**Maestría en Ingeniería Civil**

# Modelación numérica de estructuras hidráulicas 3D en Ansys – Fluent. Caso de estudio Aliviadero el Ejido

**Fernando Mogollón Mogollón**

**Bogotá, D.C., 6 de Febrero de 2018**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

# Modelación numérica de estructuras hidráulicas 3D en Ansys - Fluent. Caso de estudio Aliviadero el Ejido

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en Recursos Hidráulicos Y Medio Ambiente**

**Ing. Germán Ricardo Santos Granados**
**Director**

**Bogotá, D.C., 6 de Febrero de 2018**

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

La tesis de maestría titulada “Modelación numérica de estructuras hidráulicas 3D en Ansys - Fluent Caso de estudio Aliviadero el Ejido.”, presentada por Fernando Mogollón Mogollón, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis
PhD Ing. Germán Ricardo Santos Granados

Jurado
Ing. Andrés Humberto Otálora Carmona

Jurado
Ing. Héctor Matamoros Rodríguez

Bogotá, D.C., 6 de febrero de 2018

## Resumen

La Tesis “Modelación numérica de estructuras hidráulicas 3D en Ansys - Fluent caso de estudio Aliviadero el Ejido”, busca aplicar la teoría de la dinámica de fluidos computacional para hacer la simulación del comportamiento del flujo de la estructura hidráulica “aliviadero el Ejido”, Esta estructura está ubicada en la carrera 55 con avenida ferrocarril de la localidad de Puente Aranda de la ciudad de Bogotá, su función principal es derivar parte del caudal de escorrentía pluvial del canal el Ejido hacia el canal comuneros II, que luego hace entrega al canal San Francisco que conduce hasta la disposición final.

Para tal fin, se utilizó información que reposa en archivos de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y datos crudos de medición obtenidos por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, como son los planos topográficos, planos de detalles de la estructura, curvas de caudal y láminas de agua. Con la disponibilidad de estos datos se procedió a dibujar la estructura con todas sus dimensiones, definiendo las estructuras internas delimitadas por la entrada y las salidas. Esto se realizó mediante el software AutoCAD 3D para ser exportado a ANSYS.

Posteriormente se desarrolló un mallado hibrido (estructurado y no estructurado) con el fin de discretizar la geometría en volúmenes de control y mediante el software Ansys poder solucionar las ecuaciones de transporte utilizando la técnica de volúmenes finitos.

Luego se llevó a cabo la simulación numérica bajo condiciones de flujo permanente utilizando el modelo Volumen de Fluido en la superficie libre y el modelo K-e estándar para la turbulencia, se estudió el comportamiento del flujo sobre la estructura de alivio para varios caudales, incluyendo caudales cercanos al evento ocurrido el 8 de noviembre de 2008.

Los resultados obtenidos se contrastaron con los del modelo realizado con el software SewerGEMS en la tesis de maestría en ingeniería civil llamada “Evaluación de estructuras de alivio para alcantarillado combinado”, realizada por el ingeniero Reinaldo Pulido en el año 2012, se identificaron las diferencias, similitudes y en especial el comportamiento

hidráulico aproximado de la estructura ante diferentes escenarios. Finalmente se procedió a evaluar, comparar y concluir acerca del modelo matemático utilizado haciendo un análisis de los resultados obtenidos.

## Contenido


| | pág. |
|---|---|
| ***Introducción*** | ***14*** |
| ***Objetivos*** | ***15*** |
| **Objetivo General** | **15** |
| **Objetivos Específicos** | **15** |
| ***1. Estado del Arte*** | ***17*** |
| **1.1 Dinámica computacional de fluidos (CFD)** | **17** |
| **1.2 Ansys Fluent** | **17** |
| **1.3 Flujo Multifásico** | **18** |
| 1.3.1 Regímenes de flujo multifásico | 18 |
| 1.3.2 Elección de un modelo general multifásico | 19 |
| **1.4 Modelo VOF** | **19** |
| 1.4.1 Limitaciones del modelo VOF | 19 |
| 1.4.2 Cálculos de VOF en estado permanente y no permanente | 20 |
| 1.4.3 Ecuación de fracción de volumen | 21 |
| 1.4.4 Interpolación cerca de la interface | 22 |
| **1.5 Turbulencia** | **24** |
| 1.5.1 Direct Numerical Simulation (DNS) | 26 |
| 1.5.2 Modelo RANS (Reynolds-Average-Navier-Stokes Equation) | 26 |
| **1.6 Condiciones de frontera** | **31** |
| 1.6.1 Condición de frontera entrada y salida | 31 |
| 1.6.2 Condición de frontera de Pared (Wall) | 33 |
| **1.7 Discretización** | **33** |
| 1.7.1 Métodos de volúmenes finitos | 34 |
| ***2. Antecedentes*** | ***35*** |

*3. Metodología* *39*

*4. Detalles de la modelación* *41*

**4.1 Metas de la modelación numérica del aliviadero el Ejido.** **41**

**4.2 Creación de modelo del dominio** **41**

**4.3 Elaboración del mallado** **44**

**4.4 Selección de escenarios de modelación** **49**

**4.5 Sensibilidad del mallado** **50**

**4.6 Configuración del solucionador (Solver)** **53**

4.6.1 Resumen de configuración del solver 54

**4.7 Calibración de la estructura vertedero el Ejido** **58**

**4.7.1 Cálculo de coeficiente de descarga teórico** 60

4.7.4 Comparación de resultados entre modelación numérica y datos medidos 62

4.7.5 Comparación entre la modelación numérica y los datos depurados por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito 67

**4.8 Validación de los resultados y control de convergencia** **67**

4.8.1 Residuales 67

4.8.2 Criterio de conservación de la masa 68

**4.9 Resultados modelación de escenarios mediante Ansys – Fluent** **70**

4.9.1 Residuales 70

4.9.2 Análisis de los campos de velocidad 71

4.9.3 Análisis de líneas de corriente y perfiles de flujo 76

4.9.4 Análisis de la fracción de volumen 78

4.9.5 Análisis de las líneas de corriente (Streamlines) 81

4.9.6 Analisis de presiones (estatica + dinamica) 83

4.9.7 Análisis de los esfuerzos cortantes 87

4.9.8 Análisis del Skin Friction Coefficient 88

*5. Comparación de resultados entre Ansys - Fluent y SewerGEMS* *89*

**5.1 Comparación de los perfiles de la lámina de agua sobre el vertedero** **90**

**5.2 Resumen cuantitativo de los resultados entre los dos modelos matemáticos 92**

**5.3 Análisis de la presurización del sistema en el interceptor comuneros 96**

***6. Conclusiones y Recomendaciones 100***

***Referencias Bibliográficas 105***

## Lista de Tablas

**pág.**

*Tabla 1. Resumen de trabajos con aplicación de la simulación numérica.* 37
*Tabla 2. Metodología modelación numérica 3D* 39
*Tabla 3. Parámetros de mallados realizados para modelaciones (ver figura 4)* 46
*Tabla 4. Características físicas de la estación de trabajo utilizada en la modelación* 47
*Tabla 5. Parámetros de calidad de los mallados utilizados para las simulaciones.* 47
*Tabla 6. Resumen del tiempo computacional para cada una de las simulaciones.* 49
*Tabla 7. Características principales de los escenarios simulados* 50
*Tabla 8. Chequeo de parámetros de calidad del mallado en Ansys-Fluent* 54
*Tabla 9. Configuración del solver en Ansys* 54
*Tabla 10. Configuración de modelo multifase* 54
*Tabla 11. Configuración del modelo de turbulencia* 55
*Tabla 12. Selección de materiales para las fases del modelo* 55
*Tabla 13. Configuración de las condiciones de frontera Q= 6 m3/s* 56
*Tabla 14. Configuración discretización espacial* 57
*Tabla 15. Cálculo de K y Épsilon condición de frontera de entrada Q= 2.7 m3/s,* 57
*Tabla 16. Cálculo de K y Épsilon condición de frontera de entrada Q= 5 m3/s,* 58
*Tabla 17. Resultados coeficientes de descarga C en la calibración de vertederos de la cuenca San Francisco* 58
*Tabla 18. Resultados de altura lámina de agua medida desde la solera del aliviadero y altura de lámina de agua sobre el vertedero frontal.* 61
*Tabla 19. Cálculo teórico de coeficientes de descarga para diferentes caudales con base en ecuación 10.* 61
*Tabla 20. Datos medidos en aguacero con vertimiento para calibración del vertedero el Ejido (ECI, 2009.Subproducto 3.3)* 64
*Tabla 21. Comparación entre datos medidos y datos obtenidos en la modelación numérica de Ansys – Fluent* 65
*Tabla 22. Diferencias de alturas sobre vertedero, entre datos medidos y resultados de simulación.* 66

*Tabla 23. Comparación entre coeficientes de descarga obtenidos en el modelo numérico y la depuración de datos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2009).* 67
*Tabla 24. Resumen de residuos finales obtenidos en las modelaciones al momento de la convergencia.* 71
*Tabla 25. Resumen de los resultados generados en ANSYS y SewerGEMS para un Caudal Q= 9 m3/s* 92
*Tabla 26. Resumen de los resultados generados en Ansys y SewerGEMS para un Caudal Q= 6 m3/s* 93
*Tabla 27. Resumen de los resultados generados en ANSYS y SewerGEMS para un Caudal Q= 5 m3/s* 94
*Tabla 28. Resumen de los resultados generados en ANSYS y SewerGEMS para un Caudal Q= 6 m3/s* 95
*Tabla 29. Resumen de los resultados generados en ANSYS y SewerGEMS para un Caudal Q= 6 m3/s* 98

## Lista de Figuras

**pág.**

*Figura 1. Planta General Aliviadero el Ejido.* 42
*Figura 2. Perfil Aliviadero el Ejido.* 42
*Figura 3. Geometría general el formato CAD.* 44
*Figura 4. Mallados utilizados en la simulación del flujo para la estructura de estudio* 45
*Figura 5. Mallado 1, hibrido (tetraédrico y hexaédrico). Seleccionado para realizar las simulaciones para diferentes caudales.* 46
*Figura 6. Cálculo de la relación de aspecto en una celda* 48
*Figura 7. Puntos de control para evaluación de la sensibilidad del mallado.* 51
*Figura 8. Fracción de volumen, en puntos de control para mallado1 y mallado 2(ver tabla 5)* 51
*Figura 9. Fracción de volumen, en puntos de control para mallado3 y mallado 4(ver tabla 5)* 51
*Figura 10. Evaluación de calidad del mallado para fracción de volumen de 100%* 52
*Figura 11. Evaluación de calidad del mallado para fracción de volumen de 50%* 52
*Figura 12. Evaluación de calidad del mallado para fracción de volumen de 0%-fase aire* 53
*Figura 13. Condiciones de frontera (plano).* 56
*Figura 14. Medición de la fracción de volumen mediante Ansys (plano frontal).* 60
*Figura 15. Hidrograma de aguacero con vertimiento para calibración de vertedero.* 64
*Figura 16. Gráfico de comparación de coeficientes de descarga (calibración vs modelación)* 65
*Figura 17. Criterio de convergencia de los residuos (solución exacta vs solución aproximada).* 68
*Figura 18. Gráfico de convergencia de la conservación del flujo másico.* 69
*Figura 19. Gráfico de convergencia residuos para Q= 9m3/s.* 70
*Figura 20. Plano de análisis del campo de velocidades en la pantalla, vertedero y cámara de alivio.* 72
*Figura 21. Vectores de velocidad en plano longitudinal – para caudales simulados* 73
*Figura 22. Vórtices de fluido con flujo en dirección contraria y recirculación al golpear el muro del vertedero.* 74

*Figura 23. Plano longitudinal por eje de tubería principal (Interceptor)* 74
*Figura 24. Contornos y vectores de velocidad en el plano central de la tubería de salida principal (Interceptor).* 75
*Figura 25. Perfiles de flujo interceptor y box culvert para Q= 9 m3/s.* 76
*Figura 26. Perfiles de flujo interceptor y box culvert para Q= 6 m3/s.* 76
*Figura 27. Perfiles de flujo interceptor y box culvert para Q= 5 m3/s.* 77
*Figura 28. Perfiles de flujo interceptor y box culvert para Q= 4 m3/s.* 77
*Figura 29. Perfil de velocidades en el eje del box culvert.* 78
*Figura 30. Perfiles de fracción de volumen para Q = 9 m3/s aguas arriba del vertedero.* 79
*Figura 31. Perfiles de fracción de volumen para Q= 6 m3/s aguas arriba del vertedero.* 79
*Figura 32. Perfiles de fracción de volumen para Q= 5 m3/S aguas arriba del vertedero.* 79
*Figura 33. Fracción de volumen en fases para diferentes caudales.* 80
*Figura 34. Contornos de fracción de volumen en un plano central.* 81
*Figura 35. Líneas de corriente del fluido en el aliviadero vista lateral.* 82
*Figura 36. Líneas de corriente en el aliviadero vista superior Q= 9m3/s.* 83
*Figura 37. Distribución estática de presiones para Q= 9 m3/s.* 84
*Figura 38. Comportamiento de la presión estática en siete puntos de control, para los caudales modelados.* 85
*Figura 39. Contornos de presión dinámica después del vertedero.* 85
*Figura 40. Contornos de presión total en aliviadero.* 86
*Figura 41. Distribución de esfuerzos cortantes en paredes.* 87
*Figura 42. Distribución de esfuerzos cortantes en la tubería principal.* 87
*Figura 43. Plano de análisis del coeficiente de fricción* 88
*Figura 44. Topología del modelo en SewerGEMS modelación 2D.* 89
*Figura 45. Perfiles de flujo en Ansys vs SewerGEMS para diferentes caudales.* 90
*Figura 46. Perfiles de flujo SewerGEMS vs Ansys Q= 5 m3/s y Q= 4 m3/s* 91
*Figura 47. Curva de Gasto colector comuneros II* 97
*Figura 48. Curva de gasto (nivel vs Caudal) colector comuneros II* 97
*Figura 49. Gráfico curva de gasto (Tesis Reinaldo P vs modelación Ansys)* 98

## Lista de Ecuaciones

**pág.**

*Ecuación 1. Ecuación de fracción de volumen* *21*
*Ecuación 2. Viscosidad turbulenta para el modelo K-ϵ* *28*
*Ecuación 3. Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta por unidad de tiempo* *28*
*Ecuación 4. Esfuerzos de Reynolds a partir de la ecuación de Boussinesq* *28*
*Ecuación 5. Ecuación de transporte para k en el modelo de turbulencia estándar* *29*
*Ecuación 6. Ecuación de transporte para ε en el modelo de turbulencia estándar* *29*
*Ecuación 7. Energía cinética turbulenta* *32*
*Ecuación 8. Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta* *32*
*Ecuación 9. Ley del muro para flujos turbulentos* *33*
*Ecuación 10. Ecuación general para cálculo de coeficiente de descarga Cd para vertederos rectangulares sin contracciones* *59*

# Introducción

Los aliviaderos son estructuras hidráulicas cuya función principal es la de separar el caudal combinado de aguas residuales y aguas lluvias, permitiendo que el caudal de aguas residuales de tiempo seco continúe por las tuberías y no se desvíe hacia los cuerpos de agua como las quebradas, ríos o canales. Los objetivos principales de la construcción de aliviaderos son la reducción de costos de conducción de las aguas combinadas hasta la entrega final, reflejada con la reducción de los diámetros de tuberías, menores costos operacionales y evitar la sobrecarga hidráulica de los sistemas de alcantarillado. La construcción de aliviaderos es muy benéfica para el medio ambiente, permitiendo el saneamiento de los cuerpos de agua, minimizando el primer lavado durante la lluvia, evitando conducir los sólidos del agua aliviada al sistema sanitario, y reteniendo grasas y sólidos.

En tal sentido, el aspecto más desfavorable de las estructuras de alivio es el constante mantenimiento. En el caso de no dimensionarse correctamente puede alterar el comportamiento hidráulico del sistema sanitario llevando a generar impactos ambientales considerables, con la contaminación de las fuentes receptoras o los drenajes naturales.

Hoy día en Colombia se desarrollan proyectos de consultoría de estructuras hidráulicas basándose todavía en relaciones empíricas, donde la evaluación del comportamiento es muy limitada, ya sea por los costos de realizar modelos físicos o por la falta de implementación de modelaciones numéricas más precisas, tal como el software de modelación Ansys - Fluent. Los modelos numéricos en 3D pueden proporcionar resultados detallados de carácter cualitativo y cuantitativo de cada una de las variables de interés, permitiendo así un gran aporte para el diseño, análisis o evaluación del flujo en obras de infraestructura hidráulica.

El presente trabajo busca aplicar la modelación numérica en una estructura hidráulica específica como es el aliviadero el Ejido, aplicando la teoría de la mecánica de fluidos computacional mediante el modelo matemático Ansys - Fluent, con el fin de evaluar el comportamiento hidráulico de la estructura ante varios escenarios, analizando las ventajas y limitaciones

# Objetivos

## Objetivo General

✓ Modelación y evaluación del comportamiento del flujo en el aliviadero el Ejido, utilizando el software de simulación ANSYS - Fluent.

## Objetivos Específicos

✓ Realizar un análisis de sensibilidad de las mallas por medio de la modelación y análisis del comportamiento del flujo para cada uno de los mallados realizados.

✓ Analizar las ventajas y desventajas del software Ansys - Fluent en la modelación numérica 3D en estructuras de alivio.

✓ Comparar los resultados de una modelación 3D de Ansys - Fluent y una modelación 2D de SewerGEMS realizada para la misma estructura de estudio.

✓ Modelación computacional y análisis de los vectores de velocidad, de las líneas de corriente y contornos de presión, del comportamiento del fluido en los elementos del aliviadero el Ejido.

✓ Estudiar y analizar los efectos de una tormenta ocurrida el 8 de noviembre de 2008 en el aliviadero, utilizando la mecánica de fluidos computacional y con los resultados obtenidos, verificar cuáles fueron las variables más susceptibles al evento.

✓ Utilizar una herramienta moderna e indispensable para el ejercicio de la ingeniería hidráulica, como es el código comercial Ansys - Fluent.

✓ Discutir los resultados de las modelaciones en la estructura analizada y establecer recomendaciones en la planificación, diseño y construcción de obras hidráulicas tipo aliviadero

## Organización del documento

**Capítulo 1. Estado del arte:** en este capítulo se definen los conceptos básicos y el marco teórico que son necesarios para poder aplicar la teoría de la dinámica computacional de fluidos en las modelaciones numéricas, conceptos básicos del modelo comercial Ansys - Fluent, los modelos de turbulencia, las condiciones de frontera y los diferentes esquemas de discretización utilizados en la modelación.

**Capítulo 2. Antecedentes:** se presenta la información referente a la modelación numérica realizada para la misma estructura, su historia y el desempeño hidráulico frente a diversos eventos.

**Capítulo 3. Metodología:** se describen los pasos y métodos empleados para poder realizar la simulación del comportamiento del fluido en un aliviadero con vertedero frontal utilizando las herramientas de la dinámica de fluidos computacional, empleando el software Ansys - Fluent.

**Capítulo 4. Modelación numérica**: Son presentados los esquemas numéricos, ajustes de discretización, la configuración de las condiciones de frontera en las entradas y salidas, los factores de relajación y el procedimiento llevado a cabo en el software Ansys - Fluent para poder realizar la simulación.

**Capítulo 5. Resultados de la Modelación:** se muestran los resultados de la simulación numérica, comparados con los datos obtenidos en la tesis “Evaluación de estructuras de alivio para alcantarillado combinado” presentado por el ingeniero Reinaldo Pulido en el año 2012. Adicionalmente, se comparan los resultados del comportamiento de la velocidad, láminas de agua y caudal, además se analiza el campo de vectores de velocidad, contornos de velocidad, presión, energía cinética turbulenta y tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, para diferentes grados de refinamiento de las mallas y los diferentes modelos caudales.

**Capítulo 6. Conclusiones:** con base en los resultados se concluye y se presentan las recomendaciones para modelaciones de estructuras hidráulicas tipo aliviadero.

# 1. Estado del Arte

## 1.1 Dinámica computacional de fluidos (CFD)

Se refiere al análisis de sistemas que involucran el flujo de fluidos, la transferencia de calor o fenómenos asociados a estos mediante el uso de simulaciones desarrolladas por computador (Versteeg, 2007). Se ha demostrado que es de gran utilidad para el desarrollo de la ingeniería, dentro de sus numerosas aplicaciones están el diseño de componentes de uso aeroespacial, náutico, aeronáutico y terrestre; el estudio de fenómenos tales como la cavitación, la turbulencia, la combustión y los procesos químicos de mezclado entre otros. En la dinámica computacional de fluidos se utilizan los datos experimentales para la validación de soluciones, obteniendo detalles de los campos del flujo. En los flujos laminares se puede manejar con facilidad simulaciones con buenos resultados, mientras que en los flujos turbulentos es necesario recurrir a los modelos de turbulencia.

Por desgracia, ningún modelo de turbulencia es universal, y una solución de la CFD de flujo turbulento es tan buena dependiendo qué tan apropiado es el modelo de turbulencia aplicado. Pese a esta limitación, los modelos de turbulencia estándares producen resultados razonables para muchos problemas de ingeniería prácticos (Cengel & Cimbala, 2006,p.818)

## 1.2 Ansys Fluent

Fluent ofrece capacidades completas de modelado para una amplia gama de problemas de flujo en fluidos incompresibles y compresibles, laminares y turbulentos. Pueden realizarse análisis de estado permanente o no permanente. En Fluent se combina una amplia gama de modelos matemáticos para fenómenos de transporte con la capacidad de modelar geometrías complejas.

Otro grupo muy útil de modelos en Ansys - Fluent es el conjunto de modelos de flujo superficial y multifásico. Estos pueden usarse para el análisis de flujos gas-líquido, gas-sólido, líquido-sólido, y gas-líquido-sólido. Para estos tipos de problemas, Ansys - Fluent proporciona las siguientes alternativas: volumen de fluido (VOF), mezcla y modelos Eulerianos, así como el modelo de fase discreta (DPM); El DPM realiza cálculos de

trayectoria lagrangiana para fases dispersas (partículas, gotitas o burbujas), incluyendo el acoplamiento con la fase continua. Ejemplos de flujos multifase son flujos en canales, aerosoles, sedimentación, separación y cavitación.

## 1.3 Flujo Multifásico

Se presenta cuando hay interacción de 2 o más fluidos en el dominio de estudio, como es el caso de sistemas de alcantarillados y estructuras de alivio, pues están diseñados para trabajar parcialmente llenos, generalmente con relaciones de llenado inferiores al 75%. En estos casos se presenta la interacción de flujo de aire y flujo de agua tanto en las tuberías de entrada como en las de salida, además de las cámaras que comprenden el sistema. La interface se encuentra perfectamente definida y se conoce como flujo a superficie libre. El estudio de flujos multifásicos se puede realizar mediante varios modelos matemáticos, para flujos a superficie libre el más utilizado es el modelo (E-E) Euleriano-Euleriano (Baker, 2002) y permite lo siguiente:

- ✓ Mezcla y separación de fases
- ✓ Resuelve las ecuaciones de cantidad de movimiento, continuidad y energía para cada una de las fases y realiza un seguimiento de la fracción del volumen de cada una de las fases.
- ✓ Utiliza un único campo de presión para todas las fases
- ✓ Permite transferencia de calor y masa entre las fases
- ✓ Permite resolver las ecuaciones de turbulencia para cada fase.

### 1.3.1 Regímenes de flujo multifásico

Los regímenes de flujo multifásico pueden agruparse en cuatro categorías:

- ✓ Flujos de gas-líquido o líquido-líquido
- ✓ Flujos de gas-sólido
- ✓ Flujos líquido-sólidos
- ✓ Flujos trifásicos.

### 1.3.2 Elección de un modelo general multifásico

El primer paso para resolver cualquier problema multifásico es determinar cuál de los regímenes descritos representa mejor su flujo.

## 1.4 Modelo VOF

El modelo VOF puede modelar dos o más fluidos inmiscibles resolviendo un solo conjunto de ecuaciones de momento y rastreando la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio. Las aplicaciones típicas incluyen la predicción de la disolución del chorro, el movimiento de grandes burbujas en un líquido, el movimiento del líquido después de una ruptura de la presa y el seguimiento constante o transitorio de cualquier interfaz líquido-gas.

