÓN

El último resultado de interés para el análisis de validación es la disposición final de sedimentos en el dominio computacional, una vez que ha terminado la prueba I3. En la siguiente figura se observa la comparación de los resultados de modelo físico y de simulación numérica.





**Figura 5.5:** Comparación de la disposición final de sedimentos en modelo físico y en la simulación numérica FLOW-3D.

**FUENTE:** Propia

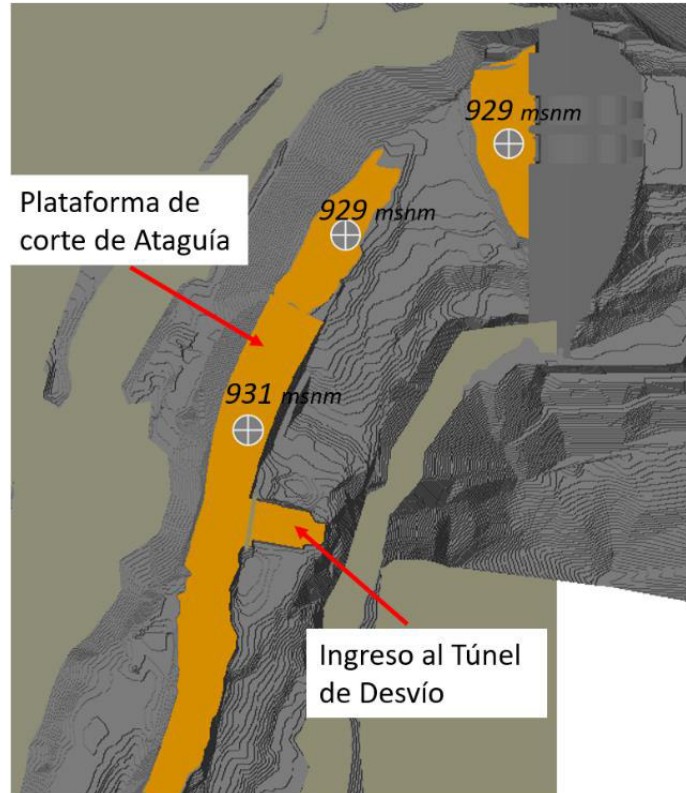
En la Figura 5.5 se observa una concentración de sedimentos en la margen derecha del embalse muy cerca al desagüe de fondo derecho de la presa, además de una acumulación de sedimento en la zona externa de la curva de la zona de aproximación a la presa, esta disposición obtenida en la simulación numérica tiene una similitud considerable con el resultado obtenido en el modelo físico.

El modelo de arrastre de sedimento que permite representar de manera adecuada el movimiento de los sedimentos azolvados en el embalse es el planteado por Meyer Peter & Müller, ya que se observa una disposición final de sedimento muy similar tanto en modelo físico como en simulación numérica, como se observa en la Figura 5.5

Este resultado indica que el modelo de arrastre de sedimento seleccionado y su configuración logran representar aceptablemente el fenómeno de arrastre de sedimento en el fondo del embalse.

### 5.3.2 CASO DE ESTUDIO

En el caso de estudio de aplicación, se muestra que la condición inicial de colmatación para la simulación, que corresponde a la cota 929 msnm desde la presa hasta la plataforma de corte de ataguía y a la cota 931 desde la plataforma de corte de ataguía hasta el inicio del dominio computacional. En esta figura se identifica claramente la zona de acumulación de material en el tramo de aproximación hacia la presa, que alcanza cotas superiores a la de colmatación inicial de sedimentos.

