

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE VERTEDEROS UTILIZANDO SIMULACIÓN FÍSICA Y DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD)

TESIS

Presentada por:

Bach. Jesús Ángel Cáceres Cari

Bach. Renzo Bryan Ellier Flores Vichata

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

TACNA – PERÚ

2025

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería Civil, Arquitectura y Geotecnia

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO
DE VERTEDEROS UTILIZANDO SIMULACIÓN FÍSICA Y DINÁMICA
DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD)”

Tesis sustentada y aprobada el día 24 de setiembre del 2025 estando
integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE

.....
Mtro. Ing. César José Avendaño Jihuallanga

SECRETARIO

.....
Ing. Omar Mamani Huarcaya

VOCAL

.....
Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

ASESOR DE TESIS

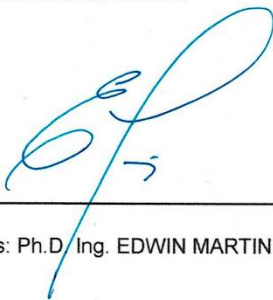
.....
Ph.D. Ing. Edwin Martin Pino Vargas

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Edwin Martin Pino Vargas, en mi condición de ASESOR acreditado con Resolución de Facultad N° 370-2025-FIG/UNJBG del 22 de julio del 2025, del Trabajo de Tesis titulado: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE VERTEDEROS UTILIZANDO SIMULACIÓN FÍSICA Y DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD)”**. Presentado por los bachilleres: **JESÚS ÁNGEL CÁCERES CARI** y **RENZO BRYAN ELLIER FLORES VICHATA**. Para optar el título profesional de Ingeniero Civil.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual de la UNJBG; considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual TURNITIN, cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 5 %. Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis enunciada líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para optar el título profesional en Ingeniero Civil, según corresponda para su publicación en el Repositorio Institucional.

Tacna, 23 de setiembre del 2024.



FIRMA ASESOR
Nombres y apellidos: Ph.D. Ing. EDWIN MARTIN PINO VARGAS
DNI: 00486621



Huella dactilar



FIRMA AUTOR
Nombres y apellidos: JESÚS ÁNGEL CÁCERES CARI
DNI: 76675204



Huella dactilar



FIRMA AUTOR
Nombres y apellidos: RENZO BRYAN ELLIER FLORES VICHATA
DNI: 70947026



Huella dactilar

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres Ángel y Lucía, cuyo amor incondicional y sacrificio han sido el motor de cada meta alcanzada y por inculcarme en una formación con valores para ser mejor persona cada día.

A mi tía Aurora, mi segundo corazón, mi refugio en la tormenta, te dedico este logro, con la promesa de que, allá donde estés, sepas que fuiste mi inspiración más profunda, mi motor más genuino y el alma de cada esfuerzo que hice.

Jesús Ángel Cáceres Cari

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi madre Yolanda y a mi padre Gregorio, por ser ejemplo de esfuerzo, sacrificio y dedicación, por brindarme la educación, los valores y el apoyo incondicional que hicieron posible este logro, enseñándome siempre que la perseverancia es el camino para alcanzar cualquier meta.

A mi hermana Katherine, por estar a mi lado en cada desafío, alentarme a esforzarme siempre y motivarme a crecer cada día, recordándome que cada reto en la vida es una oportunidad para aprender, avanzar y fortalecerme.

Renzo Bryan Ellier Flores Vichata

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por la vida y salud, por no dejar que me falte una familia, y por regalarme cada día una nueva oportunidad para seguir adelante.

Al Dr. Edwin Pino, por su compromiso, paciencia y valiosa orientación como asesor, cuya guía marcó cada etapa de este trabajo y fue decisiva para la culminación de esta tesis.

Al Ing. Omar, por el tiempo brindado, apoyo y generosidad al compartir sus conocimientos, lo cual fue fundamental para el desarrollo del presente trabajo.

INDICE DE CONTENIDO

1	PORTADA	i
2	HOJA DE JURADO	ii
3	CERTIFICADO DE SIMILITUD	iii
4	DEDICATORIA	iv
5	AGRADECIMIENTO	vi
6	INDICE DE CONTENIDO	vii
7	INDICE DE FIGURAS	xiii
8	INDICE DE TABLAS	xviii
9	RESUMEN	xx
10	ABSTRACT	xxi
11	INTRODUCCION	1
1	CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1	Descripción y fundamentación del problema.....	2
1.2	Formulación del problema	2
1.2.1	Problema general.....	2
1.2.2	Problemas específicos	2
1.3	Objetivos	3

1.3.1	Objetivo General	3
1.3.2	Objetivos Específicos.....	3
1.4	Justificación e importancia de la investigación.....	3
1.4.1	Justificación económica	3
1.4.2	Justificación académica.....	4
1.4.3	Justificación técnico ambiental	4
1.4.4	Importancia de la investigación	4
1.5	Limitaciones y alcances	5
1.5.1	Limitaciones	5
1.5.2	Alcances	5
1.6	Hipótesis.....	5
1.6.1	Hipótesis General	5
1.6.2	Hipótesis específicas	5
1.7	Sistema de variables – dimensiones e indicadores.....	6
1.7.1	Variable dependiente.....	6
1.7.2	Variable Independiente	6
2	CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	8
2.1	Antecedentes o revisión de estudios realizados	8

2.1.1	Antecedentes Internacionales.....	8
2.1.2	Antecedentes Nacionales	9
2.1.3	Antecedentes Locales.....	9
2.2	Bases Teóricas.....	10
2.2.1	Bases teóricas “Comportamiento hidráulico de vertederos”.....	10
2.2.2	Bases teóricas: “simulación física y dinámica de fluidos computacional (cfd)”	12
2.3	Definición de términos básicos	14
2.4	Generalidades sobre canales	15
2.4.1	Tipos.....	15
2.4.2	Características geométricas	16
2.4.3	Características hidráulicas.....	19
2.4.4	Tipos de flujos.....	21
2.4.5	Velocidad en canales.....	22
2.4.6	Rugosidad en canales	23
2.4.7	Viscosidad	23
2.4.8	Importancia de la gravedad en canales abiertos.....	24
2.5	Caracterización de vertederos	25

2.5.1	Definiciones	25
2.5.2	Partes	26
2.5.3	Clasificación.....	27
2.6	Ecuaciones fundamentales de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en ANSYS Fluent	32
2.6.1	Ecuación de Navier Stokes.....	32
2.6.2	Ecuación de Continuidad	33
2.6.3	Ecuación de conservación de la energía.....	34
2.7	Estrategias numéricas en CFD	34
2.7.1	Discretización de las ecuaciones	34
2.7.2	Discretización espacial.....	36
2.7.3	Parámetros de control de calidad del mallado Ansys Fluent	38
2.7.4	Discretización temporal	40
2.7.5	Métodos iterativos	43
2.8	Tratamiento de la turbulencia	44
2.8.1	Método DNS	45
2.8.2	Método RANS.....	46
2.8.3	Método de LES	49

3	CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	51
3.1	Metodología y técnicas utilizadas	51
3.1.1	Tipo y nivel de investigación	51
3.1.2	Diseño de investigación	51
3.2	Metodología del trabajo	52
3.2.1	Etapa 01 - El estudio experimental en el laboratorio	52
3.2.2	Etapa 02 – Configuración del canal y vertedero en Ansys	55
3.2.3	Etapa 03 – Análisis y comparación de resultados	56
3.3	Metodología experimental en el laboratorio	57
3.4	Descripción desarrollo del modelo computacional CFD	66
3.4.1	Diagrama de flujo del proceso de simulación CFD.	80
4	CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
4.1	Presentación de los resultados experimentales (laboratorio) y del modelamiento hidráulico CFD.	81
4.1.1	Análisis comparativo de tirantes experimentales (laboratorio) y del modelamiento hidráulico CFD.	81
4.1.2	Análisis comparativo de velocidades experimentales (laboratorio) y del modelamiento hidráulico CFD.....	88
4.2	Discusión de los resultados	94

5	CONCLUSIONES	95
6	RECOMENDACIONES.....	97
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Sección trapezoidal de un canal.....	17
Figura 2	Sección triangular de un canal.....	18
Figura 3	Sección mixta de un canal.	19
Figura 4	Características hidráulicas en una sección transversal.	19
Figura 5	Vista frontal de las partes de un vertedero.....	27
Figura 6	Formas básicas de los vertederos.....	27
Figura 7	Vertedero rectangular con contracción.....	29
Figura 8	Vertedero triangular.....	30
Figura 9	Vertedero trapezoidal.....	31
Figura 10	Mallados estructurados	37
Figura 11	Mallado no estructurado de perfiles	38
Figura 12	Vectores utilizados para calcular la calidad ortogonal de una celda. ...	40
Figura 13	Características geométricas del canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm.	53
Figura 14	Características geométricas de los vertederos: trapezoidal, triangular, rectangular.....	54
Figura 15	Juego de vertederos de cresta delgada HM 161.30.....	55
Figura 16	Verificación preventiva de las condiciones del canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm.	57
Figura 17	Instalación del vertedero en el canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm.	58

Figura 18 Funcionamiento a través del canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm.	59
Figura 19 Panel táctiles - Eaton Touchpanel.	60
Figura 20 Indicador del nivel de agua HM 160.5.	61
Figura 21 Velocímetro HM 160.64.	61
Figura 22 Flujo a través del vertedero trapecoidal de cresta delgada HM 161.30.	65
Figura 23 Flujo a través del vertedero triangular de cresta delgada HM 161.30.	65
Figura 24 Flujo a través del vertedero rectangular de cresta delgada HM 161.30.	66
Figura 25 Configuración geométrica del vertedero trapecoidal en el Ansys 2025 R1.	67
Figura 26 Configuración geométrica del vertedero triangular en el Ansys 2025 R1.	67
Figura 27 Configuración geométrica del vertedero rectangular en el Ansys 2025 R1.	68
Figura 28 Configuración geométrica de los vertederos en el geometry de ANSYS 2025 R1.	69
Figura 29 Elaboración del enmallado para el vertedero trapecoidal.	69
Figura 30 Elaboración del enmallado para el vertedero triangular.	70
Figura 31 Elaboración del enmallado para el vertedero rectangular.	70

Figura 32	Calidad de malla para el vertedero trapezoidal.....	72
Figura 33	Calidad de malla para el vertedero triangular.....	72
Figura 34	Calidad de malla para el vertedero rectangular.	73
Figura 35	Condición de frontera para el vertedero trapezoidal.....	74
Figura 36	Condición de frontera para el vertedero triangular.....	74
Figura 37	Condición de frontera para el vertedero rectangular.	75
Figura 38	Simulación del vertedero trapezoidal - Interfaz principal de Ansys 2025 R1.....	75
Figura 39	Convergencia para el vertedero trapezoidal.	76
Figura 40	Resultado finales de la simulación CFD en un vertedero triangular – Ansys 2025 R1.....	76
Figura 41	Simulación del vertedero triangular - Interfaz principal de Ansys 2025 R1.....	77
Figura 42	Convergencia para el vertedero triangular.....	77
Figura 43	Resultado finales de la simulación CFD en un vertedero triangular – Ansys 2025 R1.....	78
Figura 44	Simulación del vertedero rectangular - Interfaz principal de Ansys 2025 R1.....	78
Figura 45	Convergencia para el vertedero rectangular.	79
Figura 46	Resultado finales de la simulación CFD en un vertedero rectangular – Ansys 2025 R1.....	79

Figura 47 Diagrama de flujo del desarrollo CFD.....	80
Figura 48 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero trapezoidal.....	82
Figura 49 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero trapezoidal.....	83
Figura 50 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero triangular.....	84
Figura 51 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero triangular.....	85
Figura 52 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero rectangular.....	86
Figura 53 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero rectangular.....	87
Figura 54 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero trapezoidal.....	88
Figura 55 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero trapezoidal.....	89
Figura 56 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero triangular.....	90
Figura 57 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero triangular.....	91

Figura 58 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero rectangular.....	92
Figura 59 Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero rectangular.....	93

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Rango de valores de skewness y la calidad de celda correspondiente:....	39
Tabla 2 Dimensiones del canal ensayo HM 161.TA 600x800mm.	53
Tabla 3 Dimensión de los vertederos en mm.	54
Tabla 4 Caudal suministrado a máxima capacidad del vertedero.	55
Tabla 5 Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) – vertedero trapezoidal.	62
Tabla 6 Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) – vertedero trapezoidal.	62
Tabla 7 Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) – vertedero triangular.	63
Tabla 8 Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) - vertedero triangular.	63
Tabla 9 Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) - vertedero rectangular.	64
Tabla 10 Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) - vertedero rectangular.	64
Tabla 11 Resultados de la metodología experimental - modelamiento CFD 01..	81
Tabla 12 Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 02. ...	82
Tabla 13 Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 03.	83
Tabla 14 Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 04. ...	84
Tabla 15 Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 05.	85

Tabla 16 Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 06.	86
Tabla 17 Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 07.	88
Tabla 18 Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 08. ...	89
Tabla 19 Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 09. ...	90
Tabla 20 Resultados de la metodología experimental – modelamiento CFD 10.	91
Tabla 21 Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 11. ...	92
Tabla 22 Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 12. ...	93

RESUMEN

La implementación de herramientas digitales para el modelado y simulación bajo metodologías de herramientas CFD ha revolucionado los procesos de diseño en ingeniería hidráulica. Este avance tecnológico ha sido adoptado en el laboratorio de hidráulica e hidrología, de la E.P. Ingeniería Civil, FIAG, de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann [UNJBG], donde el canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm, usa de plataformas computacionales para optimizar diseños y modificaciones estructurales con mayor precisión y eficiencia.

Por consiguiente, se emplea el software de ANSYS 2025 R1 for Students, para realizar el análisis comparativo, siendo necesario realizar ensayos que permitan el observar y analizar el comportamiento del agua en condiciones específicas. Así mismo, en el análisis se usó el canal de ensayo HM 161.TA y HM 161.30 Juego de vertederos de cresta delgada. Los resultados obtenidos experimentalmente mostraron una alta similitud con el modelo numérico. Esta similitud se atribuye a que, en las pruebas físicas, los valores registrados dependen directamente del caudal suministrado. Al ajustar este parámetro, los datos experimentales se aproximan progresivamente a los predichos por la simulación numérica, validando así la precisión del modelo computacional.

Palabras clave: vertedero, tirante, fluido, análisis comparativo, metodología CFD.

ABSTRACT

The implementation of digital tools for modeling and simulation using CFD methodologies has revolutionized design processes in hydraulic engineering. This technological advance has been adopted in the hydraulics and hydrology laboratory at the E.P. Ingeniería Civil Engineering, FIAG, at the Jorge Basadre Grohmann National University [UNJBG], where the HM 161.TA 600x800mm test channel uses computational platforms to optimize designs and structural modifications with greater precision and efficiency.

Consequently, ANSYS 2025 R1 for Students software is used to perform the comparative analysis, requiring tests to observe and analyze the behavior of water under specific conditions. Likewise, the HM 161.TA test channel and HM 161.30 set of thin-crest spillways were used in the analysis. The results obtained experimentally showed a high similarity with the numerical model. This similarity is attributed to the fact that, in physical tests, the recorded values depend directly on the flow rate supplied. By adjusting this parameter, the experimental data progressively approximates those predicted by the numerical simulation, thus validating the accuracy of the computational model.

Keywords: weir, depth, fluid, comparative analysis, CFD methodology.

INTRODUCCION

Esta tesis consta de cinco capítulos los cuales se ha dividido en el siguiente orden:

En el capítulo I, se muestra los objetivos, alcance de la investigación y parámetros generales.

En el capítulo II, se realiza el marco teórico, se realiza la descripción concisa de los fundamentos, conceptos, principios científicos y bases fundamentales de la hidráulica, adicionalmente, un resumen de los trabajos previos realizados referente a modelos CFD.

En el capítulo III, se presenta el desarrollo de la metodología experimental, posteriormente el modelo hidráulico CFD, partiendo con la descripción general del proyecto.

El capítulo IV, se obtiene los resultados de la metodología experimental y del modelamiento CFD. Por lo tanto, se desarrolla la discusión del análisis comparativo de los resultados.

En el Capítulo V, se presenta un resumen de resultados, conclusiones e investigaciones o trabajos futuros que se pueden realizar.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción y fundamentación del problema

El estudio del flujo de agua sobre vertederos es crucial en ingeniería hidráulica para el diseño de estructuras de control de inundaciones, presas y sistemas de riego. Sin embargo, los métodos experimentales tradicionales son costosos y requieren prototipos físicos. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite simular estos fenómenos con menor costo y mayor flexibilidad, pero su precisión depende de modelos numéricos y condiciones de contorno adecuadas.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 *Problema general*

¿Cómo podemos utilizar herramientas CFD para aumentar la precisión de las simulaciones del flujo de agua en un vertedero teniendo en cuenta diversas condiciones de contorno y modelos de turbulencia?

1.2.2 *Problemas específicos*

¿Cuál de los tres modelos de turbulencia ($k-\epsilon$, $k-\omega$ y LES) produce resultados más similares a los datos experimentales?

¿Qué efectos tienen las condiciones de contorno en el modelado de perfiles de flujo?

¿Qué técnicas de discretización de volumen finito y elementos finitos maximizan el tiempo de cálculo sin sacrificar la precisión?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Modelar el flujo de agua sobre vertederos de cresta delgada, utilizando un modelo de dinámica de fluidos computacional de acceso libre, y compararlo con el ensayo en el canal horizontal abierto del laboratorio de hidráulica e hidrología, de la E.P. Ingeniería Civil, FIAG, de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann [UNJBG].

1.3.2 Objetivos Específicos

- Calcular el tirante y la velocidad del flujo en vertederos de sección rectangular, triangular y trapezoidal mediante ensayos en el modelo físico del laboratorio de hidráulica e hidrología de la ESIC-FIAG.
- Simular el flujo en vertederos con secciones triangular, trapezoidal y rectangular utilizando CFD para obtener el tirante y la velocidad del flujo.
- Comparar los resultados del modelo físico y numérico CFD, aplicando análisis estadístico para validar los resultados.

1.4 Justificación e importancia de la investigación

1.4.1 Justificación económica

Este estudio permite que, mediante simulaciones numéricas, se pueden completar rápidamente numerosas iteraciones de diseño y análisis, lo que reduce significativamente los gastos de creación y prueba de prototipos físicos.

1.4.2 *Justificación académica*

Este estudio permite el desarrollo de manejo de tecnología enfoques de CFD relacionados con los diferentes diseños de estructuras hidráulicas.

1.4.3 *Justificación técnico ambiental*

Este estudio permite que a futuros diseños de vertederos estos, contribuyen a la prevención de erosión y sedimentación, mejorando las condiciones de flujo y prolongando la vida útil de los embalses y estructuras hidráulicas. En condición de cambio climático, su diseño y operación pueden adaptarse para enfrentar eventos climáticos extremos, promoviendo una gestión integral y sostenible de los recursos hídricos protegiendo tanto a las comunidades como al medio ambiente.

1.4.4 *Importancia de la investigación*

En ingeniería hidráulica y gestión de recursos hídricos, los estudios de modelado experimental y numérico de canales rectangulares abiertos con diferentes tipos de vertederos son esenciales. El modelo numérico CFD ahorra tiempo y dinero al simular el flujo de agua y evaluar la efectividad de diversas estructuras de vertederos sin necesidad de costosas pruebas físicas.

Para que estos modelos sean precisos y proporcionen diseños más confiables y efectivos, es necesaria la experimentación física para su validación. Además, este estudio apoya la gestión sostenible del agua al permitir la implementación de estrategias prácticas de control de

inundaciones y conservación de recursos hídricos, especialmente en condiciones del cambio climático.

1.5 Limitaciones y alcances

1.5.1 Limitaciones

- Dependencia de la validación experimental.
- Los modelos LES (Large Eddy Simulation) tienen altos requerimientos computacionales, el análisis computacional se desarrolló en una laptop ASUS TUF Gaming Laptops with RTX GPUs.

1.5.2 Alcances

- Se simulan flujos estables e inestables en tres dimensiones.
- Examen de vertederos con paredes gruesas y delgadas.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

Con una inexactitud inferior al 5 % en comparación con los datos experimentales, la simulación CFD realista del flujo sobre vertederos es posible gracias al empleo de modelos de turbulencia Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) con refinamiento de malla.

1.6.2 Hipótesis específicas

En flujos con separación, el modelo (k- ω) SST ofrece mayor precisión que el modelo k- ϵ estándar, gracias a su capacidad para capturar mejor los gradientes cercanos a la pared. El modelo Shear Stress Transport (SST) es una formulación híbrida que combina las ventajas del modelo (k-

ω) en la región cercana a la pared con las del modelo $k-\varepsilon$ en el flujo libre, logrando una mejor representación de fenómenos complejos como la recirculación y la separación del flujo. Además, al emplear una malla estructurada u organizada, es posible mantener una alta precisión en los resultados mientras se optimiza el tiempo de simulación.

1.7 Sistema de variables – dimensiones e indicadores

1.7.1 Variable dependiente

La variable dependiente es el flujo sobre el vertedero (Q), ya que su valor varía en función del modelo de turbulencia utilizado en la simulación:

a) Dimensión:

Volumen por unidad de tiempo.

b) Indicador:

Se utiliza la diferencia porcentual entre el flujo experimental y el flujo simulado como medida de precisión del modelo.

1.7.2 Variable Independiente

La variable independiente es el modelo de turbulencia empleado en la simulación ($k-\varepsilon$, $k-\omega$, LES), ya que se modifica para analizar su influencia sobre el comportamiento del flujo.

a) Dimensión:

Adimensional (se refiere a la elección del modelo, no a una magnitud física).

b) Indicadores:

- Número de Reynolds, como parámetro de referencia del régimen de flujo.
- Criterios de convergencia numérica, que garantizan la validez de los resultados obtenidos en CFD

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes o revisión de estudios realizados

2.1.1 *Antecedentes Internacionales*

Patel y Sharma (2021) realizaron un estudio comparativo entre modelos físicos y simulaciones CFD para vertederos escalonados en India; utilizando un canal de pruebas a escala reducida y software ANSYS Fluent, determinaron que las simulaciones CFD reproducían con un 92% de precisión los resultados obtenidos en laboratorio, validando su uso como herramienta complementaria para el diseño hidráulico.

Wang et al. (2020) analizaron el comportamiento del flujo en vertederos fijos mediante CFD y pruebas físicas, en su presente investigación reveló que la simulación computacional permite identificar zonas de recirculación y formación de vórtices con mayor detalle, mejorando la eficiencia del diseño hidráulico y reduciendo riesgos de cavitación.

González y Herrera (2019) compararon vertederos con y sin elementos disipadores de energía usando simulaciones CFD, así mismo; los resultados mostraron que la incorporación de deflectores y cambios en la geometría del vertedero reducen significativamente la energía del chorro de salida, contribuyendo a una menor erosión en el canal de descarga.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Huamán (2022) llevó a cabo un análisis hidráulico de vertederos en represas andinas utilizando modelos físicos construidos en laboratorio y simulaciones CFD, así mismo, los resultados indicaron que, si bien ambos métodos son útiles, la CFD permite optimizar recursos al prever comportamientos de flujo antes de construir modelos a escala.