### 1.4.1 Limitaciones del modelo VOF

Las siguientes limitaciones se aplican al modelo VOF en Ansys - Fluent:

- ✓ Debe utilizar el solucionador basado en presión. El modelo VOF no está disponible con el solucionador basado en densidad.

- ✓ Todos los volúmenes de control deben llenarse con una sola fase de fluido o una combinación de fases. El modelo VOF no permite regiones vacías en las que no existe ningún fluido de ningún tipo.

- ✓ No hay limitación en el uso de líquidos compresibles usando funciones definidas por el usuario.

- ✓ No se puede modelar el flujo periódico en la dirección de la corriente principal (ya sea el caudal másico especificado o la caída de presión especificada) cuando se utiliza el modelo VOF. (Ansys Fluent Theory Guide)

### 1.4.2 Cálculos de VOF en estado permanente y no permanente

La formulación de VOF se utiliza generalmente para calcular una solución dependiente del tiempo, pero es posible realizar cálculos para los problemas en los que sólo interesa una solución en estado permanente, Un cálculo de VOF en estado permanente sólo es sensato cuando su solución es independiente de las condiciones iniciales y hay condiciones de frontera en la entrada diferentes para las fases individuales. Por ejemplo, puesto que la forma de la superficie libre dentro de una copa giratoria depende del nivel inicial del fluido, tal problema debe resolverse usando la formulación dependiente del tiempo. Por otra parte, el flujo de agua en un canal con una región de aire en la parte superior y una entrada de aire separada se puede resolver con la formulación en estado permanente.

La formulación VOF se basa en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no se interpenetran. Para cada fase adicional que se agrega a su modelo, se introduce una variable: la fracción de volumen de la fase en la celda computacional. En cada volumen de control, las fracciones de volumen de todas las fases deben sumar la unidad. Los campos para todas las variables y propiedades son compartidos por las fases y representan valores promediados en el volumen, siempre y cuando la fracción de volumen de cada una de las fases se conozca en cada ubicación. De este modo, las variables y propiedades en cualquier celda dada son puramente representativas de una de las fases, o representativas de una mezcla de las fases, dependiendo de los valores de la fracción volumétrica. En otras palabras, si la $q^{th}$ fracción de volumen del fluido en la celda se denomina como, entonces son posibles las siguientes tres condiciones:

- ✓ $\alpha_q = 0$*: La celda está vacía ($q^{th}$ del fluido).*
- ✓ $\alpha_q = 1$*: La celda está llena ($q^{th}$ del fluido).*
- ✓ $0 < \alpha_q < 1$*: La celda contiene la interfaz entre el $q^{th}$ fluido y uno o más fluidos.*

Con base en el valor local de $\alpha_q$ las propiedades y variables son asignadas a cada volumen de control.

### 1.4.3 Ecuación de fracción de volumen

El seguimiento de la interfaz o interfaces entre las fases se logra mediante la solución de una ecuación de continuidad para la fracción volumétrica de una (o más) de las fases. Para la fase, esta ecuación tiene la siguiente forma:

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial_t}\left(\alpha_q\rho_q\right) + \nabla\,.\left(\alpha_q\rho_q\overrightarrow{V_q}\right) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^{n}\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}\right]$$

**Ecuación 1. Ecuación de fracción de volumen**

Donde $\dot{m}_{qp}$ es la transferencia de masa de fase *q* a la fase *p*. y $\dot{m}_{pq}$ es la transferencia de masa de la fase *p* a la fase *q*. Por defecto, el término fuente en el lado derecho de la ecuación, $S_{\propto q}$ es cero, pero puede especificar una fuente de masa constante o definida por el usuario para cada fase la cual representa la masa generada.

La fracción de volumen de fase primaria se calcula con base en la siguiente restricción:

$$\sum_{q=1}^{n} \propto_q = 1$$

La ecuación de la fracción volumétrica puede resolverse mediante una formulación temporal implícita o explícita. (ANSYS, Inc., 2013)

#### *1.4.3.1 Esquema Implícito*

Para la discretización implícita están disponibles los esquemas de First Order Upwind, Second Orden Upwind, Compressive, HRIC Modificado.

Siendo uno más preciso que el otro. Pero es necesario aclarar, que a medida aumenta la precisión del modelo, aumenta considerablemente, el costo computacional. En este esquema se requiere la fracción de volumen en el paso del tiempo actual, por lo que las ecuaciones deben resolverse en forma iterativa.

#### *1.4.3.2 Esquemas Explícitos*

En los esquemas explícitos, las fracciones de volúmenes se calculan con base en el paso de tiempo anterior y por tanto no requieren iteraciones.

Los flujos de cara pueden ser interpolados utilizando esquemas de seguimiento o captura de interfaz tales como Geo-Reconstrucción, CICSAM, Compresión y HRIC modificado.

Ansys - Fluent refina automáticamente el paso del tiempo para la integración de la ecuación de la fracción de volumen, pero puede influir en este cálculo del paso de tiempo modificando el número de Courant. Puede elegir actualizar la fracción de volumen una vez para cada paso de tiempo, o una vez para cada iteración dentro de cada paso de tiempo.

Importante: Cuando se utiliza el esquema explícito, se debe calcular una solución dependiente del tiempo

### 1.4.4 Interpolación cerca de la interface

La interpolación es un proceso por el cual se define un valor en un punto cualquiera a partir de los valores conocidos en algunos puntos dados.
La formulación de volumen de control requiere que los flujos de convección y difusión a través de las caras de volumen de control sean computados y se balanceen con los términos de fuente dentro del propio volumen de control.

El esquema explícito y el esquema implícito tratan a estas celdas con la misma

interpolación que las celdas que están completamente llenas con una fase u otra (es decir, usando el método estándar de contra-viento (First-Order Upwind Scheme), de segundo orden, QUICK, HRIC modificado, compresión (Esquema compresivo y variantes basadas en modelos de Interfaz), o esquema CICSAM (Esquema de captura de interfaz compresiva para mallas arbitrarias)

#### *1.4.4.1* Esquema regresivo en espacio de Primer Orden (Upwind)

Para obtener una precisión a partir de un esquema de primer orden, las cantidades en las caras de las celdas se determinan asumiendo que los valores de centro de celda de cualquier variable de campo representan un valor promedio de celda y se mantienen a lo largo de toda la celda; Las cantidades de cara son idénticas a las cantidades de celdas. Por lo tanto, cuando se selecciona el esquema upwind de primer orden, el valor de cara se establece igual al valor de centro de celda en la ascendente.

Importante: el esquema contra el viento de primer orden está disponible en los modelos basados en la presión y en la densidad.

#### *1.4.4.2* Esquema del Upwind de segundo orden

Cuando se desea precisión de segundo orden, las cantidades en las caras de las celdas se calculan utilizando un enfoque de reconstrucción lineal multidimensional. En este enfoque, se consigue una precisión de orden superior en las caras de las celdas a través de una expansión en series de Taylor alrededor del centroide de celdas.
Importante: El esquema Upwind de segundo orden está disponible en los solucionadores basados en la presión y en la densidad.

#### *1.4.4.3* Esquema Quick

Para las mallas cuadriláteras y hexaédricas, donde se pueden identificar caras y celdas únicas ascendentes y descendientes, Ansys - Fluent también proporciona el esquema QUICK (por las siglas en inglés Quadratic Upstream interpolation for convective Kinetics) para calcular un valor de orden superior de la variable en una cara. Los esquemas de tipo QUICK se basan en un promedio ponderado de las interpolaciones de segundo orden de la variable.

Importante: el esquema QUICK está disponible en el solver a base de presión y cuando se resuelven ecuaciones escalares adicionales en el solver basado en densidad.

#### *1.4.4.4* Esquema HRIC modificado

Para las simulaciones que usan el modelo multifásico VOF, los esquemas de Upwind son generalmente inadecuados para el seguimiento de la interfaz debido a su carácter excesivamente difusivo. Los esquemas centrales de diferenciación, aunque generalmente son capaces de retener la nitidez de la interfaz, no tienen límites y suelen dar resultados no físicos. Con el fin de superar estas deficiencias, Ansys - Fluent utiliza una versión modificada del esquema de captura de interfaz de alta resolución (HRIC). El esquema de HRIC modificado es un esquema de **NVD** compuesto que consiste en una mezcla no lineal de diferenciación de upwind y downwind.

## 1.5 Turbulencia

La mayoría de los flujos de interés como lo son los flujos atmosféricos, ríos, canales, flujos en conductos, turbo maquinarias, intercambio de calor, aerodinámica etc. La turbulencia modifica significativamente parámetros como la resistencia, fricción, la transmisión de calor, o la capacidad de mezcla.

Actualmente no es posible la resolución exacta de las ecuaciones, sin embargo, con el avance tecnológico y en especial de los ordenadores y el desarrollo de algoritmos matemáticos ha surgido la resolución numérica de algunos flujos dando lugar a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

En tal sentido, la resolución de las ecuaciones de Navier Stokes o DNS (Direct Numerical Solutions) es la manera más precisas de predecir un flujo turbulento, pues se resuelven todas las escalas temporales y espaciales del flujo turbulento sin promediados o aproximaciones; los errores previenen de las discretizaciones numéricas. Sin embargo para geometrías complejas los tiempos de cálculo necesarios hacen imposible la solución con los computadores actuales.

El tipo de aproximaciones que con frecuencia se utiliza en ingeniería para predecir los flujos turbulentos son los basados en métodos estadísticos para su estudio. Surgen así los modelos basados en los promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier Stokes o modelos RANS.

Por otra parte, la turbulencia es tridimensional, dependiente del tiempo y una gran cantidad de información que es necesaria para resolver la mecánica del movimiento en un flujo con características turbulentas (Celik, 1999). Debido a que estas fluctuaciones pueden ser demasiado pequeñas y de alta frecuencia, modelarlas por métodos numéricos directamente representa un costo computacional muy alto. Para reducir la carga de procesamiento se diseñaron modelos, los cuales eliminan las escalas más pequeñas mediante un promedio basado en tiempo o en un conjunto de variables, esto da ecuaciones menos exigentes para el proceso, pero con mayor número de variables para las cuales se deben formular con más ecuaciones y encontrar el valor de las incógnitas (Ansys Inc., 2013)

Ansys ofrece las siguientes alternativas respecto a los modelos de turbulencia

- ✓ Spallart – Allmaras
- ✓ K - ε en sus variables RNG, Realizable y Standard
- ✓ K - ω en sus variables Standard, y SST
- ✓ Transition SST
- ✓ K - kl - ω
- ✓ Reynolds Stress
- ✓ SAS
- ✓ DES
- ✓ LES

### 1.5.1 Direct Numerical Simulation (DNS)

Es el modelo numérico de resolución completo de las ecuaciones de Navier – Stokes de todas las características de la turbulencia en cualquier espacio y tiempo (Menter, 2011). Es así, que los flujos turbulentos poseen características de escala, de cuan grandes pueden ser las fluctuaciones generadas y según Pope (2000) las escalas de la turbulencia en un flujo libre, aumentan proporcional al número de Reynolds. Por su parte, Menter (2011), expone que el modelo DNS debe ser aplicado en geometrías muy simples y a bajos números de Reynolds, ya que para aplicaciones de ingeniería no podrán ser obtenidas soluciones numéricas de turbulencia en escalas con números relativos a $Re^3$ y números de Reynolds entre $10^4$ y $10^9$

### 1.5.2 Modelo RANS (Reynolds-Average-Navier-Stokes Equation)

En general, los estudios de ingeniería están más interesados en los efectos del flujo promedio que en sus fluctuaciones, por lo que se adopta una aproximación estadística, estas aproximaciones se basan en las ecuaciones de conservación durante un periodo de tiempo mucho mayor que el periodo característico de las fluctuaciones turbulentas. (Time-averaging).

Los modelos derivados de los modelos RANS consisten en el principio establecido por Reynolds en 1985, en el cual todas las cantidades son expresadas como la suma de las partes individuales. Esta formulación permite crear un promedio de las variables con respecto al tiempo (Wilcox, 1993). Este proceso de promediar las ecuaciones se deriva en ventajas y desventajas con respecto al análisis de los fluidos, una de las primeras desventajas que salto a la vista, es que en este proceso se eliminan los cambios propios de la turbulencia. Por otro lado, la gran ventaja que adquieren los modelos bajo esta formulación es la facilidad para realizar gran variedad de procesos en cualquier computador (Menter, 2011).

#### *1.5.2.1 Spallart-Allmaras*

El modelo Spallart-Allmaras es un modelo de turbulencia de una ecuación, principalmente diseñado para análisis de perfiles aerodinámicos en flujo subsónico. Es acertado en fluidos cercanos a las paredes y ha sido probado como un buen modelo para capas límite con gradientes de presión adversos (Ansys Inc., 2013).

#### *1.5.2.2 Modelo K-ϵ estándar*

Este modelo de turbulencia permite introducir efectos tales como el transporte de propiedades de turbulencia por convección y difusión, la generación y destrucción de la misma, razón por la cual es el modelo más validado en la actualidad y presenta muy buen desempeño en la modelación de estructuras hidráulicas. (H. K. Versteeg, 2007). El modelo k-ε se enfoca en los mecanismos que afectan la energía cinética turbulenta k, a través de dos ecuaciones diferenciales parciales que modelan el transporte de k y la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta ε. El análisis matemático que lleva al desarrollo de las dos ecuaciones para k y ε parte de la suposición que la energía cinética del flujo dada por $K_c=K+k$, donde K corresponde a la energía cinética promedio, definida por

$\boldsymbol{K} = \frac{1}{2}$**(U²⁺V²+W²)** y k corresponde a la energía cinética turbulenta, puede expresarse matemáticamente a partir de las ecuaciones RANS y de las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes.

El modelo RANS emplea la energía cinética turbulenta *K* y la tasa de disipación de le energía cinética turbulenta **ϵ** donde:

La viscosidad turbulenta está dada por

$$\mu_t = \rho . C_\mu \left( + \frac{k}{\epsilon} \right)$$

**Ecuación 2. Viscosidad turbulenta para el modelo K-ϵ**

Dónde:

$\mu_t$ = Viscosidad Turbulenta

$C_\mu$= Constante del modelo

*K* = Energía Cinética Turbulenta

*K* $= \frac{1}{2}\left(u^2 + v^2 + w^2\right)$

**ϵ** =Tasa de disipación de energía cinética turbulenta por unidad de tiempo.

$$\epsilon = \frac{\mu_t}{\rho} \left( \frac{dU_i}{dU_j} \right)^2 ; i, j = 1,2,3$$

**Ecuación 3. Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta por unidad de tiempo**

Los esfuerzos de Reynolds se calculan con base en la expresión de Boussinesq Así,

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

**Ecuación 4. Esfuerzos de Reynolds a partir de la ecuación de Boussinesq**

Las ecuaciones de transporte para k y ϵ se presentan así:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla.(\rho k U) = \nabla.\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k}\,\nabla k\right] + 2\mu_t s_{ij.} s_{ij} - \rho\varepsilon$$

(I) (II) (III) (IV) (V)

**Ecuación 5. Ecuación de transporte para *k* en el modelo de turbulencia estándar**

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial_t} + \nabla.(\rho\varepsilon U) = \nabla.\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\,\nabla\varepsilon\right] + C_{1\varepsilon}\,\frac{\varepsilon}{k}2\,\mu_t S_{ij}\,.\,S_{ij} - C_{2\varepsilon}\,\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$$

(I) (II) (III) (IV) (V)

**Ecuación 6. Ecuación de transporte para *ε* en el modelo de turbulencia estándar**

Donde*:*

- ✓ El termino (I) en ambas ecuaciones corresponde a las tasas de cambio de *k* o de ϵ.

- ✓ el término (II) corresponde al transporte de k o ε por el fenómeno de convección.

- ✓ el término (III) corresponde al transporte de k o ε por difusión.

- ✓ (IV) es la tasa de producción de k o ε

- ✓ (V) es la tasa de destrucción de k o ε. $C\mu$, $\sigma_k$ , $\sigma_\varepsilon$, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$constantes ajustables.

Los valores experimentales que mejor se adaptan a una amplia gama de flujos turbulentos son:

$C_\mu$=0.09 $\sigma_k$=1.00, $\sigma_\varepsilon$=1.30, $C_{1\varepsilon}$=1.44 y $C_{2\varepsilon}$=1.92

#### *1.5.2.3 RNG k- ε*

El modelo cuenta con ecuaciones adicionales las cuales se desarrollan para darle características al modelo, éstas son superiores a las de su modelo estándar, por lo que se tiene la ecuación de modificación del efecto de ondas fluctuantes en la turbulencia y ecuación del término Re. (Ansys Inc., 2013). Debido a las características de aumento de ε reduciendo k y además la efectividad viscosa el modelo resulta ser más certero en la evaluación de flujos deformados y de líneas de corriente curvadas (Ansys Inc., 2013).

#### *1.5.2.4 Realizable k-ε*

Las principales diferencias entre este modelo y su modelo original radican en primer lugar, en que este modelo contiene una formulación distinta para analizar la viscosidad turbulenta, y en segundo lugar, para hallar la disipación de ε, el modelo ha formulado una derivación de la raíz de la fluctuación en la vorticidad (Ansys Inc., 2013). Al igual que en el modelo standard la ecuación que está regida bajo k, es igual en este modelo, sin embargo, la ecuación de ε es diferente y no tiene en cuenta la producción de k (Ansys Inc., 2013). Dentro de las ventajas de este modelo se tiene que, es especialmente preciso en flujos planos, capas límite bajo gradientes de presión extremos o separación de la misma, rotación, recirculación, y una alta curvatura de las líneas de corriente (Karthik, 2011).

#### *1.5.2.5 Standard k-ω*

Resulta ser un modelo un poco más simplificado que el k-ε en términos de la ecuación de k. Se establece una ecuación de transporte para ω y se incluyen modificaciones para análisis en bajo número Reynolds, efectos de

compresibilidad y flujo cortante. En este modelo encontramos la variable ω la cual representa la tasa específica de disipación de la turbulencia (Ansys Inc., 2013).

## 1.6 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera deben reflejar las condiciones reales del flujo. Para la modelación se empleó una formulación en régimen permanente y no permanente, y para la representación del flujo multifásico se escogió el modelo Volumen de Fluido (VOF). En el modelo basado en la formulación euleriana-euleriana para la simulación de flujos dispersos, se resuelven ecuaciones diferenciales de conservación de la masa y cantidad de movimiento en la fase dispersa. El modelo de VOF, se centra en la interface de los componentes del sistema y ésta se modela utilizando volúmenes finitos para solucionar numéricamente el modelo. Está diseñado para dos o más fluidos inmiscibles donde la posición de la interface entre los fluidos es de interés. En el VOF se utiliza un solo conjunto de ecuaciones de momento para ambos fluidos y la fracción de volumen de cada uno de los mismos, en cada celda computacional, es seguida por todo el dominio. Por estas razones resulta conveniente esta formulación para la modelación del aliviadero con vertedero transversal.

### 1.6.1 Condición de frontera entrada y salida

Se deben definir las condiciones de entrada y de salida del flujo tanto del flujo másico o caudal, velocidad o de la presión. Los más utilizados en Ansys - Fluent son los siguientes:

- ✓ Entrada de Presión (Pressure inlet): se emplea para definir la presión en las entradas de flujo.

- ✓ Entrada de flujo másico (Mass flow inlet): describe la tasa de flujo de masa en una entrada. en los flujos incompresibles, cuando la densidad es constante, la condición de frontera velocity inlet es equivalente a especificar flujo másico a la

entrada.

✓ Salida de presión (pressure outlet): define la presión estática en los puntos de flujo. El uso de una condición salida de presión en vez de una condición salida a presión atmosférica a menudo resulta en una mejor tasa de convergencia cuando el ocurre reflujo durante la iteración

✓ Salida (outflow): es empleado en las salidas de flujo cuando los detalles de la velocidad del flujo y la presión no se conocen antes de la solución del problema de flujo. Cuando el flujo de salida está cerca de una condición completamente desarrollada, como la condición de frontera salida, se puede especificar que el gradiente es cero en la dirección del flujo.

✓ Si se utiliza un modelo de turbulencia se requiere suministrar los valores de energía cinética turbulenta K y la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta en la entrada. Estos valores se pueden aproximar mediante las siguientes ecuaciones.

$$K = \frac{3}{2}(U * I)^2$$

**Ecuación 7. Energía cinética turbulenta**

Y

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{K^{2/3}}{l}$$

**Ecuación 8. Tasa de disipación de la energía cinética turbulenta**

Donde:

*U* = Velocidad media

*I* = Intensidad Turbulenta

*l* = tamaño de los remolinos *l* = 0.07 *L*

$C\mu^{3/4}$ = constante empírica = 0.1643

*L* = Longitud de referencia, en nuestro caso puede considerarse como el radio hidráulico del canal

### 1.6.2 Condición de frontera de Pared (Wall)

Esta condición toma el nombre de no penetración, donde los componentes tangenciales y normales a la velocidad son nulos. Esta situación sirve para confinar el flujo. En los flujos turbulentos, los cuales son afectados significativamente por la presencia de paredes, es así que el modelo de turbulencia K-ϵ es válido fuera de las paredes, por lo que se requiere un tratamiento especial para que sean válidos cerca de las mismas.

Ahora bien, para flujos turbulentos los sectores cercanos a los muros solidos se encuentran influenciados por efectos viscosos y no por los parámetros del flujo a superficie libre. La velocidad media estará determinada por la distancia Y normal al muro y la densidad del fluido ρ, la viscosidad μ y el esfuerzo cortante $\tau_w$. A través de un análisis dimensional se obtiene la ecuación:

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = f\left(\frac{\rho * u_\tau * y}{\mu}\right) = f(y^+)$$

**Ecuación 9. Ley del muro para flujos turbulentos**

Donde,

$u_\tau$ : Es la velocidad de fricción = $(\tau w \rho)^2$

U: Velocidad media en el punto

$u^+$ $y$ $y^+$: Grupos adimensionales

*y*: Distancia normal a partir del contorno sólido

*μ*: Viscosidad del fluido

$\tau_w$: Esfuerzo cortante en el muro

## 1.7 Discretización

Ansys - Fluent utiliza una técnica basada en volúmenes finitos para convertir las ecuaciones de transporte descritas anteriormente, en un sistema de ecuaciones algebraicas que puedan ser resueltas numéricamente. Estas técnicas consisten en la

integración de la ecuación de transporte de cada volumen de control elemental (celda), obteniéndose una ecuación discreta, que exprese la ley de conservación.

### 1.7.1 Métodos de volúmenes finitos

Utilizan la formulación integral de las ecuaciones. El dominio se divide en volúmenes de control en los cuales se aplican las ecuaciones integrales que son aproximadas mediante cuadraturas. En este caso los nodos residen en el centroide del volumen y se interpolan para obtener sus valores en las caras de dichos volúmenes. Se pueden usar cómodamente en todo tipo de mallas, tanto estructuradas como no estructuradas. Entre sus desventajas está la dificultad de obtener esquemas de alto orden, sobre todo en 3D, debido a que requieren tres niveles de aproximación: interpolación, diferenciación e integración. Es el método utilizado por la mayoría de software CFD (Ansys - Fluent, STAR CCM+, OPENFOAM etc.

## 2. Antecedentes

Hasta el 2004 la estructura de alivio de El Ejido presentaba mal funcionamiento, el continuo taponamiento del conducto de aguas residuales elevaban los niveles de agua de la cámara de entrada, produciendo un vertimiento constante sobre el vertedero e insuficiencia en la capacidad hidráulica para conducir el caudal de diseño, correspondiente a 5 veces el caudal medio, por lo tanto, no garantizaba la dilución requerida antes del inicio de vertido en los eventos de lluvia.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, la EAAB en el año 2006 contrata a la firma IC Ingenieros Consultores Ltda., para el desarrollo del contrato No. 1-02-25500-815-2005 donde se elaboró los “Estudios y diseño para construcción de las obras necesarias para controlar vertimientos de aguas residuales, en tiempo seco, a canales de las cuencas de Fucha y Salitre”. Entre estos diseños, se realizaron los de la estructura de alivio El Ejido, ubicada en la carrera 55 con Avenida el Ferrocarril, en la localidad de Puente Aranda.