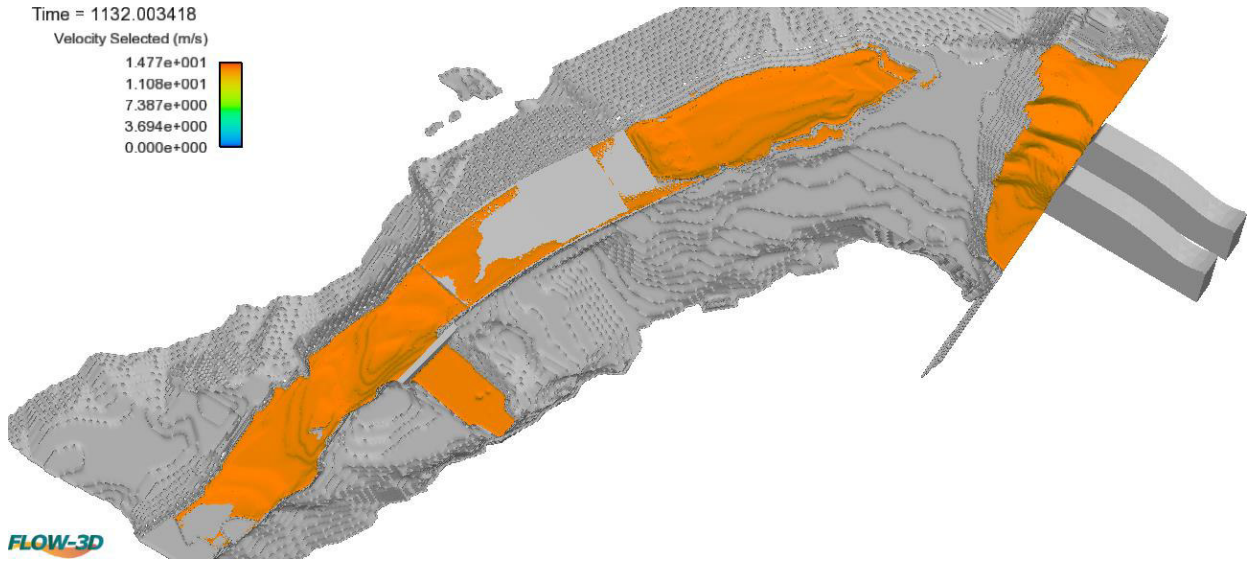


**Figura 5.6:** Disposición inicial de sedimentos  
**FUENTE:** Propia

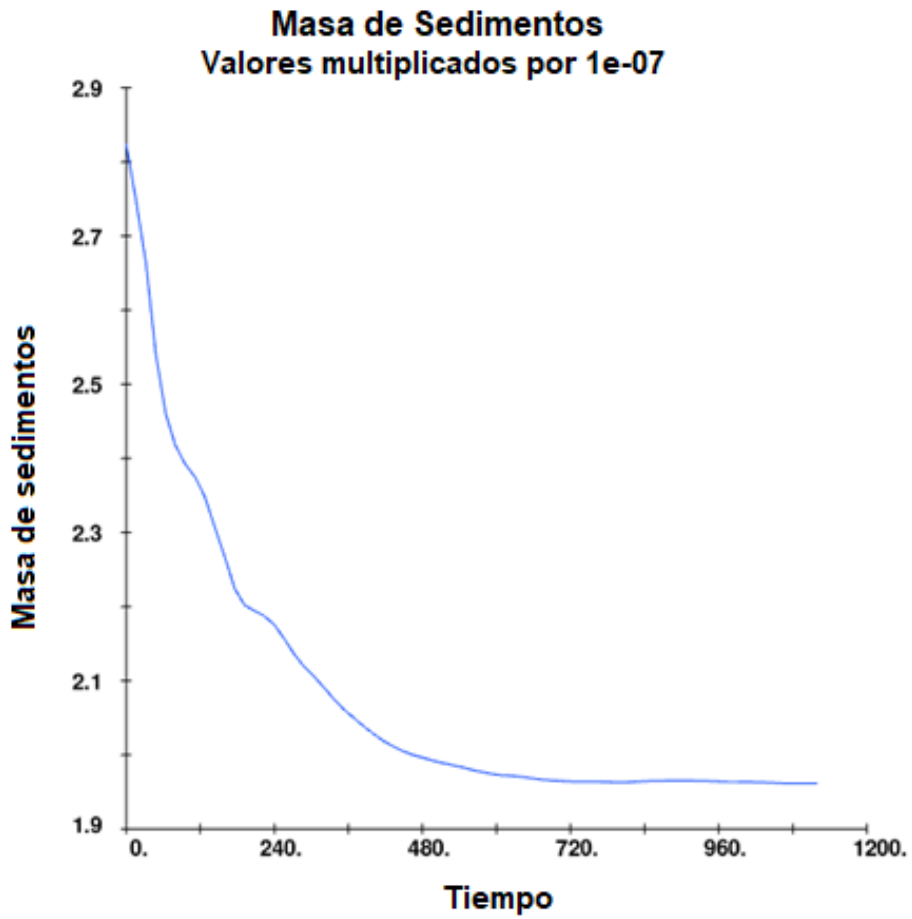
En el siguiente cuadro se resumen los resultados obtenidos en la simulación en relación con el arrastre de sedimentos. El volumen evacuado desde el desembalse hasta alcanzar una tendencia al equilibrio en el movimiento de los sólidos corresponde al 30,6% del volumen inicial considerando la condición inicial de colmatación.