Castillo y Torres (2020) evaluaron el diseño de vertederos de emergencia en proyectos hidroeléctricos; se emplearon tanto maquetas físicas como simulaciones en FLOW-3D para comparar el comportamiento en eventos extremos, por lo tanto, que la combinación de ambas técnicas ofrece una solución más robusta para prevenir fallos estructurales.

Mendoza (2018) utilizó simulación CFD para estudiar el comportamiento del flujo sobre vertederos instalados en zonas agrícolas de la costa, de este modo el estudio permitió optimizar la geometría de los vertederos y mejorar la eficiencia en la medición y control del caudal de riego.

2.1.3 Antecedentes Locales

Pérez y Mamani (2021) analizaron el vertedero del canal Uchusuma mediante un modelo físico a escala reducida en la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG), la investigación identificó zonas de turbulencia que generaban pérdidas de carga no previstas en el diseño original.

Apaza (2020) realizó una simulación CFD del vertedero del sistema de riego Caplina, evaluando diferentes escenarios de caudales máximos, por consiguiente, el estudio demostró que mediante ajustes geométricos en el aliviadero se podía reducir hasta en un 20% la presión máxima sobre las paredes laterales.

Cárdenas y Luque (2019) desarrollaron un estudio comparativo entre métodos físicos y computacionales aplicados al vertedero del embalse Paucarani; finalmente, concluyeron que la CFD permitió prever condiciones de sobrepaso en eventos extremos, mientras que el modelo físico fue clave para validar los resultados ante la autoridad regional.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Bases teóricas “Comportamiento hidráulico de vertederos”

a) Definición del comportamiento hidráulico de vertederos.

Según Chow 2010, el comportamiento hidráulico de un vertedero se refiere a la forma en que el flujo de agua interactúa con su geometría estructural, incluyendo parámetros como la velocidad, presión, profundidad y régimen del flujo, así mismo, los vertederos son estructuras utilizadas para controlar el caudal de agua excedente en embalses, canales y ríos, permitiendo el paso seguro del agua y evitando el colapso de la infraestructura u diseño hidráulico debe garantizar estabilidad, eficiencia y seguridad bajo diferentes condiciones de operación.

b) Tipos de vertederos y su aplicación en ingeniería hidráulica.

Según Montes (2018), los vertederos pueden clasificarse en varios tipos según su geometría: vertederos rectangulares, triangulares (V-notch), trapezoidales (Cipoletti), de labio delgado, y tipo ogee, estos responden de manera distinta a los caudales y presiones ejercidas por el agua. Por ejemplo, los vertederos OGEE son comúnmente utilizados en presas debido a su eficiencia hidráulica en caudales altos, mientras que los V-notch son útiles para medir caudales bajos en sistemas de riego, que cuya selección adecuada del tipo de vertedero influye directamente en su comportamiento hidráulico.

c) Dimensiones del comportamiento hidráulico de vertederos.

De acuerdo con Ramírez (2020), las principales dimensiones que definen el comportamiento hidráulico de un vertedero son:

- Altura de carga hidráulica:

Representa la altura del agua sobre el vertedero, determinando el caudal que puede evacuar.

- Presión y velocidad del flujo:

Indican la energía cinética y dinámica del agua al pasar por el vertedero, fundamentales para el análisis de erosión y cavitación.

- Régimen de flujo:

Define si el flujo es laminar, turbulento o supercrítico, lo cual influye en la estabilidad del vertedero y el diseño de disipadores de energía posteriores.

2.2.2 **Bases teóricas: “simulación física y dinámica de fluidos computacional (cfd)”**

- a) Definición de simulación física y CFD.

La simulación física consiste en la construcción de modelos a escala, en laboratorios hidráulicos para observar el comportamiento del agua en condiciones controladas que permite validar diseños estructurales antes de su construcción (White, 2011).

Por otro lado, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una herramienta numérica que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes mediante software especializado como ANSYS Fluent, cuya ecuación permite simular el comportamiento del agua sin necesidad de modelos físicos, representando con alta precisión las variables de flujo (Ferziger & Perić, 2019).

- b) Importancia de la simulación en el análisis hidráulico.

Según Paredes y Silva (2021), el uso de simulación física y CFD en ingeniería hidráulica permite comparar y validar diseños de estructuras hidráulicas como vertederos, disipadores de energía y canales, así mismo, estas herramientas brindan datos relevantes sobre caudales máximos, líneas

de corriente, presiones, y distribución del flujo, lo que contribuye a prevenir fallos estructurales.

Según Torres et al. (2020), resaltan que la metodología CFD reduce significativamente los tiempos y costos de diseño, permitiendo realizar múltiples escenarios y análisis de sensibilidad antes de la implementación final del proyecto.

c) Dimensiones de la simulación física y CFD

De acuerdo con Herrera (2022), las principales dimensiones o atributos de estas herramientas son:

- Capacidad de representación del flujo:

Nivel de precisión en la reproducción de variables como presión, velocidad y turbulencia.

- Escalabilidad y validación:

Posibilidad de comparar resultados obtenidos por CFD con datos experimentales de modelos físicos, asegurando la confiabilidad del modelo.

- Optimización del diseño:

Permite analizar diferentes configuraciones estructurales de manera virtual, identificando las más eficientes en términos hidráulicos y estructurales.

2.3 Definición de términos básicos

a) Vertedero:

Estructura hidráulica destinada a evacuar el exceso de agua de un embalse, canal o río, regulando el caudal y evitando desbordes o daños estructurales (Chow, 2010).

b) Comportamiento hidráulico:

Respuesta del flujo de agua ante la geometría, pendiente y condiciones de operación de una estructura, considerando variables como velocidad, presión, caudal y régimen del flujo (Ramírez, 2020).

c) Simulación física:

Método experimental que utiliza modelos a escala en laboratorios hidráulicos para observar y analizar directamente el comportamiento del flujo en condiciones controladas (White, 2011).

d) Dinámica de Fluidos Computacional (CFD):

Herramienta numérica basada en la resolución computacional de las ecuaciones de Navier-Stokes, utilizada para simular el comportamiento del flujo de fluidos en estructuras hidráulicas (Ferziger & Perić, 2019).

e) Carga hidráulica:

Altura de agua medida desde el nivel del vertedero hasta la lámina libre, utilizada para calcular el caudal que fluye a través de la estructura (Montes, 2018).

f) Régimen de flujo:

Clasificación del tipo de flujo de agua según su velocidad y profundidad relativa, pudiendo ser subcrítico, crítico o supercrítico (Chow, 2010).

g) Condiciones de contorno:

Parámetros establecidos en los límites de un dominio de simulación (entrada, salida y paredes), que definen las características físicas del flujo a modelar (Ferziger, Perić & Street, 2020).

h) Validación experimental:

Proceso mediante el cual se comparan resultados obtenidos por simulación computacional con datos de modelos físicos para asegurar la precisión del análisis (Herrera, 2022).

i) Disipación de energía:

Reducción de la energía del flujo a través de elementos estructurales como cuencas de disipación o escalones, diseñada para evitar erosión aguas abajo y proteger la infraestructura (Vásquez & Terrones, 2019).

2.4 Generalidades sobre canales

2.4.1 Tipos

Los canales se clasifican según su origen en canales naturales y canales artificiales.

2.4.1.1 Canales Naturales:

Los canales naturales son formaciones geográficas creadas por procesos hidrológicos y geológicos, como ríos, arroyos y estuarios. Estos canales mantienen la diversidad de hábitats acuáticos y ribereños, y su dinámica está determinada por el flujo natural del agua, la topografía y la vegetación circundante (Wadnerkar et al., 2020).

2.4.1.2 Canales Artificiales:

Los canales artificiales son estructuras construidas por el ser humano para transportar agua con fines específicos, como riego, navegación, control de inundaciones o abastecimiento urbano. Estos canales pueden modificar significativamente el entorno, alterando los flujos de agua y los procesos ecológicos (Carlson et al., 2019).

2.4.2 Características geométricas

2.4.2.1 Sección Transversal:

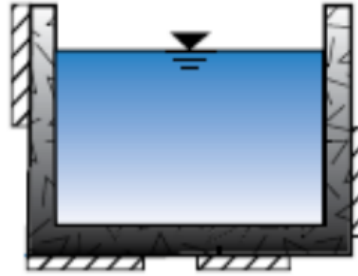
Las secciones transversales de los canales se diseñan considerando criterios como economía, topografía, resistencia estructural, estabilidad geotécnica y aplicaciones específicas. A continuación, se describen los tipos más comunes y sus parámetros geométricos clave.

a) Sección Rectangular:

Es la más simple, definida por el ancho (b) y la altura (h). Fácil de construir y analizar, pero menos eficiente hidráulicamente que otras formas, común en canales urbanos y de laboratorio.

Figura 1

Sección rectangular de un canal.



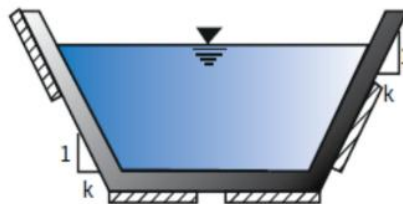
Nota. La figura muestra la sección rectangular de un canal destinado a agua potable o alcantarillado. Fuente: Conagua (2024).

b) Sección Trapezoidal:

Tiene un fondo plano y taludes laterales inclinados. Es la más utilizada en canales de riego y drenaje por su eficiencia hidráulica y estabilidad.

Figura 1

Sección trapezoidal de un canal.



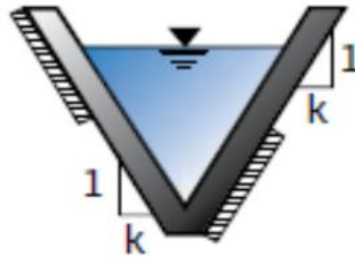
Nota. La figura muestra la sección trapezoidal de un canal destinado a agua potable o alcantarillado. Fuente: Conagua (2024).

c) Sección Triangular:

Formada solo por dos taludes inclinados que se unen en el fondo. Se emplea en canales pequeños o de drenaje, donde la economía y la facilidad de construcción son prioritaria.

Figura 2

Sección triangular de un canal.



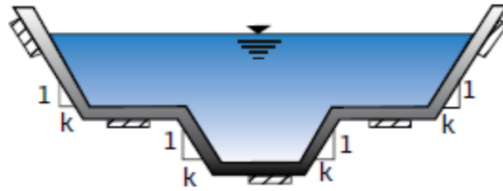
Nota. La figura muestra la sección triangular de un canal destinado a agua potable o alcantarillado. Fuente: Conagua (2024).

d) Sección mixta:

Compuesta por un canal principal (rectangular o trapezoidal) para caudales normales y un canal secundario para eventos excepcionales, generalmente con recubrimiento de menor calidad.

Figura 3

Sección mixta de un canal.

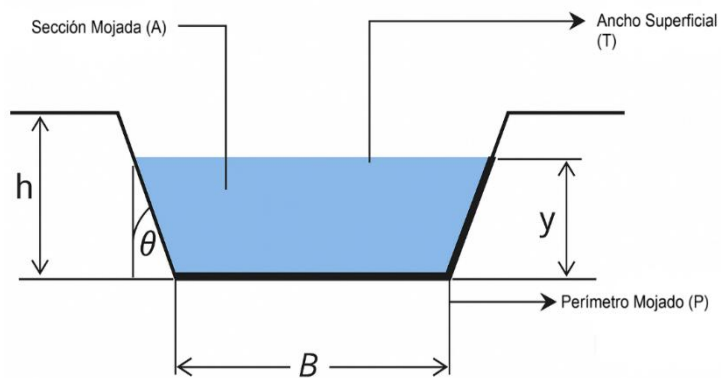


Nota. La figura muestra la sección mixta de un canal destinado a agua potable o alcantarillado. Fuente: Conagua (2024).

2.4.3 Características hidráulicas

Figura 4

Características hidráulicas en una sección transversal.



Nota. La figura muestra las características hidráulicas que determinan la cantidad de agua que puede fluir a través de la sección transversal de un canal. Fuente: Namalieu (2015).

a) Área hidráulica (A):

Es la superficie de la sección transversal ocupada por el agua. Se expresa en unidades de superficie (m^2) y está directamente relacionada con la capacidad de conducción del canal. Un mayor valor de A permite transportar más caudal (González et al., 2018).

b) Perímetro mojado (P):

Es la longitud del contorno de la sección transversal que está en contacto con el agua. Este parámetro influye en la fricción y en las pérdidas de energía, ya que una mayor longitud de contacto implica mayor resistencia al flujo (González et al., 2018).

c) Radio hidráulico ($R = A/P$):

Es la relación entre el área hidráulica y el perímetro mojado. Es un parámetro clave para evaluar la eficiencia hidráulica: un mayor radio hidráulico suele asociarse con menores pérdidas por fricción y mayor eficiencia en el transporte de agua (Wei et al., 2018).

d) Ancho superficial (T):

Es la anchura de la lámina libre de agua en la superficie. Este parámetro es relevante en el análisis de fenómenos de superficie libre, como oleajes o remansos, y en el diseño de canales para evitar desbordamientos (Enfinger, 2018).

e) Pendiente Longitudinal:

Es la inclinación del fondo de un canal, se representa en porcentaje (%), y está dada por la topografía y altura de energía requerida para el flujo.

f) Talud (z):

Es la relación entre la proyección horizontal y la vertical de la pared lateral. Se expresa según la relación $\tan(\theta) = 1/z$, donde θ es el ángulo de la pared.

g) Tirante (y):

Profundidad del agua en la sección, afecta la capacidad de conducción y la velocidad.

2.4.4 Tipos de flujos

La clasificación del flujo en canales abiertos es fundamental para el análisis y diseño hidráulico, ya que determina el comportamiento del agua en función de la variación de la profundidad respecto al tiempo y al espacio.

- **Flujo permanente:** La profundidad del agua en un punto fijo del canal no varía con el tiempo. En estas condiciones, las propiedades hidráulicas como la velocidad, la profundidad y el caudal se mantienen constantes en todo instante.
- **Flujo no permanente:** La profundidad del flujo en un punto fijo del canal cambia con el tiempo. Las propiedades hidráulicas

también son variables, lo que complica el análisis y requiere el uso de métodos más avanzados.

- **Flujo uniforme:** La velocidad y la profundidad del flujo permanecen constantes a lo largo de la dirección del flujo.
- **Flujo variado:** La profundidad cambia a lo largo del canal. Las propiedades del flujo cambian a lo largo del recorrido, pudiendo ser gradualmente variado (cambios suaves) o rápidamente variado (cambios bruscos, como en saltos hidráulicos).

2.4.5 *Velocidad en canales*

En los canales, la velocidad del flujo varía en diferentes puntos de la sección transversal debido a factores como la rugosidad, la pendiente y la geometría. Por ello, se utiliza el concepto de velocidad media, que representa el valor promedio de la velocidad en toda la sección transversal del canal.

$$V_m = \frac{Q}{A_m}$$

Donde:

V_m : Velocidad media del canal.

Q : Caudal del canal.

A_m : Área de la sección mojada del canal.

2.4.6 *Rugosidad en canales*

El coeficiente de rugosidad (η o n de Manning) es un parámetro clave que cuantifica la resistencia que las paredes y el fondo de un canal ofrecen al flujo de agua. A mayor rugosidad, mayor resistencia y menor velocidad del flujo, lo que afecta directamente la capacidad de transporte del canal (Pradhan et al., 2024).

2.4.7 *Viscosidad*

En los canales a superficie libre, el flujo suele presentarse predominantemente en régimen turbulento. Por esta razón, la viscosidad constituye un parámetro fundamental en la determinación del número de Reynolds (Re), el cual es un valor adimensional que permite identificar el régimen de flujo de un fluido en movimiento (Sturm, 2025).

Se distinguen tres tipos de flujo:

- **Flujo laminar:** Las partículas del fluido se desplazan siguiendo trayectorias bien definidas y separadas, sin que exista mezcla o intercambio transversal entre ellas.
- **Flujo turbulento:** Se caracteriza por el movimiento desordenado de las partículas, con trayectorias irregulares y múltiples componentes de la velocidad que favorecen la mezcla interna del fluido.
- **Flujo de transición:** Corresponde a la etapa intermedia en la cual el flujo comienza a cambiar de laminar a turbulento.

La clasificación de los regímenes de flujo, de acuerdo con el valor del número de Reynolds en canales a superficie libre, es la siguiente:

- Flujo laminar: $Re < 500$
- Flujo de transición: $500 < Re < 2000$
- Flujo turbulento: $Re > 2000$

A mayor viscosidad, menor número de Reynolds, lo que favorece flujos laminares; a menor viscosidad, el Re aumenta y el flujo tiende a ser turbulento.

2.4.8 Importancia de la gravedad en canales abiertos

En canales abiertos, la gravedad es la fuerza dominante que controla el comportamiento del flujo a superficie libre. El número de Froude (Fr) es el parámetro clave que compara las fuerzas inerciales con las fuerzas gravitacionales, permitiendo clasificar el régimen de flujo y predecir fenómenos hidráulicos relevantes (Yoshimura,2020).

El número de Froude se define como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD_h}}$$

Donde: (V) es la velocidad media, (g) la aceleración de la gravedad y ($D_h = A/T$) la profundidad hidráulica.

A partir de los resultados que se obtengan del número de Froude, se puede determinar lo siguiente:

- $Fr < 1$: Flujo subcrítico (dominan los efectos gravitacionales; las ondas pueden propagarse aguas arriba).
- $Fr = 1$: Flujo crítico (equilibrio entre inercia y gravedad; máxima eficiencia hidráulica).
- $Fr > 1$: Flujo supercrítico (dominan las fuerzas inerciales; las ondas solo se propagan aguas abajo).

2.5 Caracterización de vertederos

2.5.1 Definiciones

Los vertederos son dispositivos hidráulicos que consisten en una abertura o barrera colocada en canales, ríos o depósitos, obligando al flujo a pasar por encima de ellos. Su función principal es controlar el nivel del agua, medir caudales y evacuar excedentes en sistemas hidráulicos (Ary Jamil et al., 2024).

Finalidades y aplicaciones de los vertederos

- Control del nivel de flujo: Los vertederos regulan el nivel del agua en canales, embalses y depósitos, permitiendo mantener condiciones hidráulicas estables (B. Hussein et al., 2020).
- Medición de caudales: Son ampliamente utilizados para medir el caudal en canales y cursos de agua pequeños, gracias a la relación conocida entre la altura del agua sobre el vertedero y el caudal.

- Evacuación de excedentes: Funcionan como dispositivos de seguridad para evacuar volúmenes excedentes en embalses y tanques, previniendo desbordamientos (Ghaderi et al., 2020).

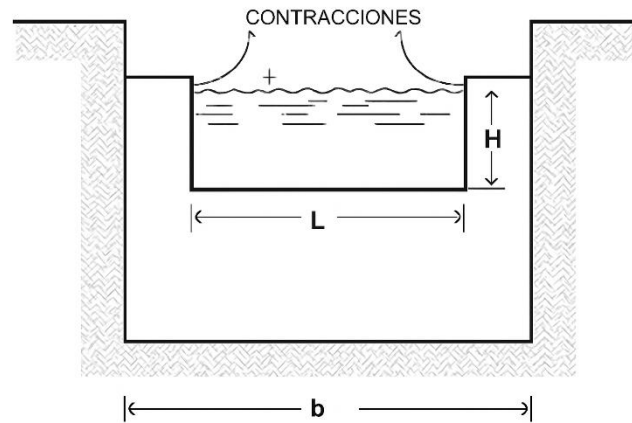
2.5.2 Partes

Un vertedero está compuesto por varios elementos geométricos clave, cada uno con una función específica en el control y medición del flujo.

- Cresta (L): Borde superior del vertedero por donde pasa el agua; su longitud afecta la capacidad de descarga y la eficiencia hidráulica.
- Contracciones: Caras verticales que forman la cresta, influyen en la formación del chorro y en la distribución del flujo.
- Umbral (P): Altura desde el fondo del canal hasta la cresta; un mayor P incrementa la capacidad de descarga.
- Ancho del canal (b): Ancho del canal de aproximación; determina el flujo que llega al vertedero.
- Carga (H): Diferencia entre la cota de la superficie libre aguas arriba y la cresta; es el parámetro principal para calcular el caudal.
- Espesor (e): Espesor de la pared del vertedero; influye en la estabilidad estructural y, en algunos casos, en la formación del flujo.

Figura 5

Vista frontal de las partes de un vertedero.



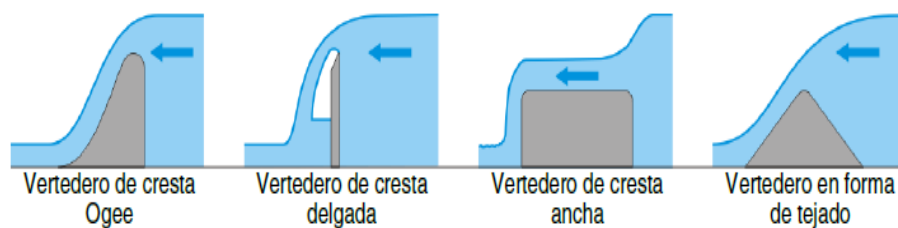
2.5.3 Clasificación

Los vertederos pueden clasificarse por el espesor de la pared y por la geometría.

2.5.3.1 Clasificación por el espesor de la pared

Figura 6

Formas básicas de los vertederos.



Nota. La figura muestra los tipos de vertederos más comunes empleados en estructuras hidráulicas de control y medición. Fuente: GUNT (2024).

Los vertederos se construyen de modos diferentes. La mayoría de los vertederos se clasifican en una de las siguientes formas básicas:

a) Vertederos de cresta delgada.

Borde superior delgado, generalmente rectangular o triangular. Usado para medición precisa de caudales pequeños y medianos (Biegowski et al.,2020).

b) Vertedero de cresta ancha.

Cresta plana y ancha, permite transición suave de flujo subcrítico a supercrítico con bajas pérdidas de energía. Utilizado en canales y estructuras de control (Chanson, 2020).

c) Vertedero de cresta OGEE.

Cresta curva diseñada para coincidir con la trayectoria del chorro de agua, común en presas y grandes caudales. Ofrece alta eficiencia y controla bien la energía aguas abajo (Abdurrosyid et al.,2021).

d) Vertedero en forma de tejado.

Cresta inclinada o en ángulo, puede aumentar la capacidad de descarga y modificar la distribución de velocidades. Utilizado en aplicaciones específicas y variantes de cresta ancha (Doustkam et al., 2024).

2.5.3.2 Clasificación por la geometría

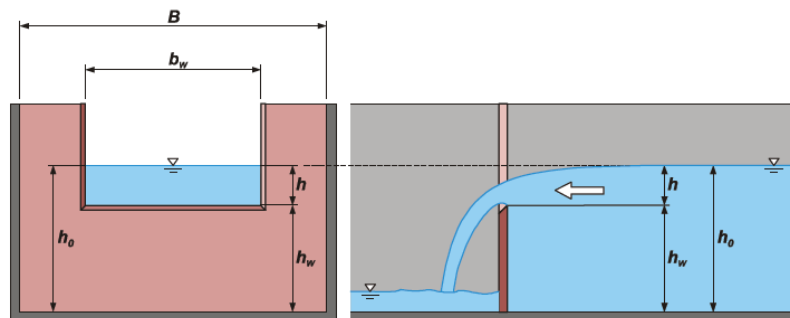
Vertedero rectangular:

Este tipo de vertedero, aunque presenta una menor eficiencia en términos de descarga, es ampliamente utilizado debido a la simplicidad de su construcción. En las presas rectangulares, el borde del vertedero se dispone de forma horizontal, lo que las hace adecuadas para el manejo de grandes caudales. Sin embargo, cuando se trata de alturas reducidas, este diseño ofrece una precisión limitada en la medición del caudal (Bekheet et al., 2021).