Siguiendo las recomendaciones realizadas por la firma IC Consultores, la EAAB construyó la estructura de Alivio El Ejido, donde el diseñador encontró conveniente construir la estructura inmediatamente aguas abajo de la existente, con un vertedero frontal de 5 metros de longitud, con el fin de minimizar el impacto del manejo de las aguas durante la construcción, debido a que cualquier solución propuesta en este sentido implicaba obras destructivas y de afectación a estructuras, vías, espacio público y redes de servicios, que serían mayores a las propias de construcción de la estructura.

A finales del año 2008, durante un evento de lluvia extrema sobre la cuenca El Ejido, se originó una creciente sobre el colector que ocasiono la presurización del sistema aguas arriba de la estructura de alivio, generando el levantamiento de tapas y desbordamiento de las aguas transportadas por el colector a la vía.

Es así que, para evitar nuevos problemas de inundación, el Acueducto de Bogotá construyó las compuertas laterales, sobre las dos cajas de inspección de la estructura de alivio que limitan con el canal Comuneros II, con el fin de que operaran simulando el

funcionamiento de válvulas de chapaleta o charnela, abriéndose cuando la estructura se presurizara dejando verter los excesos sobre el canal. No obstante, estas obras, el jueves 5 de noviembre de 2009, durante otra precipitación de importante magnitud sobre la cuenca, nuevamente se desbordaron las aguas transportadas por el colector. (Pulido, 2012, p. 31)

Con base en lo expuesto anteriormente se realizó una simulación hidráulica para evaluar el comportamiento del flujo en la estructura y establecer los posibles errores en el diseño del aliviadero objeto del estudio. Se modeló numéricamente en el software SewerGEMS con base en la información obtenida de la empresa consultora, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá y con las mediciones realizadas por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito en el año 2009.

Los resultados obtenidos se presentan en la tesis denominada “Evaluación de estructuras de alivio para alcantarillado combinado”, realizada por el ingeniero Reinaldo Pulido en el año 2012, de acuerdo a toda la información obtenida se decidió realizar una simulación numérica en 3D con base en la información antes mencionada, donde se simulan varios escenarios correspondientes a la misma estructura en un modelo matemático diferente con el fin de comparar los resultados y evaluar el comportamiento hidráulico de la estructura desde otro punto de vista.

El uso de modelos numéricos se ha incrementado en la última década en diferentes aplicaciones de la ingeniería. Estos son herramientas alternativas a los métodos de diseño convencionales que incluso pueden proveer información que no se puede determinar en modelos físicos. Debido a que se emplean ecuaciones que predicen el comportamiento del fluido los modelos numéricos tienen que ser verificados con modelos físicos y sus resultados comparados con ecuaciones teóricas y experimentales (Chanel, 2008).

Con el fin de entender el comportamiento de los fluidos en las estructuras hidráulicas se han desarrollado diferentes estudios que emplean la simulación numérica a través de la dinámica de fluidos computacional (CFD) en diferentes softwares. Se reportan resultados adecuados para software como CFX (Bouhadji, 2004), ANSYS Fluent (Srtaj et al, 2006;

Dargahi, 2006; Raphael Domiron, 2015; Ulrich Ngamalieu, 2015; Andrés Otálora, 2016), los dos Fluent y CFX (Cederstrom et al., 1998, 2000; Yang y Johanson, 1998), y Flow-3D (Paul Chanel, 2008), entre otros.

Se encuentra literatura adicional sobre otros softwares, en general se observan resultados precisos para describir el comportamiento del fluido en estructuras hidráulicas tipo aliviadero, lo cual permite establecer que el uso de la dinámica modelos CFD es adecuado para analizar el comportamiento de este tipo de estructuras.

Estudios recientes en los cuales se emplea una metodología similar a la que se empleó en este trabajo son presentados a continuación:

***Tabla 1. Resumen de trabajos con aplicación de la simulación numérica.***

| Año | Autor (es) | Nombre del documento | Resumen |
|---|---|---|---|
| 2017 | Edgar Orlando Ladino Moreno | Simulación numérica CFD de la estructura de control y del sistema de compuertas radiales – Represa El Quimbo | Desarrollo del modelo numérico en 2-D del sistema de compuertas radiales de la represa el Quimbo por medio del software ANSYS Fluent versión 17.0 por medio del cual se analizó el comportamiento de la lámina de agua, velocidades de aproximación y variación del campo de presión, validando el modelo con resultados de datos teóricos y modelos físicos. Se empleó el modelo Volumen de Fluido (VOF) con el modelo de turbulencia RNG k-ε y el modelo LES. |
| 2016 | Andrés Humberto Otálora Carmona | Modelación Numérica 3D con ANSYS -FLUENT del Vertedero Laberinto de la Central Hidroeléctrica "La Naveta", en Apulo – Cundinamarca, a partir de un Modelo Físico a Escala | Modelación computacional de un vertedero triangular de pared delgada y el vertedero tipo laberinto de la central hidroeléctrica de la Naveta en Apulo evaluando el comportamiento del coeficiente de descarga, lámina de agua, líneas de corriente y campo de velocidades. Los resultados son comparados con un modelo físico a escala y datos teóricos. Se emplea en la simulación el modelo volumen de fracción (VOF) y el modelo de turbulencia k-ε estándar. |
| 2016 | Pablo Castillo Falcón | Estudio Experimental y Modelización Numérica de Flujo en Canal Horizontal sobre Vertedero Creager | Análisis del comportamiento del fluido en un vertedero de perfil tipo Creager por medio del desarrollo de un modelo numérico empleando técnicas de la mecánica de fluidos computacional por medio del software ANSYS Fluent versión 15, comparando los resultados con un modelo físico desarrollado en laboratorio y con datos teóricos. En el modelo se realiza la modelación en 2-D y 3-D, empleando el modelo de volúmenes finitos (MDF) con el modelo de turbulencia k-ε. |
| 2016 | Yúnior Gutiérrez Lozano | Modelación numérica computacional del diseño de un vertedor de pared delgada de sección compuesta | Desarrollo de simulaciones computacionales empleando el software ANSYS Fluent empleando la dinámica de fluidos computacional |
| 2015 | Ulrich Auréle Ngamalieu Nengoue | Caracterización de vertederos hidráulicos mediante técnicas CFD | Caracterización del comportamiento del fluido en tres tipos de vertedero (triangular, rectangular y trapezoidal) empleando modelos que usan la dinámica de fluidos computacional por medio del software Ansys Fluent |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | versión 15.0, validando el modelo con datos de un modelo físico y comparando los resultados con un modelo realizado en el software SWMM versión 5.0. Se emplea el modelo Volumen de Fluido (VOF) con el modelo de turbulencia k-ε |
| 2015 | Raphael Damiron | CFD modelling of dam spillway aerator | Simulación numérica en 2-D y 3-D del vertedero y piscina de aquietamiento de la represa Bergeforsen empleando el software FLUENT/GAMBIT evaluando el comportamiento de la interfase, velocidades y campo de presiones, los resultados fueron comparados con datos de laboratorio limitados. Se emplea el método VOF y el modelo de turbulencia k-ε estándar |
| 2008 | Paul Guy Chanel | An Evaluation of Computational Fluid Dynamics for Spillway Modelling | Verificación de la capacidad de los modelos CFD de predecir el comportamiento del agua en vertederos tipo Ogee. Se analizaron las descargas, lámina de agua y presiones. Los resultados son comparados con datos físicos. Se empleó el software Flow-3D. |

***Fuente: Elaborada por el Autor***

En esta tesis se emplea una metodología similar a otros trabajos en los cuales se utilizó la dinámica de fluidos computacional, realizando el análisis para una estructura que presenta una geometría compleja en la cual resaltan la presencia de dos vertederos ubicados a distintas alturas, uno frontal y uno lateral, una pared de aquietamiento posterior al vertedero frontal y una tubería de descarga, no centrada, debajo del vertedero frontal. La información resultante de la simulación numérica tiene un carácter significativo debido a la poca información que existe de cómo afectan la pantalla de aquietamiento y la tubería frontal de descarga en un vertedero rectangular de pared delgada, en el marco teórico y especialmente en modelos predictivos en tres dimensiones.

Los resultados obtenidos en el estudio se emplearán para entender el comportamiento hidrodinámico que se presenta en la estructura, permitiendo entender diferentes eventos para varios caudales, así como el comportamiento general de la estructura en términos de la descarga, velocidades, presiones y esfuerzos cortantes. De igual forma, la metodología empleada puede ser usada en otros trabajos similares, continuando con los aportes desarrollados por otros autores.

# 3. Metodología

***Tabla 2. Metodología modelación numérica 3D***

| Resumen de la metodología utilizada para la modelación | |
|---|---|
| Fase 1. Recolección de información sobre (el problema de estudio, Antecedentes, marco teórico, verificación del dominio computacional, teoría de la mecánica de fluidos computacional. | Recopilación de la información básica de CFD |
| | Comprensión de conceptos de la modelación CFD |
| | Estudio de los temas de la dinámica de fluidos |
| | Investigación del modelo comercial Ansys |
| | Estudio y análisis de los conceptos del modelo VOF |
| | Revisión de literatura de los modelos de turbulencia |
| | Recolección de información sobre el tema discretización |
| | Revisión de la teoría de volúmenes finitos |
| Fase 2. Pre. Procesamiento Modelación numérica estructura. | Análisis de la información detallada de la estructura(planos) |
| | Digitalización de la geometría |
| | Verificación de la geometría CAD - validación de la geometría |
| | Elaboración del mallado en Ansys, refinación, sensibilidad. |
| | Validación del mallado por medio de mesh quality |
| | Configuración del solver, estado del flujo, multifases, modelo de turbulencia. |
| | Definición de las condiciones de frontera |
| | Aplicación de los métodos de solución, adaptación de regiones |
| | Ejecución de la modelación. |
| Fase 3. Verificación de resultados | Análisis de los resultados mediante herramientas de visualización |
| | Control de calidad de los resultados |
| | Verificación de la convergencia (residuos y conservación de la masa) |
| | Análisis de vectores de velocidad, líneas de corriente, presiones, esfuerzos cortantes, volumen de fracción. |
| | Control de resultados cuantitativos mediante gráficos |
| | Control de resultados mediante reportes (fuerzas, momentos) |
| Fase 4. Validación de la modelación | Validación de los resultados mediante la teoría y comparación con modelación en SewerGEMS |
| | Validación del modelo de turbulencia |
| | Validación del modelo físico (si es apropiado) |
| | Validación de las condiciones de frontera |
| | Validación de los resultados obtenidos |
| | |
| Fase 5. análisis de resultados y recomendaciones | Discusión de los resultados obtenidos |
| | Conclusiones acerca de la modelación matemática en Ansys fluent. |

***Fuente: Elaborada por el Autor***

En esta tesis se presenta la modelación numérica del flujo en la estructura hidráulica aliviadero el Ejido mediante el software Ansys - Fluent versión 17.0, se modela teniendo en cuenta las principales características físicas, propiedades del fluido y otras variables hidráulicas.

Para la validación del modelo se compararon los resultados frente a las mediciones realizadas en campo por medio de los sensores ubicados estratégicamente en los puntos más relevantes de la estructura, además se verificaron analíticamente los coeficientes de descarga del vertedero con base en las metodologías de diferentes autores y los resultados de la modelación en Ansys - Fluent.

Luego de tener la validación del modelo se procedió a simular un evento específico ocurrido el 8 de noviembre de 2009, el cual ya fue modelado en un estudio anterior mediante el paquete SewerGEMS.

Adicionalmente se compararon resultados entre modelación 2D y modelación 3D, con el fin de evaluar el desempeño de cada uno de los paquetes computacionales y verificar la calidad de la información generada en cada estudio realizado.

A continuación, se describe detalladamente las principales fases contempladas durante este trabajo.

# 4. Detalles de la modelación

## 4.1 Metas de la modelación numérica del aliviadero el Ejido.

Con la modelación de la estructura hidráulica se busca evaluar el comportamiento del fluido mediante un modelo numérico que es accesible, fácil de utilizar, ahorra costos en la elaboración de modelos físicos y garantiza buenos resultados.

En tal sentido, se propone obtener datos de buena calidad en cada uno de los parámetros estudiados como lo son los perfiles de velocidades, distribución de presiones, esfuerzos cortantes y fracción de volumen de fluido agua.

Para que el grado de precisión optado para la validación de resultados es obtener valores de residuos menores al 3%, en la conservación de la masa ya que la estructura modelada es de gran tamaño y resultados con diferencias porcentuales menores requieren costos computacionales muy elevados. El refinamiento del mallado que se consideró apropiado corresponde a celdas con un área menor a 0.02 $cm^2$

## 4.2 Creación de modelo del dominio

La creación de la geometría para este caso de estudio se realizó mediante el software AutoCAD 3D - 2014, A partir de los planos suministrados por la empresa privada Ingenieros Consultores IC y archivos de la EAAB y Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

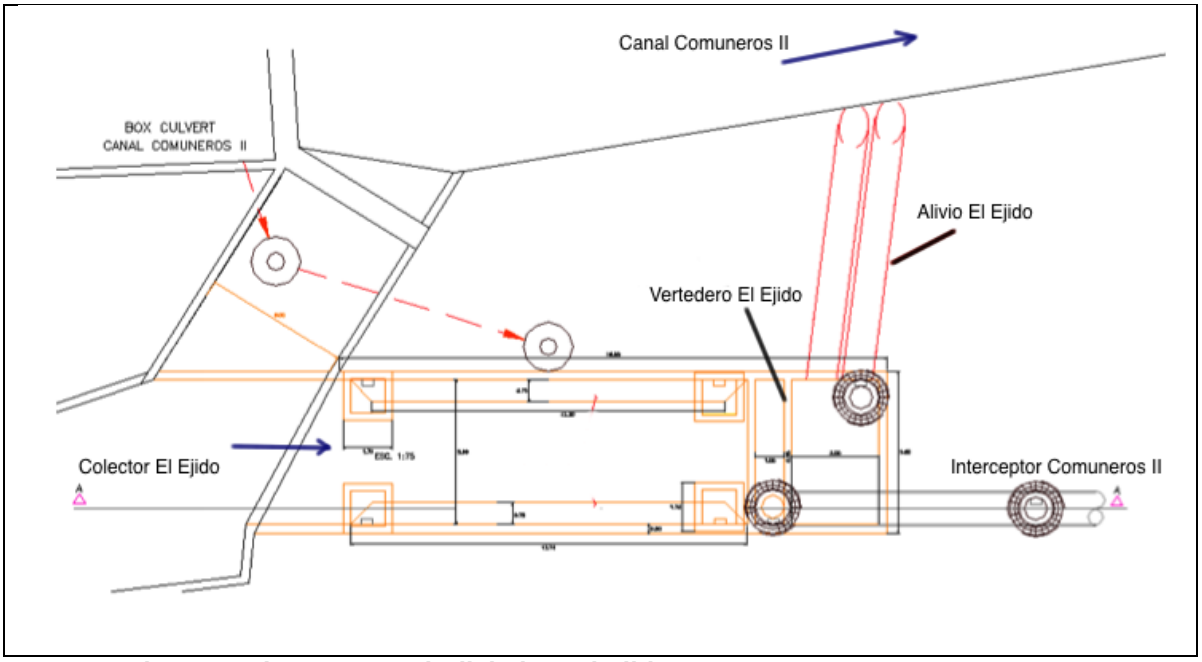



***Figura 1. Planta General Aliviadero el Ejido.***
***Fuente: Planos record producto del contrato de obra N° 1-01-25500-366-2007 UT MB-264 – EAAB***

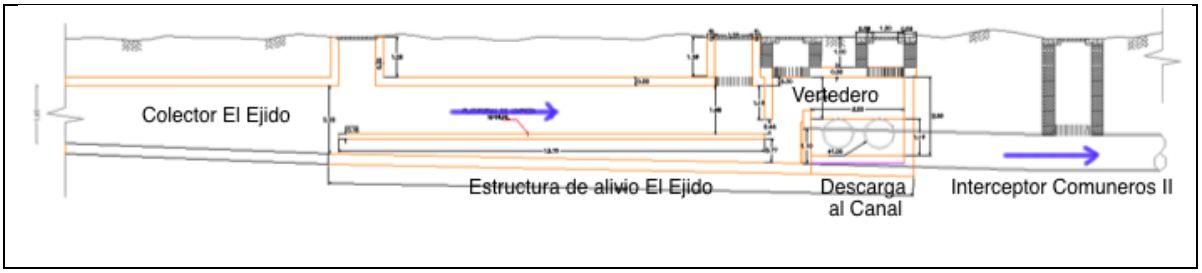



***Figura 2. Perfil Aliviadero el Ejido.***
***Fuente: Planos record producto del contrato de obra N° 1-01-25500-366-2007 UT MB-264 - EAAB***

Luego realizar la geometría en el software AutoCAD se exportó bajo el formato IGES (Initial Graphics Exchange Specification**)** para luego realizar el mallado en el módulo "Mesh" de Ansys Workbench 17.0.

La geometría de esta estructura de derivación llamada El Ejido, está conformada por una cámara de sección rectangular, rematada en un vertedero frontal de longitud=5,0 m y una altura=1,70 m, sobre el que se descargan las aguas separadas (lluvias), que se desvían al canal Comuneros II por medio de dos tuberías

(diámetro = 1,00 m), ubicadas en paralelo que parten de la cámara de excesos del vertedero frontal y descargan sobre la margen derecha del canal. Las aguas separadas (sanitarias) del box de El Ejido son conducidas por un interceptor denominado Comuneros II, mediante una tubería (diámetro = 1,10m), que se inicia en el fondo de la estructura de derivación, en el muro del vertedero frontal. Cabe anotar que como medida de emergencia en un evento de lluvia, el acueducto habilitó una ventana provisional (largo = 6,00 m) de tal manera que la cota de la cresta del vertedero El Ejido coincide con la cota de la cresta de la ventana que trabaja como un vertedero rectangular cuando la lámina de agua que pasa por encima de la cresta es inferior a 0,34 m, si la lámina es mayor, éste trabaja como un orificio de grandes dimensiones o cargas pequeñas.

Ahora bien, cuando la capacidad de la tubería de alcantarillado sanitario no es suficiente para transportar la totalidad del caudal recogido por el colector El Ejido, el nivel de flujo dentro de la cámara se eleva, presurizando la tubería de alcantarillado sanitario hasta superar la altura de un dique de 1,7 m, que actúa como vertedero frontal de excesos. Las aguas provenientes del vertedero de excesos se entregan al canal Comuneros II a través de dos tuberías de GRP de 1,1 m de diámetro, con una pendiente de 2,5%, aproximadamente.

La subcuenca denominada El Ejido transporta aguas combinadas. Su colector principal es un box culvert, el cual originalmente entregaba al canal Comuneros II en su cabecera y sobre la margen derecha en una ventana ubicada cerca de la descarga del colector de aguas lluvias Comuneros. Esta condición fue modificada para separar las aguas residuales y desviarlas al interceptor izquierdo de San Francisco mediante la construcción de la estructura de alivio de El Ejido y el interceptor de Comuneros II. (Pulido, 2012, p. 39)

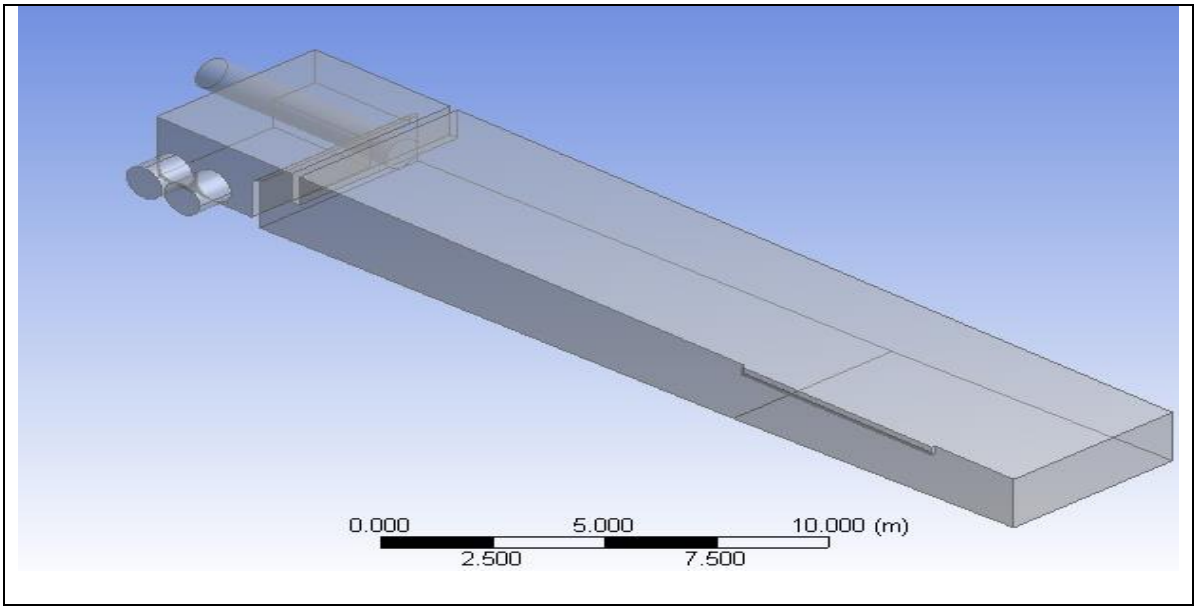



***Figura 3. Geometría general el formato CAD.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

## 4.3 Elaboración del mallado

Para el desarrollo de la presente tesis se elaboraron varios mallados de tipo tetraédrico, hexaédrico y mallado híbrido con el fin de comparar el desempeño computacional y la calidad de los resultados de cada malla y así poder tener un mejor criterio en la selección de los mallados para obtener resultados fiables. Cada uno de estos mallados presenta características diferentes en cuanto al refinamiento de las paredes, tuberías, vertedero, y en especial la forma de la malla.

Para crear la malla del dominio se utilizó las herramientas del módulo Mesh de Ansys para 3D, se utilizó un mallado de tipo híbrido correspondiente a una mezcla de mallado estructurado y mallado no estructurado utilizado en las secciones donde están ubicados los vertederos y las tuberías.

En el diseño de la malla principal se tuvo en cuenta el refinamiento en zonas donde se deben resolver y capturar los detalles del flujo, los vórtices y en las zonas contiguas a las paredes.