En la Figura 5.7 se observa que permanece el sedimento en gran parte del tramo de análisis. La presencia de la zona de acumulación de materiales genera un obstáculo efectivo para que el sedimento alcance la zona próxima al ingreso hacia los desagües de fondo. Aguas abajo de la zona de acumulación se observa que el ensanchamiento no favorece la evacuación de sólidos a través de los desagües de fondo debido a la disminución en la velocidad media del flujo.





**Figura 5.7:** Disposición final de sedimento  
**FUENTE:** Propia



**Figura 5.8:** Masa de Sedimento vs. Tiempo  
**FUENTE:** Propia

**Tabla 5.4:** Resultados de arrastre de sedimentos.

<b>RESULTADOS DE LAVADO DE SEDIMENTOS</b>		
<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>VALOR</b>
Volumen Inicial de Sedimento	$m^3$	15691,57
Volumen Final de Sedimento	$m^3$	10895,54
Volumen de Sedimento Evacuado	$m^3$	4796,03
Porcentaje de volumen Evacuado	%	30,6%
Tiempo de lavado	s	1132
Caudal de lavado	$m^3/s$	82,6
Eficiencia de Lavado	%	5,1%

**FUENTE:** Propia

Finalmente, en la Tabla 5.4 se muestra que la mejor alternativa para el proyecto Toachi-Pilatón es conformar un canal de aproximación hacia los desagües de fondo para mejorar la eficiencia del lavado hidráulico, ya que la geometría actual en canal genera una evacuación de sedimentos de 30,6% del volumen inicial de sólidos, lo que implica una eficiencia de lavado del 5,1%, este valor se considera inaceptable debido a que el proceso es sedimentación en el embalse con la geometría actual generaría rápidamente volúmenes de material sólido que exigirían operaciones de limpieza mucho más frecuentes con la consiguiente afectación a la generación del proyecto hidroeléctrico, según el criterio presentado en la sección 2.3 de este trabajo tampoco es deseable buscar eficiencias de lavado mayores al 65%, debido a la afectación ambiental que genera una alta descarga de sólidos en el tramo de aguas debajo de la presa.

## **5.4 ESTABILIDAD NUMÉRICA**

La estabilidad indica la forma en que los errores se difunden a través del algoritmo. Se considera estable a un método numérico cuando los errores generados por las aproximaciones se suavizan a medida que el cálculo computacional avanza. Se dice que un método numérico es inestable cuando los errores en el cálculo van incrementándose

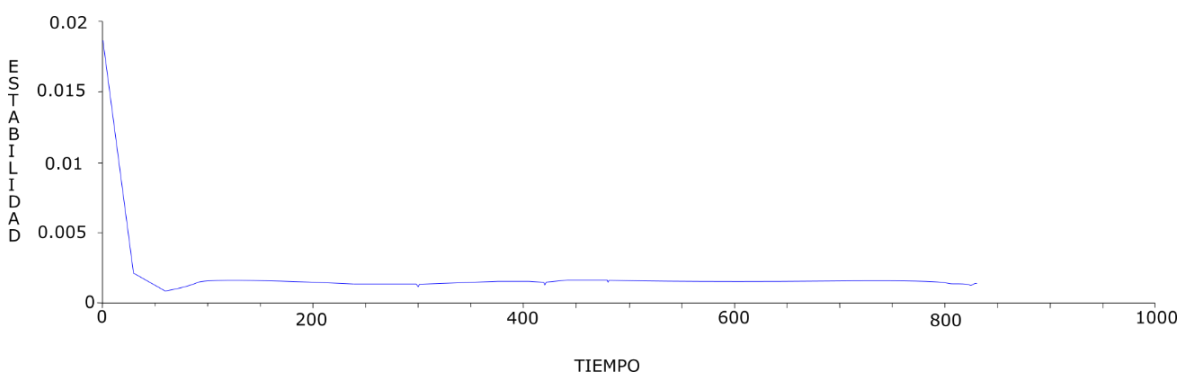
conforme avanza el desarrollo numérico, consecuentemente los métodos inestables no permiten alcanzar una solución generando rápidamente anomalías.