Las presas rectangulares pueden ser construidas con o sin contracciones laterales, dependiendo de las condiciones hidráulicas y los requerimientos específicos del proyecto.

Figura 7

Vertedero rectangular con contracción.



Nota. La figura muestra las dimensiones del vertedero rectangular de cresta delgada del manual HM 161.30. Fuente: GUNT (2024).

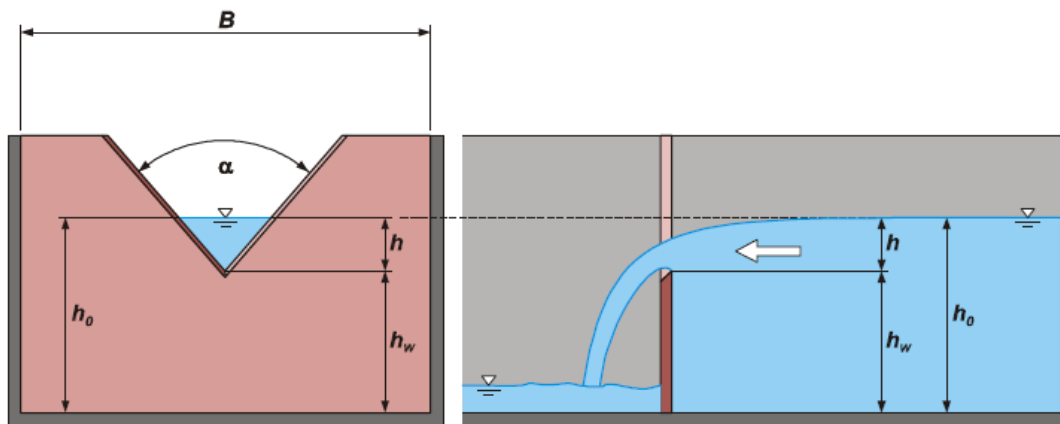
Vertedero triangular:

El vertedero triangular presenta el mayor coeficiente de descarga entre los diferentes tipos de vertederos, especialmente en configuraciones tipo laberinto, superando al vertedero trapezoidal y al rectangular (Tanga et al., 2023).

En las presas triangulares, el borde del vertedero se eleva hacia los extremos, lo que caracteriza su forma geométrica particular. Estos vertederos ofrecen una alta precisión en la medición de caudales bajos, siendo especialmente adecuados para aplicaciones donde se requiere un control detallado del flujo.

Figura 8

Vertedero triangular.



Nota. La figura muestra las dimensiones del vertedero triangular de cresta delgada del manual HM 161.30. Fuente: GUNT (2024).

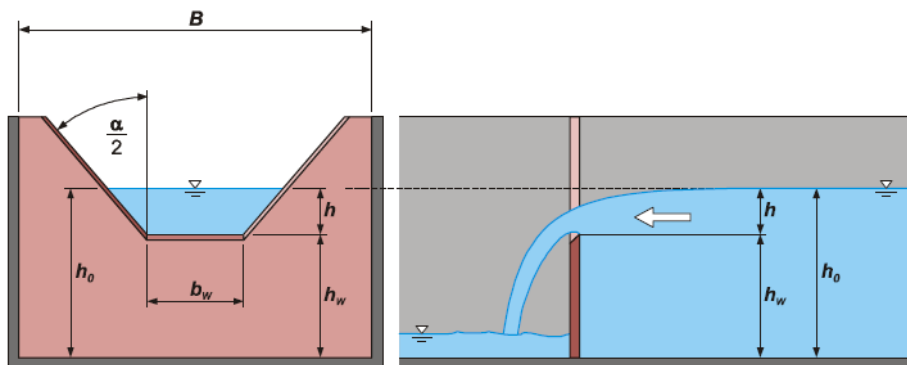
Vertedero trapezoidal:

Los vertederos trapezoidales destacan por su alta eficiencia hidráulica y su elevado coeficiente de descarga, superando en rendimiento a los vertederos rectangulares y, en muchos casos, también a los triangulares. Por ejemplo, en configuraciones tipo piano key, un vertedero trapezoidal puede ser hasta un 15 % más eficiente que uno rectangular y aproximadamente un 6 % más que uno triangular, bajo determinadas condiciones hidráulicas (Zarei et al., 2024).

La presa trapezoidal combina características de las presas rectangulares y triangulares. Aunque ofrece menor precisión en caudales bajos que la triangular, amplía significativamente el rango superior de medición, logrando un equilibrio entre exactitud y capacidad de descarga.

Figura 9

Vertedero trapezoidal.



Nota. La figura muestra las dimensiones del vertedero trapezoidal de cresta delgada del manual HM 161.30. Fuente: GUNT (2024).

2.6 Ecuaciones fundamentales de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en ANSYS Fluent

2.6.1 Ecuación de Navier Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes constituyen un conjunto de derivadas parciales no lineales que describen de manera fundamental el movimiento de los fluidos. Estas ecuaciones incorporan la conservación de la masa, el momento y, en casos compresibles, la energía, permitiendo modelar fenómenos complejos como la turbulencia, la transferencia de calor y la interacción fluido-estructura. Sin embargo, su elevada complejidad matemática y la presencia de términos no lineales hacen que la resolución analítica sea prácticamente imposible para la mayoría de los problemas reales, por lo que su estudio y aplicación dependen en gran medida de métodos numéricos avanzados, como los utilizados en dinámica de fluidos computacional (CFD), que permiten obtener soluciones aproximadas con un alto grado de precisión (Garvin, 2023).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y V^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y V^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - u_w - \delta u_s)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} - \xi \frac{A_y V^2}{x V_F} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - u_w - \delta w_s)$$

Dónde:

G_x, G_y, G_z = Aceleración del cuerpo.

f_x, f_y, f_z = Aceleraciones viscosas.

b_x, b_y, b_z = Pérdidas de flujo en medios porosos.

V_F = Volumen Fraccional del fluido.

A_x, A_y, A_z = Área fraccional abierta a fluir según el eje de dirección.

u, v, w = Componentes de velocidad en dirección de las coordenadas (x, y, z).

ρ = Densidad del fluido.

R_{SOR} = Fuente másica.

2.6.2 Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad relaciona el cambio temporal de la densidad con la divergencia del flujo, garantizando que la cantidad total se conserve localmente. Esta formulación, en su versión tridimensional y no estacionaria, constituye la base para el análisis de cualquier problema de dinámica de fluidos (White, 2020).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0$$

Dónde:

u, v, w : Componentes de la velocidad en dirección de las coordenadas.

(x,y,z) vector velocidad.

2.6.3 Ecuación de conservación de la energía

La ecuación de conservación de energía permite modelar el transporte de calor y los procesos térmicos en fluidos y sólidos. Esta ecuación es clave para simular la transferencia de calor que influye en la transición de fase entre agua y aire, como la evaporación o la condensación, al modificar la energía interna y las propiedades del flujo (Patel & Markatos, 2019).

$$\frac{\delta(ph)}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h$$

Dónde:

K = Conductividad térmica del fluido.

T = Temperatura.

$\frac{\delta(ph)}{\delta t}$ = Temperatura temporal.

S_h = Término fuente.

2.7 Estrategias numéricas en CFD

2.7.1 Discretización de las ecuaciones

Este proceso consiste en transformar las ecuaciones diferenciales continuas en un sistema de ecuaciones algebraicas que pueda ser resuelto mediante métodos computacionales. Este paso es fundamental, ya que permite aproximar de manera numérica los fenómenos de transporte y las fuerzas que intervienen en el comportamiento del flujo de fluidos (Potter & Gracias, 2025).

2.7.1.1 Aproximación mediante diferencias finitas

La formulación matemática de fenómenos físicos complejos suele requerir el planteamiento de ecuaciones diferenciales parciales (EDP) que describen el comportamiento del sistema en un dominio específico. Dado que las soluciones analíticas son raramente alcanzables, se emplean métodos numéricos que transforman las EDP en sistemas algebraicos resolubles computacionalmente, permitiendo aproximar fenómenos como la dinámica de fluidos y la transferencia de calor en geometrías complejas (Gracias & Potter, 2025).

Uno de los métodos más utilizados es el de diferencias finitas, que aproxima las derivadas parciales mediante expresiones algebraicas evaluadas en puntos discretos del dominio. Este enfoque es adecuado para resolver EDP en una, dos o tres dimensiones, y destaca por su simplicidad conceptual y eficacia computacional, aunque su aplicación en geometrías complejas puede presentar desafíos de precisión y estabilidad (Kossaczka, 2023).

2.7.1.2 Aproximación mediante volúmenes finitos

El método de los volúmenes finitos (MVF) es una técnica numérica ampliamente utilizada en dinámica de fluidos computacional (CFD) para resolver ecuaciones diferenciales parciales que representan leyes de conservación. Este método discretiza el dominio de cálculo en pequeños volúmenes de control, integrando las ecuaciones de conservación en cada

volumen. Su principal ventaja es la conservación exacta de las magnitudes físicas en cada volumen y en todo el dominio, independientemente del tamaño de la malla (Saeed, 2025).

Este enfoque es especialmente adecuado para simular flujos en geometrías complejas y no estructuradas, ya que permite la utilización de mallas irregulares. Además, el MVF es la base de muchos paquetes de software de CFD, como ANSYS Fluent, debido a su capacidad para manejar discontinuidades y gradientes pronunciados en los campos de flujo (Van Hoecke, 2023).

2.7.2 *Discretización espacial*

La discretización espacial es un proceso fundamental en la dinámica de fluidos computacional (CFD), ya que transforma el dominio continuo del problema en una representación discreta sobre la cual se pueden resolver las ecuaciones de conservación. Esta discretización se logra mediante la creación de una malla que divide el espacio en pequeños volúmenes de control, permitiendo la aproximación numérica de las variables del flujo en cada celda.

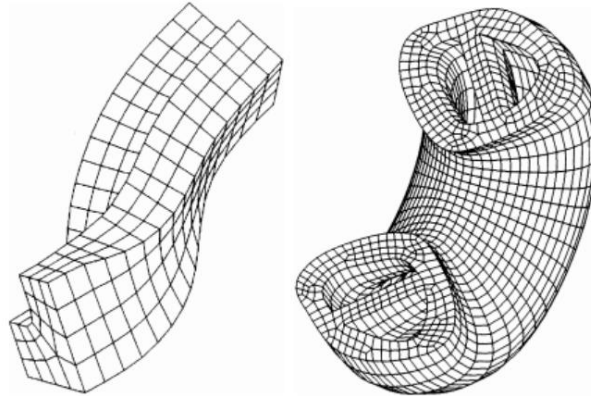
2.7.2.1 *Mallados Estructurados*

Se caracterizan por su disposición regular y ordenada de los nodos, lo que facilita la indexación y el acceso a las celdas. Este tipo de mallado es especialmente adecuado para geometrías simples y problemas donde se

requiere alta precisión computacional. En los sistemas cartesianos, las líneas de las celdas son paralelas a los ejes coordenados, mientras que en sistemas curvilíneos se deforman para adaptarse a la geometría del objeto de estudio (ANSYS, 2025).

Figura 10

Mallados estructurados



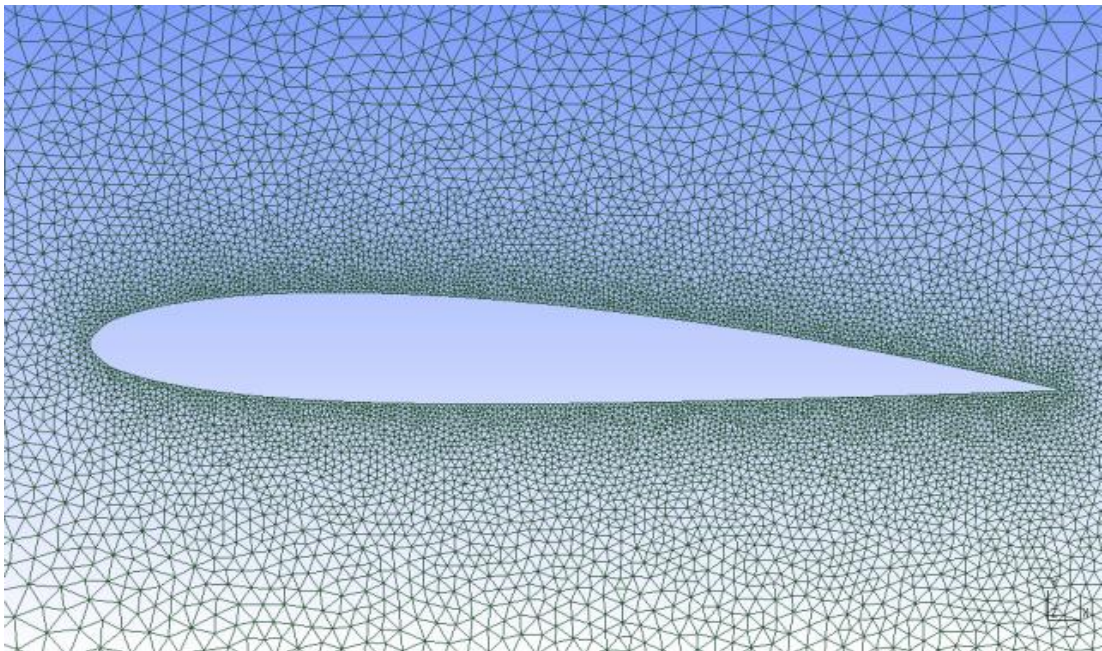
Nota. La figura muestra mallas estructuradas para simulaciones. Fuente: Ruiz & López (2012).

2.7.2.2 Mallado No Estructurado

Presenta gran flexibilidad para adaptarse a geometrías complejas e irregulares, ya que pueden generarse automáticamente con elementos triangulares en 2D o tetraédricos en 3D, independientemente de la complejidad del dominio. La calidad de la solución depende del refinamiento de la malla, y este tipo de mallado requiere menos tiempo de generación que las mallas estructuradas, manteniendo estabilidad y precisión en la simulación (ANSYS, 2021).

Figura 11

Mallado no estructurado de perfiles



Nota. La figura muestra el conjunto de mallado no estructurado de perfiles con GMSH. Fuente: Samuel (2013).

2.7.3 Parámetros de control de calidad del mallado Ansys Fluent

2.7.3.1 Element Quality

La opción Element Quality proporciona una métrica de calidad compuesta que varía entre 0 y 1. Esta métrica se basa en la relación entre el volumen y la suma del cuadrado de las longitudes de las aristas en elementos 2D (cuadriláteros/triángulos), o en la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las longitudes de las aristas en elementos 3D. Un valor de 1

indica un cubo o cuadrado perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el elemento tiene un volumen nulo o negativo.

2.7.3.2 Skewness

La distorsión (skewness) es una de las principales medidas de calidad para una malla. Este parámetro determina qué tan cercana a la forma ideal (equilátera o equiangular) es una cara o celda.

Tabla 1

Rango de valores de skewness y la calidad de celda correspondiente:

Valor de Skewness	Calidad de la celda
1	Degenerada
0.9 — < 1	Mala (delgada/sliver)
0.75 — 0.9	Deficiente
0.5 — 0.75	Aceptable
0.25 — 0.5	Buena
>0 — 0.25	Excelente
0	Equilátera

Nota. La tabla muestra valores de skewness y la calidad de celda. Fuente: ANSYS (2025).

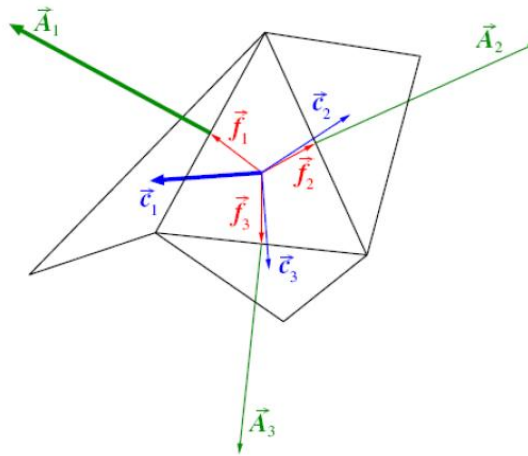
2.7.3.3 Orthogonal Quality

El rango de la calidad ortogonal va de 0 a 1, donde un valor de 0 representa la peor calidad y un valor de 1 la mejor. La calidad ortogonal de las celdas se calcula utilizando el vector normal de

la cara. Para cada cara, se considera el vector que va desde el centroide de la celda hasta el centroide de cada celda adyacente, así como el vector que conecta el centroide de la celda con cada una de sus caras.

Figura 12

Vectores utilizados para calcular la calidad ortogonal de una celda.



Nota. La figura muestra los vectores empleados para determinar la calidad ortogonal de una celda. Fuente: ANSYS (2025).

2.7.4 Discretización temporal

2.7.4.1 Método Explícito

El método explícito se fundamenta en la evaluación directa del vector de variables conservadas \vec{Q} en el paso de tiempo actual, matemáticamente se expresa como:

$$\vec{Q}^{n+1} = \vec{Q}^n + \Delta\vec{Q}^n$$

La formulación temporal explícita en ANSYS Fluent solo está disponible al emplear el solucionador basado en densidad en modo

explícito, en el que $F(\phi)$ se evalúa a partir de los valores conocidos de la variable dependiente ϕ :

$$\frac{Q^{n+1} - Q^n}{\Delta t} = F(\phi^n)$$

Donde:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi)$$

ϕ = Cantidad escalar

$n + 1$ = Valor en el siguiente nivel, $t + \Delta t$

n = Valor en el nivel en tiempo actual, t

Se denomina explícito porque el valor futuro \vec{Q}^{n+1} puede calcularse directamente a partir de valores existentes:

$$Q^{n+1} = Q^n + \Delta t F(\phi^n)$$

La precisión temporal en el método explícito requiere que todas las celdas del dominio utilicen un mismo paso de tiempo. Para asegurar la estabilidad del cálculo, este paso de tiempo global se define como el menor de los valores locales permitidos en cada celda. Este procedimiento es adecuado para simular fenómenos transitorios asociados a la propagación de ondas, como los choques, ya que en tales situaciones el método explícito proporciona mayor exactitud numérica y un menor costo computacional en comparación con el método implícito (ANSYS, 2025).

2.7.4.2 Método Implícito

El método implícito evalúa el residuo en función de los valores futuros de las variables, lo que implica la resolución de un sistema algebraico acoplado en cada paso de tiempo. Su formulación general se expresa como:

$$\frac{\vec{Q}^{n+1} - \vec{Q}^n}{\Delta t} = F(\phi^{n+1})$$

y puede reescribirse como:

$$\vec{Q}^{n+1} = \vec{Q}^n + \Delta t F(\phi^{n+1})$$

Este planteamiento muestra que, a diferencia de la formulación explícita, el cálculo de las variables futuras requiere resolver relaciones que dependen de sí mismas, lo cual incrementa la complejidad numérica (ANSYS, 2025).

La principal ventaja del método implícito es que posee estabilidad incondicional, lo que permite utilizar pasos de tiempo mucho mayores que en el esquema explícito. Este método es más apropiado en problemas donde se busca alcanzar una solución estacionaria de manera eficiente, en la simulación de fenómenos transitorios de larga duración o en regímenes de flujo en los que la estabilidad numérica es prioritaria frente a la captura detallada de ondas transitorias. En tales contextos, el método implícito proporciona mayor robustez y eficiencia global, a pesar de que cada paso de tiempo exija un mayor esfuerzo computacional (ANSYS, 2025).

2.7.5 *Métodos iterativos*

Los métodos iterativos buscan resolver un sistema de ecuaciones mediante aproximaciones sucesivas, partiendo de una estimación inicial de la solución. A partir de esta primera suposición, se ejecutan iteraciones sucesivas hasta que el sistema alcanza la convergencia mediante la reducción progresiva del error. Este enfoque permite aproximar la solución real con un nivel de precisión controlado y depende de la definición de un criterio de convergencia adecuado (Saad, 2020).

Entre los métodos iterativos más sencillos se encuentra el método de Jacobi, aplicado en la resolución de sistemas lineales mediante actualizaciones sucesivas de las incógnitas. Sin embargo, en la práctica, el método de Gauss–Seidel es el más empleado por su mejor comportamiento en términos de convergencia. En este último, cada nuevo valor puede utilizar la información más reciente disponible, acelerando la reducción del error (Trottenberg, Oosterlee, & Schüller, 2020).

$$T_p = \frac{\sum a_i T_i^* + b}{a_p}$$

Dónde:

T_i^* representa el valor de T_i en la iteración anterior o bien el actualizado si este ya está disponible.

La convergencia del procedimiento iterativo puede garantizarse mediante criterios como el de Scarborough, que establece condiciones suficientes para asegurar que el proceso converja hacia la solución real (Trottenberg, Oosterlee, & Schüller, 2020).

$$\frac{\sum |a_i|}{|a_p|} \begin{cases} \leq 1 \text{ para todas las ecuaciones} \\ < 1 \text{ para al menos una ecuación} \end{cases}$$

2.8 Tratamiento de la turbulencia

Los flujos turbulentos se caracterizan por un movimiento tridimensional irregular, generado por remolinos de distintas escalas que inducen fluctuaciones de velocidad y presión. Estos remolinos favorecen el intercambio de energía, masa y cantidad de movimiento (Pope, 2019).

El avance de la simulación numérica ha permitido desarrollar métodos como la Simulación Directa de Navier–Stokes (DNS), que resuelve todas las escalas turbulentas sin necesidad de modelos adicionales. Sin embargo, su aplicación resulta impracticable en la mayoría de los problemas de ingeniería debido al elevado costo computacional que crece con el número de Reynolds (Moser et al., 2021).

Como alternativa se emplean modelos promediados en el tiempo como RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes), que simplifican el cálculo a partir de valores estadísticos. Un método intermedio entre DNS y RANS se ubica la Simulación de Grandes Escalas (LES), que permite calcular directamente los remolinos de mayor tamaño y mientras que los de

menor escala se representan mediante modelos de turbulencia, bajo la premisa de que los primeros dependen fuertemente de la geometría del flujo, mientras que los segundos son más carácter universal e isotrópico (Garnier et al., 2019).

Pese a sus ventajas, la LES demanda mallas finas y grandes recursos de cómputo, lo que la hace más costosa que los modelos RANS. Esta limitación se intensifica en las proximidades de las paredes, donde los remolinos grandes se reducen a escalas pequeñas dependientes del número de Reynolds, restringiendo su aplicación a dominios reducidos o números bajos de Reynolds (Vreman, 2020).

2.8.1 Método DNS

La Simulación Numérica Directa (DNS) resuelve las ecuaciones de Navier–Stokes sin recurrir a modelos de turbulencia, lo que exige capturar todas las escalas de movimiento, desde las estructuras de gran tamaño hasta las microscópicas responsables de la disipación de energía. Para ello, se requieren mallas muy finas y pasos de tiempo reducidos que permitan describir tanto el flujo medio como sus fluctuaciones rápidas. Aunque este método proporciona una representación muy precisa del campo de velocidades y presiones, su elevado costo computacional restringe su aplicación a configuraciones simples y números de Reynolds bajos (Moser et al., 2021).