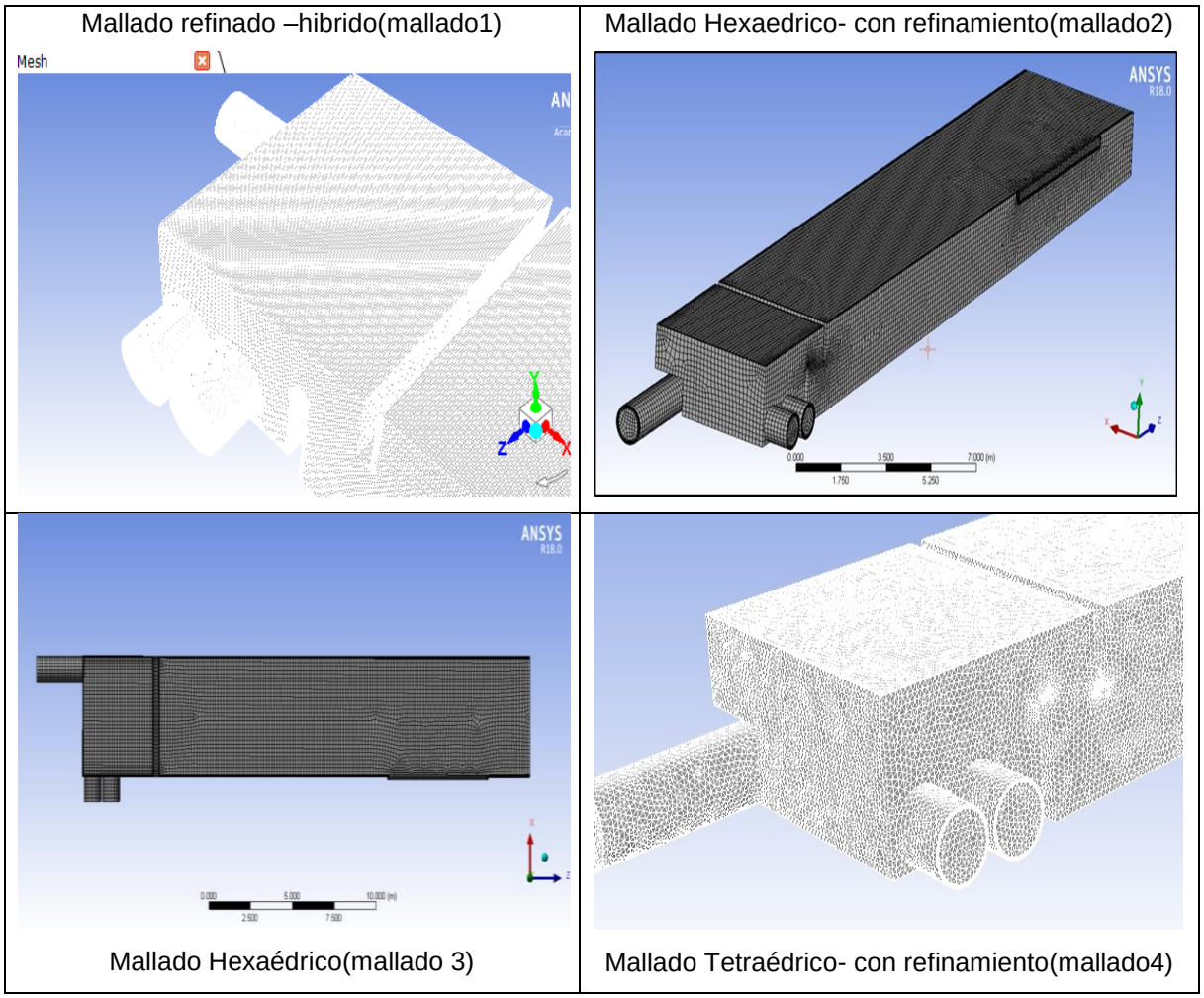



***Figura 4. Mallados utilizados en la simulación del flujo para la estructura de estudio***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Esta subdivisión de la geometría en varios elementos de volumen (mallado), es lo que genera una buena precisión en los resultados de la modelación propuesta. Luego de realizar la subdivisión en pequeños volúmenes de control se procede aplicar el método de volúmenes finitos.

La modelación principal se desarrolló con un mallado denso con los parámetros que se

presentan en la tabla 3.

| Tipo de malla | Numero de Elementos | Número de nodos | Tipo de Refinamiento | Volumen Máximo m3 | Volumen Mínimo m3 |
|---|---|---|---|---|---|
| Hibrida malla 1 | 1.763.276 | 2.164.200 | Localizado | $5.40\ \mathrm{e}-04$ | $1.15\ e-06$ |
| Hexaédrica malla 2 | 978.500 | 1.225.005 | Localizado | $9.89\ \mathrm{e}-04$ | $1.80\ e-06$ |
| Hexaédrica malla 3 | 563.453 | 774.457 | Sin Refinar | $1.34\ \mathrm{e}-03$ | $3.67\ e-04$ |
| Hibrida malla 4 | 1.884.706 | 2.234.064 | Localizado | $6.69\ e-04$ | $2.47\ e-07$ |
| Hibrida | 1.369.101 | 2.530.029 | Localizado | $1.76\ \mathrm{e}-03$ | $3.77\ e-06$ |
| Hexaédrica | 618.782 | 1.161.490 | Sin Refinar | $3.24\ \mathrm{e}-03$ | $2.67\ e-04$ |
| Hibrida | 4.423.567 | 6.347.211 | Localizado | $8.12\ e-06$ | $3.87\ e-09$ |

***Tabla 3. Parámetros de mallados realizados para modelaciones (ver figura 4)***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

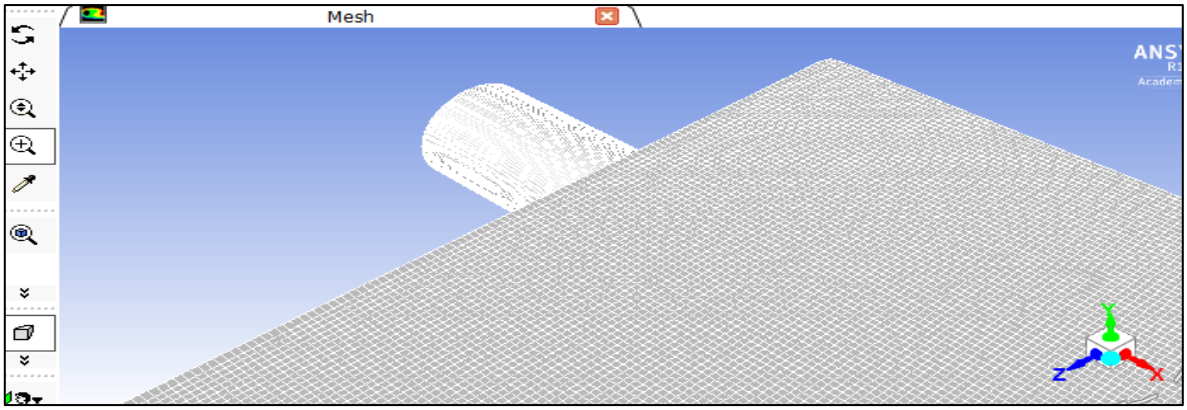



***Figura 5. Mallado 1, hibrido (tetraédrico y hexaédrico). Seleccionado para realizar las simulaciones para diferentes caudales.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

El mallado 1 de la figura 4 fue seleccionado para hacer las simulaciones definitivas con los diferentes caudales, es un mallado de tipo hibrido cuyos parámetros se resaltan en la tabla N° 3. Los diferentes mallados y las simulaciones se realizaron en la estación de

trabajo de la Escuela Colombiana de Ingeniera área de postgrados, y en un computador personal, el cual presenta las siguientes características:

| | |
|---|---|
| Sistema operativo | Windows 10 Pro |
| Marca | Hewlet Packard |
| Procesador | Core i7 séptima generación |
| Memoria RAM | 32 GB |
| Adaptador de video | Geforce GTX 1070 |
| Disco Duro | 2 TB |

***Tabla 4. Características físicas de la estación de trabajo utilizada en la modelación***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

El equipo de trabajo seleccionado permitió realizar con facilidad varios mallados con diferentes números de celdas y elementos (mallado de 978.000 mil celdas, mallado de 1.763.000 celdas, mallado de 4.400.000 de celdas) permitiendo ahorrar tiempos y costes computacionales. Para el desarrollo de esta tesis se elaboraron aproximadamente 40 mallados con diferentes características, para finalmente seleccionar los que presentaban los mejores parámetros de calidad como se observa en la tabla 5 fueron seleccionados para realizar las simulaciones teniendo en cuenta que el costo computacional estuviera dentro de los tiempos requeridos.

| Mallado | Número de celdas | Ortogonalidad | Oblicuidad | Aspecto Ratio |
|---|---|---|---|---|
| Híbrido malla1 | 1.763.276 | 0.86 | 0.16 | 8.01 |
| Híbrido malla 2 | 978.000 | 0.84 | 0.14 | 26.12 |
| Híbrido malla 3 | 618.782 | 0.81 | 0.22 | 31 |
| Tetraédrico malla 4 | 563.453 | 0.86 | 0.21 | 36.04 |

***Tabla 5. Parámetros de calidad de los mallados utilizados para las simulaciones.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

La calidad de la malla tiene un papel fundamental en la precisión de los resultados. El software utiliza las anteriores verificaciones para medir la calidad de los elementos en una malla, pero la relación de aspecto (aspecto ratio) es el parámetro más relevante a la hora de evaluar el mallado.

La relación de aspecto de un elemento tetraédrico perfecto se utiliza como la base para el cálculo de relaciones de aspecto de otros elementos. La relación de aspecto de un elemento se define como la relación entre la arista más larga y la normal más corta, colocadas desde un vértice a la cara opuesta normalizada con respecto a un tetraedro perfecto. Por definición, la relación de aspecto de un elemento tetraédrico perfecto es 1,0. La verificación de relación de aspecto supone que las aristas rectas se conectan con los cuatro nodos angulares. Dicha verificación es utilizada automáticamente por el programa para comprobar la calidad de la malla.

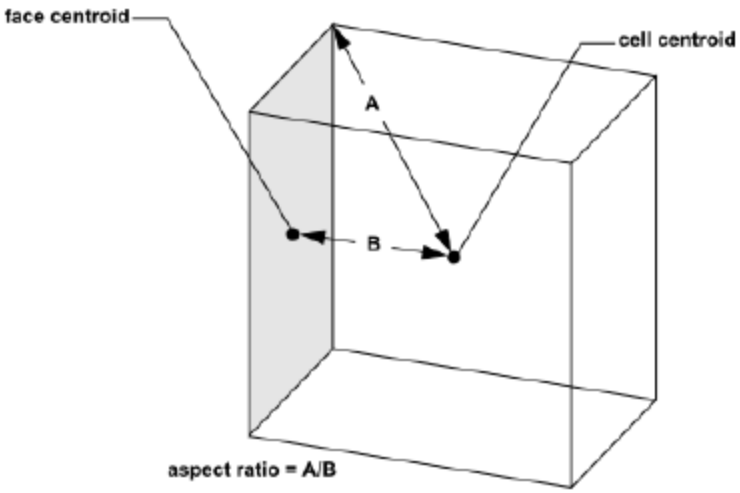



***Figura 6. Cálculo de la relación de aspecto en una celda***
***Fuente: (Castillo, 2016)***

Como se ha mencionado, el proceso de generación de la malla fue muy complejo debido a la forma de la geometría del aliviadero. En primer lugar se optó por una malla estructurada siguiendo la dirección del flujo, aplicando refinamiento en las zonas críticas y dejando elementos más amplios en el box culvert y paredes con geometría regular. Las pruebas realizadas con este mallado no generaron resultados aceptables en la evaluación de los parámetros de calidad y los cálculos iniciales no alcanzaron la convergencia. Se puede decir que desarrollar una correcta malla hexaédrica toma mucho tiempo y se corre el riesgo de no obtener una convergencia si no se tiene el tamaño de elementos adecuado.

Luego se realizaron varios mallados de tipo tetraédrico como se muestra en la figura 4, en las zonas donde el flujo cambia de dirección se realizó un tratamiento especial, con un refinamiento mayor en las tuberías, vertedero frontal y lateral. Las pruebas realizadas con este tipo de mallados no han sido satisfactorias.

Con base en los resultados de pruebas y errores obtenidos, se optó por un mallado tetraédrico/hexaédrico (híbrido), con un tamaño de elementos menor y refinamiento localizado, la tipología de esta malla es muy similar a otras utilizadas en estudios similares. Esta malla se adaptó mejor a la geometría, dando resultados estables, garantizando la convergencia y dentro de la precisión que se requiere. Cabe mencionar que el costo computacional es mucho mayor y los tiempos para cada modelación estuvieron cercanos a cuatro semanas por cada caudal modelado.

| Mallado (ver tabla 4) | Número de Celdas | Caudal Q($m^3/s$) | Tiempo computacional (días) | Tipo de mallado |
|---|---|---|---|---|
| Mallado 1 | 1.763.276 | 9.0 | 27 | Híbrido |
| Mallado 1 | 1.763.276 | 6.0 | 24 | Híbrido |
| Mallado 1 | 1.763.276 | 5.0 | 23 | Híbrido |
| Mallado 1 | 1.763.276 | 4.0 | 21 | Híbrido |
| Mallado 1 | 1.763.276 | 2.7 | 18 | Híbrido |
| Mallado 1 | 1.763.276 | 2.0 | 16 | Híbrido |
| Mallado 2 | 978.000 | 6.0 | 16 | Hexaédrica |
| Mallado 3 | 618.782 | 6.0 | 15 | Híbrida |
| Mallado 4 | 563.453 | 6.0 | 16 | Tetraédrica |

***Tabla 6. Resumen del tiempo computacional para cada una de las simulaciones. Fuente: Elaborada por el Autor***

## 4.4 Selección de escenarios de modelación

El objetivo principal de la modelación consiste en la evaluación o respuesta de la

estructura aliviadero el Ejido, ante una secuencia de eventos que ya ocurrieron o que pueden ocurrir a futuro, a este conjunto de alternativas se le llamará escenarios.

Cada escenario está definido por una combinación de variables, las cuales definen las condiciones físicas de la estructura y los caudales modelados; variables que están relacionadas directamente con la solución de cada simulación. A continuación, se presentan las alternativas para cada modelación.

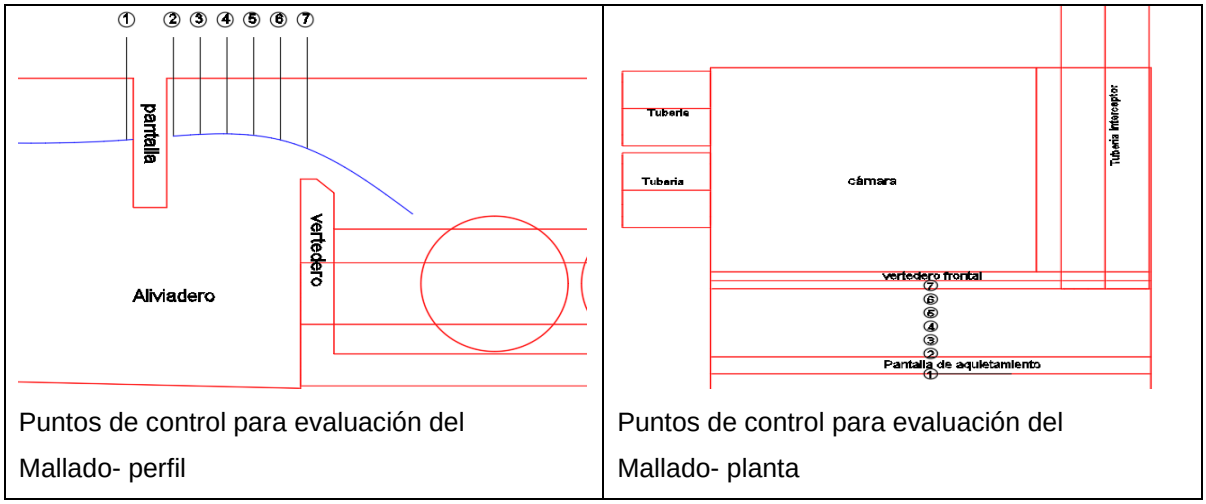
| Salidas a canal Comuneros (excesos) | Pendiente longitudinal | Vertedero frontal | Vertedero lateral | Pantalla de aquietamiento | Tubería de salida principal |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 tuberías Φ = 1 m | 2% | 5 m | 6 m | 5 m x 1m | Φ =1.1 m |
| | Caudales modelados = $(9m^3/s,\ 6\ m^3/s,\ 5\ m^3/s,\ 4\ m^3/s,\ 2.7\ m^3/s,\ 2\ m^3/s)$ | | | | |

***Tabla 7. Características principales de los escenarios simulados***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

## 4.5 Sensibilidad del mallado

La necesidad de partir de un mallado de gran calidad es muy importante en la simulación de flujos bifásicos agua-aire con el software comercial Ansys Fluent. Cuando se emplean distintos tipos de mallado para una misma situación de flujo, se pueden analizar las diferencias en los resultados para las variables de importancia. Con esta premisa en este estudio se analizó la lámina de agua en varios puntos de control establecidos sobre el eje de la estructura, como se observa en la figura 7.

En la presente tesis para cada uno de los casos se realizó un chequeo de la calidad del mallado, en los parámetros de Oblicuidad, Ortogonalidad, Aspecto Ratio, ya que son los parámetros mínimos requeridos para garantizar convergencia del modelo y buenos resultados. Además de evaluar la calidad del mallado, se procedió a evaluar los resultados en siete puntos de control, que se ubicaron sobre los ejes del aliviadero y de las tuberías de salida respectivamente.




Puntos de control para evaluación del Mallado- perfil

Puntos de control para evaluación del Mallado- planta

***Figura 7. Puntos de control para evaluación de la sensibilidad del mallado.***
***Fuente: Elaborado por el Autor***

En cada punto de control se evalúa la fracción de volumen fase 2 (agua) al 100% y al 50%.

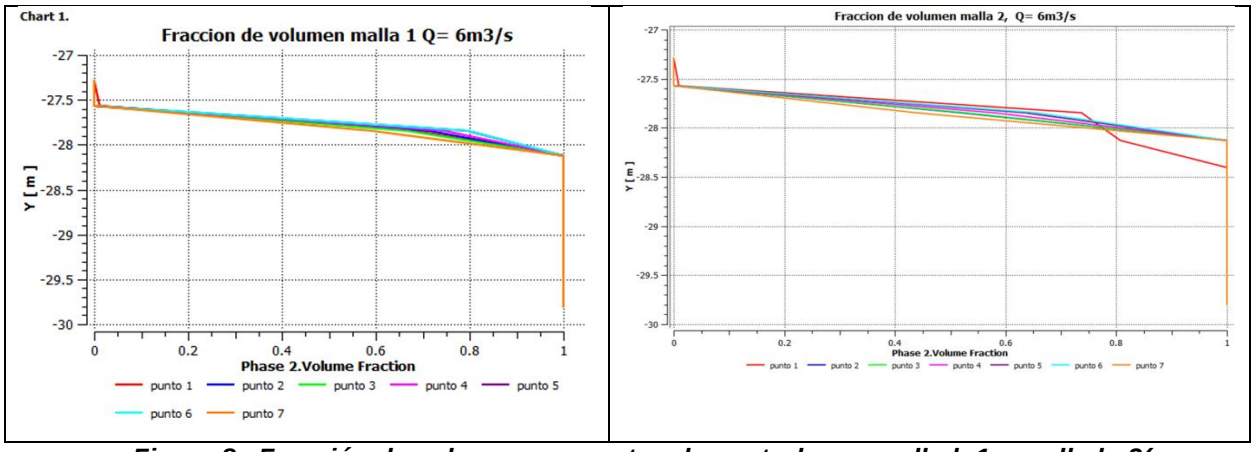



***Figura 8. Fracción de volumen, en puntos de control para mallado1 y mallado 2(ver tabla 5)***
***Fuente: Elaborado por el Autor***

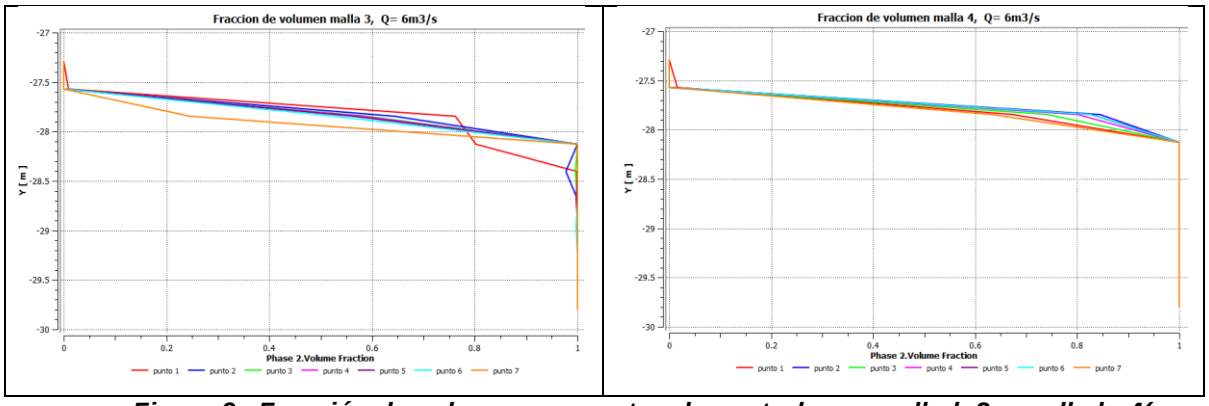



***Figura 9. Fracción de volumen, en puntos de control para mallado3 y mallado 4(ver tabla 5)***
***Fuente: Elaborado por el Autor***

Caudal modelado $6\ m^3/s$ , refinamiento de malla ver tabla 5.

H = Altura de lámina de agua sobre vertedero

| Fracción de Volumen | Malla 1 100% | Malla 2 100% | Malla 3 100% | Malla 4 100% |
|---|---|---|---|---|
| H1 (m) | 0.016 | 0.306 | -0.296 | 0.027 |
| H2 (m) | 0.016 | 0.027 | -0.017 | 0.027 |
| H3 (m) | 0.016 | 0.027 | -0.017 | 0.027 |
| H4 (m) | 0.016 | 0.027 | -0.017 | 0.027 |
| H5 (m) | 0.016 | 0.027 | -0.017 | 0.027 |
| H6 (m) | 0.016 | 0.027 | -0.017 | 0.027 |
| H7 (m) | 0.016 | 0.027 | -0.017 | 0.027 |
| Q vert (m3/s) | 3.271 | 3.196 | 3.204 | 3.199 |
| Q Interc(m3/s) | 2.582 | 2.634 | 2.693 | 2.594 |

***Figura 10. Evaluación de calidad del mallado para fracción de volumen de 100%***
***Fuente: Elaborado por el Autor***

Caudal modelado $6\ m^3/s$, refinamiento de malla ver tabla 5.

| Fracción de Volumen | Malla 1 50% | Malla 2 50% | Malla 3 50% | Malla 4 50% |
|---|---|---|---|---|
| H1 (m)-abs 0 | 0.37 | 0.34 | 0.35 | 0.39 |
| H2 (m) | 0.35 | 0.26 | 0.31 | 0.37 |
| H3 (m) | 0.33 | 0.26 | 0.30 | 0.36 |
| H4 (m) | 0.31 | 0.28 | 0.29 | 0.35 |
| H5 (m) | 0.30 | 0.31 | 0.30 | 0.35 |
| H6 (m) | 0.26 | 0.31 | 0.26 | 0.31 |
| H7 (m) | 0.26 | 0.23 | 0.24 | 0.29 |

***Figura 11. Evaluación de calidad del mallado para fracción de volumen de 50%***
***Fuente: Elaborado por el Autor***

Caudal modelado $6\ m^3/s$, refinamiento de malla ver tabla 5.
H= altura de lámina de agua sobre el vertedero.

| Fracción de Volumen | Malla 1 0% | Malla 2 0% | Malla 3 0% | Malla 4 0% |
|---|---|---|---|---|
| H1 (m)-abs 0 | 0.541 | 0.531 | 0.540 | 0.530 |
| H2 (m) | 0.541 | 0.531 | 0.540 | 0.530 |
| H3 (m) | 0.541 | 0.531 | 0.540 | 0.530 |
| H4 (m) | 0.541 | 0.531 | 0.540 | 0.530 |
| H5 (m) | 0.541 | 0.531 | 0.540 | 0.530 |
| H6 (m) | 0.541 | 0.531 | 0.540 | 0.530 |
| H7 (m) | 0.541 | 0.531 | 0.540 | 0.530 |

***Figura 12. Evaluación de calidad del mallado para fracción de volumen de 0%-fase aire***
***Fuente: Elaborado por el Autor***

Con el fin de evaluar la sensibilidad del mallado, de acuerdo con los resultados presentados en las secciones de la Figura 7. Se observa que las mediciones de la fracción de volumen son homogéneas hasta la sección 5, para las secciones 6 y 7, que se encuentran cerca de la cresta de vertedero disminuye su valor y es consecuente con la forma del chorro para descargas libres. (Ver figura 11)

Los resultados obtenidos para cada una de las mallas propuestas son estables y en general no se presentaron puntos de comportamiento extraño. Como consecuencia, las demás simulaciones se realizaron con base en el mallado 1, el cual presenta una cantidad de elementos de 1.763.276.

## 4.6 Configuración del solucionador (Solver)

A continuación, se presenta la configuración utilizada en la solución de la modelación 3D.