En general, las aproximaciones numéricas a las ecuaciones diferenciales pueden mostrar un comportamiento inestable. Es decir, los resultados computacionales pueden incluir características de crecimiento exponencial y, a veces, oscilantes que no guardan relación con la solución de la ecuación diferencial original. Este tipo de comportamiento se conoce como inestabilidad computacional.

La estabilidad numérica de un algoritmo matemático es un indicador de la bondad del resultado que se obtendrán aplicando métodos aproximados para el estudio de un fenómeno físico.

Es importante distinguir la inestabilidad computacional de las inestabilidades físicas, que pueden ocurrir en algunos fenómenos. En la práctica, la diferenciación entre estos tipos de comportamiento inestable no resulta fácil de identificar. Cuando una solución calculada tiene características que cambian de signo con cada paso de los incrementos en diferencias finitas (en tiempo o espacio), la inestabilidad probablemente esté asociada con la aproximación numérica. Estos cambios de signo durante el avance del tiempo a menudo se pueden rectificar disminuyendo el tamaño del incremento de tiempo. Por otro lado, los cambios en el signo con incrementos de espacio podrían indicar una falta de resolución computacional, que una reducción en el tamaño de los incrementos de espacio podría eliminar. (Flow Science, 2020)

A continuación, se presenta la curva de estabilidad obtenida en el desarrollo de la simulación, este dato es una de las variables de diagnóstico que reporta el software FLOW 3D.



**Figura 5.9:** Curva de Estabilidad del desarrollo del algoritmo de solución para la simulación de validación

**FUENTE:** Propia

La curva presentada anteriormente evidencia que los valores de estabilidad se mantienen prácticamente constantes, lo que implica un desarrollo estable del algoritmo con intervalos de tiempo estables, por lo que los resultados obtenidos son confiables y que el criterio del número de Courant se cumple sin problemas.

Esta curva de estabilidad numérica indica que la configuración seleccionada para la simulación de este fenómeno es la adecuada y permite una representación aproximada aceptable del flujo de lavado del embalse.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Un análisis numérico del lavado hidráulico de un embalse ha sido realizado utilizando mecánica de fluidos computacional, a través de software comercial FLOW 3D. Las siguientes conclusiones pueden ser remarcadas:

- El software comercial FLOW-3D ha permitido obtener una aceptable representación numérica del flujo en el proceso de lavado del embalse analizado en el caso de estudio.
- Se ha seleccionado el modelo de turbulencia  $k - \omega$ , junto con el modelo matemático de Meyer-Peter-Müller para la predicción del movimiento de los sedimentos, que integra tanto el arrastre de fondo del material sólido como su interacción con el flujo turbulento de la fase líquida.
- Las condiciones de contorno influyentes que han sido consideradas son: la geometría de la presa y del embalse, el tamaño y tipo de sedimento, la rugosidad absoluta de los contornos físicos, el caudal de operación para el lavado con una descarga libre.
- Las condiciones iniciales que se han considerado para lograr la simulación numérica del fenómeno son: el nivel inicial del embalse y el nivel de colmatación inicial de sólidos en la zona de aproximación a los desagües de fondo.
- Las características del sedimento depositado en el embalse tipifican a este material como arena fina con un diámetro de medio de  $0,15 \text{ mm}$ , con una densidad de saturación de  $1800 \text{ kg/m}^3$ .
- La validación de la simulación numérica se realiza mediante el análisis comparativo del comportamiento del flujo observado en el estudio experimental con el obtenido en el estudio numérico. Las principales características comunes observadas son:
  - Flujo de alta velocidad sobre la ataguía.
  - Flujo bien definido que sigue la curvatura del cauce en el tramo comprendido entre la ataguía y la presa.
  - Flujo de alta velocidad sobre la terraza derecha del cauce orientado hacia el desagüe izquierdo.
  - Zonas de recirculación en los externos laterales izquierdo y derecho junto a la presa