En softwares como ANSYS Fluent, la DNS posibilita calcular directamente la evolución de estructuras turbulentas resolviendo las ecuaciones completas de dinámica de fluidos. Sin embargo, la complejidad numérica, la necesidad de gran capacidad de memoria y el uso de mallas extremadamente refinadas limitan su uso en problemas industriales. Por esta razón, en la práctica se suele recurrir a aproximaciones como RANS o LES, que permiten reducir los recursos computacionales mediante técnicas de promediado o filtrado de escalas (Garnier et al., 2019).

2.8.2 Método RANS

2.8.2.1 Modelos de turbulencia de RANS en Ansys Fluent

a) El modelo $k-\epsilon$ estándar

Es una de las herramientas más empleadas en la ingeniería desde que fue propuesto por Launder y Spalding, debido a su robustez, bajo costo computacional y nivel de precisión aceptable en la simulación de diversos regímenes de flujo turbulento. Este modelo, de carácter semiempírico, se fundamenta en ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y para la tasa de disipación de energía (ϵ), formuladas a partir de una combinación de fundamentos teóricos y consideraciones fenomenológicas. Su aplicación se restringe a flujos totalmente turbulentos, ya que supone la despreciabilidad de la viscosidad molecular (Ansys, 2025).

b) El modelo $k-\epsilon$ RNG

Se desarrolló a partir de la aplicación de la técnica estadística de la teoría del grupo de renormalización a las ecuaciones instantáneas de Navier–Stokes. Si bien mantiene la estructura general del modelo $k-\epsilon$ estándar, introduce diversas mejoras que amplían su rango de aplicabilidad. Entre ellas destacan la incorporación de un término adicional en la ecuación de disipación (ϵ), que aumenta la precisión en el análisis de flujos sometidos a altas tasas de deformación, la consideración explícita del efecto de vórtices o swirl en la turbulencia, lo que mejora la predicción en flujos con fuerte rotación, y la inclusión de una expresión diferencial derivada analíticamente para la viscosidad efectiva, la cual permite representar de manera más realista los efectos de bajo número de Reynolds, siempre que se aplique un tratamiento adecuado en las zonas próximas a las paredes. Asimismo, el modelo redefine ciertas constantes y funciones en las ecuaciones de transporte de k y ϵ , lo que le otorga mayor robustez en comparación con el modelo estándar. Estas características convierten al modelo $k-\epsilon$ RNG en una herramienta más precisa y confiable para la simulación de una amplia variedad de flujos turbulentos en dinámica de fluidos computacional (Ansys, 2025).

c) El modelo $k-\varepsilon$ realizable

Constituye una mejora respecto al modelo estándar, ya que incorpora una formulación alternativa de la viscosidad turbulenta y una ecuación de transporte modificada para la tasa de disipación (ε), lo que le permite satisfacer restricciones matemáticas sobre las tensiones de Reynolds y representar de manera más realista la física de los flujos turbulentos. Este modelo ha demostrado un mejor desempeño en flujos con rotación, gradientes de presión adversos, separación y recirculación, superando al $k-\varepsilon$ estándar y mostrando resultados comparables e incluso superiores al RNG en configuraciones con fuerte curvatura de líneas de corriente, vórtices o estructuras secundarias complejas. A diferencia de los modelos tradicionales, corrige limitaciones como el denominado análisis de chorro redondo, evidenciando su mayor precisión y aplicabilidad en la simulación de flujos turbulentos (Ansys, 2025).

d) El modelo $k-\omega$ estándar

Es un modelo de dos ecuaciones propuesto por Wilcox, que emplea como variables de cierre la energía cinética turbulenta (k) y la tasa específica de disipación (ω), siendo esta última interpretable como la razón entre ε y k . Se caracteriza por su capacidad para representar de manera robusta la subcapa viscosa y proporcionar predicciones confiables en flujos con fuertes gradientes de presión adversos. No obstante, presenta una limitación

importante relacionada con su alta sensibilidad a las condiciones de frontera en el flujo libre, especialmente en los valores especificados de k y ω fuera de la capa de corte, lo que puede afectar significativamente (Ansys, 2025).

e) El modelo SST $k-\omega$

Combina las ventajas de los modelos $k-\varepsilon$ y $k-\omega$, permitiendo describir la capa límite hasta la pared sin necesidad de funciones de amortiguamiento adicionales, y adoptando un comportamiento tipo $k-\varepsilon$ en el flujo libre, lo que reduce la sensibilidad a las condiciones de entrada de turbulencia. Esta formulación híbrida lo convierte en uno de los más confiables para predecir flujos con gradientes de presión adversos, separación y recirculación. No obstante, una de sus limitaciones es la tendencia a sobreestimar los niveles de turbulencia en regiones donde predominan grandes tensiones normales (Ansys, 2025).

2.8.3 Método de LES

La Simulación de Grandes Escalas (LES) surge como una alternativa entre DNS y RANS. Este método resuelve directamente los remolinos de gran tamaño, mientras que los pequeños son modelados mediante técnicas de submalla. Su aplicación requiere resolver ecuaciones no estacionarias, lo que incrementa de forma considerable el costo computacional en memoria y tiempo de cálculo, aunque hoy en día la computación de alto rendimiento

ha permitido abordar problemas CFD con geometrías complejas de manera exitosa (Moin, 2019).

A pesar de estas exigencias, la LES es recomendable en flujos donde los remolinos de gran escala tienen un rol dominante, como en la separación de vórtices, flujos en conductos difusores o en trayectorias con cambios de dirección. Su aplicación en CFD comercial es reciente, y aunque aún presenta validaciones limitadas, constituye una herramienta importante para mejorar la predicción de flujos complejos (Zhou, 2021).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Metodología y técnicas utilizadas

3.1.1 Tipo y nivel de investigación

La investigación es de tipo aplicada, ya que busca poner en práctica conocimientos teóricos sobre hidráulica y dinámica de fluidos mediante la realización de ensayos en el laboratorio de Hidráulica e Hidrología de la Escuela de Ingeniería Civil. Este enfoque permite analizar el comportamiento del flujo sobre vertederos a través de la simulación física y la modelación numérica CFD.

Asimismo, se trata de una investigación explicativa-comparativa, ya que pretende explicar las diferencias en el comportamiento hidráulico de los vertederos al ser evaluados con distintas metodologías, y compararlos entre sí para identificar ventajas, limitaciones y márgenes de error entre el modelo físico y el numérico.

3.1.2 Diseño de investigación

El diseño de esta investigación combina un enfoque experimental y computacional para analizar el comportamiento hidráulico de vertederos. Se adopta un enfoque cuantitativo, al recopilar y analizar datos numéricos como caudal, tirante y velocidad; y cualitativo, al observar visualmente las características del flujo. Esta combinación permite una comprensión integral del fenómeno, al vincular mediciones precisas con observaciones

descriptivas, y facilita la comparación entre los resultados obtenidos mediante simulación física en laboratorio y modelación numérica con CFD.

3.2 Metodología del trabajo

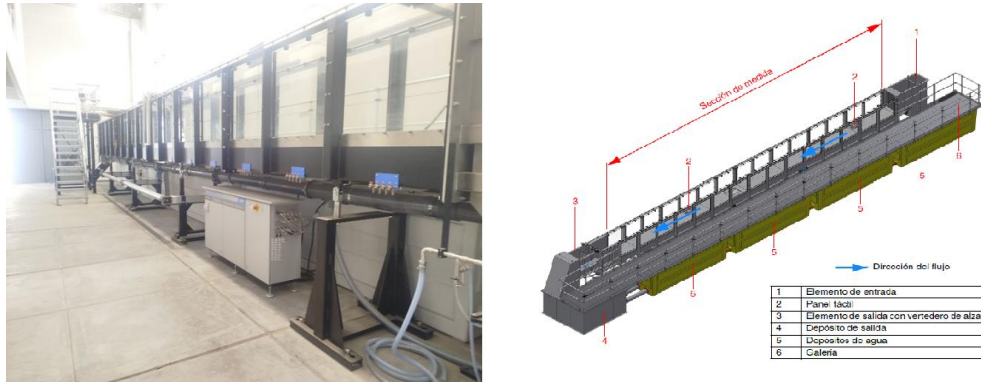
En el presente trabajo se llevó a cabo en 3 etapas, entre ellas se detallarán a continuación:

3.2.1 *Etapa 01 - El estudio experimental en el laboratorio*

Se realizará en el canal GUNTS HM 161.TA 600x800mm, ubicado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. El procedimiento consistirá en simular el funcionamiento de un vertedero de configuración triangular, trapezoidal, rectangular. Para ello, se han seleccionado tres caudales diferentes, así mismo, la capacidad máxima de gasto es 0.111 (m³/s), los cuales se harán manteniendo una pendiente constante 0% en el canal durante todas las pruebas.

Figura 13

Características geométricas del canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm.



Nota. La figura muestra las características del canal de ensayo HM 161 TA. Fuente: GUNT (2024).

Tabla 2

Dimensiones del canal ensayo HM 161.TA 600x800mm.

Característica geométrica	Simbología	Dimensión (mm)
Base	B	600
Altura	H	800
Longitud	L	15000

Figura 14

Características geométricas de los vertederos: trapezoidal, triangular, rectangular.

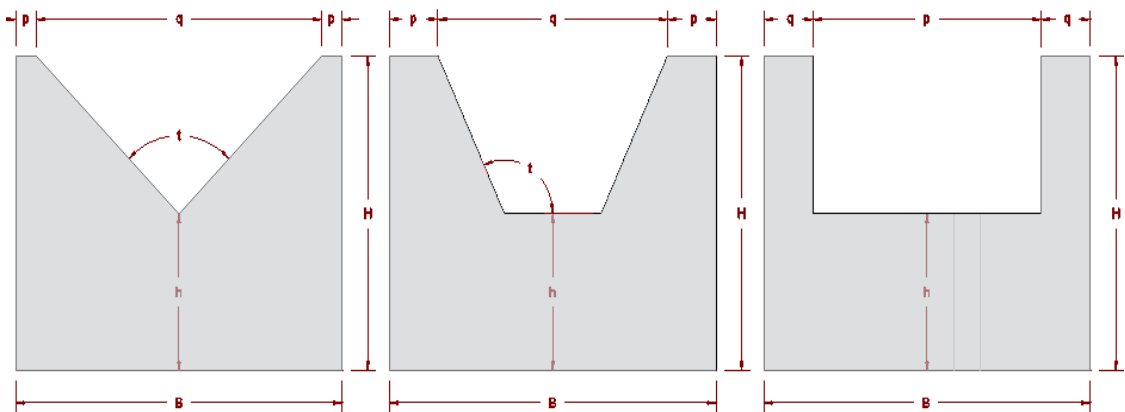


Tabla 3

Dimensión de los vertederos en mm.

Característica geométrica	Dimensiones de los vertederos (mm, °)		
	Triangular	Trapezoidal	Rectangular
B	573.00	573.00	573.00
H	600.00	600.00	600.00
h	250.00	250.00	250.00
p	36.50	84.90	400.00
q	500.00	403.20	86.50
t	90.00	115.00	

Figura 15

Juego de vertederos de cresta delgada HM 161.30.

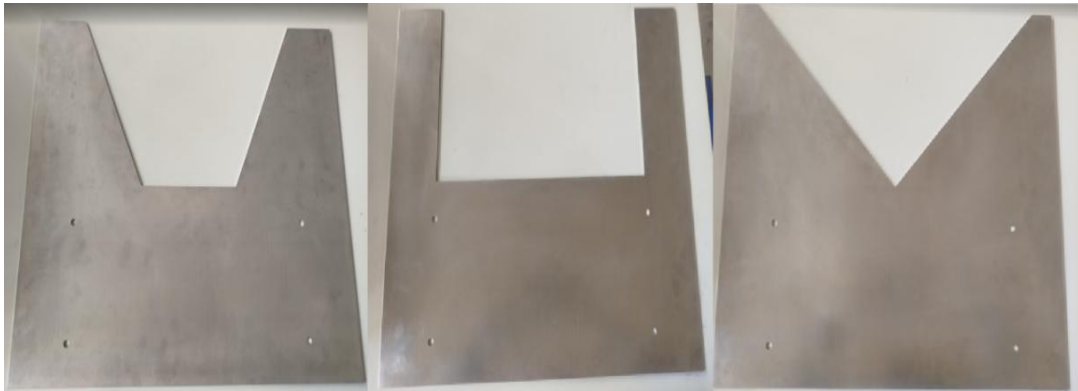


Tabla 4

Caudal suministrado a máxima capacidad del vertedero.

N°	Caudal suministrado a su máxima capacidad (m ³ /s)		
	Triangular	Trapezoidal	Rectangular
01	0.045	0.06	0.095
02	0.035	0.04	0.065

3.2.2 Etapa 02 – Configuración del canal y vertedero en Ansys

La fase inicial para la simulación computacional en Ansys consiste en crear un modelo digital de la geometría del canal y el vertedero, cuyas dimensiones se registraron durante una visita al laboratorio. Este modelo geométrico se desarrollará en el interior del software para generar un diseño tridimensional. Posteriormente, este diseño procesará al Mesh, la cual se empleará para generar la malla computacional. Este proceso de mallado define las restricciones y los parámetros dimensionales críticos que son

esenciales para garantizar la precisión de los datos resultantes del modelo numérico.

La siguiente fase implica ejecutar la simulación numérica del modelo. La simulación se configurará replicando las condiciones físicas observadas en el laboratorio, incluyendo parámetros como el caudal, la aceleración gravitacional, el coeficiente de rugosidad de Manning y la uniformidad de la rugosidad superficial. El objetivo de este análisis es identificar un tamaño de malla óptimo que produzca resultados numéricamente precisos y convergentes, a la vez que minimice el tiempo requerido de procesamiento computacional.

3.2.3 *Etapa 03 – Análisis y comparación de resultados*

Con el propósito de obtener una muestra de datos representativa, se emplearon tres caudales diferentes. Esta variación permite generar un conjunto de resultados diversos para aplicar las fórmulas seleccionadas en esta investigación, las cuales son coeficiente de eficiencia. El proceso culminará con la contraposición de los datos obtenidos del modelo físico (laboratorio) y aquellos resultantes del modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Esta comparación permitirá evaluar el grado de similitud entre el modelo computacional y la realidad experimental, además de identificar las variables que ejercen una mayor influencia en los resultados obtenidos.

3.3 Metodología experimental en el laboratorio

Se ha establecido un protocolo de medición sistemático y replicable, diseñado para garantizar la obtención de datos confiables y minimizar posibles sesgos operativos. El procedimiento se estructura de la siguiente manera:

1. Protocolo de verificación preventivas de las condiciones del canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm.

Antes de iniciar cualquier procedimiento, es importante realizar una inspección visual y funcional del canal HM 161.TA 600x800mm para garantizar la integridad de los resultados.

Figura 16

Verificación preventiva de las condiciones del canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm.



2. Instalación del vertedero de cresta delgada HM 161.30

Se coloca el vertedero seleccionado en la ranura ubicada en el extremo final del canal, asegurando su fijación para evitar movimientos durante la experimentación.

Figura 17

Instalación del vertedero en el canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm.



3. Llenado del canal y estabilización del flujo

Se pone en marcha el sistema de bombeo y se regula la válvula de control de caudal hasta que el canal se encuentre parcialmente lleno hasta que el flujo supere la cresta del vertedero, cuya regulación del caudal se realiza de forma manual respectiva para cada vertedero.

Figura 18

Funcionamiento a través del canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm.

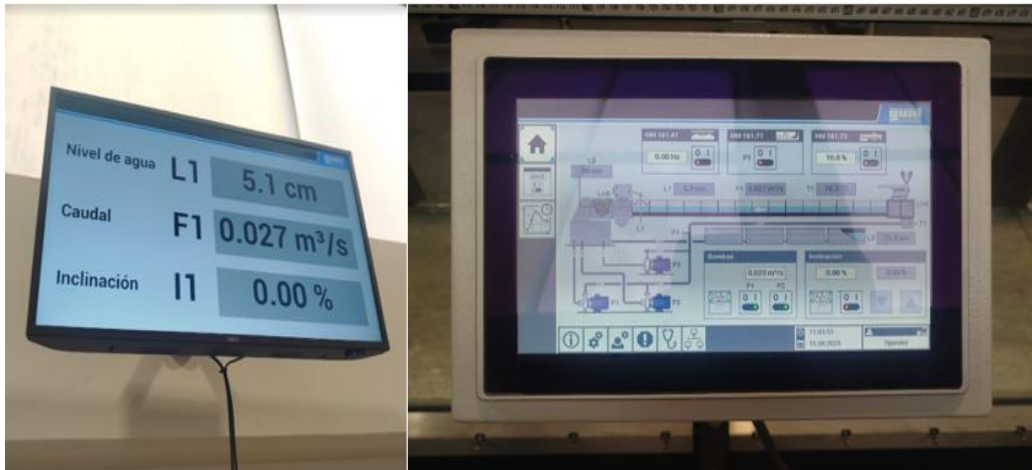


4. Estabilización y registro de datos.

Una vez alcanzada una altura de carga deseada para cada vertedero, se espera un tiempo suficiente (minutos) para que el flujo se estabilice en el canal y las mediciones sean consistentes.

Figura 19

Panel táctiles - Eaton Touchpanel.



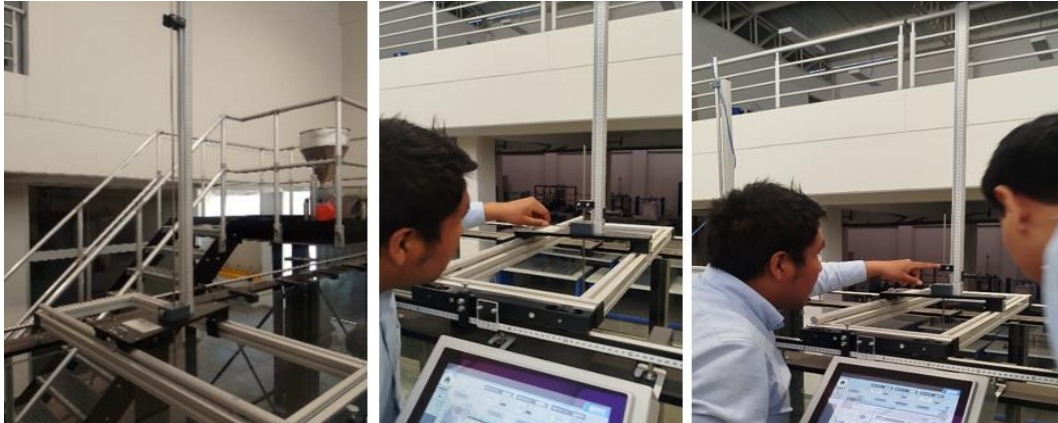
Nota. La imagen muestra la configuración de los datos de entrada (caudal, pendiente, velocidad).

5. Medición de tirantes y velocidades.

Se registra el valor del tirante usando el Indicador del nivel de agua HM 160.5, así mismo, se mide la velocidad del vertedero con el velocímetro HM 161.64, en la presente investigación se toma el registro de velocidades y tirantes a cada 100 cm desde el centro del canal, con el objetivo de validar comparativamente los resultados con un modelo matemático posterior.

Figura 20

Indicador del nivel de agua HM 160.5.



Nota. Se utiliza el dispositivo para la medición de profundidades de descarga en el canal de ensayo HM 160.

Figura 21

Velocímetro HM 160.64.



Nota. La figura muestra los componentes del velocímetro HM 160.64, cuyo elemento central es una rueda de paletas que gira impulsada por el flujo. El número de revoluciones de la rueda es proporcional a la velocidad del agua.

6. Variación de condiciones y repetición.

Se reajusta el caudal para modificar el flujo y se repite el proceso para cada vertedero, es decir, para cada vertedero se tomará tres caudales obtener el mayor número de puntos de operación posibles.

Tabla 5

Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) – vertedero trapezoidal.

d (m)	Tirante (mm)			Velocidad (m/s)			T(°C)	
	Mín.	Máx.	Prom	Mín.	Máx.	Prom		H (mm)
6.64	32.00	37.00	34.50	1.50	1.70	1.60	10.00	14.70
7.64	51.00	56.00	53.50	2.05	2.15	2.10	34.00	14.60
8.64	50.00	54.00	52.00	1.35	1.45	1.40	17.00	14.60
9.64	56.00	58.00	57.00	1.89	1.95	1.92	24.00	14.80
10.64	69.00	76.00	72.50	1.70	1.78	1.74	34.00	14.70
11.64	69.00	71.00	70.00	1.63	1.73	1.68	34.00	14.90
12.64	66.00	70.00	68.00	1.60	1.68	1.64	34.00	14.90
13.34	71.00	73.00	72.00	1.55	1.65	1.60	34.00	15.70

Nota. Los parámetros de entrada para el cálculo fueron: Caudal (Q) = 0.060 m³/s,

Velocidad de entrada (V inlet) = 0.20 m/s, Pendiente (S) = 0.000 %, Altura (Y) = 0.500 m, y Ancho de base (*b*) = 0.600 m.

Tabla 6

Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) – vertedero trapezoidal.

d (m)	Tirante (mm)			Velocidad (m/s)			T(°C)	
	Mín.	Máx.	Prom	Mín.	Máx.	Prom		H(mm)
6.64	22.00	24.00	23.00	1.86	1.98	1.92	20.00	14.70
7.64	37.00	40.00	38.50	1.76	1.80	1.78	20.00	14.60
8.64	32.00	36.00	34.00	1.42	1.62	1.52	19.00	14.60
9.64	39.00	41.00	40.00	1.67	1.69	1.68	23.00	14.80
10.64	47.00	50.00	48.50	1.32	1.40	1.36	20.00	14.70
11.64	54.00	56.00	55.00	1.36	1.39	1.38	21.00	14.80
12.64	58.00	62.00	60.00	1.30	1.35	1.33	34.00	14.80
13.34	47.00	49.00	48.00	1.33	1.35	1.34	25.00	14.70

Nota. Los parámetros de entrada para el cálculo fueron: Caudal (Q) = 0.040 m³/s, Velocidad de entrada (V inlet) = 0.15 m/s, Pendiente (S) = 0.000 %, Altura (Y) = 0.445 m, y Ancho de base (*b*) = 0.600 m.

Tabla 7

Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) – vertedero triangular.

d (m)	Tirante (mm)			Velocidad (m/s)			T(°C)	
	Mín.	Máx.	prom	Mín.	Máx.	prom		H(mm)
6.64	32.00	36.00	34.00	1.92	2.00	1.96	12.00	14.60
7.64	49.00	52.00	50.50	1.68	1.76	1.72	14.00	14.60
8.64	51.00	57.00	50.00	1.53	1.59	1.56	22.00	14.60
9.64	53.00	55.00	54.00	1.53	1.57	1.55	22.00	14.70
10.64	57.00	60.00	58.50	1.53	1.57	1.55	24.00	14.80
11.64	61.00	63.00	62.00	1.35	1.45	1.40	34.00	14.90
12.64	62.00	65.00	63.50	1.32	1.42	1.37	34.00	14.80
13.34	65.00	67.00	66.00	1.24	1.30	1.27	34.00	14.80

Nota. Los parámetros de entrada para el cálculo fueron: Caudal (Q) = 0.045 m³/s, Velocidad de entrada (V inlet) = 0.15 m/s, Pendiente (S) = 0.000 %, Altura (Y) = 0.500 m, y Ancho de base (*b*) = 0.600 m.