### 4.6.1 Resumen de configuración del solver

Para el desarrollo de esta modelación, se utiliza un solucionador basado en la presión, con velocidad absoluta para un flujo no permanente. Entendiéndose como un flujo el cual cambian las características de un punto a otro dentro de su campo, es decir $\frac{dN}{dt} \neq 0$

Siendo N= parámetro a analizar con respecto al tiempo.

| General | |
|---|---|
| Mallado | mallado #1 |
| Verificado | si |
| Reporte de calidad | verificado |

***Tabla 8. Chequeo de parámetros de calidad del mallado en Ansys-Fluent***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Para flujo a superficie libre se trabaja con gravedad g = -9.81 m/s.

| Solver(solucionador) | |
|---|---|
| Tipo | basado en la presión |
| Velocidad | absoluta |
| Tiempo | No permanente |
| Gravedad | (-9.81 m/s$^2$) en el eje Y |

***Tabla 9. Configuración del solver en Ansys***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

| Configuración modelos | |
|---|---|
| Model Multiphase (Modelo Multifase) | |
| Modelo | Volumen de fluido |
| Número de fases | 2(agua-aire) |
| VOF Sub-modelos | |
| Flujo canal abierto | el flujo empieza desde lámina de agua |
| Parámetros de fracción de volumen | |
| Formulación | implícita |
| Volumen fracción Cut off | 1.00E-06 |
| Número de Courant | 0.25 |
| Modelo de interface | Sharp/Dispersed |
| Formulación fuerzas de cuerpo | activo |

***Tabla 10. Configuración de modelo multifase***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Se consideró un flujo multifásico con dos fases: agua y aire. Se tomó como fase primaria el aire y como fase secundaria el agua. El modelo VOF (Volumen Of Fluid) se utiliza en esta modelación ya que permite trabajar flujos inmiscibles separados por una interface claramente definida (flujo en superficies libres), tanto para flujo permanente como no permanente, generalmente. El modelo VOF puede ser implementado mediante una discretización temporal explícita o implícita. En nuestro caso se optó por la modelación implícita, que tiene menores restricciones en cuanto a la estabilidad.

| Configuración Modelo Viscoso | |
|---|---|
| Turbulencia | |
| **Modelo** | k-Épsilon (2 eq) |
| Constantes del modelo | por defecto |
| k- Épsilon modelo | estándar |
| Tratamiento cerca de las paredes | por defecto |

***Tabla 11. Configuración del modelo de turbulencia***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

En este trabajo, para los valores iniciales de los parámetros del modelo de turbulencia se realizaron dos modelaciones, la primera utilizando con los valores por defecto y la segunda con valores de los parámetros basados en las ecuaciones descritas en la sección 1.6.1 para cada caudal modelado.

| Materiales | |
|---|---|
| Fase-1 | aire |
| Fase-2 | agua |

***Tabla 12. Selección de materiales para las fases del modelo***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Las propiedades de los materiales se tomaron de los valores por defecto incluidos en la base de datos del software, es decir en la fase 1 (aire), con densidad 1.225 kg/m3 y la viscosidad 0.000017894 kg/m-s

En la fase 2 se tomó como material el agua, con densidad 998.2 kg/m3 y viscosidad de 0.001569 kg/m-s.

Luego de elegir el material para cada fase, se continuó con la configuración de las

condiciones de frontera como se muestra a continuación.

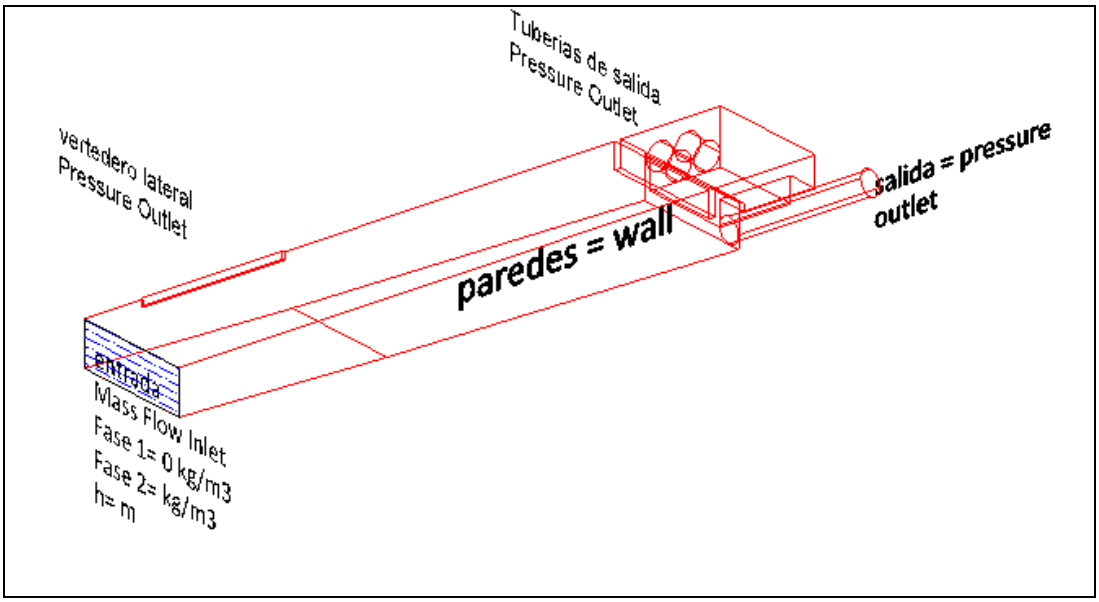



***Figura 13. Condiciones de frontera (plano).***
***Elaborada por el Autor***

| Condiciones de Frontera | |
|---|---|
| Entrada | Flujo másico en la entrada |
| Mezcla | agua |
| Fase 1 | aire flujo másico=0 |
| Fase 2 | agua flujo másico = 6000 kg/s |
| | |
| Momentum | |
| Velocidad | normal hacia la frontera entrada |
| Campo de referencia | absoluto |
| Presión manométrica | cero |
| Turbulencia | |
| Intensidad de turbulencia | (%) por defecto |
| Diámetro hidráulico | por defecto |
| Fracción de volumen | 1 ( paso de solo agua) |

***Tabla 13. Configuración de las condiciones de frontera Q= 6 m3/s***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

| Discretización Espacial | |
|---|---|
| Variable Analizada | Modelo de discretización |
| Gradiente | mínimos cuadrados basado en celdas |
| Presión | peso de fuerzas del cuerpo |
| Momento | contra el viento(Upwind) segundo orden |
| Fracción de Volumen | modificado HRIC |
| Energía cinética turbulenta | segundo orden contra el viento |
| Tasa de disipación | segundo orden contra el viento |

***Tabla 14. Configuración discretización espacial***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

| Cálculo de K y épsilon | | | Cálculo de K y épsilon | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Lámina agua | 1.27 | m | Lámina agua | 1.52 | m |
| Caudal | 2.7 | m3/s | Caudal | 6 | m3/s |
| Viscosidad dinámica | 0.001569 | N-s/m2 | Viscosidad dinámica | 0.001569 | N-s/m2 |
| Velocidad | 0.4251969 | m/s | Velocidad | 0.7894737 | m/s |
| Área mojada | 6.35 | m2 | Área mojada | 7.6 | m2 |
| Perímetro mojado | 7.54 | m | Perímetro mojado | 8.04 | m |
| Radio hidráulico | 0.8421751 | m | Radio hidráulico | 0.9452736 | m |
| Densidad | 1000 | Kg/m3 | Densidad | 1000 | Kg/m3 |
| | | | | | |
| Reynolds | 912913.16 | | Reynolds | 1902533.2 | |
| | | | | | |
| Ti(intensidad Turbulenta) | 0.0287784 | | Ti(intensidad Turbulenta) | 0.0262545 | |
| Long Característica | 0.8421751 | m | Long Característica | 0.9452736 | m |
| l (tamaño remolinos) | 0.0589523 | m | l (tamaño remolinos) | 0.0661692 | m |
| k | 0.0002246 | m2/s2 | k | 0.0006444 | m2/s2 |
| Épsilon | 9.382E-06 | m2/s3 | Épsilon | 4.062E-05 | m2/s3 |

***Tabla 15. Cálculo de K y Épsilon condición de frontera de entrada Q= 2.7 m3/s, Q= 6.0 m3/s***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

| Cálculo de K y épsilon | | | Cálculo de K y épsilon | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Lámina agua | 1.44 | m | Lámina agua | 1.66 | m |
| Caudal | 5 | m3/s | Caudal | 9 | m3/s |
| Viscosidad dinámica | 0.001569 | N-s/m2 | Viscosidad dinámica | 0.001569 | N-s/m2 |
| Velocidad | 0.6944444 | m/s | Velocidad | 1.0843373 | m/s |
| Área mojada | 7.2 | m2 | Área mojada | 8.3 | m2 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Perímetro mojado | 7.88 | m | Perímetro mojado | 8.32 | m |
| Radio hidráulico | 0.9137056 | m | Radio hidráulico | 0.9975962 | m |
| Densidad | 1000 | Kg/m3 | Densidad | 1000 | Kg/m3 |
| | | | | | |
| Reynolds | 1617636.1 | | Reynolds | 2757758.5 | |
| | | | | | |
| Ti(intensidad Turbulenta) | 0.0267923 | | Ti(intensidad Turbulenta) | 0.025064 | |
| Long Característica | 0.9137056 | m | Long Característica | 0.9975962 | m |
| l (tamaño remolinos) | 0.0639594 | m | l (tamaño remolinos) | 0.0698317 | m |
| k | 0.0005193 | m2/s2 | k | 0.001108 | m2/s2 |
| Épsilon | 3.04E-05 | m2/s3 | Épsilon | 8.678E-05 | m2/s3 |

***Tabla 16. Cálculo de K y Épsilon condición de frontera de entrada Q= 5 m3/s, Q= 9 m3/s***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

## 4.7 Calibración de la estructura vertedero el Ejido

Dada la complejidad de la estructura, una buena aproximación para un modelo unidimensional es considerarlo como un vertedero rectangular, con coeficientes para calibrar. Consecuentemente, el trabajo realizado por (Pulido, 2012, p. 68) y la Escuela Colombiana de Ingeniería , la estructura fue calibrada inicialmente, Obteniendo los coeficientes de descarga, derivados del análisis de las series de caudal y altura, medidos directamente sobre las estructuras en tiempo lluvioso para un amplio rango de caudales. Como resultado experimental se obtuvieron los siguientes datos en el estudio realizado por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, (2009).

| Estructura | Coeficiente de descarga C $M^{0.5}/s$ | Longitud de vertedero L |
|---|---|---|
| Alivio calle 22 | 1.77 | 11 |
| Alivio Universidad Nacional | 1.64 | 5.7 |
| Alivio el Ejido | 2.23 | 11 |
| Alivio Comuneros | variable | 4.88 |

***Tabla 17. Resultados coeficientes de descarga C en la calibración de vertederos de la cuenca San Francisco***
***Fuente: (ECI, 2009, Subproducto 3.5, p 66.)***

Como se observa en la tabla 17, el resultado de la calibración para el Ejido corresponde a un coeficiente de descarga de 2.23 con unidades de $m^{0.5}/s$ que corresponde a un valor adimensional de 0.75, para un vertedero de tipo frontal de 11 m. Estos resultados se compararon con los coeficientes obtenidos mediante la modelación matemática realizada en Ansys, con el fin de validar la información obtenida mediante el presente estudio.

Es importante anotar que la simplificación hecha al considerar la estructura como un vertedero, tiene simplificaciones importantes. La lámina del vertedero no está aireada, por lo que realmente, se pega a la pared. La presencia de la pantalla y la salida inferior por las tuberías hacen, como se puede apreciar en las simulaciones, que el flujo sea supremamente complejo. Otro factor adicional, que es necesario considerar es que las tuberías de salida de nivel bajo están controladas por el nivel del agua en el canal. En la simulación, se consideró que las tuberías descargan libremente en el canal (Pressure Outlet) como una simplificación del modelo. Se recomienda que en futuros trabajos, se analicen otras condiciones de frontera.

Para el cálculo de los coeficientes de descarga para vertederos rectangulares sin contracciones laterales se utilizó la siguiente expresión:

$$Q = \frac{2}{3} cd * b\sqrt{2g} * h^{3/2}$$

Ecuación 10. Ecuación general para cálculo de coeficiente de descarga Cd para vertederos rectangulares sin contracciones

*Dónde:*

*Q= Caudal en $m^3$*

*Cd= Coeficiente de descarga*

*b: Longitud de la cresta del vertedero*

*B: Ancho del canal de acceso*

*h: Carga del vertedero. Es el desnivel entre la superficie libre de aguas arriba y la cresta del vertedero + la cabeza de velocidad*

*P: Paramento: Altura o cota de la cresta, referida al fondo del canal*

*e: Espesor de la pared del vertedero*

*H: Espesor de la lámina de agua, aguas arriba del vertedero*

### 4.7.1 Cálculo de coeficiente de descarga teórico

Para la determinación del coeficiente de descarga es necesario seleccionar un único valor de la lámina de agua sobre el vertedero para cada caudal transitado. Para este caso se ha seleccionado la sección correspondiente al inicio del muro del vertedero, debido a que esta es la zona es cercana a los puntos donde se tomaron los datos experimentales. Para los cálculos se utilizó la ecuación 10, y la medición de la altura de lámina de agua sobre el vertedero mediante la fracción de volumen al 100% como se aprecia en la figura 14.

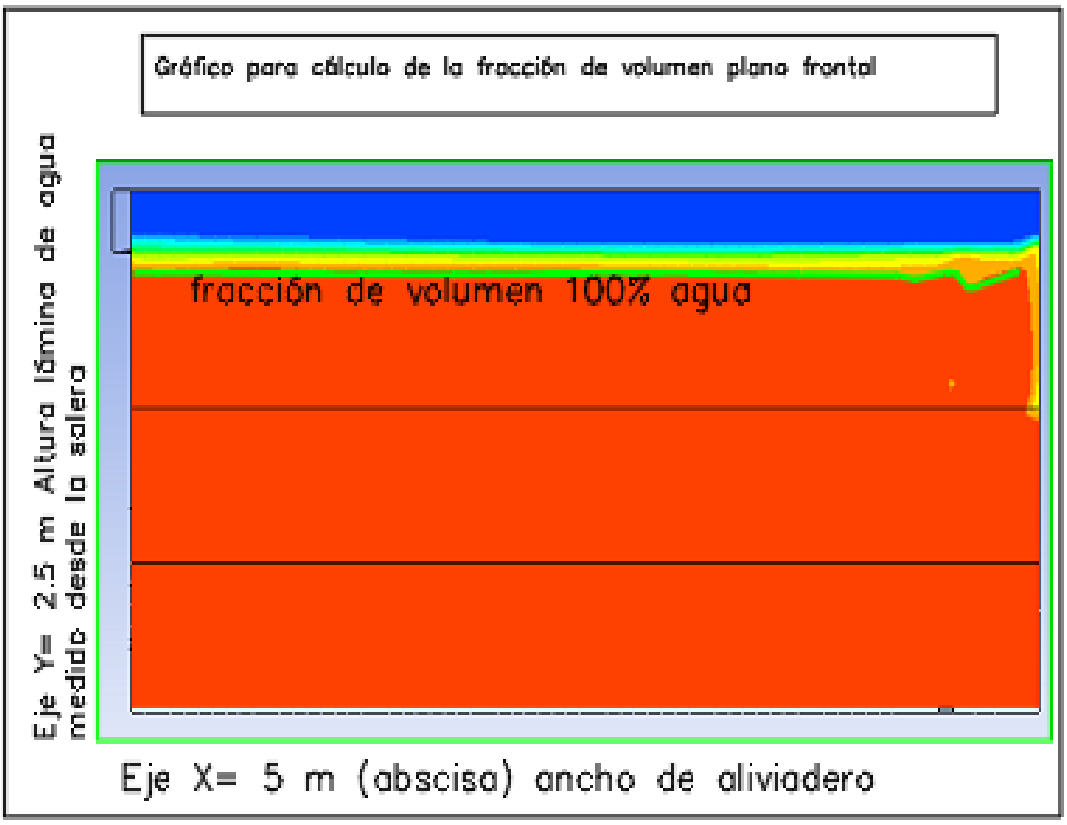



***Figura 14. Medición de la fracción de volumen mediante Ansys (plano frontal). Elaborada por el Autor***

| Caudal 9 m3/s | |
|---|---|
| Ancho de pantalla | Altura desde la solera |
| Abscisa x(m) | Y (m) |
| 0.021 | 2.137 |
| 1.160 | 2.143 |
| 1.691 | 2.142 |
| 2.230 | 2.133 |
| 2.699 | 2.132 |
| 3.952 | 2.121 |
| 4.986 | 2.154 |
| | |
| Promedio | 2.137 |
| Altura del vertedero | 1.700 |

Altura lámina sobre vertedero 0.437

| Caudal 6 m3/s | |
|---|---|
| Ancho de pantalla | Altura desde la solera |
| Abscisa x(m) | Y (m) |
| 0.010 | 2.050 |
| 0.713 | 2.050 |
| 1.516 | 2.040 |
| 2.400 | 2.030 |
| 3.373 | 2.030 |
| 4.247 | 2.010 |
| 4.839 | 2.000 |
| | |
| Promedio | 2.030 |
| Altura del vertedero | 1.700 |

Altura lámina sobre vertedero 0.330

| Caudal 5 m3/s | |
|---|---|
| Ancho de pantalla | Altura desde la solera |
| Abscisa x(m) | Y (m) |
| 0.026 | 1.940 |
| 0.889 | 1.948 |
| 1.707 | 1.948 |
| 2.605 | 1.940 |
| 3.406 | 1.931 |
| 4.172 | 1.914 |
| 4.983 | 1.931 |
| | |
| Promedio | 1.936 |
| Altura del vertedero | 1.700 |

Altura lámina sobre vertedero 0.236

| Caudal 4 m3/s | |
|---|---|
| Ancho de pantalla | Altura desde la solera |
| Abscisa x(m) | Y (m) |
| 0.043 | 1.883 |
| 0.670 | 1.869 |
| 1.480 | 1.862 |
| 2.455 | 1.865 |
| 5.015 | 1.771 |
| | |
| | |
| | |
| Promedio | 1.850 |
| Altura del vertedero | 1.700 |

Altura lámina sobre vertedero 0.150

***Tabla 18. Resultados de altura lámina de agua medida desde la solera del aliviadero y altura de lámina de agua sobre el vertedero frontal.***
***Elaborada por el Autor***

| Caudal Total $m^3/s$ | Caudal que pasa sobre vertedero (m3/s) | h0(m) | v(m/s) | b(m) | P(m) | Hd(m) | Coeficiente de descarga Cd |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | 4.730 | 0.437 | 0.932 | 5.000 | 1.700 | 0.481 | **0.970** |
| 6 | 2.580 | 0.330 | 0.673 | 5.000 | 1.700 | 0.353 | **0.840** |
| 5 | 1.830 | 0.236 | 0.559 | 5.000 | 1.700 | 0.252 | **0.990** |
| 4 | 0.970 | 0.150 | 0.505 | 5.000 | 1.700 | 0.163 | **1.010** |

***Tabla 19. Cálculo teórico de coeficientes de descarga para diferentes caudales con base en ecuación 10.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

### 4.7.4 Comparación de resultados entre modelación numérica y datos medidos

Con base en un aguacero ocurrido el 9 de febrero del año 2011, se obtuvieron datos de mediciones en la entrada del box, sobre el vertedero frontal y en el interceptor principal. Estos datos se presentan en la (tabla 20) y fueron importantes a la hora de calibrar el vertedero el Ejido.

| Aguacero con vertimiento/ calibración de vertedero el Ejido | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Q (Lps)Entrada | Q(Lps) Interceptor | h (cm) vertido |
| Fecha inicio | Fecha Fin | Hora | Eq: 43840 | Eq: 43838 | Eq: 45143 |
| 09/02/2011 5:35 | 09/02/2011 | 5:35 | 2498.149692 | 1104.798825 | 21.5 |
| 09/02/2011 5:36 | 09/02/2011 | 5:36 | 2535.126281 | 1102.793551 | 26.5 |
| 09/02/2011 5:37 | 09/02/2011 | 5:37 | 2572.102871 | 1100.788277 | 29.5 |
| 09/02/2011 5:38 | 09/02/2011 | 5:38 | 2609.079461 | 1098.783002 | 31.5 |
| 09/02/2011 5:39 | 09/02/2011 | 5:39 | 2646.056051 | 1096.777728 | 32.5 |
| 09/02/2011 5:40 | 09/02/2011 | 5:40 | 2683.03264 | 1094.772454 | 33.5 |
| 09/02/2011 5:41 | 09/02/2011 | 5:41 | 2720.009231 | 1092.76718 | 35 |
| 09/02/2011 5:42 | 09/02/2011 | 5:42 | 6088.676198 | 1090.761905 | 35 |
| 09/02/2011 5:43 | 09/02/2011 | 5:43 | 6113.856588 | 1088.756631 | 35 |
| 09/02/2011 5:44 | 09/02/2011 | 5:44 | 6139.036978 | 1086.751357 | 35.5 |
| 09/02/2011 5:45 | 09/02/2011 | 5:45 | 6164.217368 | 1084.746083 | 35.5 |
| 09/02/2011 5:46 | 09/02/2011 | 5:46 | 6189.397758 | 1082.740808 | 34.5 |
| 09/02/2011 5:47 | 09/02/2011 | 5:47 | 6214.578149 | 1080.735534 | 34.5 |
| 09/02/2011 5:48 | 09/02/2011 | 5:48 | 6239.758539 | 1078.73026 | 33.5 |
| 09/02/2011 5:49 | 09/02/2011 | 5:49 | 6039.920107 | 1076.724986 | 32 |
| 09/02/2011 5:50 | 09/02/2011 | 5:50 | 5894.064646 | 1074.719711 | 32 |
| 09/02/2011 5:51 | 09/02/2011 | 5:51 | 5748.209185 | 1072.714437 | 31 |
| 09/02/2011 5:52 | 09/02/2011 | 5:52 | 5602.353724 | 1070.709163 | 30 |
| 09/02/2011 5:53 | 09/02/2011 | 5:53 | 5456.498262 | 1068.703889 | 30 |
| 09/02/2011 5:54 | 09/02/2011 | 5:54 | 5310.642801 | 1066.698614 | 29 |
| 09/02/2011 5:55 | 09/02/2011 | 5:55 | 5164.787341 | 1064.69334 | 28.5 |
| 09/02/2011 5:56 | 09/02/2011 | 5:56 | 5018.93188 | 1062.688066 | 28 |

Tabla 20 (continúa)

| Aguacero con vertimiento/ calibración de vertedero el Ejido | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Q (Lps)Entrada | Q(Lps) Interceptor | h (cm) vertido |
| Fecha inicio | Fecha Fin | Hora | Eq: 43840 | Eq: 43838 | Eq: 45143 |
| 09/02/2011 5:57 | 09/02/2011 | 5:57 | 4430.374036 | 1060.682792 | 27.5 |
| 09/02/2011 5:58 | 09/02/2011 | 5:58 | 4366.918445 | 1058.677517 | 27.5 |
| 09/02/2011 5:59 | 09/02/2011 | 5:59 | 4303.462854 | 1056.672243 | 26.5 |
| 09/02/2011 6:00 | 09/02/2011 | 6:00 | 4240.007264 | 1054.666969 | 25.5 |
| 09/02/2011 6:01 | 09/02/2011 | 6:01 | 4176.551673 | 1052.661694 | 25.5 |
| 09/02/2011 6:02 | 09/02/2011 | 6:02 | 4113.096082 | 1050.65642 | 25 |
| 09/02/2011 6:03 | 09/02/2011 | 6:03 | 4049.640491 | 1048.651146 | 25 |
| 09/02/2011 6:04 | 09/02/2011 | 6:04 | 3986.184901 | 1046.645872 | 24 |
| 09/02/2011 6:05 | 09/02/2011 | 6:05 | 3922.72931 | 1044.640597 | 23.5 |
| 09/02/2011 6:06 | 09/02/2011 | 6:06 | 3859.273719 | 1042.635323 | 23 |
| 09/02/2011 6:07 | 09/02/2011 | 6:07 | 3795.818128 | 1040.630049 | 22.5 |
| 09/02/2011 6:08 | 09/02/2011 | 6:08 | 3781.86823 | 1038.624775 | 22 |
| 09/02/2011 6:09 | 09/02/2011 | 6:09 | 3664.936223 | 1036.6195 | 21.5 |
| 09/02/2011 6:10 | 09/02/2011 | 6:10 | 3548.004215 | 1034.614226 | 21 |
| 09/02/2011 6:11 | 09/02/2011 | 6:11 | 3431.072208 | 1032.608952 | 20.5 |
| 09/02/2011 6:12 | 09/02/2011 | 6:12 | 3314.140202 | 1030.603678 | 19.5 |
| 09/02/2011 6:13 | 09/02/2011 | 6:13 | 3197.208195 | 1028.598403 | 18.5 |
| 09/02/2011 6:14 | 09/02/2011 | 6:14 | 3080.276188 | 1026.593129 | 18.5 |
| 09/02/2011 6:15 | 09/02/2011 | 6:15 | 2963.34418 | 1024.587855 | 17.5 |
| 09/02/2011 6:16 | 09/02/2011 | 6:16 | 2846.412173 | 1022.582581 | 17 |
| 09/02/2011 6:17 | 09/02/2011 | 6:17 | 2729.480166 | 1020.577306 | 15.5 |
| 09/02/2011 6:18 | 09/02/2011 | 6:18 | 2612.54816 | 1018.572032 | 15 |
| 09/02/2011 6:19 | 09/02/2011 | 6:19 | 2495.616152 | 1016.566758 | 13.5 |
| 09/02/2011 6:20 | 09/02/2011 | 6:20 | 2378.684145 | 1014.561484 | 13.5 |
| 09/02/2011 6:21 | 09/02/2011 | 6:21 | 2261.752138 | 1012.556209 | 13 |
| 09/02/2011 6:22 | 09/02/2011 | 6:22 | 2144.820131 | 1010.550935 | 12 |
| 09/02/2011 6:23 | 09/02/2011 | 6:23 | 2027.888124 | 1008.545661 | 12 |
| 09/02/2011 6:24 | 09/02/2011 | 6:24 | 1910.956117 | 1006.540386 | 11 |
| 09/02/2011 6:25 | 09/02/2011 | 6:25 | 1970.264607 | 1004.535112 | 10 |
| 09/02/2011 6:26 | 09/02/2011 | 6:26 | 1925.602002 | 1002.529838 | 10 |
| 09/02/2011 6:27 | 09/02/2011 | 6:27 | 1880.939397 | 1000.524564 | 9 |
| 09/02/2011 6:28 | 09/02/2011 | 6:28 | 1836.276792 | 998.5192894 | 9 |
| 09/02/2011 6:29 | 09/02/2011 | 6:29 | 1791.614187 | 996.5140152 | 8.5 |
| 09/02/2011 6:30 | 09/02/2011 | 6:30 | 1746.951582 | 994.5087409 | 8 |
| 09/02/2011 6:31 | 09/02/2011 | 6:31 | 1702.288977 | 992.5034667 | 7.5 |