- La disposición final de los sedimentos obtenida en el estudio numérico coincide aceptablemente con el resultado del estudio experimental, en ambos estudios se muestra que el material sólido se ha depositado junto al extremo derecho de la presa, se ha lavado gran parte de la zona de aproximación quedando una pequeña cantidad de material sólido en la parte central.
- Para el caso de estudio, con la geometría construida en campo, se obtiene una eficiencia de lavado de sedimentos que alcanza el 5,1 %.
- Se recomienda plantear alternativas para la conformación de estructuras de aproximación que permitan optimizar la operación de lavado hidráulico del embalse.
- La implementación del software FLOW-3D para casos de proyectos reales en donde se trabaja con dominios computacionales importantes en dimensión y complejos en geometría, ha dado resultados satisfactorios debido a su estructura y forma de aplicar la discretización espacial.
- Se recomienda la implementación de un estudio numérico debidamente validado para mejorar los diseños de ingeniería en muchos campos, como se muestra en el presente proyecto de titulación, en el que específicamente se señala que no es una alternativa aceptable para el proyecto Toachi-Pilatón mantener la geometría actual de la zona del embalse próxima a la presa, porque genera una evacuación de sedimentos con muy poca eficiencia, lo que no favorece al proyecto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Ahn, J., Yang, C. T., Boyd, P., Pridal, D., & Remus, J. (2013). Numerical modeling of sediment flushing from Lewis and Clark Lake. *International Journal of Sediment Research*, 28(2), 182-193.
- Annandale. (1984). Predicting the distribution of deposited sediment in southern African reservoirs. *IAHR: Challenges in African Hydrology and Water Resources*.
- Aref, H., & Balachandar, S. (2017). *A first course in computational fluid dynamic*. Cambridge University Press.
- Badano, N., & Menéndez, A. (2014). EVALUACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA MODELACIÓN REYNOLDS-AVERAGED NAVIER-STOKES (RANS) DE LA CAPA LÍMITE EN CONDUCTOS CIRCULARES. San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Bravo-Espinoza, Osterkamp, & Lopes. (2004). Sediment Transport in Natural Channels: Technical review of empirical Bedload Equations. *Terra Latinoamericana*, 22(3), 377-386.
- Cando, E., & Luo, X. (2018). *Sediment erosion prediction in Francis turbines based on liquid-solid two phase flow*. Tsinghua, China: Tsinghua University.
- Carrillo Sánchez, J. M., & Castillo Elsitdié, L. G. (2011). Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos computacional. *Iv Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT* (págs. 33-35). Cartagena: Universidad Politecnica de Cartagena.
- Carrillo, A., González, K., & Mendoza, B. (2019). *Introducción al Método de Diferencias Finitas y su Implementación Computacional*. México.
- Carrillo, J. (2014). *Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica*. Cartagena.
- Castro, M., Hidalgo, X., Galarza, J. L., & Guachamín, K. (2021). *Reconformación del área de aproximación a los desagües de fondo para un adecuado lavado del embalse de la presa Toachi*. Quito: CELEC-EP.
- Cebeci, T., & Bradshaw, P. (1977). *Momentum Transfer in Boundary Layers*. New York.
- CELEC. (2020). *Unidad de Negocio HIDROTOAPI-CELEC EP*. Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/hidrotoapi/>
- Celik, I., Ghía, U., Roache, P., Freitas, C., Coleman, H., & Raad, P. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, 078001-1-3.

- Celik, I., Ghia, U., Roache, P., Freitas, C., Coleman, H., & Raad, P. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty due to Discretization in CFD applications. *Journal of Fluids Engineering*.
- Cevallos, P. E., & Ochoa, D. M. (2020). *Modelación numérica (CFD) del lavado de sedimentos en el embalse Toachi. - Programa FLOW-3D*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Chen, Q., Dai, G., & Liu, H. (Julio de 2002). Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow. *Jornal of Hydraulic Engineering, Vol. 128*(Issue 7).
- Cheng, X., Chen, Y., & Luo, L. (2006). Numerical simulation of air-water two-phase flow over stepped spillways. *Science in China Series E: Technological Sciences, 49*(6), 674-684.
- Chow, V. T. (1990). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill.
- Chow, V. t. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. México: McGraw-Hill.
- CIERHI-EPN. (2011). *Estudio Hidrológico - Hidráulico Complementario, que Determine los Caudales de Crecida y Defina las Afectaciones de estos Caudales, Aguas Abajo de las Obras Principales del Proyecto Hidroeléctrico Toachi – Pilatón*. Quito.
- Creaco, E., & Bertrand-Krajewski, J.-L. (2009). Numerical simulation of flushing effect on sewer sediments and comparison of four sediment transport formulas. *Journal of Hydraulic Research, 47*(2), 195-202.
- De Vehi Sarrazin, J. M. (2016). *MALLADO DE GEOMETRÍAS COMPLEJAS MEDIANTE CFD*. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña.
- ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL - DICA. (2012). *Estudio en modelo hidráulico escala 1:50 presa toachi y sus obras complementarias*. Informe Técnico, Fase II, Quito.
- Escuela Politécnica Nacional - FICA. (2012). *Estudio hidrológico - hidráulico complementario que determine los caudales de crecida y defina las afectaciones de estos caudales de crecida aguas abajo de las obras principales del proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón*. Quito: CELEC.
- Fernández Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*. Barcelona: Reverte.
- Fernández, J. (2012). *Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos. Introducción a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) por el Método de Volúmenes Finitos*. Barcelona, España.
- Flow Science. (2017). *FLOW-3D Users Manual*. Flow Science.