Tabla 8

Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) - vertedero triangular.

d (m)	Tirante (mm)			Velocidad (m/s)			T(°C)	
	Mín.	Máx.	prom	Mín.	Máx.	prom		H(mm)
6.64	18.00	22.00	20.00	2.05	2.15	2.10	12.00	14.70
7.64	41.00	43.00	42.00	1.61	1.67	1.64	13.00	14.70
8.64	46.00	48.00	47.00	1.38	1.46	1.42	18.00	14.70
9.64	38.00	41.00	40.00	1.44	1.48	1.46	16.00	14.80
10.64	42.00	45.00	43.50	1.33	1.39	1.36	18.00	14.80
11.64	48.00	51.00	49.50	1.30	1.34	1.32	20.00	15.00
12.64	52.00	54.00	53.00	1.13	1.17	1.15	20.00	14.80
13.34	47.00	49.00	48.00	1.17	1.23	1.20	34.00	15.20

Nota. Los parámetros de entrada para el cálculo fueron: Caudal (Q) = 0.035 m³/s, Velocidad de entrada (V inlet) = 0.122 m/s, Pendiente (S) = 0.000 %, Altura (Y) = 0.480 m, y Ancho de base (*b*) = 0.600 m.

Tabla 9

Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) - vertedero rectangular.

d (m)	Tirante (mm)			Velocidad (m/s)			T(°C)	
	Mín.	Máx.	prom	Mín.	Máx.	prom		H(mm)
6.64	62.00	64.00	63.00	2.25	2.35	2.30	34.00	14.80
7.64	68.00	72.00	70.00	2.08	2.14	2.11	32.00	14.70
8.64	77.00	80.50	78.75	2.09	2.15	2.12	34.00	14.70
9.64	72.00	74.00	73.00	2.07	2.13	2.10	34.00	14.70
10.64	84.00	88.00	86.00	1.88	1.92	1.90	35.00	14.50
11.64	76.00	80.00	78.00	1.90	1.92	1.91	35.00	14.60
12.64	84.00	86.00	85.00	1.88	1.94	1.91	40.00	14.60
13.34	93.00	95.00	94.00	1.78	1.86	1.82	50.00	14.50

Nota. Los parámetros de entrada para el cálculo fueron: Caudal (Q) = 0.095 m³/s, Velocidad de entrada (V inlet) = 0.32 m/s, Pendiente (S) = 0.000 %, Altura (Y) = 0.500 m, y Ancho de base (*b*) = 0.600 m.

Tabla 10

Medición y registro de las variables (tirante y velocidad) - vertedero rectangular.

d (m)	Tirante (mm)			Velocidad (m/s)			T(°C)	
	Mín.	Máx.	prom	Mín.	Máx.	prom		H(mm)
6.64	30.00	32.00	31.00	2.07	2.13	2.10	18.00	14.50
7.64	56.00	60.00	58.00	2.18	2.22	2.20	32.00	14.70
8.64	56.00	60.00	58.00	2.08	2.12	2.10	22.00	14.80
9.64	50.00	54.00	52.00	2.07	2.11	2.08	24.00	14.80
10.64	72.00	76.00	74.00	1.88	1.92	1.90	34.00	14.80
11.64	64.00	70.00	67.00	1.87	1.95	1.91	34.00	14.80
12.64	68.00	70.00	69.00	1.80	1.85	1.83	34.00	14.80
13.34	80.00	83.00	81.50	1.66	1.72	1.69	34.00	14.80

Nota. Los parámetros de entrada para el cálculo fueron: Caudal (Q) = 0.065 m³/s, Velocidad de entrada (V_{inlet}) = 0.25 m/s, Pendiente (S) = 0.000 %, Altura (Y) = 0.438 m, y Ancho de base ($*b*$) = 0.600 m.

Figura 22

Flujo a través del vertedero trapecoidal de cresta delgada HM 161.30.



Figura 23

Flujo a través del vertedero triangular de cresta delgada HM 161.30.

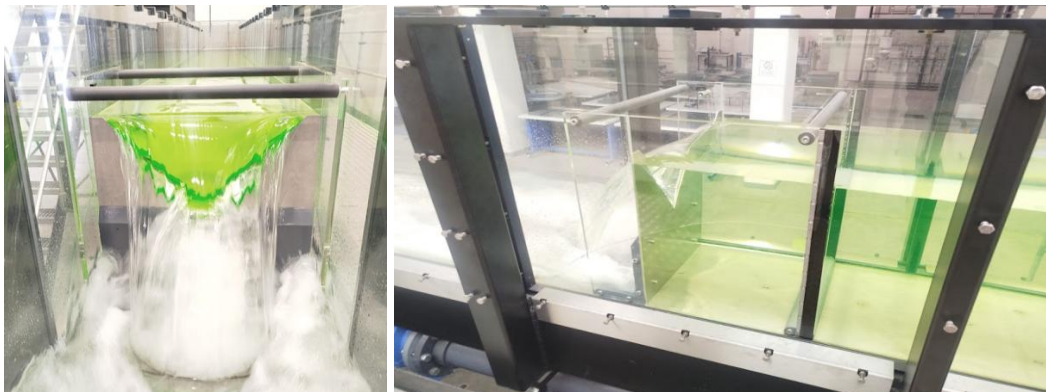
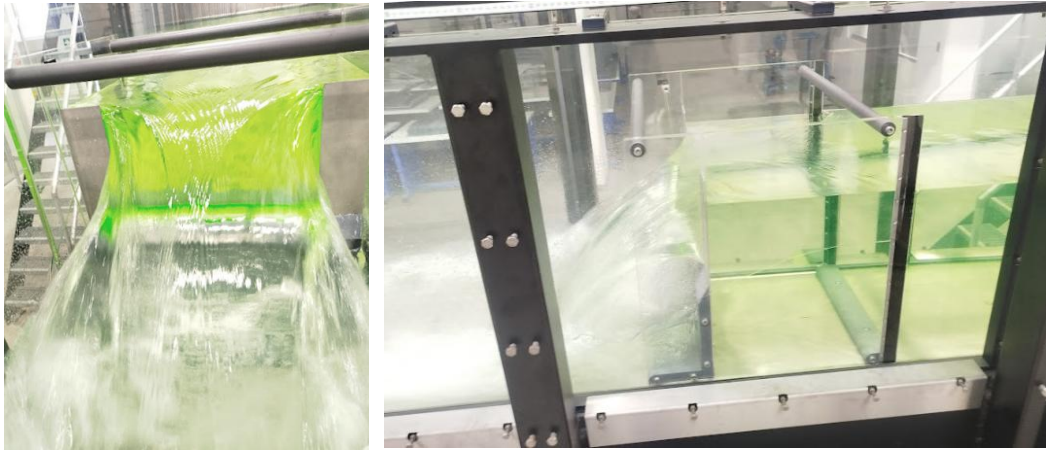


Figura 24

Flujo a través del vertedero rectangular de cresta delgada HM 161.30.



3.4 Descripción desarrollo del modelo computacional CFD

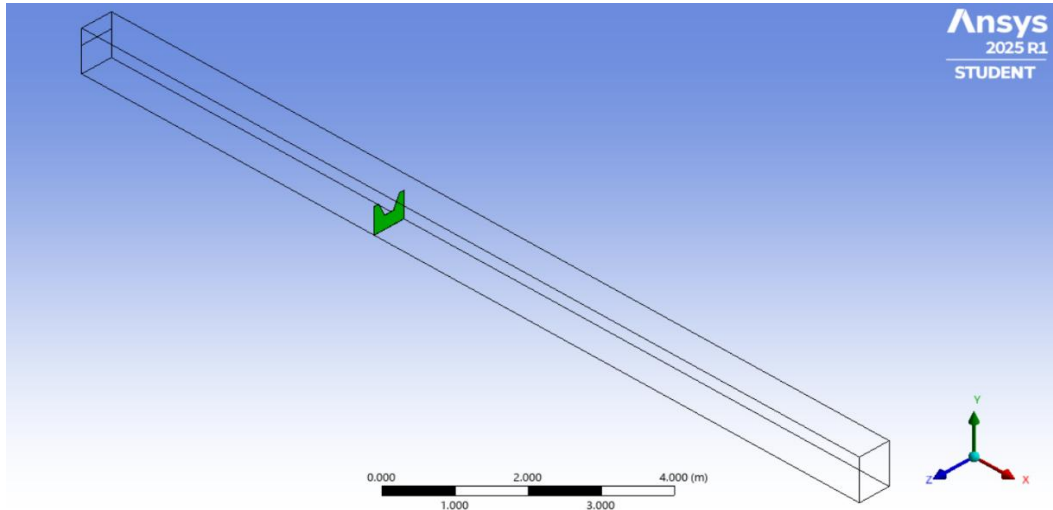
El procedimiento numérico se desarrolla mediante simulaciones CFD, siguiendo las siguientes etapas:

1. Definición de la geometría.

Se modelan los vertederos con secciones triangular, trapezoidal y rectangular. Que inicialmente se realizó en geometry. La configuración geométrica del modelo numérico se desarrolló considerando las especificaciones del canal de ensayo HM 161.TA 600x800mm y los vertederos de cresta delgada HM 161.30, incorporando sus características dimensionales y estructurales.

Figura 25

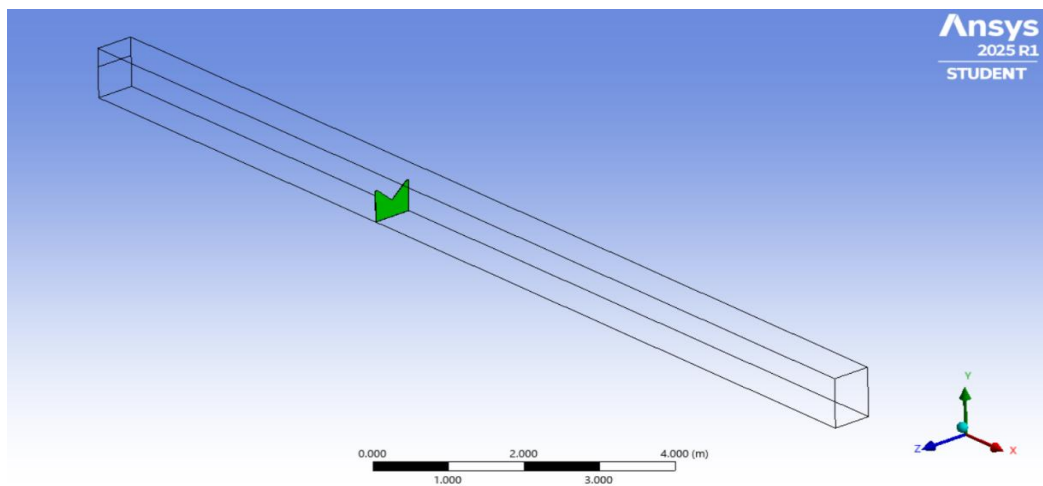
Configuración geométrica del vertedero trapezoidal en el Ansys 2025 R1.



Nota. Vista isométrica del dominio computacional del canal con el vertedero trapezoidal integrado.

Figura 26

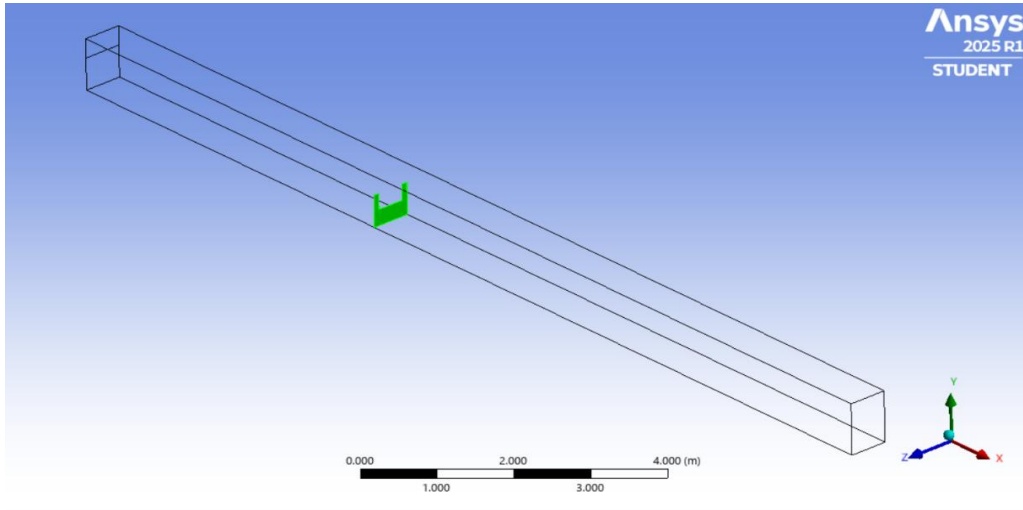
Configuración geométrica del vertedero triangular en el Ansys 2025 R1.



Nota. Vista isométrica del dominio computacional del canal con el vertedero triangular integrado.

Figura 27

Configuración geométrica del vertedero rectangular en el Ansys 2025 R1.

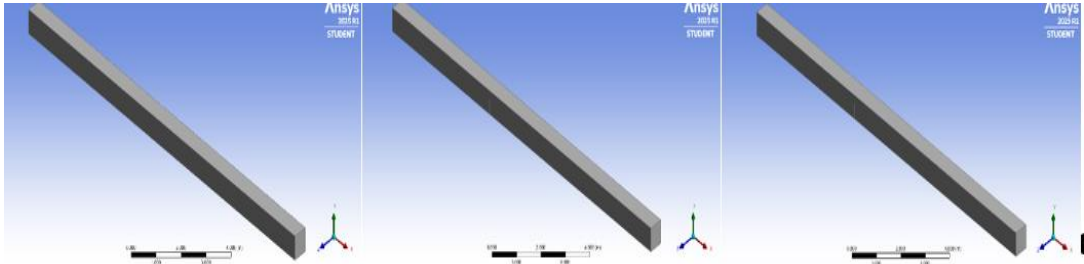


Nota. Vista isométrica del dominio computacional del canal con el vertedero rectangular integrado.

Dada la simetría axial del canal con respecto a su eje longitudinal, se evaluó la viabilidad de modelar únicamente la mitad del dominio. Tras validar mediante una simulación de prueba que los resultados obtenidos en el modelo reducido eran equivalentes a los del modelo completo.

Figura 28

Configuración geométrica de los vertederos en el geometry de ANSYS 2025 R1.



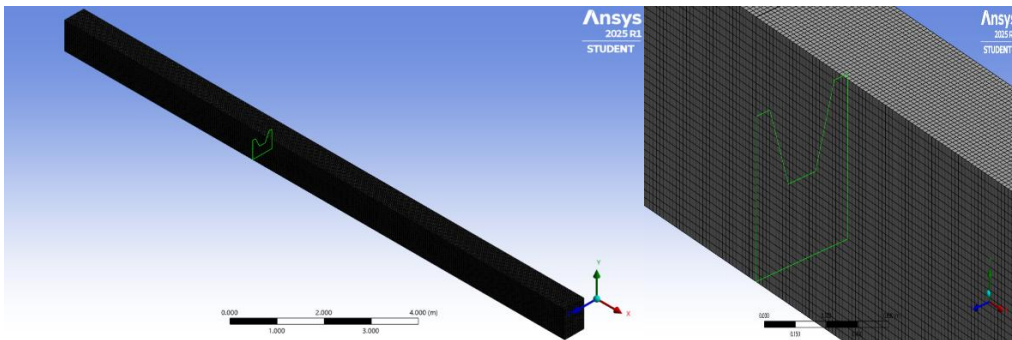
Nota. Geometría simplificada utilizada para el estudio de malla independiente.

2. Estructuración de la malla.

Se crea una malla estructurada o no estructurada, cuidando la calidad de los elementos en zonas críticas como cercanías a paredes o cambios de sección.

Figura 29

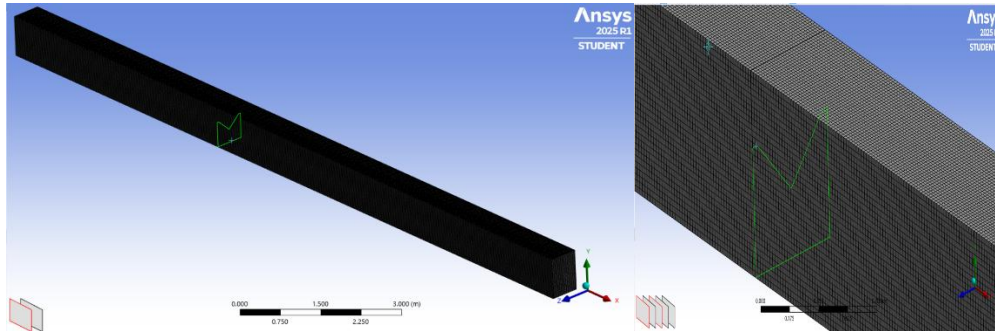
Elaboración del enmallado para el vertedero trapezoidal.



Nota. Geometría simplificada utilizada para el estudio de malla independiente.

Figura 30

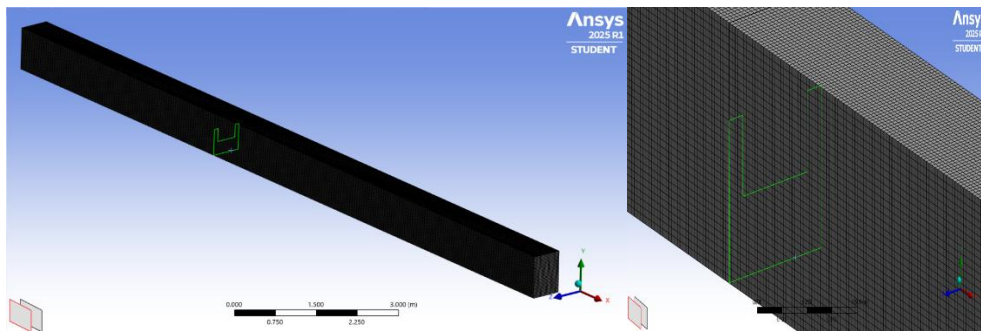
Elaboración del enmallado para el vertedero triangular.



Nota. Geometría simplificada utilizada para el estudio de malla independiente.

Figura 31

Elaboración del enmallado para el vertedero rectangular.



Nota. Geometría simplificada utilizada para el estudio de malla independiente.

3. Generación de la malla.

La generación de la malla constituye una etapa crítica en la modelación CFD, ya que determina directamente la precisión, confiabilidad y estabilidad de los resultados numéricos. Los métodos de elementos finitos (2D) y volúmenes finitos (3D) requieren una discretización espacial

optimizada para equilibrar la eficiencia computacional y la fidelidad física.

Los parámetros clave para evaluar la calidad de la malla incluyen:

- Geometría de los elementos: Forma y proporción de celdas (ej. tetraédricas, hexaédricas, polihédricas).
- Densidad total de elementos: Número de nodos y celdas en el dominio.
- Uniformidad y suavidad: Transición gradual entre zonas refinadas y gruesas, evitando distorsiones abruptas.

Estrategia de refinamiento iterativo:

Para identificar la configuración óptima, se evaluaron múltiples esquemas de mallado mediante un proceso iterativo, comparando métricas de calidad (ej. skewness, element quality, orthogonal quality). Este enfoque permitió establecer criterios específicos adaptados a la geometría del canal y los vertederos.

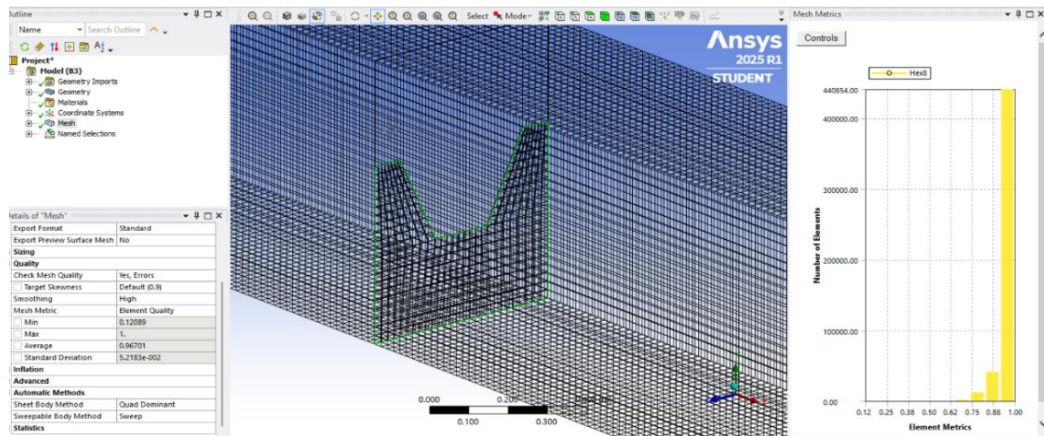
- Refinamiento localizado: Mayores densidad en regiones con gradientes pronunciados (ej. cerca de la cresta del vertedero, capas límite).
- Control de crecimiento: Tasa progresiva de expansión del tamaño de las celdas para minimizar errores de interpolación.
- Adaptación a curvaturas: Preservación de la geometría original en bordes y superficies complejas.

Fundamentos del Método de Elementos Finitos (FEM)

Los indicadores de calidad de la malla deben acercarse a 1 en ANSYS (y en cualquier software de elementos finitos) porque es la principal garantía de que los resultados de la simulación serán precisos y fiables.

Figura 32

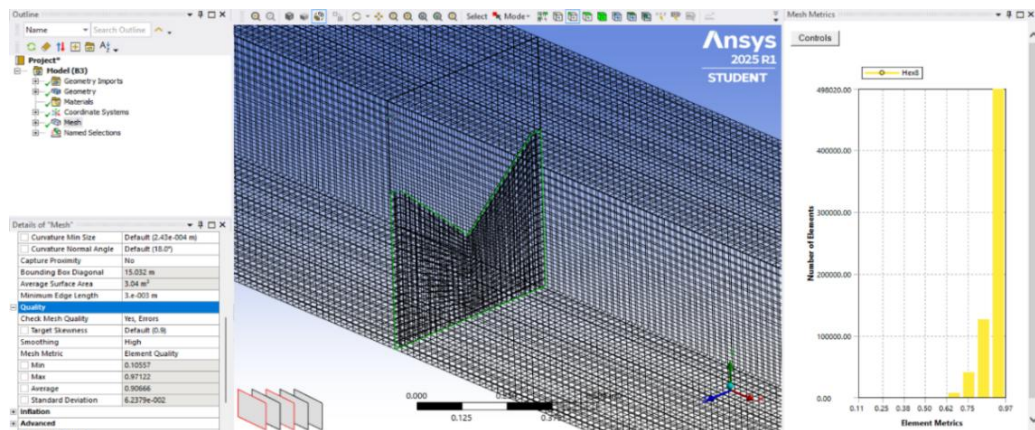
Calidad de malla para el vertedero trapezoidal.



Nota. La figura muestra la calidad de malla (Element Quality) cuyo valor es de 0.96701, por lo tanto, su valor se aproxima a 1.00 siendo es la principal garantía de que los resultados de la simulación serán precisos y fiables.