Tabla 20 (continúa

| Aguacero con vertimiento/ calibración de vertedero el Ejido | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Q (Lps)Entrada | Q(Lps) Interceptor | h (cm) vertido |
| Fecha inicio | Fecha Fin | Hora | Eq: 43840 | Eq: 43838 | Eq: 45143 |
| 09/02/2011 6:32 | 09/02/2011 | 6:32 | 1657.626371 | 990.4981924 | 7 |
| 09/02/2011 6:33 | 09/02/2011 | 6:33 | 1612.963767 | 988.4929181 | 6.5 |
| 09/02/2011 6:34 | 09/02/2011 | 6:34 | 1568.301161 | 986.4876439 | 6 |
| 09/02/2011 6:35 | 09/02/2011 | 6:35 | 1523.638556 | 984.4823696 | 5.5 |
| 09/02/2011 6:36 | 09/02/2011 | 6:36 | 1478.975951 | 982.4770954 | 5 |
| 09/02/2011 6:37 | 09/02/2011 | 6:37 | 1434.313346 | 980.4718211 | 4.5 |
| 09/02/2011 6:38 | 09/02/2011 | 6:38 | 1389.650741 | 978.4665468 | 4.5 |
| 09/02/2011 6:39 | 09/02/2011 | 6:39 | 1344.988136 | 976.4612726 | 4 |
| 09/02/2011 6:40 | 09/02/2011 | 6:40 | 1300.325531 | 974.4559983 | 3 |
| 09/02/2011 6:41 | 09/02/2011 | 6:41 | 1255.662926 | 972.4507241 | 3 |
| 09/02/2011 6:42 | 09/02/2011 | 6:42 | 1211.00032 | 970.4454498 | 2 |
| 09/02/2011 6:43 | 09/02/2011 | 6:43 | 1166.337716 | 968.4401755 | 2 |
| 09/02/2011 6:44 | 09/02/2011 | 6:44 | 1048.999273 | 966.4349013 | 1.5 |
| 09/02/2011 6:45 | 09/02/2011 | 6:45 | 1047.781396 | 964.429627 | 1 |
| 09/02/2011 6:46 | 09/02/2011 | 6:46 | 1046.563519 | 962.4243528 | 0.5 |

***Tabla 20. Datos medidos en aguacero con vertimiento para calibración del vertedero el Ejido (ECI, 2009.Subproducto 3.3)***

***Fuente: Subproducto 3.5 contrato 1-02-25500-0884-2009. Consultoría para la investigación, estudios y diseños de ingeniería básica para la rehabilitación de las redes troncales en los sectores de expansión y re densificación - subcuenca san francisco***

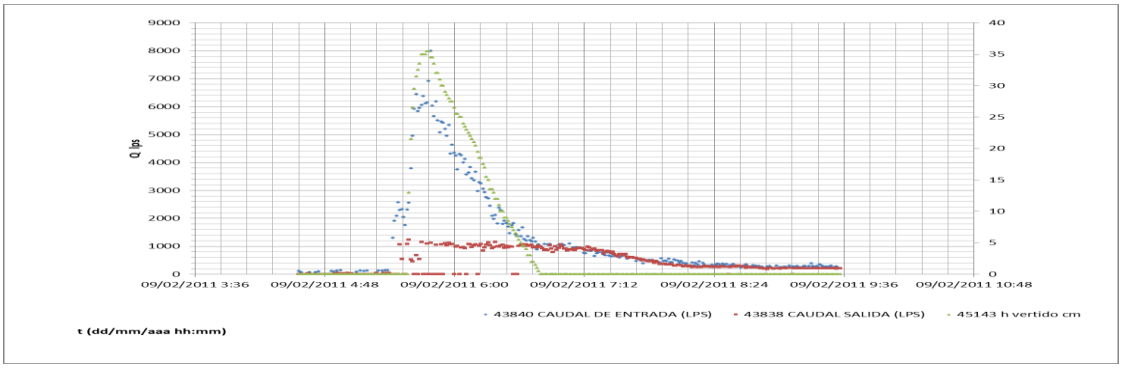



*Figura 15. Hidrograma de aguacero con vertimiento para calibración de vertedero.****Fuente: Subproducto 3.5 contrato 1-02-25500-0884-2009. Consultoría para la investigación, estudios y diseños de ingeniería básica para la rehabilitación de las redes troncales en los sectores de expansión y re densificación - subcuenca san francisco***

| Q(m3/s) que pasa vertedero | C (coeficiente de descarga) | L (Ancho Vertedero) | H(m) Altura sobre vertedero |
|---|---|---|---|
| 4.730 | 2.230 | 5.000 | 0.564 |
| 2.580 | 2.230 | 5.000 | 0.380 |
| 1.830 | 2.230 | 5.000 | 0.300 |
| 0.970 | 2.230 | 5.000 | 0.200 |

Cálculo con base en la ecuación resultado de la calibración $\boldsymbol{Q = C * L * H^{1.5}}$

| Q (m3/s) entrada Box | Qmodelo (m3/s) pasa sobre vertedero- mediciones | Qmodelo (m3/s) pasa sobre vertedero |
|---|---|---|
| | | |
| 6.00 | 4.6 | 2.58 |
| 5.00 | 3.3 | 1.83 |
| 4.00 | 2.7 | 0.97 |

Resultados obtenidos en la modelación

***Tabla 21. Comparación entre datos medidos y datos obtenidos en la modelación numérica de Ansys – Fluent***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

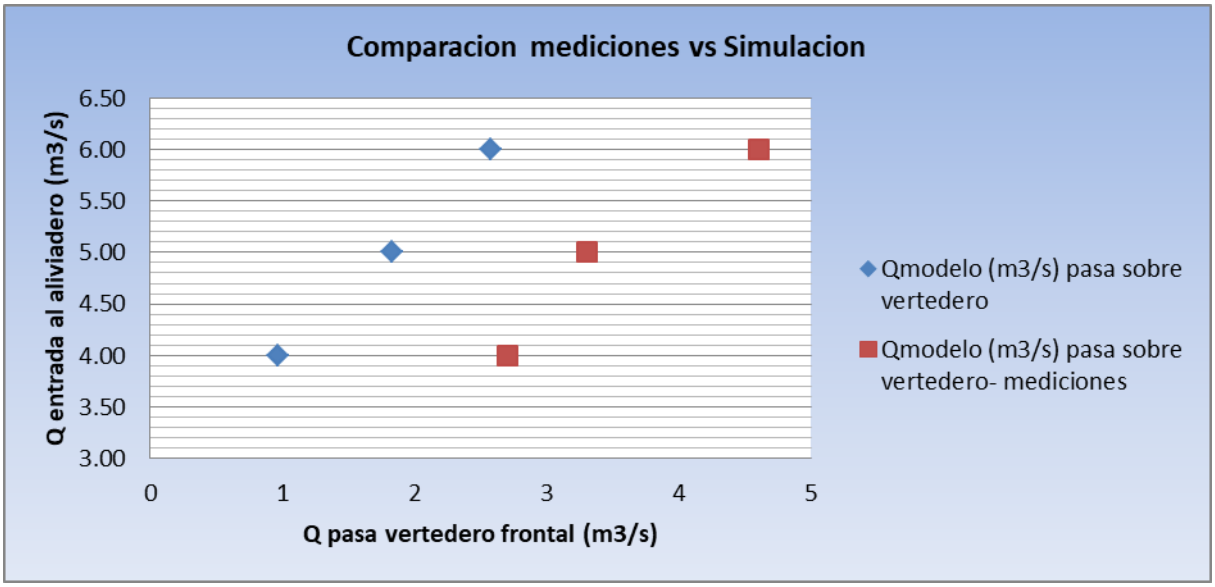



***Figura 16. Gráfico de comparación de coeficientes de descarga (calibración vs modelación)***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

La medición directa de la descarga se efectuó mediante el muestreo de la velocidad media y altura de lámina de agua lo largo de la sección transversal en

la entrada del box, en el vertedero frontal y en la tubería del interceptor, dando como resultados los descritos en la tabla 21.

La forma más sencilla consiste en establecer una relación entre el caudal y la altura o nivel de la columna de agua, de un número importante de mediciones directas y simultáneas. Se obtuvo la información y se contrastó con la información resultante de la modelación numérica. Existen algunas diferencias entre estos dos resultados, por lo tanto se concluye que estas diferencias se deben a varios aspectos que no se tuvieron en cuenta en la modelación numérica bajo el software Ansys -Fluent.

| Q(m3/s) que pasa vertedero | H(m) Altura sobre vertedero mediciones | H(m) Altura sobre vertedero Modelación | Diferencias porcentuales |
|---|---|---|---|
| 4.730 | 0.564 | 0.437 | 22.52 |
| 2.580 | 0.380 | 0.330 | 13.16 |
| 1.830 | 0.300 | 0.236 | 21.33 |
| 0.970 | 0.200 | 0.150 | 25.00 |

***Tabla 22. Diferencias de alturas sobre vertedero, entre datos medidos y resultados de simulación.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Como resultado, se aprecian las diferencias en alturas de lámina de agua sobre el vertedero de un 25% para un caudal de 0.97 $m3/s$; para un caudal de 2.58 $m3/s$ se reduce la diferencia a un 13%, mientras que para un caudal de 4.73 m3/s se presentan diferencias porcentuales de 22%. Las grandes diferencias entre los caudales medidos y los calculados mediante la simulación numérica pueden ser por posibles sedimentaciones, o por haber utilizado en la simulación de Ansys como condición de frontera descarga libre (Pressure Outlet), mientras que durante la medición, existía un control aguas abajo, en un pozo de inspección.

Para el caudal de $9m^3/s$ no se tienen registros en la estructura el Ejido. La lámina de agua obtenida es 0.1m metros con respecto a la modelada para $6m^3/s$, por lo cual el caudal descargado por las tuberías laterales se espera sea mayor.

### 4.7.5 Comparación entre la modelación numérica y los datos depurados por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Los valores obtenidos para el coeficiente de descarga a partir de la modelación son comparados con los valores obtenidos en el estudio realizado por la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2009) para verificar su validez.

| Coeficiente de descarga Cd (Escuela Colombiana de Ingeniería) | Coeficiente de descarga Cd (Modelación numérica) | Diferencia (%) |
|---|---|---|
| 0.75 | 0.84 | 10.12 |

***Tabla 23. Comparación entre coeficientes de descarga obtenidos en el modelo numérico y la depuración de datos de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (2009).***

***Fuente: Elaborada por el Autor***

El resultado obtenido entre el modelo numérico y los datos depurados por la escuela para el coeficiente de descarga varían en un 10.12%. La diferencia entre los datos puede explicarse debido a las condiciones particulares que se presentan en la estructura y que no fueron modeladas, los cuales se resumen a continuación: 1) la presencia de sedimentos y contaminantes en el agua pueden hacer variar los niveles de agua y densidad del fluido y 2) la depuración de datos se hace considerando la variación del nivel del agua con respecto al tiempo mientras que la modelación numérica se realizó para flujo permanente 3) las condiciones de frontera en las descargas influye directamente en los resultados, ya que se tomó como condición de frontera descarga libre en la salida en el interceptor, mientras que en las mediciones se tenía control aguas abajo.

## 4.8 Validación de los resultados y control de convergencia

### 4.8.1 Residuales

Cuando se definen las condiciones de la modelación, se debe establecer un criterio de convergencia para todas las ecuaciones que se van a resolver. Para la

actual modelación se establecieron criterios de convergencia con residuales de 10e-4 para cada una de las siguientes ecuaciones:

- ✓ Velocidad en X
- ✓ Velocidad en Y
- ✓ Velocidad en Z
- ✓ Energía cinética turbulenta
- ✓ Tasa de disipación de energía cinética
- ✓ Ecuación de VOF

Se considera que los resultados son adecuados cuando el error se mantiene entre 10e-06 y 10e-04 por recomendaciones de (Ansys - Fluent Theory Guide (versión 14.5 de 2012).

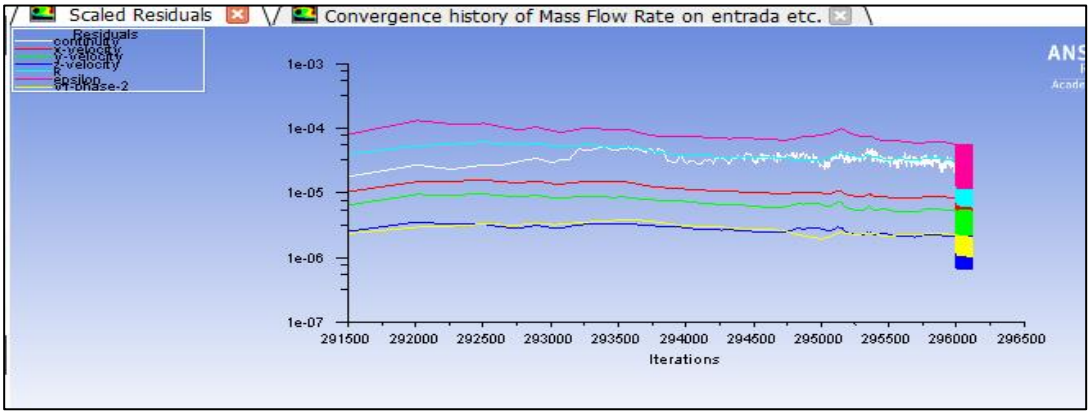



***Figura 17. Criterio de convergencia de los residuos (solución exacta vs solución aproximada).***
***Elaborada por el Autor***

Para cada uno de los caudales modelados, los residuales cumplen con las recomendaciones de Ansys, como se observa en la figura 17.

### 4.8.2 Criterio de conservación de la masa

Por otro lado, es importante controlar el balance de caudales que entran y salen del modelo, en la entrada del box y el caudal saliente por las tres tuberías y el vertedero lateral. Poco a poco la diferencia entre los caudales de entrada y de salida tiende a cero.

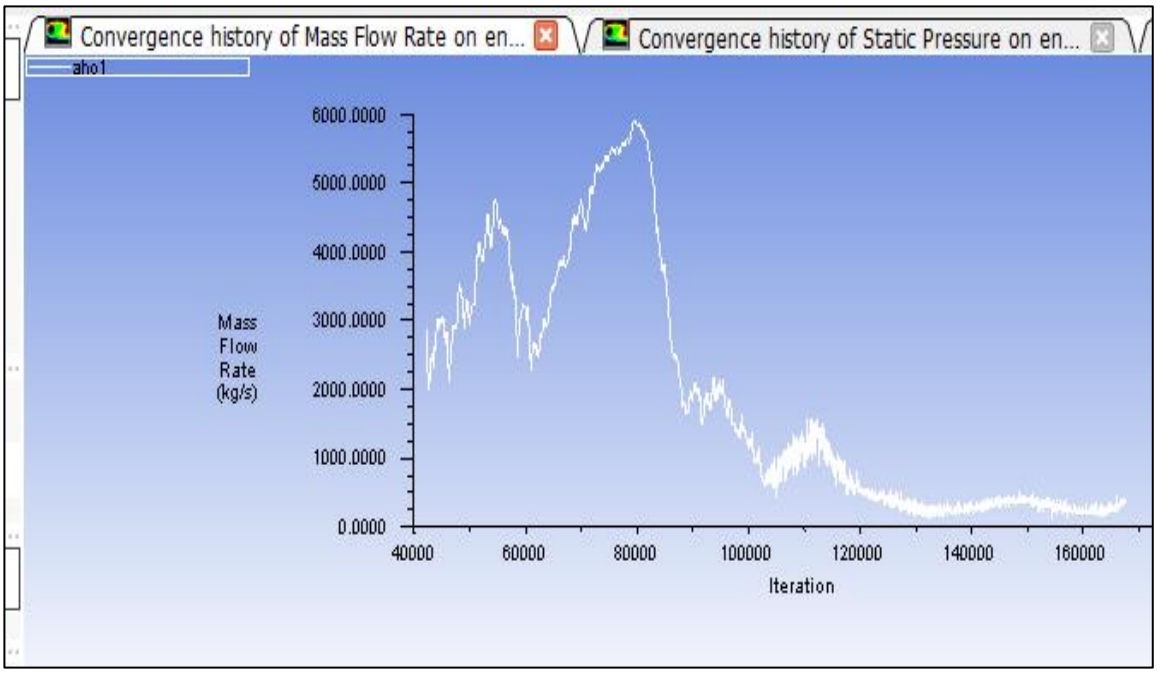



***Figura 18. Gráfico de convergencia de la conservación del flujo másico.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Dado que en esta modelación se están resolviendo las ecuaciones de conservación de la masa, se debe asegurar que la solución final la conserve, la solución nunca será exactamente cero, sin embargo las diferencias deben ser lo suficientemente pequeñas para considerar convergencia de la solución. En el presente trabajo, se consideró como criterio que la variación no superara un 3%.

El Flujo másico de entrada, debe mantener su volumen a medida que fluye en el aliviadero, dado que es un flujo incompresible. Esto significa que el volumen de fluido registrado en todas las entradas y que fluye en toda la estructura en un período de tiempo dado debe ser igual al volumen de fluido registrado en todas las salidas en el mismo período de tiempo. Cuando esta condición se cumple la tasa de flujo másico debe ser cercana a cero a medida que pasan las iteraciones como se observa en la figura 18.

## 4.9 Resultados modelación de escenarios mediante Ansys – Fluent

### 4.9.1 Residuales

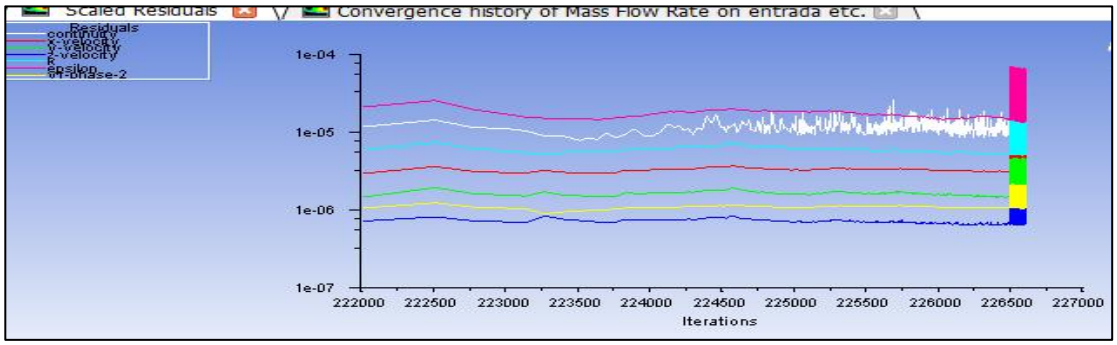



***Figura 19. Gráfico de convergencia residuos para Q= 9m3/s.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Resulta importante resaltar que la evolución del residuo es una de las medidas más importantes de la convergencia de una solución iterativa, ya que cuantifica directamente el error en la solución del sistema de ecuaciones. El residuo mide la diferencia entre iteraciones de una variable en cada volumen de control, por lo tanto, cada celda tendrá su propio valor residual para cada una de las variables. En una solución numérica iterativa el residuo nunca será exactamente cero, sin embargo, entre menor sea el valor del residuo más precisa será la solución numérica.

En la modelación propuesta, al definir las condiciones de frontera se establecieron los diferentes criterios de convergencia para las ecuaciones de continuidad en las tres dimensiones (X, Y, Z), además de las ecuaciones de energía cinética turbulenta, la tasa de disipación de la energía turbulenta y de fracción de volumen de fluido (VOF). Para cada tipo de malla se establece que un resultado es bueno si los residuales alcanzan valores entre $10^{-4}$ hasta $10^{-6}$. Como resultado de cada uno de los escenarios modelados se observan que los criterios cumplen con los valores mostrados anteriormente.

| Variable | Q= 9m3/s | Q= 6m3/s | Q=5m3/s | Q=4m3/s | Q= 2.7 m3/s | Q= 2m3/s |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Velocidad en X | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ |
| Velocidad en Y | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ |
| Velocidad en Z | $1e^{-06}$ | $1e^{-06}$ | $1e^{-06}$ | $1e^{-06}$ | $1e^{-06}$ | $1e^{-06}$ |
| Continuidad | $1e^{-04}$ | $1e^{-04}$ | $1e^{-04}$ | $1e^{-04}$ | $1e^{-04}$ | $1e^{-04}$ |
| K | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ | $1e^{-05}$ |
| Épsilon | $1e^{-04}$ | $1e^{-04}$ | $1e^{-04}$ | $1e^{-04}$ | $1e^{-04}$ | $1e^{-04}$ |

***Tabla 24. Resumen de residuos finales obtenidos en las modelaciones al momento de la convergencia.***

***Fuente: Elaborada por el Autor***

### 4.9.2 Análisis de los campos de velocidad

Con el propósito de evaluar el comportamiento hidráulico de la estructura en conjunto (aliviadero, cámaras, vertedero y orificios), se hace indispensable conocer la velocidad del fluido en cada uno de los elementos que componen el sistema.

En la figura 20, se puede apreciar que la velocidad media en la entrada es de 0.66 m/s, continuando con una velocidad homogénea en toda la cámara con valores cercanos a 1m/s.

También se observa que la velocidad aumenta al pasar el vertedero frontal, se presentan vectores desordenados que al golpear el piso de la cámara se dispersa formando vectores con direcciones y magnitudes diferentes.