- Flow Science. (2020). *Flow - 3D Users Manual*. Flow Science.
- Fontes, E. (2018). Finite Elements Versus Finite Volumes. COMSOL.
- Gómez Gonzalez, S. (2017). *Mallado y Simulación CFD de Automovil*. Barcelona: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.
- Hagger, W., Schleiss, A., Boes, R., & Pfister, M. (2021). *Hydraulic Engineering of dams*. Londres: Taylor & Francis Group.
- Heredia. (2018). *Estudio de Operación de Compuertas para Prevención y Contingencia del Llenado y Vaciado de los Embalses y Estudio Sedimentológico, Evacuación de Sedimentos y Lavado de Sedimentos del Embalse, Memoria ejecutiva*. QUITO: CELEC-HIDROTOAPI.
- Heredia, E. (2018). *Estudio de Operación de Compuertas para Prevención y Contingencia del Llenado y Vaciado de los Embalses y Estudio Sedimentológico, Evacuación de Sedimentos y Lavado de Sedimentos del Embalse, Informe General*. Quito: CELEC HIDROTOAPI.
- Hidalgo, V., Escaler, X., Valencia, E., Peng, X., Erazo, J., Puga, D., & Luo, X. (2019). Scale-Adaptive Simulation of Unsteady Cavitation Around a Naca66 Hydrofoil. *Applied Sciences*.
- ICOLD/CNEGP. (2003). *Monografía n° 27 - Estado del arte de las presas de hormigón compactado con rodillo*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Instituto Chileno del Acero. (2002). *Tablas Auxiliares*. Santiago.
- Kantoush, & Sumi. (2010). *Morphology and Sediment Management Strategies for Sustainable Reservoirs in Japan and European Alps*. Kyoto: Kyoto University.
- Kundu, & Cohen. (2008). *Fluid Mechanics*. Burlington, USA: Elsevier.
- Lamas, I., & Rodríguez, C. (2014). CFD with OpenFOAM. España.
- Manenti, S., Sibilla, S., Gallati, M., Agate, G., & Guandalini, R. (2012). SPH Simulation of Sedimento Flushing Induced by a Rapid Water Flow. *Journal of Hydraulic Engineering - ASCE*, 138(3), 272-284.
- Mangani, L. (2009). *Development and validation of an object oriented cfd solver for heat transfer and combustion modeling in turbomachinery applications*. Firenze, Italia.
- Morris, & Fan. (2009). *Reservoir Sedimentation Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Sánchez, J. (2004). *Simulación Numérica Directa en Paralelo de las Ecuaciones de Navier-Stokes en Flujos con Capa Limite Desprendida*. Valencia.

- Tennekes , H., & Lumley , J. (1972). *A first course in turbulence.* . The MIT Press.
- Trigrek, & Aras. (2012). *Reservoir Sediment Management.* Netherlands: Bakelma, Taylor and Francis Group.
- Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2018). *Computational fluid dynamics: a practical approach.* Butterworth-Heinemann.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method.* Pearson Education Ltd.
- Vide, J. P. (2003). *Ingeniería de Ríos.* México: Alfaomega.
- Villamizar, A. (2014). *Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal.* Bogota, Colombia : Universidad Nacional de Colombia.
- Villamizar, A. (2014). *Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal.* Bogota.
- Vladislav, E. (2006). *Wall funtions in Large Eddy Simulations of Channel using wall funtions.* Sweden.
- von Kármán , T. (1930). *Mechanische Ähnlichkeit und turbulenz.* .
- Wallinford, & Atkinson. (1996). *The Feasibility of Flushing Sediments from Reservoirs, TDR Project R5839, Report OD-137.*
- Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD.* D C W Industries.
- Xamán, J. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros.* Palibrio.
- Yeoh, G. H., & Tu, J. (2019). *Computational techniques for multiphase flows.* Butterworth-Heinemann.