Figura 33

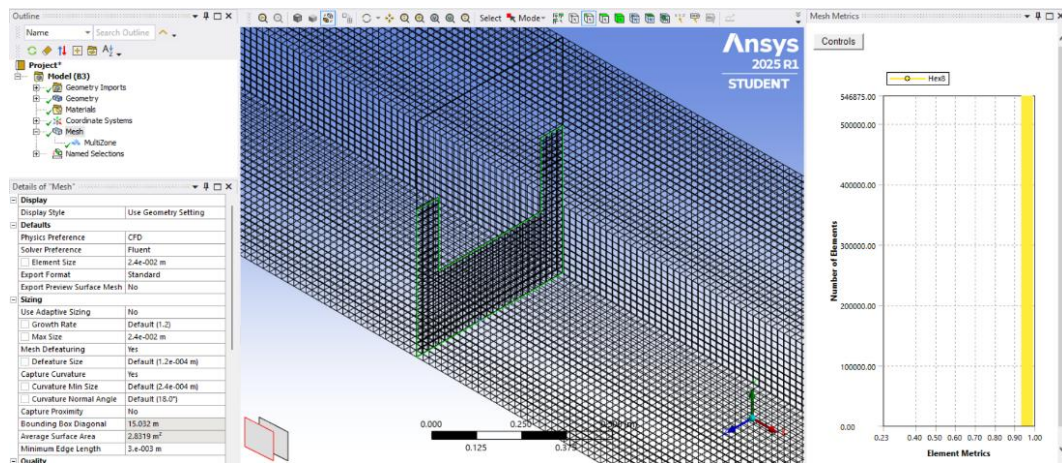
Calidad de malla para el vertedero triangular.



Nota. La figura muestra la calidad de malla (Element Quality) cuyo valor es de 0.90666, por lo tanto, su valor se aproxima a 1.00 siendo es la principal garantía de que los resultados de la simulación serán precisos y fiables.

Figura 34

Calidad de malla para el vertedero rectangular.



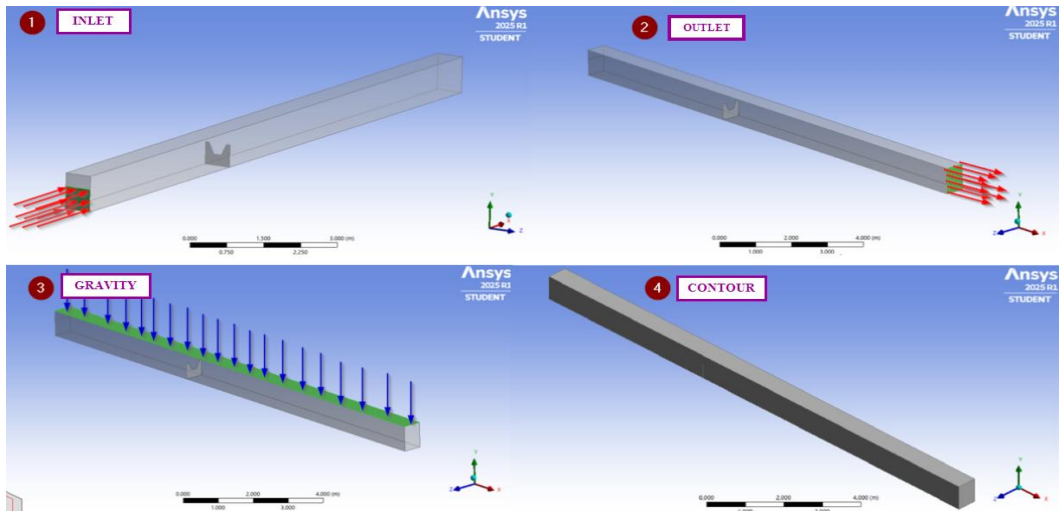
Nota. La figura muestra la calidad de malla (Element Quality) cuyo valor es de 0.99657, por lo tanto, su valor se aproxima a 1.00 siendo es la principal garantía de que los resultados de la simulación serán precisos y fiables.

4. Condiciones de frontera.

Se establecen caudal de entrada, presión de salida, condiciones de pared, gravedad y demás parámetros hidráulicos.

Figura 35

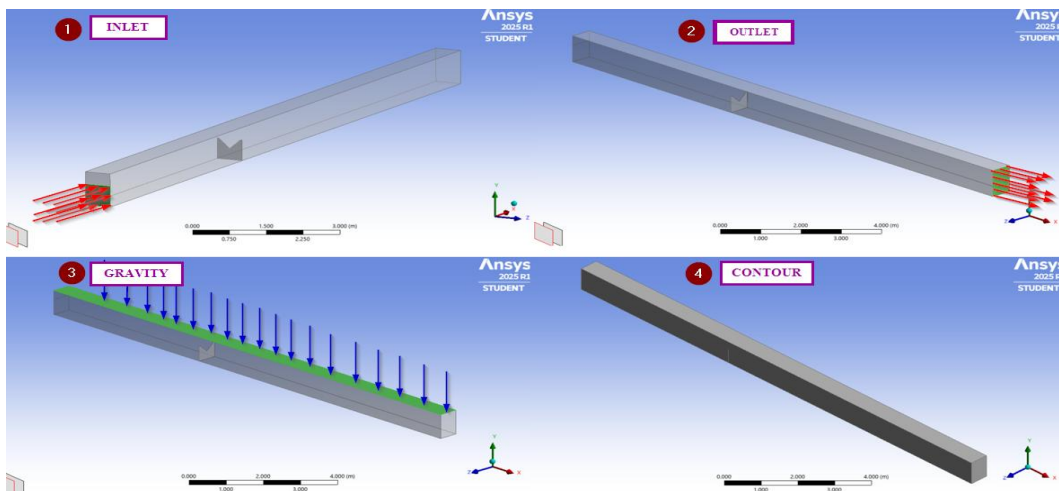
Condición de frontera para el vertedero trapezoidal.



Nota. Definición de las condiciones de contorno: (1) entrada (inlet) con caudal másico y (2) salida (outlet) con (3) presión atmosférica.

Figura 36

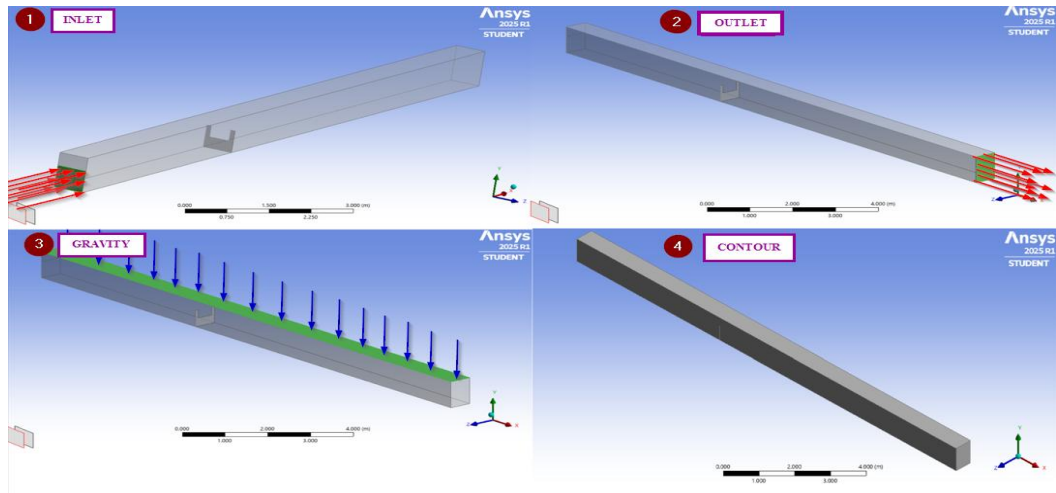
Condición de frontera para el vertedero triangular.



Nota. Definición de las condiciones de contorno: (1) entrada (inlet) con caudal másico y (2) salida (outlet) con (3) presión atmosférica.

Figura 37

Condición de frontera para el vertedero rectangular.



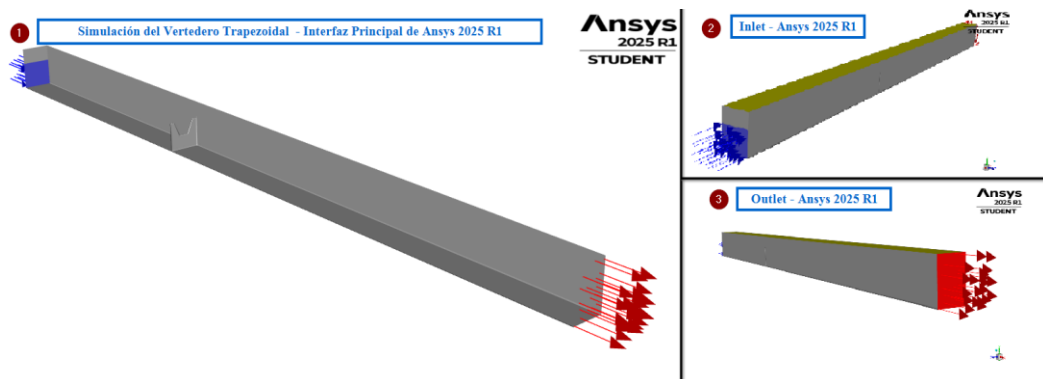
Nota. Definición de las condiciones de contorno: (1) entrada (inlet) con caudal másico y (2) salida (outlet) con (3) presión atmosférica.

5. Simulación.

Se ejecutan las simulaciones hasta alcanzar criterios de convergencia aceptables.

Figura 38

Simulación del vertedero trapezoidal - Interfaz principal de Ansys 2025 R1.



Nota. Configuración de la animación para el monitorizado de la interfaz aire-agua, por consiguiente, realizar las iteraciones.

Figura 39

Convergencia para el vertedero trapezoidal.

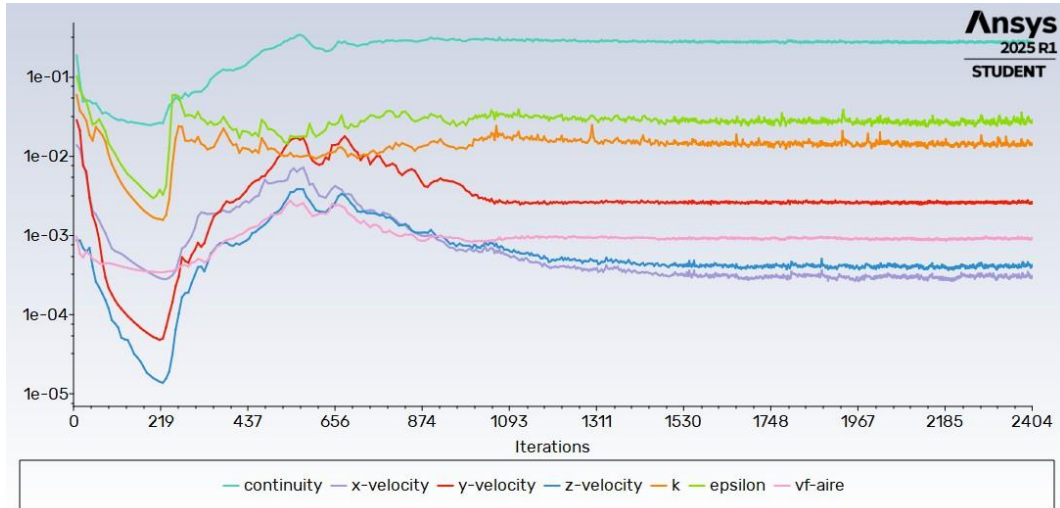
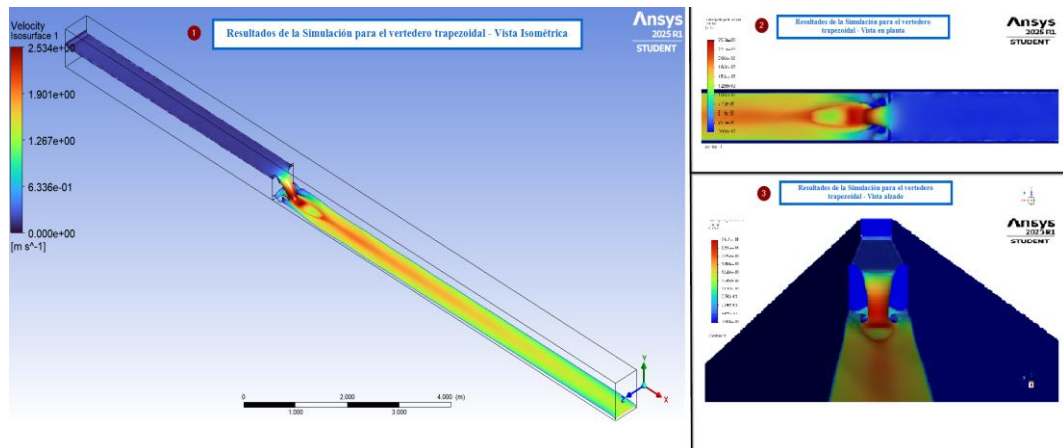


Figura 40

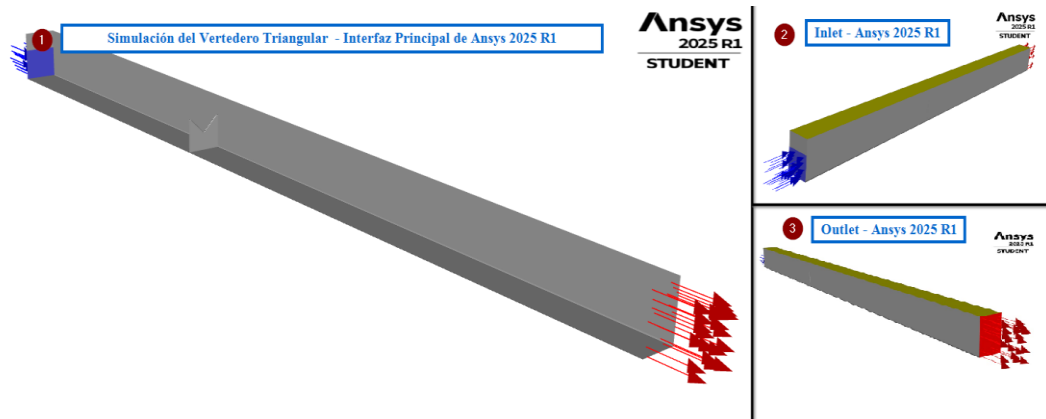
Resultado finales de la simulación CFD en un vertedero triangular – Ansys 2025 R1.



Nota. La escala de colores representa la distribución de velocidad, desde 0 m/s (azul) hasta 2.534 m/s (rojo).

Figura 41

Simulación del vertedero triangular - Interfaz principal de Ansys 2025 R1.



Nota. Configuración de la animación para el monitorizado de la interfaz aire-agua, por consiguiente, realizar las iteraciones.

Figura 42

Convergencia para el vertedero triangular.

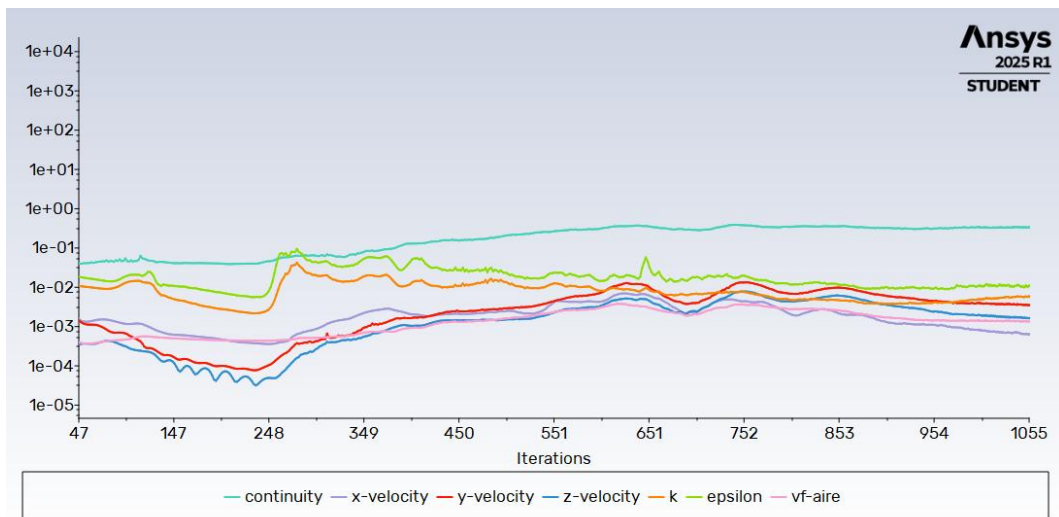
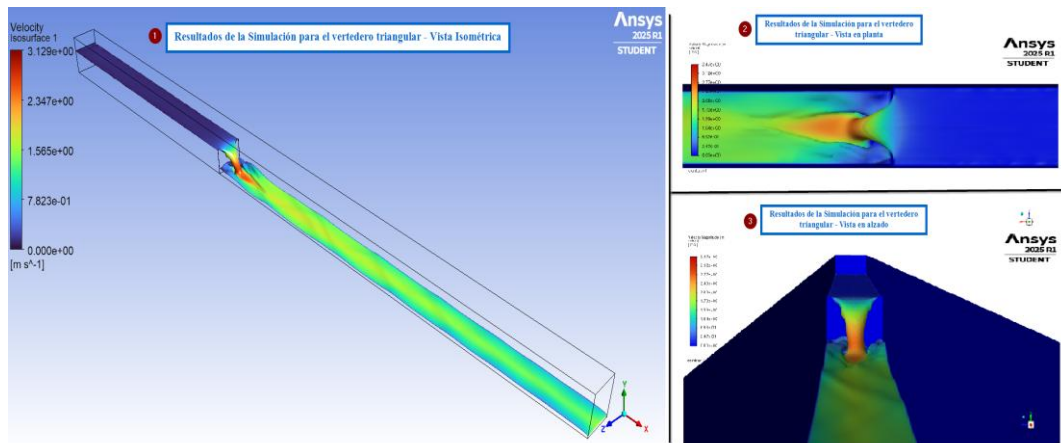


Figura 43

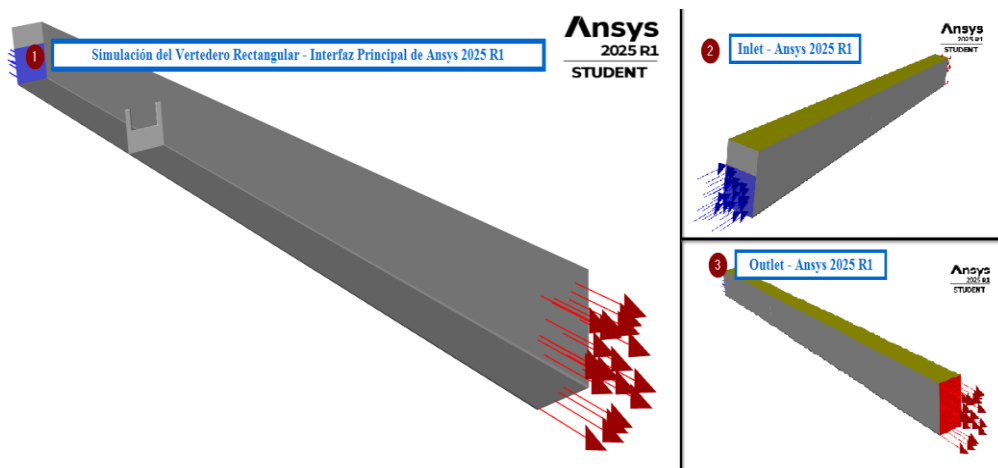
Resultado finales de la simulación CFD en un vertedero triangular – Ansys 2025 R1.



Nota. La escala de colores representa la distribución de velocidad, desde 0 m/s (azul) hasta 3.129 m/s (rojo).

Figura 44

Simulación del vertedero rectangular - Interfaz principal de Ansys 2025 R1.



Nota. Configuración de la animación para el monitoreo de la interfaz aire-agua, por consiguiente, realizar las iteraciones.

Figura 45

Convergencia para el vertedero rectangular.

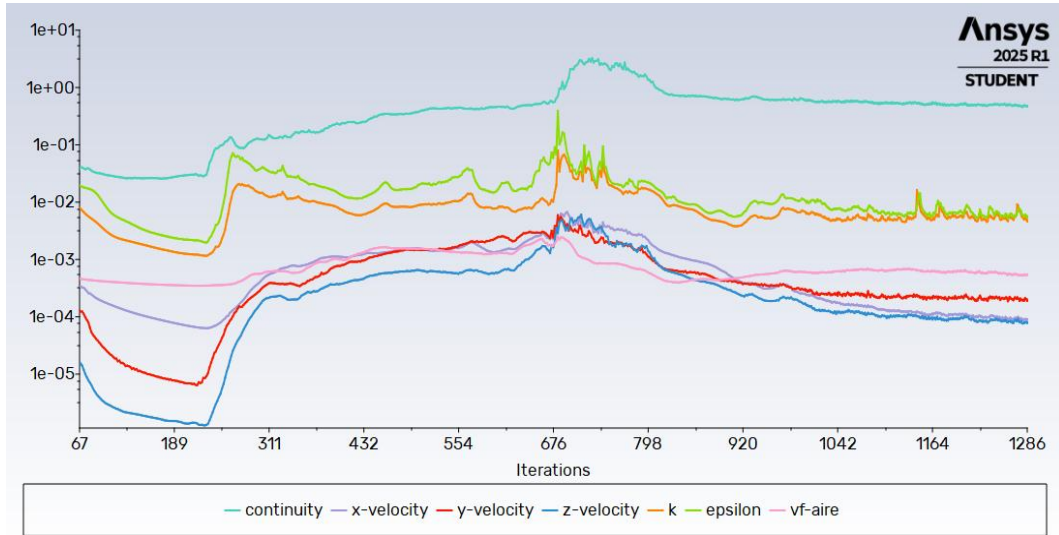
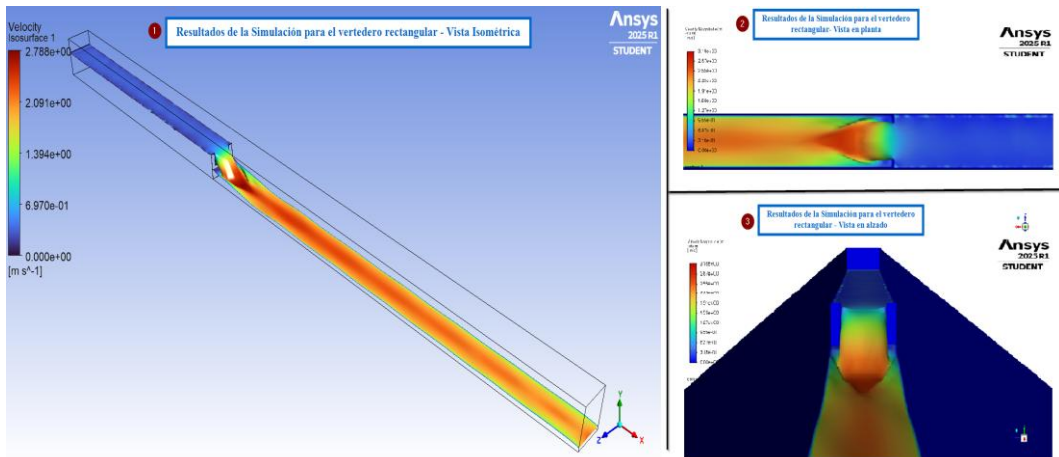


Figura 46

Resultado finales de la simulación CFD en un vertedero rectangular – Ansys 2025 R1.