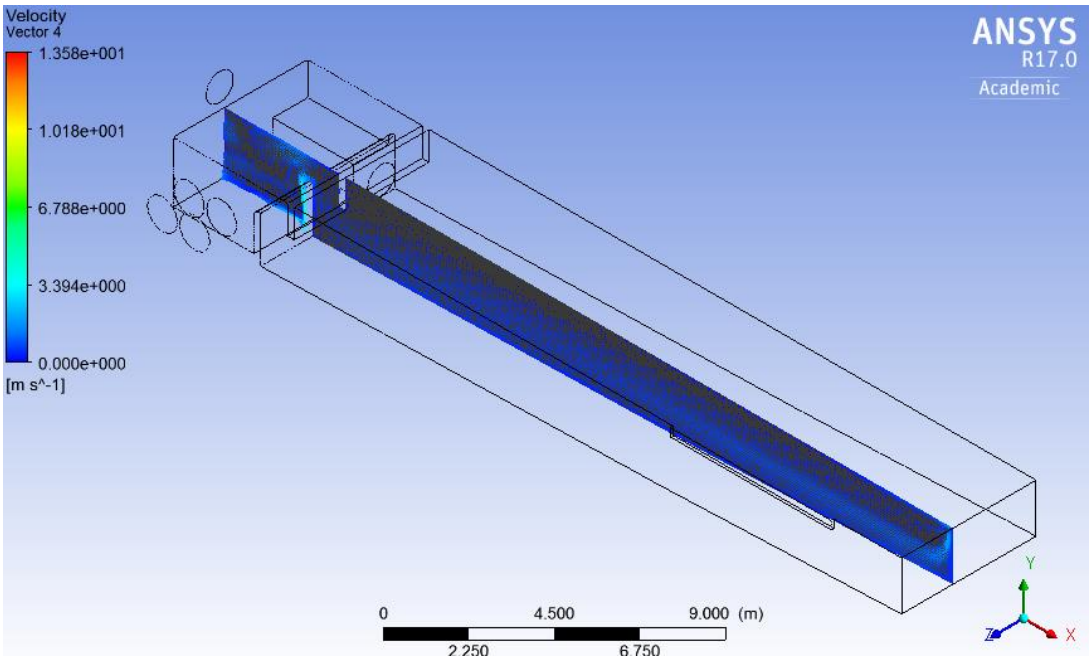
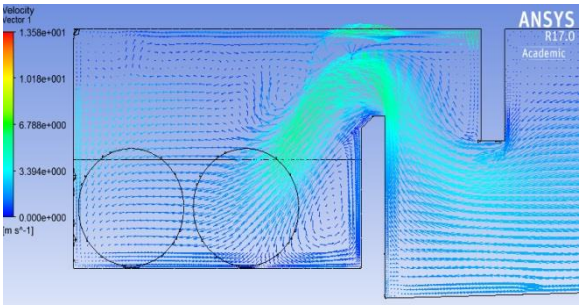
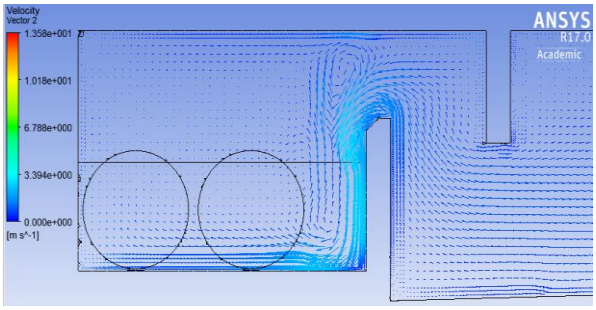



***Figura 20. Plano de análisis del campo de velocidades en la pantalla, vertedero y cámara de alivio.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

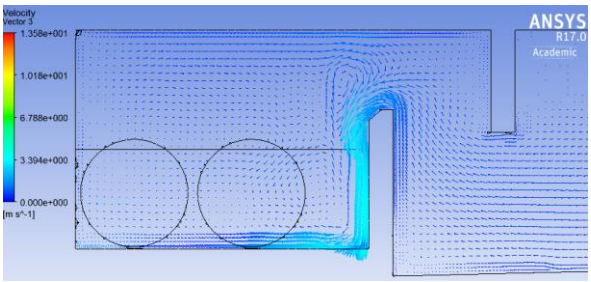
Para la salida principal, en la tubería del interceptor se presenta una velocidad promedio de 4.75 $m/s$, mientras que en las salidas de alivio hacia el canal comunero la velocidad promedio es de 3.48 $m/s$. En el vertedero lateral, que trabaja como ventana en caso de grandes caudales, se presenta una velocidad promedio de 1.04 m/s. Todo el análisis anterior para un caudal de entrada correspondiente a 9 $m3/s$.



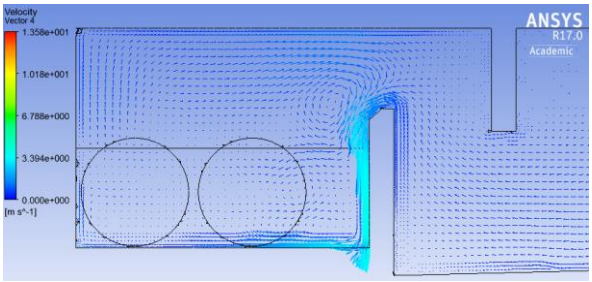

**Vectores de velocidad Q= 9 $m3/s$**



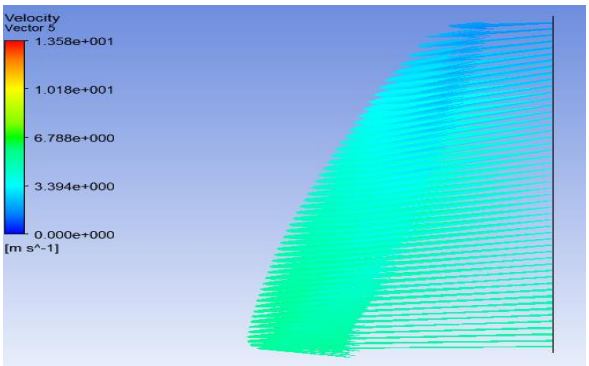

**Vectores de velocidad Q= 6 $m3/s$**




**Vectores de velocidad Q= 5 $m3/s$**

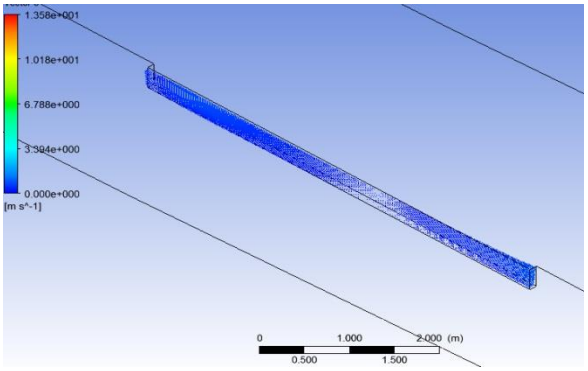



**Vectores de velocidad Q= 4 $m3/s$**




**Vectores de velocidad Q= 9 $m3/s$**

**Salida Interceptor**




**Vectores de velocidad Q= 9 $m3/s$**

**salida vertedero lateral**

***Figura 21. Vectores de velocidad en plano longitudinal – para caudales simulados***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Los vectores de velocidad son indispensables para mostrar la dirección y magnitud de la velocidad en cada punto determinado y detectar los flujos secundarios y remolinos generados.

En la figura 21, se puede observar con claridad que al llegar el flujo al vertedero con una velocidad promedio de 1.5 m/s, golpea la pared, generando una onda de forma elíptica que permite rebotar en la pantalla de la cámara generando zonas de separación del flujo en dirección aguas arriba y vórtices entre la pantalla y el vertedero.

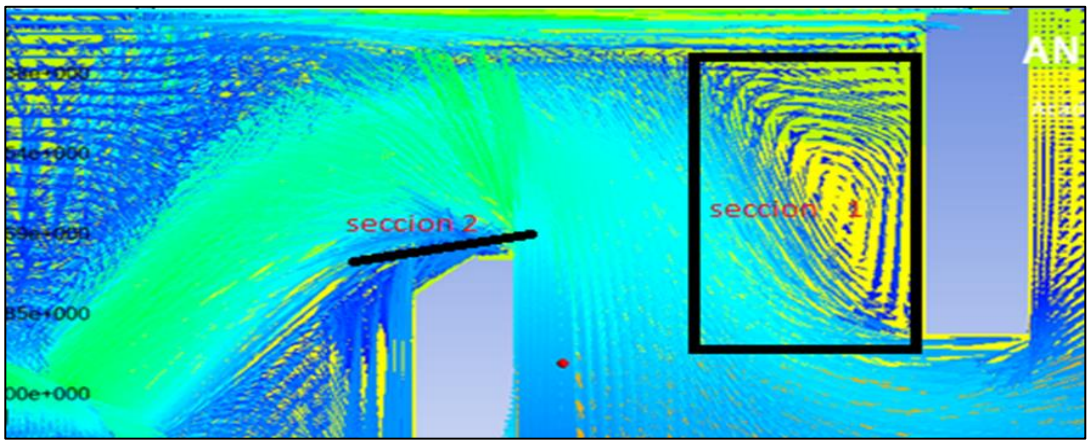



***Figura 22. Vórtices de fluido con flujo en dirección contraria y recirculación al golpear el muro del vertedero.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

En la figura 22, se observa en la sección 1 que al pasar el flujo por debajo de la pantalla golpea el muro del vertedero frontal causando un remolino que recircula el fluido para golpear nuevamente la pantalla principal y finalmente pasar sobre el vertedero de manera turbulenta En la sección 2, la distribución de velocidades es compleja con vectores de velocidad densos, con dirección ligeramente hacia arriba debido a la forma del vertedero y a la presencia de la cámara un metro antes que el vertedero, esta pantalla actúa de la misma forma que una compuerta para grandes caudales generando un resalto hidráulico después de pasar el flujo como se observa en la figura 22.

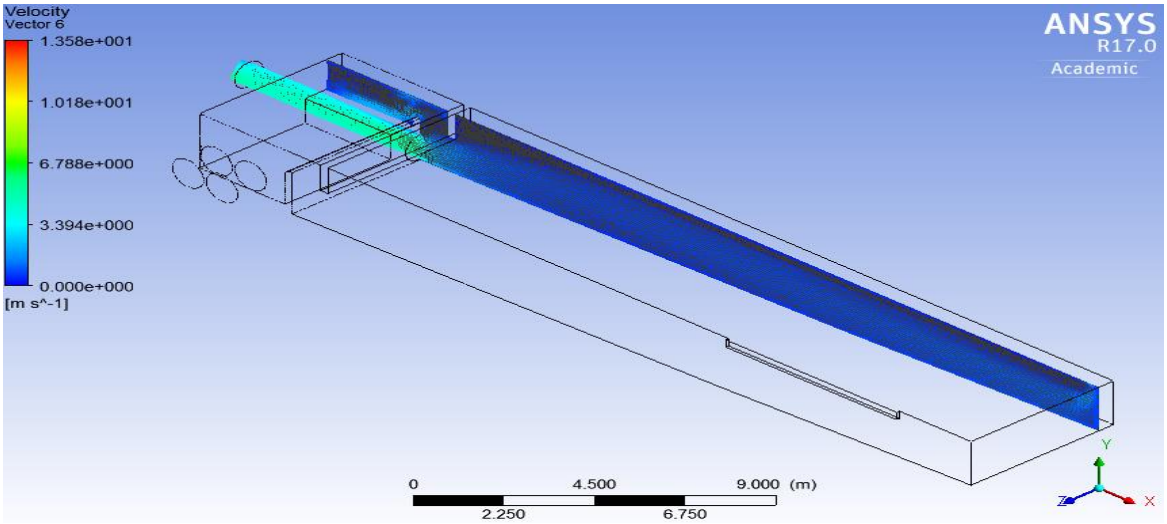
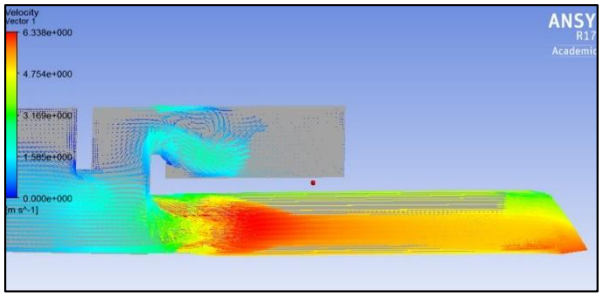
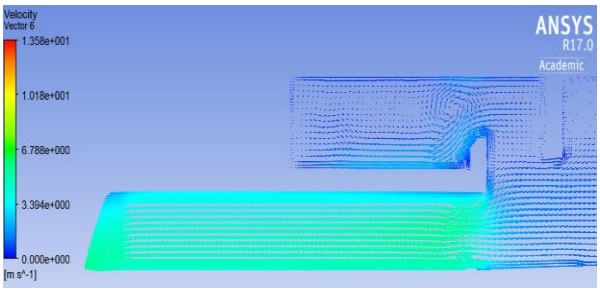


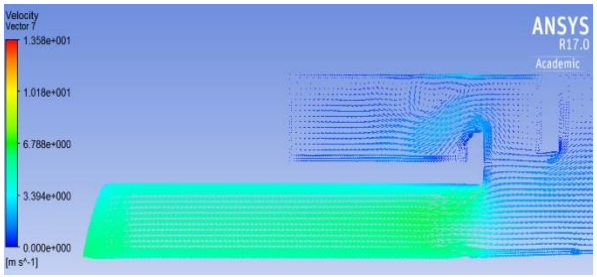

***Figura 23. Plano longitudinal por eje de tubería principal (Interceptor)***
***Fuente:*** *Elaborada por el Autor*



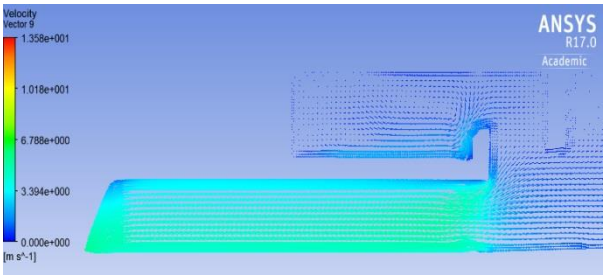

Vectores de velocidad Interceptor Q= 9m3/s



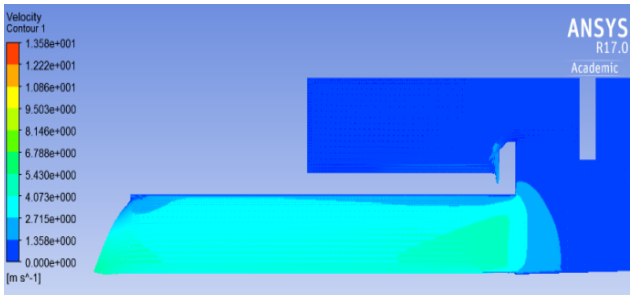

Vectores de velocidad Interceptor Q= 6m3/s



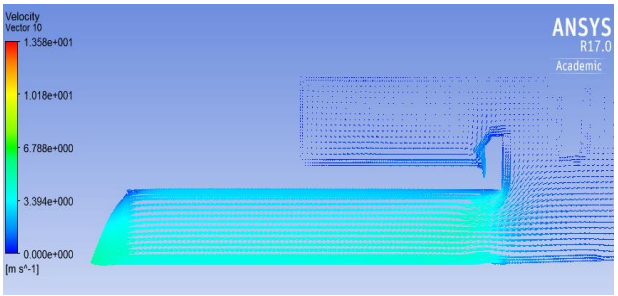

Vectores de velocidad Interceptor Q= 5m3/s



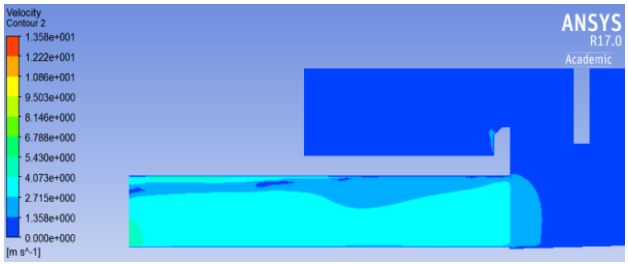

Vectores de velocidad Interceptor Q= 4m3/s



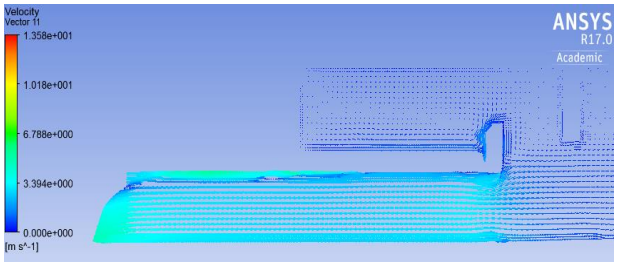

Contornos de velocidad Interceptor Q= 2.7m3/s




Vectores de velocidad Interceptor Q= 2.7m3/s




Vectores de velocidad Interceptor Q= 2m3/s




Vectores de velocidad Interceptor Q=2m3/s

***Figura 24. Contornos y vectores de velocidad en el plano central de la tubería de salida principal (Interceptor).***
***Fuente: Elaborado por el Autor***

En la figura 24 se ve claramente que fluido empieza acelerarse cerca de la entrada al Interceptor por la reducción de la sección. El fluido cerca de la salida presenta su mayor velocidad de 5.7 m/s y una velocidad promedio de 4.75 m/s en la tubería.

Para un caudal de 2 $\frac{m^3}{s}$, en los contornos de velocidad se puede ver que la tubería de salida principal no trabaja a tubo lleno. Se puede apreciar la superficie libre de la columna de agua, la cual trabaja a un 75 % de su capacidad de descarga.

Para caudales superiores a 2.7 $\frac{m^3}{s}$ la tubería de salida está totalmente llena y trabaja a presión.

### 4.9.3 Análisis de líneas de corriente y perfiles de flujo

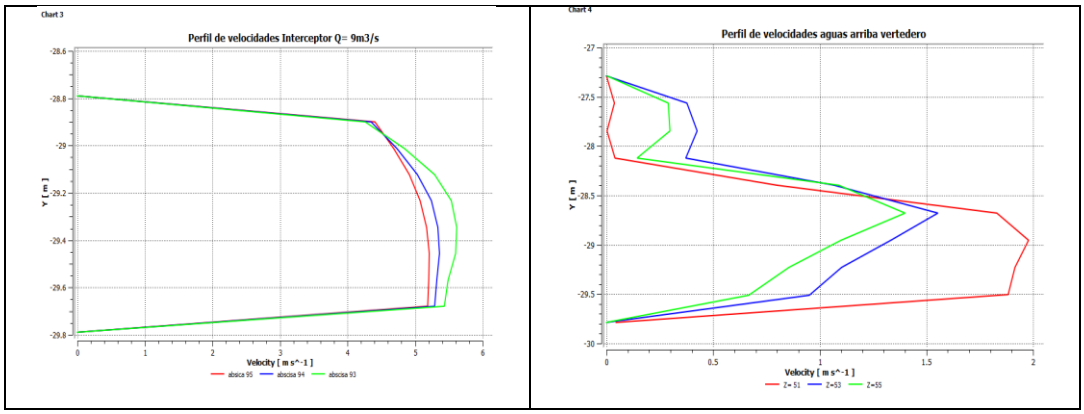



***Figura 25. Perfiles de flujo interceptor y box culvert para Q= 9 m3/s.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

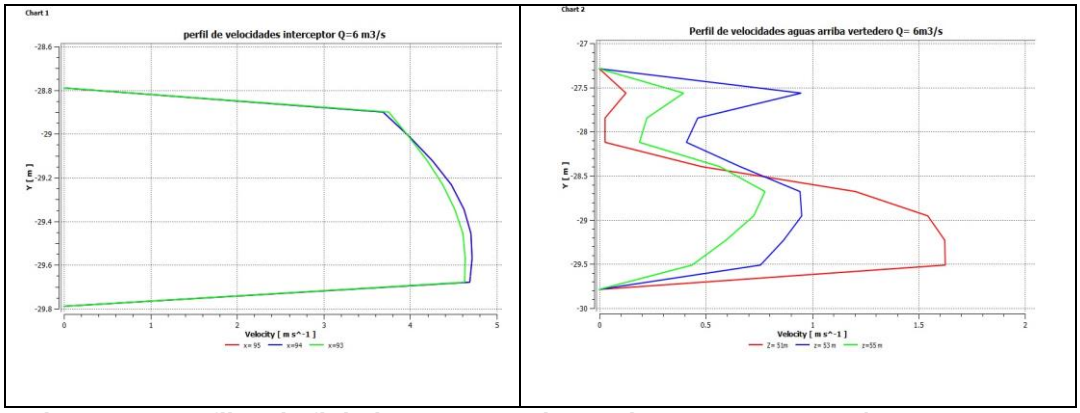



***Figura 26. Perfiles de flujo interceptor y box culvert para Q= 6 m3/s.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

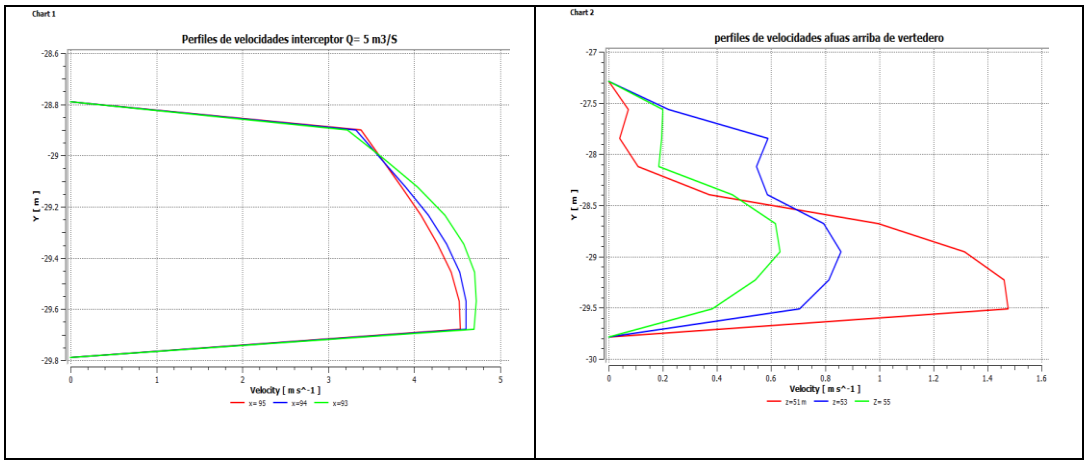



***Figura 27. Perfiles de flujo interceptor y box culvert para Q= 5 m3/s.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

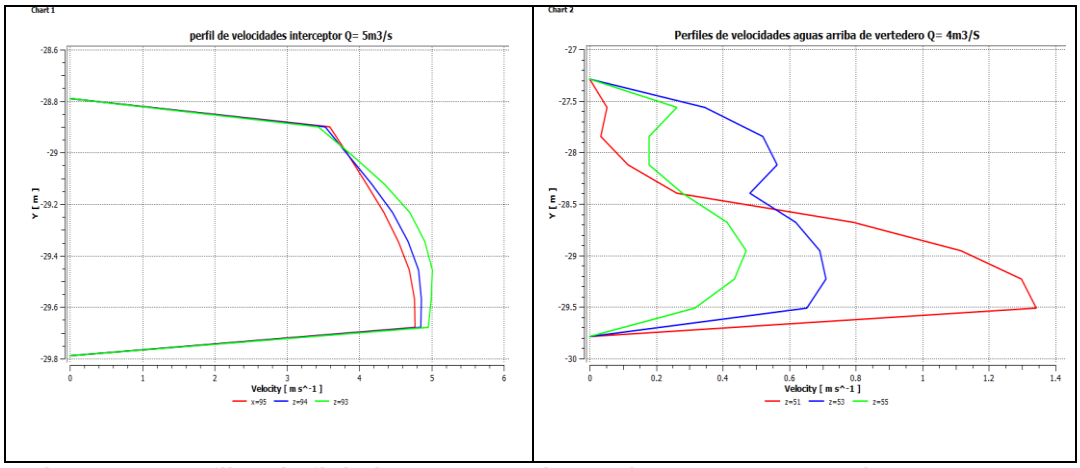



***Figura 28. Perfiles de flujo interceptor y box culvert para Q= 4 m3/s.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

En las figuras 25 a 28, los perfiles de velocidades en la salida del interceptor presentan las características teóricas para el perfil para régimen turbulento.

En tal sentido, se puede observar en las paredes de la tuberia que la velocidad es cero próxima a la cota batea y la cota clave. A medida que el flujo se aleja de las paredes aumenta su velocidad, encontrandose velocidades de hasta 5 m/s. La tuberia se presuriza en este tramo y siempre va a tubo lleno.