Nota. La escala de colores representa la distribución de velocidad, desde 0 m/s (azul) hasta 2.788 m/s (rojo).

6. Análisis de resultados.

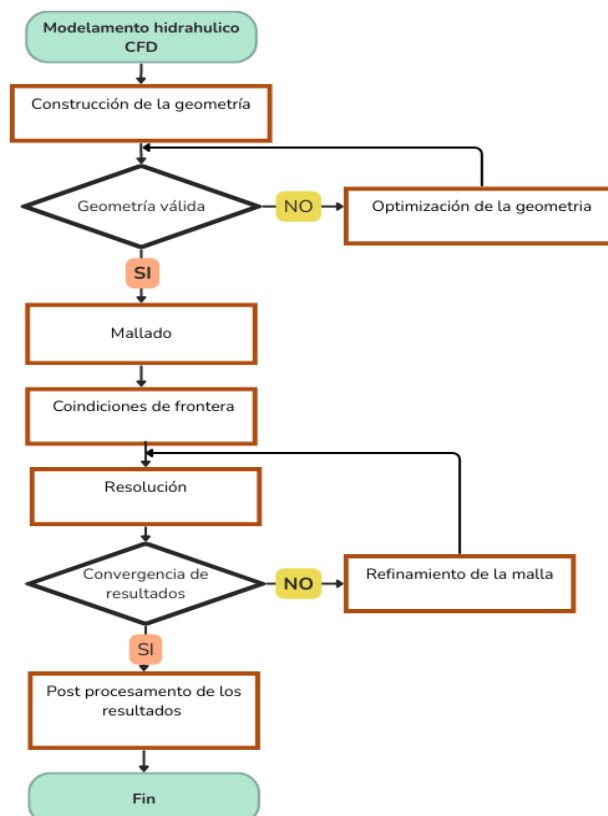
Se obtienen tirantes y velocidades, los cuales se comparan con los resultados experimentales.

3.4.1 Diagrama de flujo del proceso de simulación CFD.

Es el esquema de las etapas del proceso de simulación CFD, desde la definición del problema hasta la obtención y validación de resultados.

Figura 47

Diagrama de flujo del desarrollo CFD.



Nota. El diagrama de flujo muestra el proceso de modelación digital en Ansys R1 2025, corrigiendo iterativamente hasta obtener resultados óptimos y confiables.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos siendo ello los ensayos experimentales (laboratorio), modelo computacional y los resultados finales obtenidos.

4.1 Presentación de los resultados experimentales (laboratorio) y del modelamiento hidráulico CFD.

4.1.1 Análisis comparativo de tirantes experimentales (laboratorio) y del modelamiento hidráulico CFD.

Se muestran los tirantes obtenidos en los ensayos de laboratorio y en el modelamiento hidráulico CFD, evaluando sus coincidencias para validar el comportamiento del modelo.

4.1.1.1 Análisis comparativo mediante la metodología CFD – Vertedero trapezoidal.

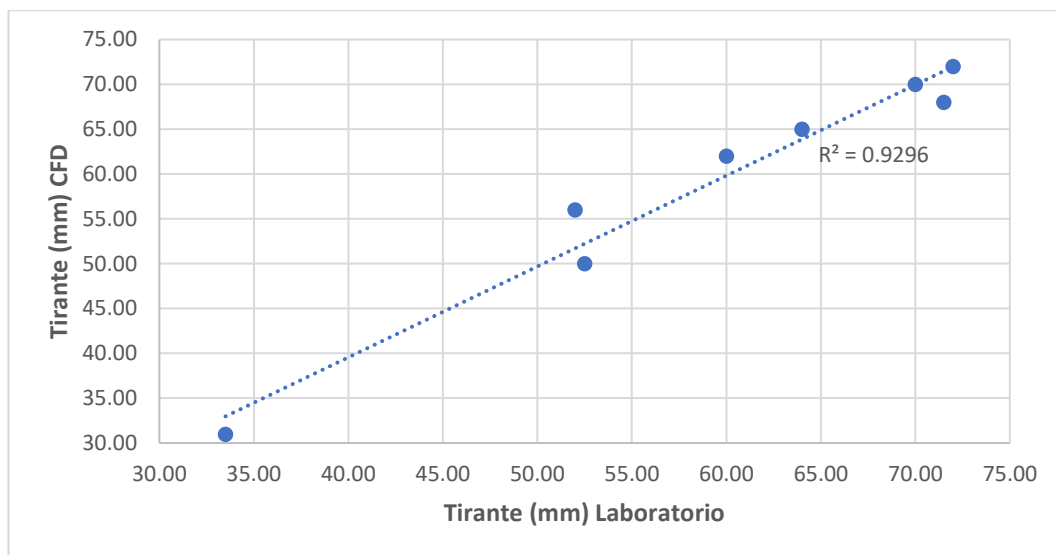
Tabla 11

Resultados de la metodología experimental - modelamiento CFD 01.

N° de muestra	Distancia (m)	Tirante - laboratorio (mm)	Tirante - CFD (mm)
Y1	6.64	34.50	31.00
Y2	7.64	53.50	50.00
Y3	8.64	52.00	56.00
Y4	9.64	57.00	62.00
Y5	10.64	72.50	68.00
Y6	11.64	70.00	70.00
Y7	12.64	68.00	65.00
Y8	13.34	72.00	72.00

Figura 48

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero trapezoidal.



Nota. La figura muestra la correlación 92.96% del análisis numérico y experimental para el vertedero trapezoidal, por lo tanto, dicho valor indica una alta similitud y precisión en los resultados.

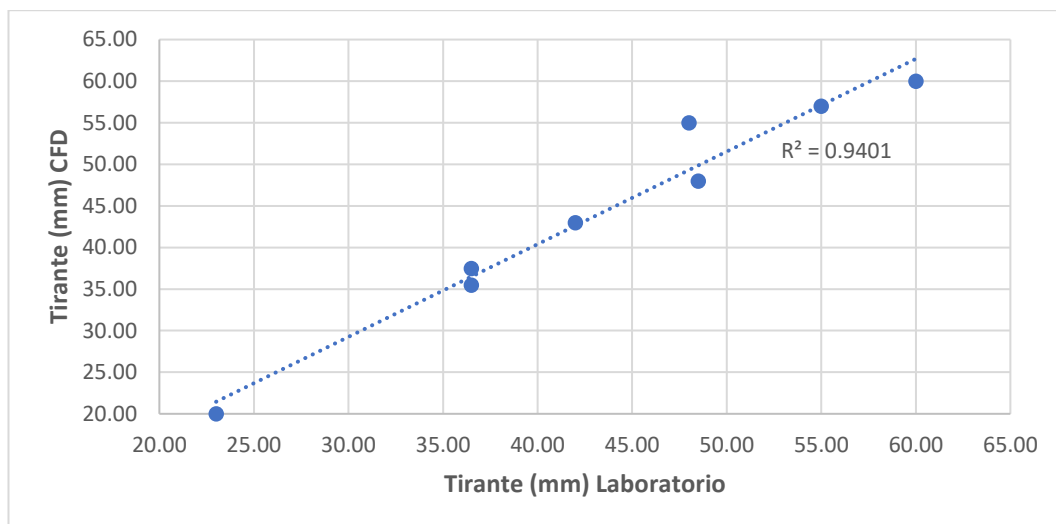
Tabla 12

Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 02.

Nº de muestra	Distancia (m)	Tirante - laboratorio (mm)	Tirante - CFD (mm)
Y1	6.64	23.00	20.00
Y2	7.64	38.50	35.50
Y3	8.64	34.00	37.50
Y4	9.64	40.00	40.00
Y5	10.64	48.50	48.00
Y6	11.64	55.00	57.00
Y7	12.64	60.00	56.00
Y8	13.34	48.00	55.00

Figura 49

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero trapezoidal.



Nota. La figura muestra la correlación 94.01% del análisis numérico y experimental para el vertedero trapezoidal, por lo tanto, dicho valor indica una alta similitud y precisión en los resultados.

4.1.1.2 Análisis comparativo mediante la metodología CFD – Vvertedero triangular.

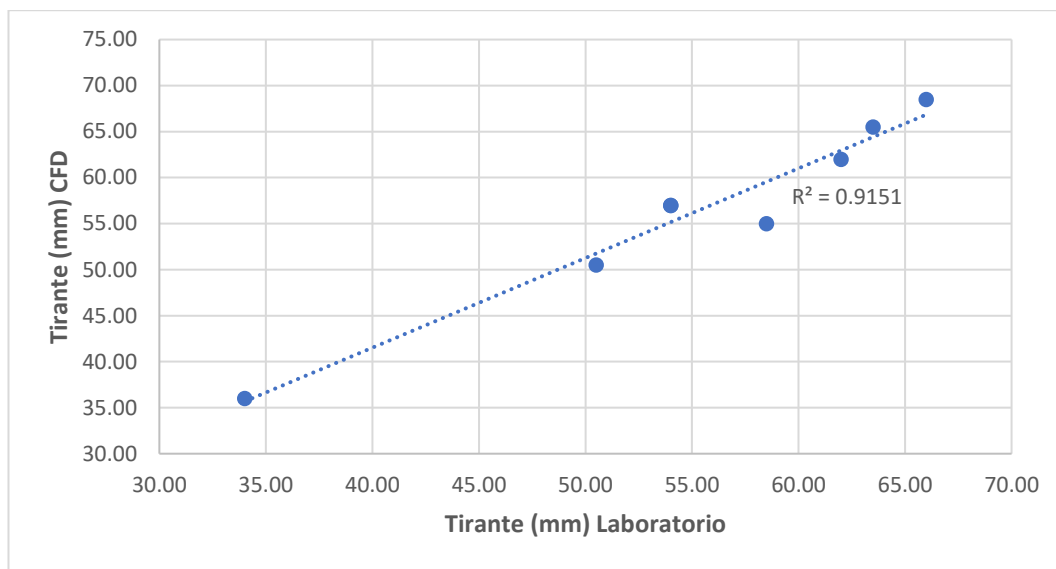
Tabla 13

Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 03.

Nº de muestra	Distancia (m)	Tirante - laboratorio (mm)	Tirante - CFD (mm)
Y1	6.64	34.00	36.00
Y2	7.64	50.50	50.50
Y3	8.64	50.00	57.00
Y4	9.64	54.00	57.00
Y5	10.64	58.50	55.00
Y6	11.64	62.00	62.00
Y7	12.64	63.50	65.50
Y8	13.34	66.00	68.50

Figura 50

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero triangular.



Nota. La figura muestra la correlación 91.51% del análisis numérico y experimental para el vertedero triangular, por lo tanto, dicho valor indica una alta similitud y precisión en los resultados.

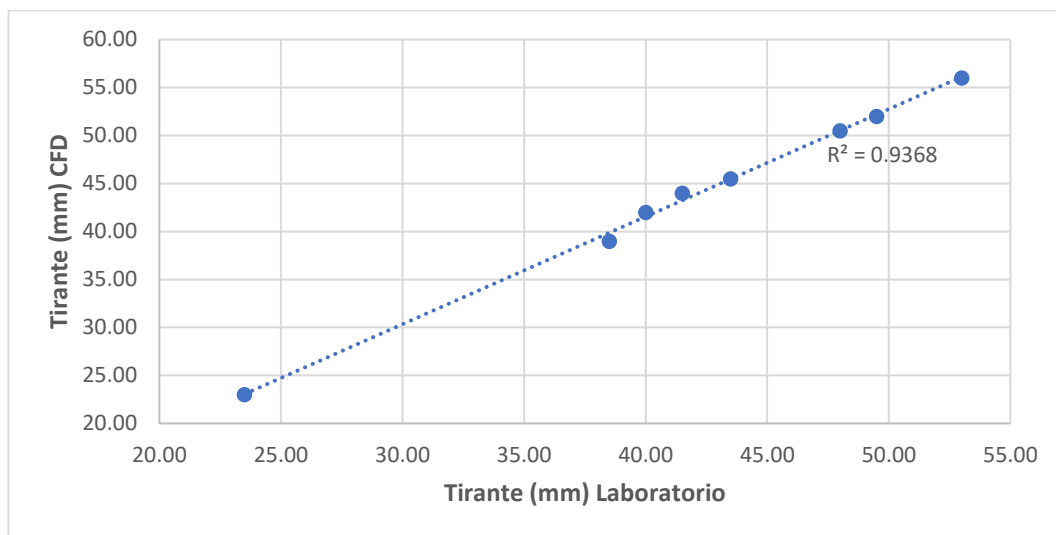
Tabla 14

Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 04.

Nº de muestra	Distancia (m)	Tirante - laboratorio (mm)	Tirante - CFD (mm)
Y1	6.64	20.00	23.00
Y2	7.64	42.00	39.00
Y3	8.64	47.00	44.00
Y4	9.64	40.00	42.00
Y5	10.64	43.50	45.50
Y6	11.64	49.50	52.00
Y7	12.64	53.00	56.00
Y8	13.34	48.00	50.50

Figura 51

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero triangular.



Nota. La figura muestra la correlación 93.68% del análisis numérico y experimental para el vertedero triangular, por lo tanto, dicho valor indica una alta similitud y precisión en los resultados.

4.1.1.3 Análisis comparativo mediante la metodología CFD – Vvertedero rectangular.

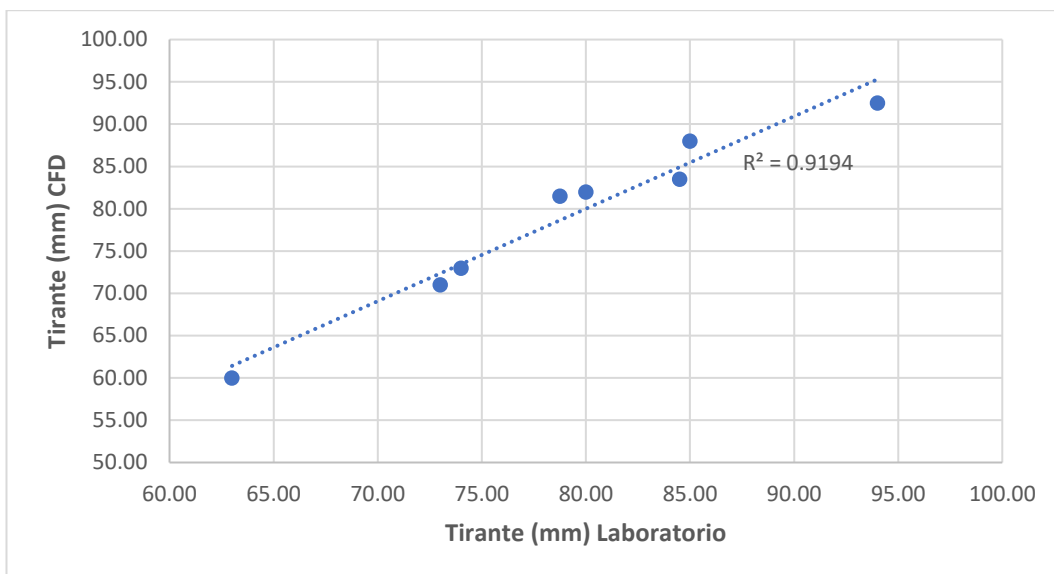
Tabla 15

Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 05.

Nº de muestra	Distancia (m)	Tirante - laboratorio (mm)	Tirante - CFD (mm)
Y1	6.64	63.00	60.00
Y2	7.64	70.00	73.00
Y3	8.64	78.75	81.50
Y4	9.64	73.00	71.00
Y5	10.64	86.00	83.50
Y6	11.64	78.00	82.00
Y7	12.64	85.00	88.00
Y8	13.34	94.00	92.50

Figura 52

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero rectangular.



Nota. La figura muestra la correlación 91.94% del análisis numérico y experimental para el vertedero rectangular, por lo tanto, dicho valor indica una alta similitud y precisión en los resultados.

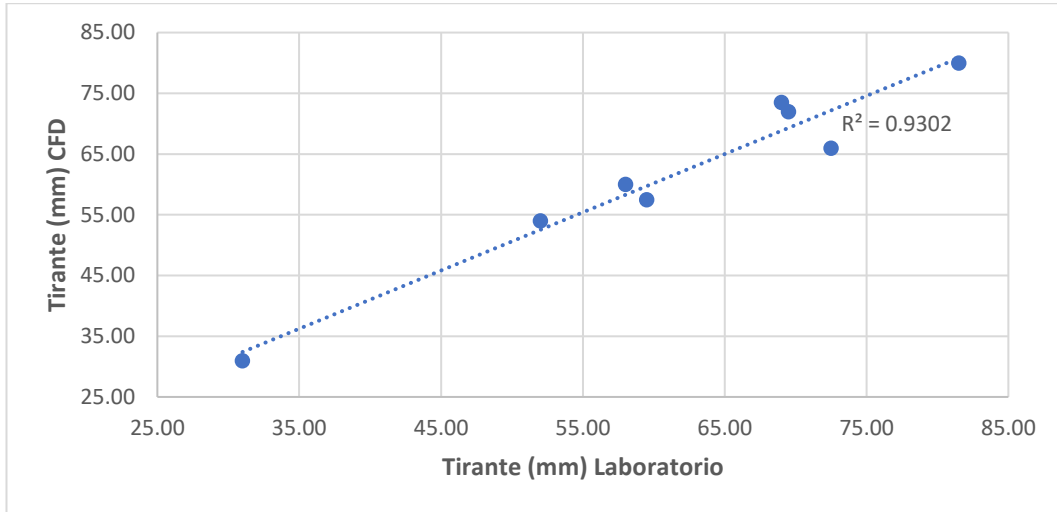
Tabla 16

Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 06.

Nº de muestra	Distancia (m)	Tirante - laboratorio (mm)	Tirante - CFD (mm)
Y1	6.64	31.00	31.00
Y2	7.64	58.00	57.50
Y3	8.64	58.00	60.00
Y4	9.64	52.00	54.00
Y5	10.64	74.00	66.00
Y6	11.64	67.00	72.00
Y7	12.64	69.00	73.50
Y8	13.34	81.50	80.00

Figura 53

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero rectangular.



Nota. La figura muestra la correlación 93.02% del análisis numérico y experimental para el vertedero rectangular, por lo tanto, dicho valor indica una alta similitud y precisión en los resultados.

4.1.2 Análisis comparativo de velocidades experimentales (laboratorio) y del modelamiento hidráulico CFD.

4.1.2.1 Análisis comparativo mediante la metodología CFD – Vertedero trapezoidal.

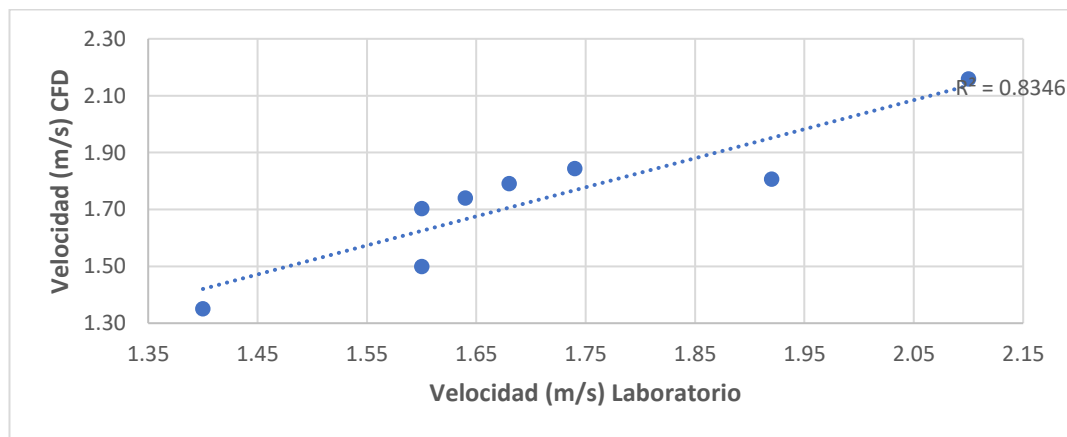
Tabla 17

Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 07.

Nº de muestra	Altura (mm)	Velocidad - laboratorio (m/s)	Velocidad - CFD (m/s)
V1	15.00	1.60	1.50
V2	34.00	2.10	2.16
V3	17.00	1.40	1.35
V4	24.00	1.92	1.81
V5	34.00	1.74	1.84
V6	34.00	1.68	1.79
V7	34.00	1.64	1.74
V8	34.00	1.60	1.70

Figura 54

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero trapezoidal.



Nota. La figura muestra la correlación 83.46% del análisis numérico y experimental para el vertedero trapezoidal, por lo tanto, dicho valor indica una regular similitud en los resultados.

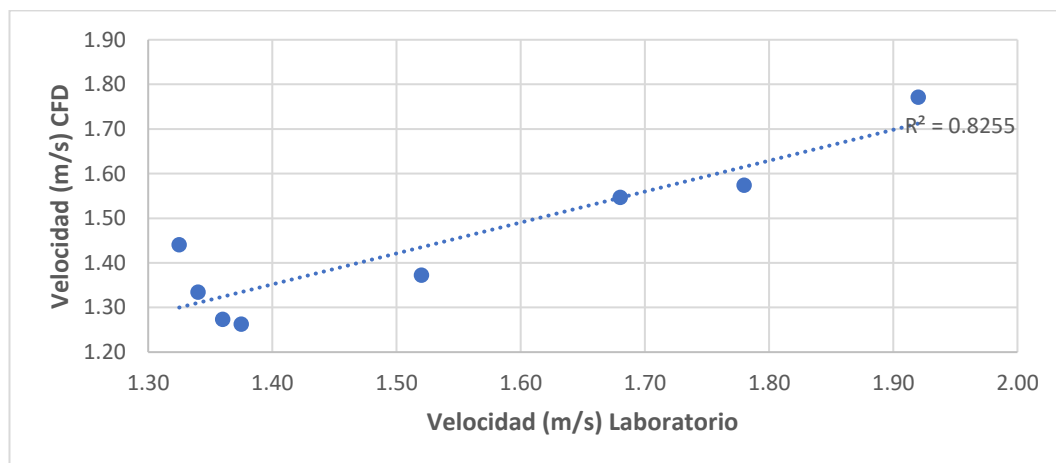
Tabla 18

Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 08.

N° de muestra	Altura (mm)	Velocidad - laboratorio (m/s)	Velocidad - CFD (m/s)
V1	15.00	1.92	1.77
V2	34.00	1.78	1.57
V3	17.00	1.52	1.37
V4	24.00	1.68	1.55
V5	34.00	1.36	1.27
V6	34.00	1.38	1.26
V7	34.00	1.33	1.44
V8	34.00	1.34	1.33

Figura 55

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero trapezoidal.



Nota. La figura muestra la correlación 82.55% del análisis numérico y experimental para el vertedero trapezoidal, por lo tanto, dicho valor indica una regular similitud en los resultados.

4.1.2.2 Análisis comparativo mediante la metodología CFD – Vertedero triangular.

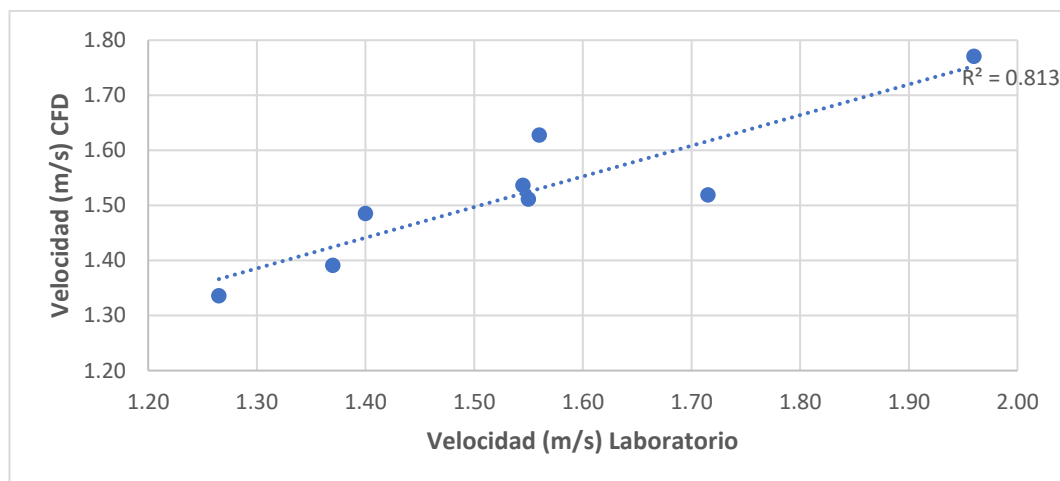
Tabla 19

Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 09.

Nº de muestra	Altura (mm)	Velocidad - laboratorio (m/s)	Velocidad - CFD (m/s)
V1	12	1.96	1.77
V2	14	1.72	1.52
V3	22	1.56	1.63
V4	22	1.55	1.54
V5	24	1.55	1.51
V6	34	1.40	1.49
V7	34	1.37	1.39
V8	34	1.27	1.34

Figura 56

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero triangular.



Nota. La figura muestra la correlación 81.30% del análisis numérico y experimental para el vertedero triangular, por lo tanto, dicho valor indica una regular similitud en los resultados.

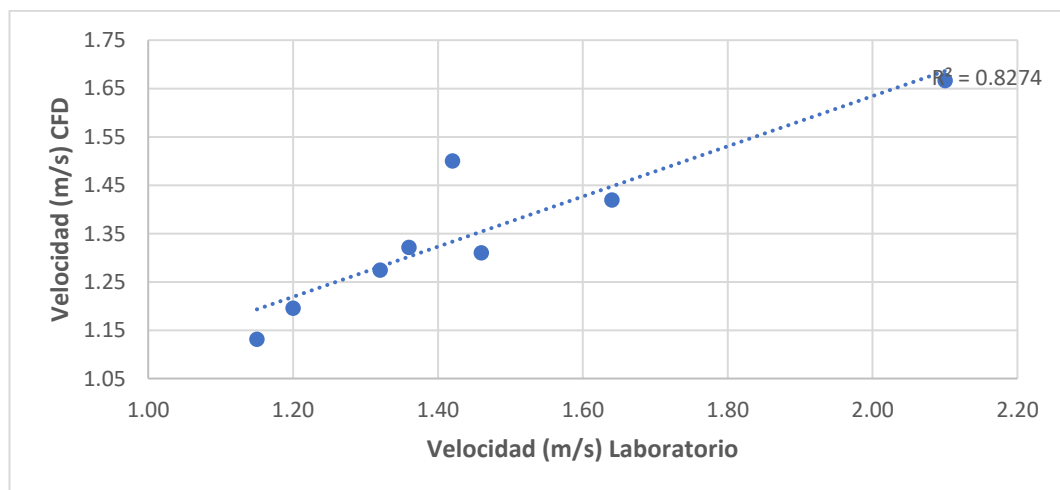
Tabla 20

Resultados de la metodología experimental – modelamiento CFD 10.

Nº de muestra	Altura (mm)	Velocidad - laboratorio (m/s)	Velocidad - CFD (m/s)
V1	12	2.10	1.67
V2	13	1.64	1.42
V3	18	1.42	1.50
V4	16	1.46	1.31
V5	18	1.36	1.32
V6	20	1.32	1.27
V7	20	1.15	1.13
V8	34	1.20	1.20

Figura 57

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero triangular.



Nota. La figura muestra la correlación 82.74% del análisis numérico y experimental para el vertedero triangular, por lo tanto, dicho valor indica una regular similitud en los resultados.

4.1.2.3 Análisis comparativo mediante la metodología CFD – Vertedero rectangular.

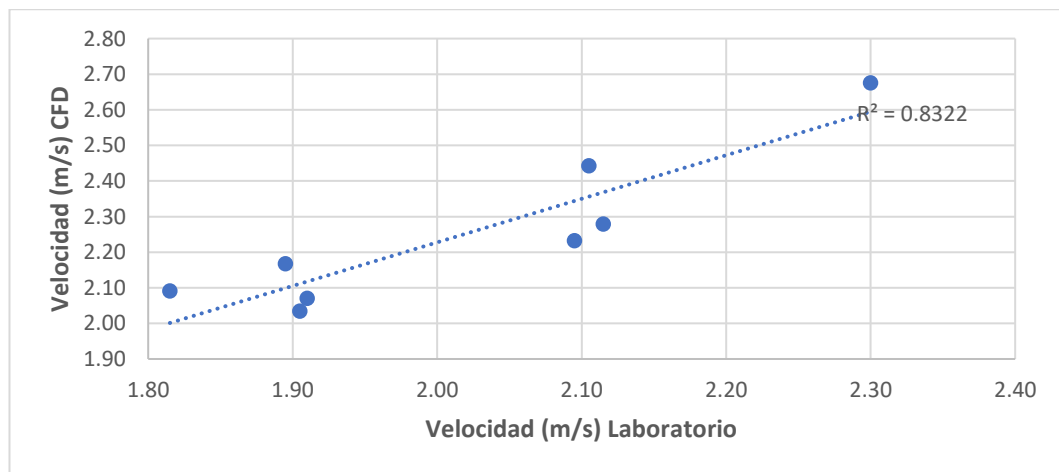
Tabla 21

Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 11.

Nº de muestra	Altura (mm)	Velocidad - laboratorio (m/s)	Velocidad - CFD (m/s)
V1	34	2.30	2.68
V2	32	2.11	2.44
V3	34	2.12	2.28
V4	34	2.10	2.23
V5	35	1.90	2.17
V6	35	1.91	2.07
V7	40	1.91	2.03
V8	50	1.82	2.09

Figura 58

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero rectangular.



Nota. La figura muestra la correlación 83.22% del análisis numérico y experimental para el vertedero rectangular, por lo tanto, dicho valor indica una regular similitud en los resultados.

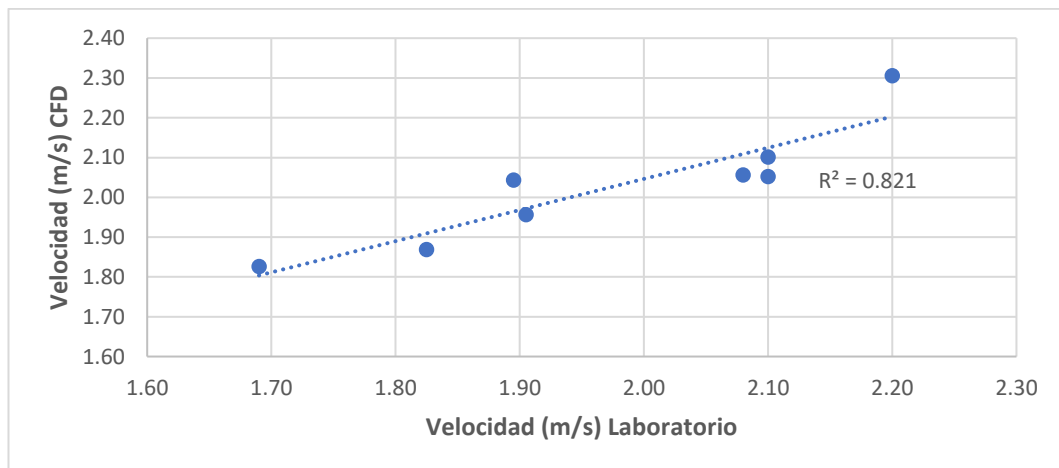
Tabla 22

Resultados del metodología experimental - modelamiento CFD 12.

N° de muestra	Altura (mm)	Velocidad - laboratorio (m/s)	Velocidad - CFD (m/s)
V1	18	2.10	2.10
V2	32	2.20	2.31
V3	22	2.10	2.05
V4	24	2.08	2.06
V5	34	1.90	2.04
V6	34	1.91	1.96
V7	34	1.83	1.87
V8	34	1.69	1.83

Figura 59

Correlación entre modelos experimental y numérico - vertedero rectangular.



Nota. La figura muestra la correlación 82.10% del análisis numérico y experimental para el vertedero rectangular, por lo tanto, dicho valor indica una regular similitud en los resultados.

4.2 Discusión de los resultados

Diversos estudios demuestran que los resultados de CFD (usando softwares como Flow-3D, OpenFOAM o ANSYS) muestran una buena concordancia con los datos experimentales de modelos físicos en parámetros clave como el perfil de la lámina de agua, la distribución de presiones y la capacidad de descarga en vertederos de cresta delgada.

Aunque la concordancia es alta para el perfil de la lámina de agua, pueden existir discrepancias en la predicción de presiones locales y velocidades especialmente en zonas de alta turbulencia o aireación, y en la modelación de fenómenos como la cavitación.

La calidad de los resultados depende de la correcta selección de mallas, modelos de turbulencia y validación experimental. Los modelos físicos siguen siendo esenciales para validar y ajustar los modelos numéricos, especialmente en condiciones geométricas complejas.

El uso de CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) permite analizar múltiples escenarios de diseño, optimizar geometrías y visualizar variables internas difíciles de medir experimentalmente, todo bajo condiciones de frontera controladas y con una reducción significativa de costos y tiempo frente a ensayos físicos extensivos.

CONCLUSIONES

Se logró modelar el flujo de agua sobre vertederos de cresta delgada empleando el software ANSYS Student 2025 R1 de acceso libre como herramienta de dinámica de fluidos computacional. Del mismo modo, se realizaron ensayos experimentales en el canal horizontal abierto del Laboratorio de Hidráulica e Hidrología de la Escuela de Ingeniería Civil de la UNJBG. La comparación entre los resultados numéricos y experimentales evidenció un comportamiento hidráulico con tendencia similar en ambos casos, validando la aplicabilidad del modelo computacional para el análisis de vertederos de cresta delgada.

El análisis experimental permitió determinar el comportamiento hidráulico de cada tipo de vertedero, evidenciando que tanto la geometría como el caudal de ingreso influyen directamente en el régimen de flujo, en la magnitud de los tirantes y en la distribución de velocidades.

El modelamiento CFD evidenció que factores como la geometría del vertedero, la calidad de la discretización o mallado y las condiciones de contorno influyen de manera determinante en la distribución de velocidades y en la magnitud del tirante, lo que confirma la importancia de una adecuada configuración numérica para obtener resultados confiables en el análisis hidráulico.

Se realizó la comparación entre los resultados obtenidos en el ensayo de laboratorio y el modelo numérico CFD mediante tablas, gráficos de

dispersión e índices de correlación en Excel. Los valores registrados mostraron correlaciones mínimas para velocidades de 81.30% y máximas de 83,46% y en tirantes se encontró un porcentaje de similitud de valor registrado mínimo 91.51% y máximas de 94.01%, lo que confirma una regular a alta semejanza entre ambas metodologías. Esto valida la confiabilidad del modelo numérico como herramienta complementaria al ensayo físico, destacando que, pese a las limitaciones propias del software de acceso libre, una adecuada discretización de malla y definición de condiciones de contorno permiten obtener simulaciones consistentes con los resultados experimentales.

RECOMENDACIONES

La correcta definición de la geometría y la configuración del mallado es esencial para la eficiencia computacional en modelos CFD. Reducir la geometría a lo estrictamente necesario y emplear estrategias de mallado adaptativo o refinado local mejora la resolución y disminuye el error, optimizando el uso de recursos computacionales.

Asimismo, se sugiere ampliar el rango de caudales y secciones evaluadas en futuros trabajos, con el propósito de explorar diferentes condiciones de flujo y su impacto en la distribución de velocidades y tirantes. Ello contribuirá a conformar una base de datos más extensa, que facilite la generación de correlaciones aplicables al diseño y análisis de vertederos en distintas condiciones de funcionamiento, ampliando al mismo tiempo su aplicabilidad a escenarios más representativos de la realidad hidráulica.

Se recomienda implementar estudios de sensibilidad que analicen la influencia de los parámetros numéricos, tales como el tamaño de celda en el mallado, los criterios de convergencia y los modelos de turbulencia empleados. Este tipo de análisis permitiría identificar qué factores tienen mayor impacto en la precisión de los resultados, optimizando así los recursos computacionales y garantizando simulaciones más confiables.

La medición precisa de la altura del tirante aguas arriba del vertedero es crucial para la confiabilidad de los datos experimentales y la calibración

de modelos numéricos. El uso de dispositivos de lectura digital y sensores automáticos permite obtener registros continuos y de alta precisión, reduciendo la incertidumbre, minimizando errores humanos y evitando la subjetividad en la toma de datos, lo que se traduce en una mejora significativa en la calidad de la información registrada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdurrosyid, J., Purwanto, E., & Null, R. (2021). THE INFLUENCE OF VARIATION OF WEIR CREST SHAPE WITH USBR-I TYPE OF STILLING BASIN ON THE LENGTH OF HYDRAULIC JUMP AND LOSS OF ENERGY. *SCIREA Journal of Hydraulic Engineering*. <https://doi.org/10.54647/hydraulic57013>.

ANSYS. (2025). ANSYS Fluent Theory Guide. ANSYS Inc.

Apaza, J. (2020). Simulación CFD del sistema de riego Caplina en condiciones de caudales máximos [Informe de investigación, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Facultad de Ingeniería Civil.

Bekheet, A., AboulAtta, N., Saad, N., & El-Molla, D. (2021). Effect of the shape and type of piano key weirs on the flow efficiency. *Ain Shams Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.015>.

Biegowski, J., Paprota, M., & Sulisz, W. (2020). Particle Image Velocimetry Measurements of Flow Over an Ogee-Type Weir in a Hydraulic Flume. *International Journal of Civil Engineering*, 18, 1451 - 1462. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00538-z>.

Cárdenas, M., & Luque, F. (2019). Evaluación comparativa de vertederos mediante modelos físicos y simulación computacional en el embalse Paucarani. *Revista de Hidráulica y Recursos Hídricos del Sur*, 5(1), 22–30.

Carlson, E., Cooper, D., Merritt, D., Kondratieff, B., & Waskom, R. (2019). Irrigation canals are newly created streams of semi-arid agricultural regions.. *The Science of the total environment*, 646, 770-781. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.246>.

Castillo, L., & Torres, P. (2020). Evaluación del comportamiento de vertederos de emergencia con simulación FLOW-3D en proyectos hidroeléctricos peruanos. *Revista de Ingeniería Civil del Perú*, 24(1), 89–97.

Chanson, H. (2020). Broad-Crested Weir. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-asce*, 121, 222-224. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_23384.

Chow, V. T. (2010). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw-Hill Interamericana.

Doustkam, M., Rahmanshahi, M., Fathi-Moghadam, M., Keramat, A., & Duan, H. (2024). Experimental Study on the Hydraulic Performance of Porous Broad-Crested Weirs with Sloping Crests. *Water Resources Management*. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03887-9>.

Enfinger, K. (2024). Working with Combined Sewers: Geometric and Hydraulic Elements of Egg-Shaped Sewers. *Pipelines 2024*. <https://doi.org/10.1061/9780784485583.030>.

Ferziger, J. H., & Perić, M. (2019). *Computational methods for fluid dynamics* (4th ed.). Springer.

Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2020). Fluid mechanics and CFD fundamentals for engineers. Springer.

Garnier, E., Adams, N., & Sagaut, P. (2019). Large Eddy Simulation for compressible flows. Springer.

Garvin, J. W. (2023). *A student's guide to the Navier-Stokes equations*. Cambridge University Press.
<https://www.cambridge.org/highereducation/books/a-students-guide-to-the-navier-stokes-equations>

Ghaderi, A., Daneshfaraz, R., Abbasi, S., & Abraham, J. (2020). Numerical analysis of the hydraulic characteristics of modified labyrinth weirs. *International Journal of Energy and Water Resources*, 1-12.
<https://doi.org/10.1007/s42108-020-00082-5>.

Gmsh Team. (2023). GMSH: A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. Recuperado de <https://gmsh.info/doc/texinfo/gmsh.html>

González, A., & Herrera, D. (2019). Hydraulic performance of energy dissipation structures in spillways: A CFD approach. *Water Resources Management*, 33(11), 3925–3940.
<https://doi.org/10.1007/s11269-019-02314-5>

González, C., Vera, P., Carrillo, G., & Garcia, S. (2018). Design of open rectangular and trapezoidal channels. *Journal of Physics: Conference Series*, 1002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1002/1/012006>.

Gracias, A., & Potter, K. (2025). Numerical methods for solving nonlinear partial differential equations in fluid dynamics. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13747.09768>

Herrera, M. (2022). Validación de modelos computacionales mediante simulaciones hidráulicas comparativas. *Revista Peruana de Ingeniería Hidráulica*, 6(2), 34–42.

Huamán, J. A. (2022). Análisis hidráulico comparativo de vertederos en represas altoandinas mediante modelos físicos y CFD [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. UNI Repositorio Institucional.

Hussein, B., & Jalil, S. (2020). Hydraulic Performance for Combined Weir-Gate Structure. , 27, 40-50. <https://doi.org/10.25130/tjes.27.1.06>.

Jamil, A., & Qader, D. (2023). Experimental Study for Measuring Flow Rate Using Broad-Crested Weirs. *4th International Conference on Architectural & Civil Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.24086/icace2022/paper.881>.

Kossaczká, T. (2023). Enhanced finite difference methods by deep learning. *Computational and Applied Mathematics*, 42(1), 1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.camwa.2023.100033>

López Fernández, A. R. (2016). Estudiar el flujo macroturbulento en modelos a escala reducida de obras hidráulicas no convencionales (PVCT16-135_Transferencia). CONACYT–PROCIENCIA, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Paraguay)

Massa, J., Vanella, M., & Sacco, C. (2012). Desarrollo de un paquete de herramientas para problemas de flujo viscoso incompresible bidimensional a bajo número de Reynolds.

Mendoza, R. (2018). Simulación CFD de vertederos tipo cipoletti para riego agrícola en la costa peruana. *Revista Agroingeniería del Perú*, 10(2), 55–64.

Moin, P. (2019). Direct numerical simulation: A tool in turbulence research. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 51(1), 1–24.
<https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010518-040340>

Montes, S. (2018). Hidráulica de vertederos y estructuras de disipación. Editorial Técnica Universitaria.

Moser, R. D., Graham, J., & Brenner, M. (2021). Direct numerical simulation of turbulence: Progress and challenges. *Annual Review of Fluid*

Mechanics, 53(1), 355–378. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060221>

Namaliu Nengoue, U. A. (2015). *Caracterización de vertederos hidráulicos mediante técnicas CFD* (Trabajo Fin de Máster, Universitat Politècnica de València). UPV Institutional Repository (RiuNet).

Patel, R., & Sharma, V. (2021). Comparative study of stepped spillways using physical models and CFD simulations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(5), 04021017. <https://doi.org/10.1061/JHYEFO.0001342>

Patel, S., & Markatos, N. (2019). *Computational fluid dynamics for thermal and phase change processes*. Springer.

Pérez, A., & Mamani, C. (2021). Estudio hidráulico del vertedero del canal Uchusuma mediante modelo físico [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. UNJBG Repositorio Académico.

Pope, S. B. (2019). *Turbulent flows* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Potter, K., & Gracias, A. (2025). *Numerical methods for solving nonlinear partial differential equations in fluid dynamics*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/392758221_Numerical_Methods_for_Solving_Nonlinear_Partial_Differential_Equations_in_Fluid_Dynamics

Pradhan, S., Pradhan, B., & Khatua, K. (2024). Experimental investigations and modelling of composite roughness for compound channels. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132554>.

Ramírez, D. (2020). Fundamentos del comportamiento hidráulico en estructuras de control. Fondo Editorial de Ingeniería Civil.

Saeed, A. M. (2025). Finite volume method and its applications in computational fluid dynamics. *Applied Sciences*, 14(5), 359. <https://doi.org/10.3390/app14050359>

Samuel. (2013). Mallado no estructurado de perfiles con GMSH. Recuperado de <https://porlasbarbasdekutta.wordpress.com/2013/01/19/mallado-no-estructurado-de-perfiles-con-gmsh/>

Sturm, T. W. (2025). *Open Channel Hydraulics*. McGraw Hill.

Tanga, A., Ishak, M., & Arafat, Y. (2023). EFFECT OF PLAN SHAPE ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF LABYRINTH WEIRS. *Jurnal Sains dan Teknologi Tadulako*. <https://doi.org/10.22487/jstt.v9i1.446>.

Van Hoecke, L. (2023). Computational fluid dynamics/finite volume method—CFD. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 101(6), 2345–2357. <https://doi.org/10.1002/cjce.24571>

Vásquez, L., & Terrones, N. (2019). Evaluación hidráulica de la disipación de energía en cuatro tipos de cuencos amortiguadores, bajo condiciones de flujo variable. *Revista INGENIERÍA UC*, 26(2), 163-174. Recuperado de Redalyc.

Vreman, A. W. (2020). An outlook on large eddy simulation of wall-bounded turbulent flows. *Flow, Turbulence and Combustion*, 104(3), 495–512. <https://doi.org/10.1007/s10494-019-00086-5>

Wadnerkar, P., Batsaikhan, B., Conrad, S., Davis, K., Correa, R., Holloway, C., White, S., Sanders, C., & Santos, I. (2020). Contrasting Radium-Derived Groundwater Exchange and Nutrient Lateral Fluxes in a Natural Mangrove Versus an Artificial Canal. *Estuaries and Coasts*, 44, 123-136. <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00778-1>.

Wang, L., Zhang, T., & Liu, H. (2020). CFD analysis of ogee spillways under variable flow conditions. *International Journal of Fluid Mechanics*, 35(2), 145–158.

Wei, M., Cheng, N., & Lu, Y. (2023). Revisiting the Concept of Hydraulic Radius. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130134>.

White, F. M. (2011). *Fluid mechanics (7th ed.)*. McGraw-Hill Education.

White, F. M. (2020). *Fluid mechanics* (9th ed.). McGraw-Hill Education.

Yoshimura, H., & Fujita, I. (2020). Investigation of free-surface dynamics in an open-channel flow. *Journal of Hydraulic Research*, 58, 231 - 247. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1561531>.

Zarei, R., Ghodsian, M., Sangsefidi, Y., & Chooplou, C. (2024). Submerged Flow over Various Shapes of Piano Key Weir. *Flow Measurement and Instrumentation*. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2024.102595>.

Zhou, Y. (2021). Coherent structures in wall-bounded turbulence: A review. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 53(1), 489–518. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010719-060221>