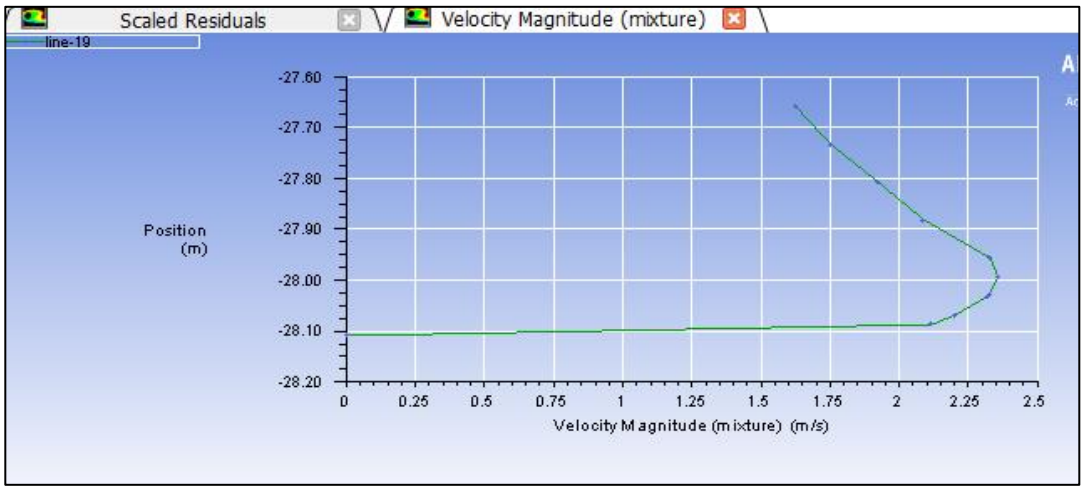



***Figura 29. Perfil de velocidades en el eje del box culvert.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Las velocidades en el box de acceso no están uniformemente distribuidas. Esto se explica por los efectos que la resistencia cortante del fluido en movimiento tiene en distintos puntos. La figura 29, muestra la distribución de velocidades en un plano por el eje del box de sección rectangular, se asemeja al perfil típico de un flujo uniforme a superficie libre, con la mayor velocidad del fluido entre los 10 y 20 centímetros por encima de la solera o fondo del canal.

### 4.9.4 Análisis de la fracción de volumen

Como se ha comentado en la definición de las condiciones de frontera y la configuración, en el modelo se presenta la mezcla de agua-aire, donde la fase 1 se definió como aire y fase 2 como agua. Se puede observar en el contorno de fracción de volumen que se ven claramente definidas las 2 fases.

Se puede observar en la figura 30, que la fracción de volumen de agua para 100% de concentración se presenta a 2.12 m, medidos desde la solera del canal, que corresponde a una altura sobre el vertedero de 0.42 m para un caudal de 9 m3/s.

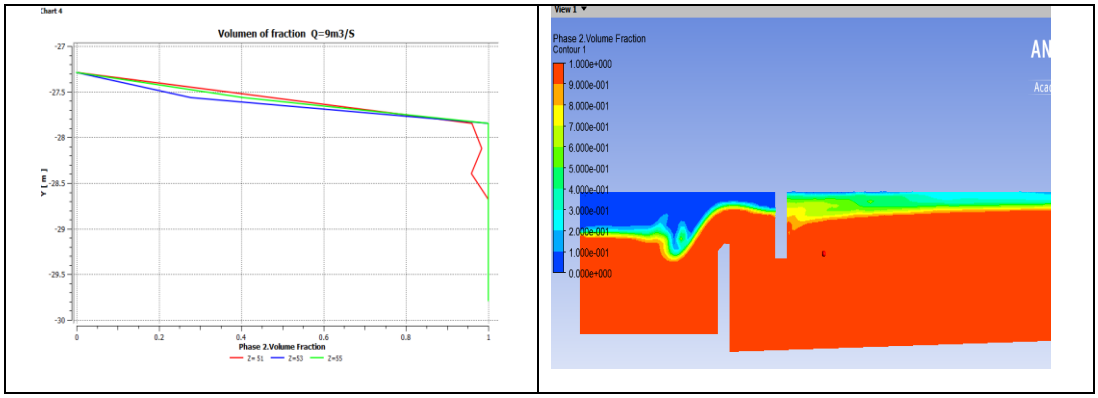



***Figura 30. Perfiles de fracción de volumen para Q = 9 m3/s aguas arriba del vertedero.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

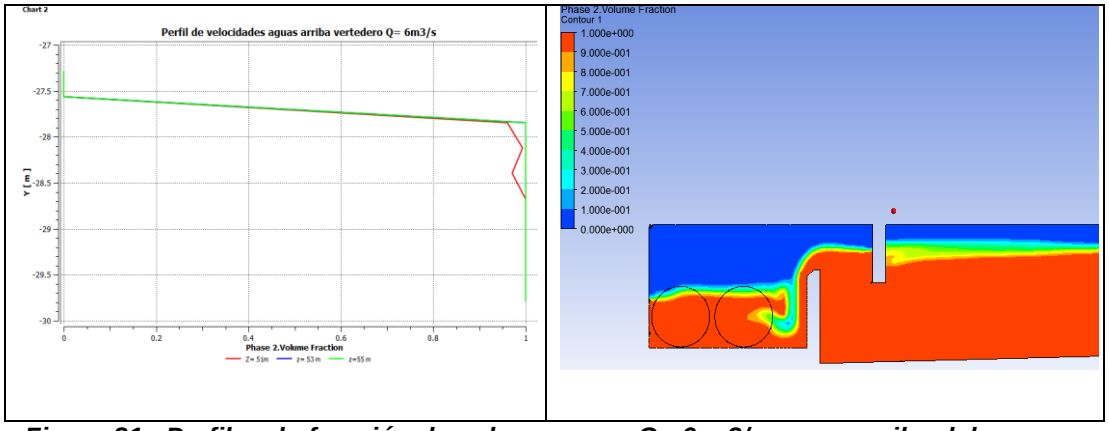



***Figura 31. Perfiles de fracción de volumen para Q= 6 m3/s aguas arriba del vertedero.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

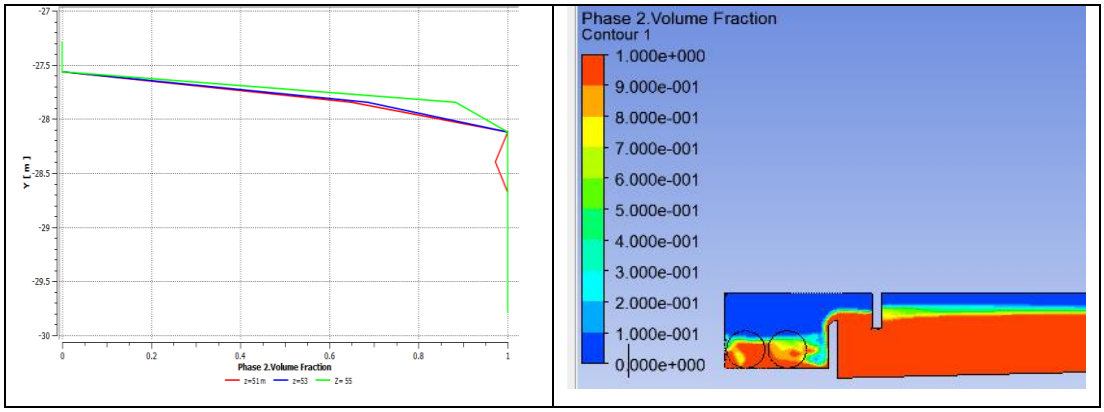



***Figura 32. Perfiles de fracción de volumen para Q= 5 m3/S aguas arriba del vertedero.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

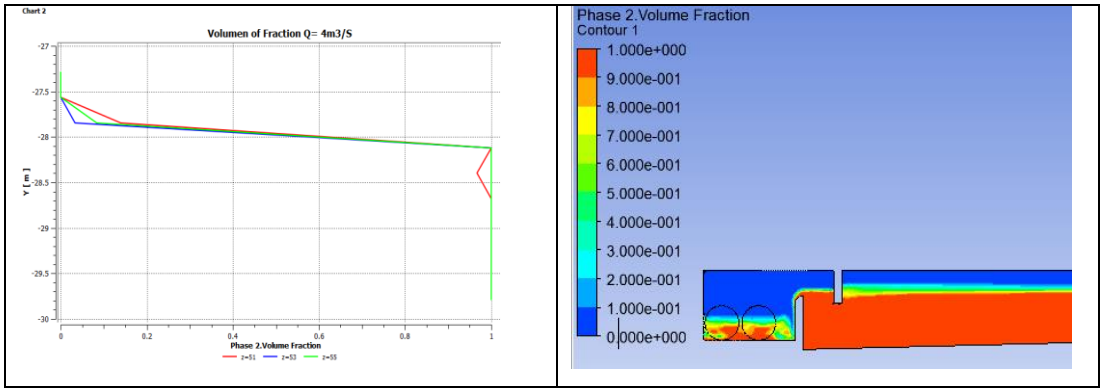



***Figura 33. Fracción de volumen en fases para diferentes caudales.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Para un caudal de 6 $m3/s$ que se representa en la figura 31, se tiene una altura de lámina de agua medido desde la solera de 2.03 m, que corresponde a una lámina sobre el vertedero de 0.33 m.

De la misma manera se ha medido las alturas de láminas de agua para los caudales de 5 $m3/s$ y 4 $m3/s$ medidos en el eje longitudinal del aliviadero con resultados de 0.23 m y 0.15 m respectivamente.

Como se ha descrito anteriormente se realizaron las modelaciones del flujo de dos fases agua-aire, para un tamaño de malla de 1.760.000 celdas, utilizando el modelo de turbulencia K-épsilon estándar. Todas las simulaciones fueron realizadas en 3D. Para cada simulación se determinó la fracción de volumen que contiene las celdas 100% agua como se observan en los perfiles de fracción de volumen, allí se logró determinar las alturas de lámina de agua en una zona determinada.

Se tomaron 3 perfiles justo aguas arriba del vertedero frontal, con el fin de determinar la carga sobre el vertedero y así poder determinar el coeficiente de descarga.

Por último, como se puede apreciar gráficamente en la figura 34, la fracción de volumen es una forma de ver y cuantificar el volumen de agua con concentración

al 100%, así como ver la interacción agua-aire en la interface y la concentración de aire en toda la zona del espacio computacional, permitiendo analizar el comportamiento del fluido para cada zona de estudio.

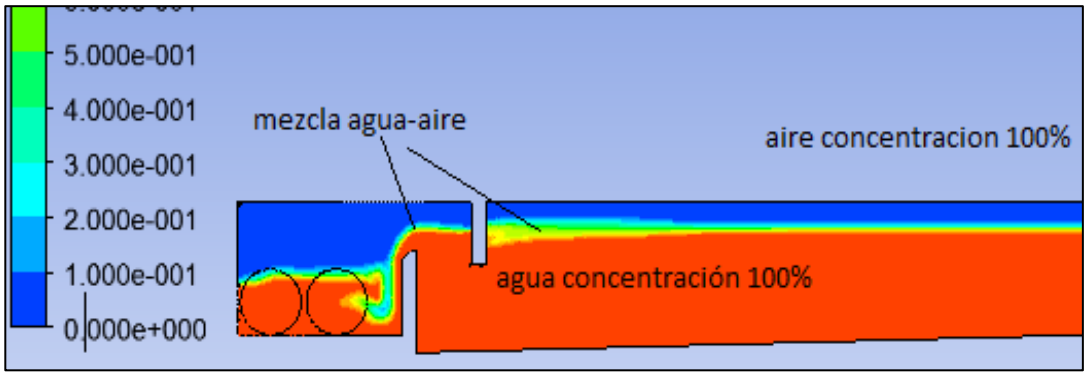
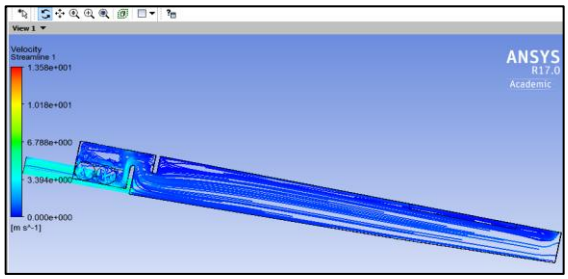
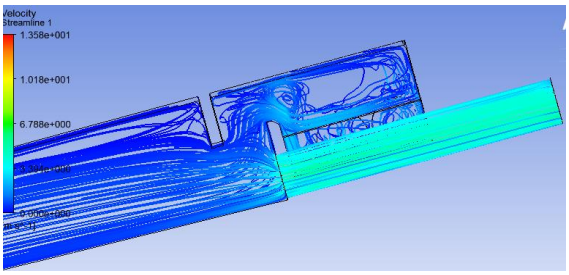



***Figura 34. Contornos de fracción de volumen en un plano central.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

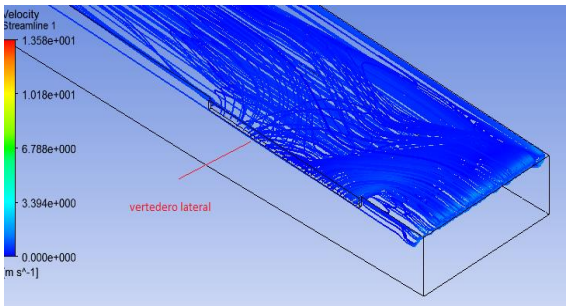
### 4.9.5 Análisis de las líneas de corriente (Streamlines)



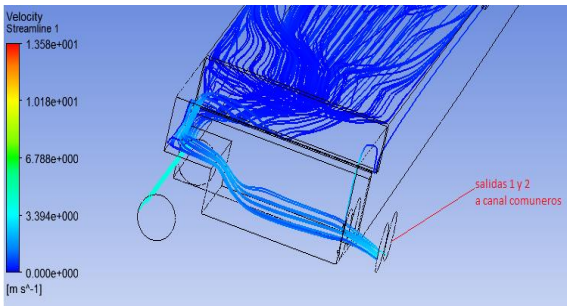

***Q= $9m^3/s$ Interior del fluido***



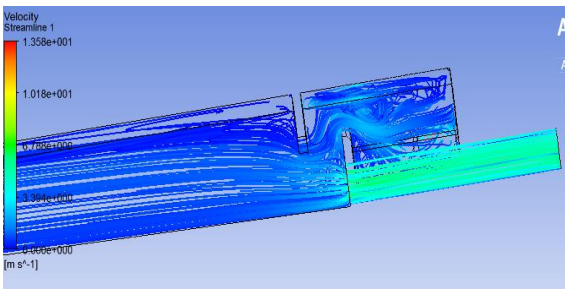
***Q= $9m^3/s$ Interceptor***

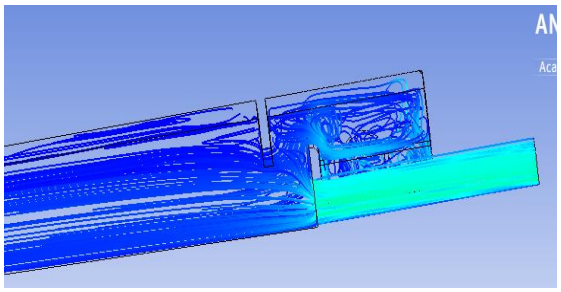



***Q= $9m^3/s$ Vertedero lateral***



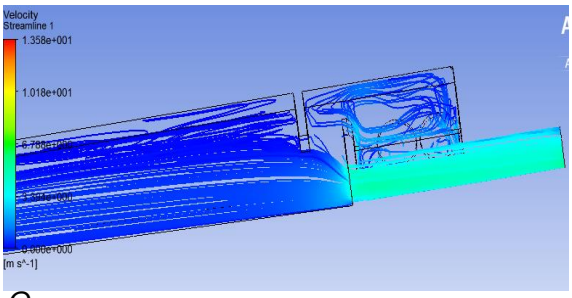

***Q= $9m^3/s$ salidas tuberías a canal***

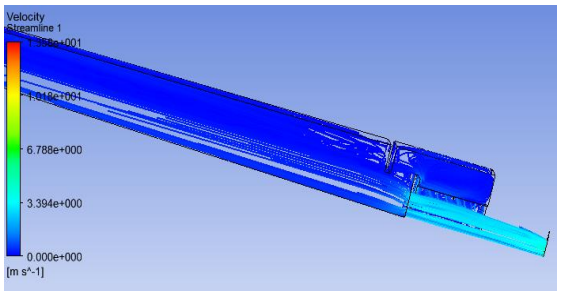


***Q= $6m^3/s$ Interior del fluido***

***Q= $5m^3/s$ Interior del fluido***




*Q*

***Q= $4m^3/s$ Interior del fluido***

***Q = $2m^3/s$ Interior del fluido***

***Figura 35. Líneas de corriente del fluido en el aliviadero vista lateral.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

En la figura 35, se muestra el movimiento del fluido dentro del volumen de control o aliviadero. Se puede observar inicialmente las líneas de corriente del flujo. Luego se observa una región de transición llegando al vertedero donde las líneas de corriente se agrupan y se empiezan a desordenar, el flujo se hace más irregular, caótico e impredecible, las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se forman pequeños remolinos aperiódicos justo entre la pantalla de aquietamiento y el vertedero frontal. Posteriormente se presentan velocidades altas cuando el flujo pasa sobre el vertedero y cae por efectos de la gravedad. Luego aparecen obstáculos al fluido en la cámara que recibe el vertimiento de excesos donde se desordenan prácticamente todas las partículas dando lugar a velocidades impredecibles, tanto en dirección como en magnitudes.

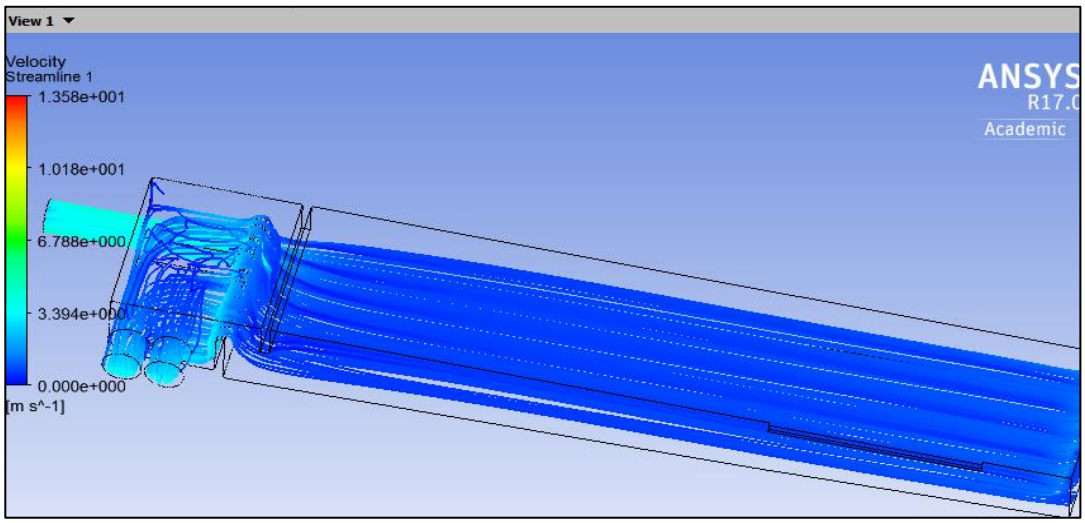



***Figura 36. Líneas de corriente en el aliviadero vista superior Q= 9m3/s.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

En la figura 36, se observa con mayor claridad que las líneas de corriente son paralelas entre sí en el box cuya geometría es regular y sin obstáculos. Cuando se presentan obstáculos cambian de forma las líneas de corriente y son desordenadas. Finalmente por acción de rebote contra los muros de concreto terminan acomodándose en dirección hacia las tuberías de salida.

### 4.9.6 Analisis de presiones (estatica + dinamica)

Una de las mayores hipótesis y simplificaciones de la hidráulica de estructuras se basa en definir que la distribución de la presión estática en la sección posterior a la pantalla de aquietamiento a lo largo del box es aproximadamente lineal, lo cual se conoce como “ley hidrostática de distribución de presiones”. En esta, se define que la presión en algún punto de la sección es directamente proporcional a la profundidad de flujo por debajo la superficie libre del agua. En la figura 37 se observa que en efecto la distribución de la presión desde el inicio del box hasta la pantalla de aquietamiento es hidrostática, debido a que las líneas de corriente (ver figura 36) son predominantemente horizontales. Posterior a esta zona la distribución de presión estática varía ligeramente debido a las curvaturas de las líneas de corriente, que hace que se generen fuerzas centrífugas y que la distribución de presión no sea completamente lineal.

Ahora bien, las presiones antes de pantalla de aquietamiento son ligeramente mayores que la que se presenta después de la misma, generando un diferencial de presiones entre los dos puntos. Posterior al vertedero, la presión estática se reduce considerablemente (ver figura 37) debido a que la columna de agua es menor que la que se presenta antes de este. Para los distintos caudales evaluados se presenta menor columna de agua después del vertedero.

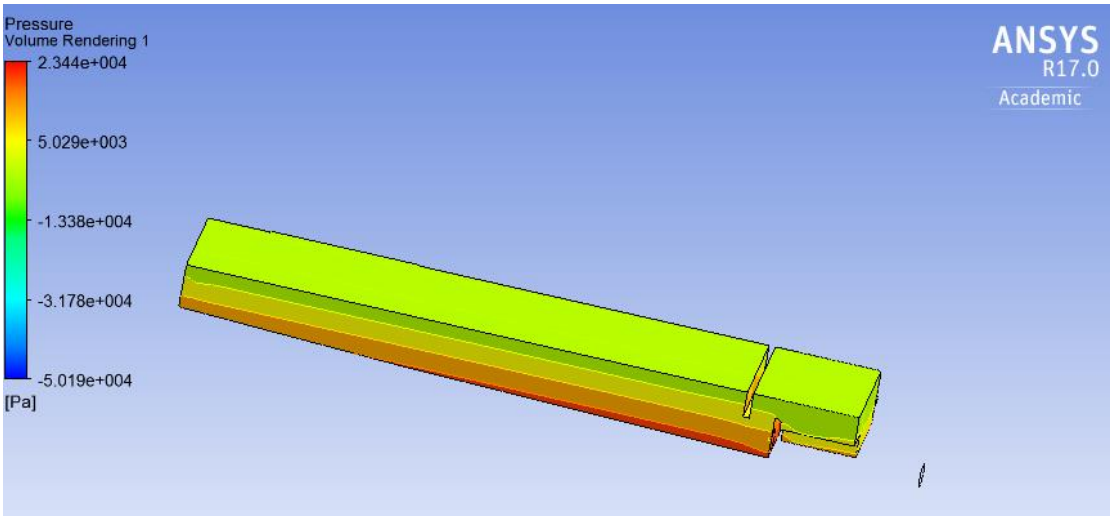
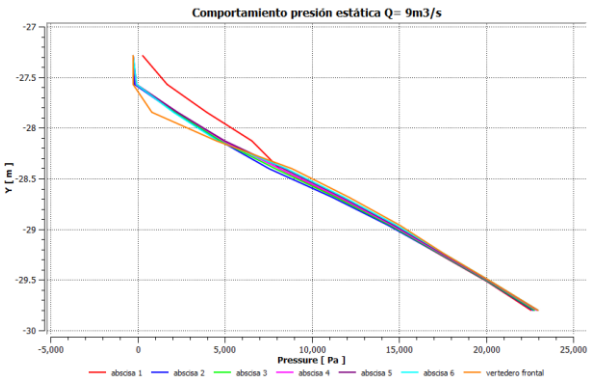
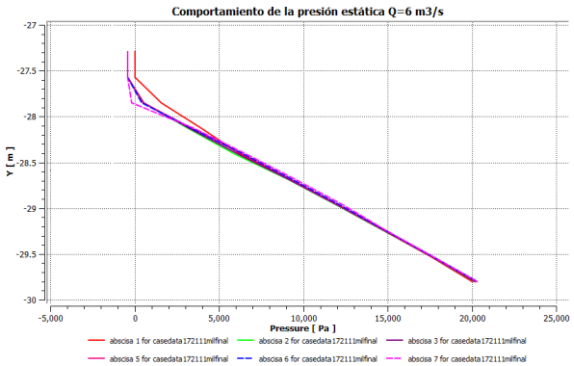



***Figura 37. Distribución estática de presiones para Q= 9 m3/s.***
*Fuente: Elaborada por el Autor*



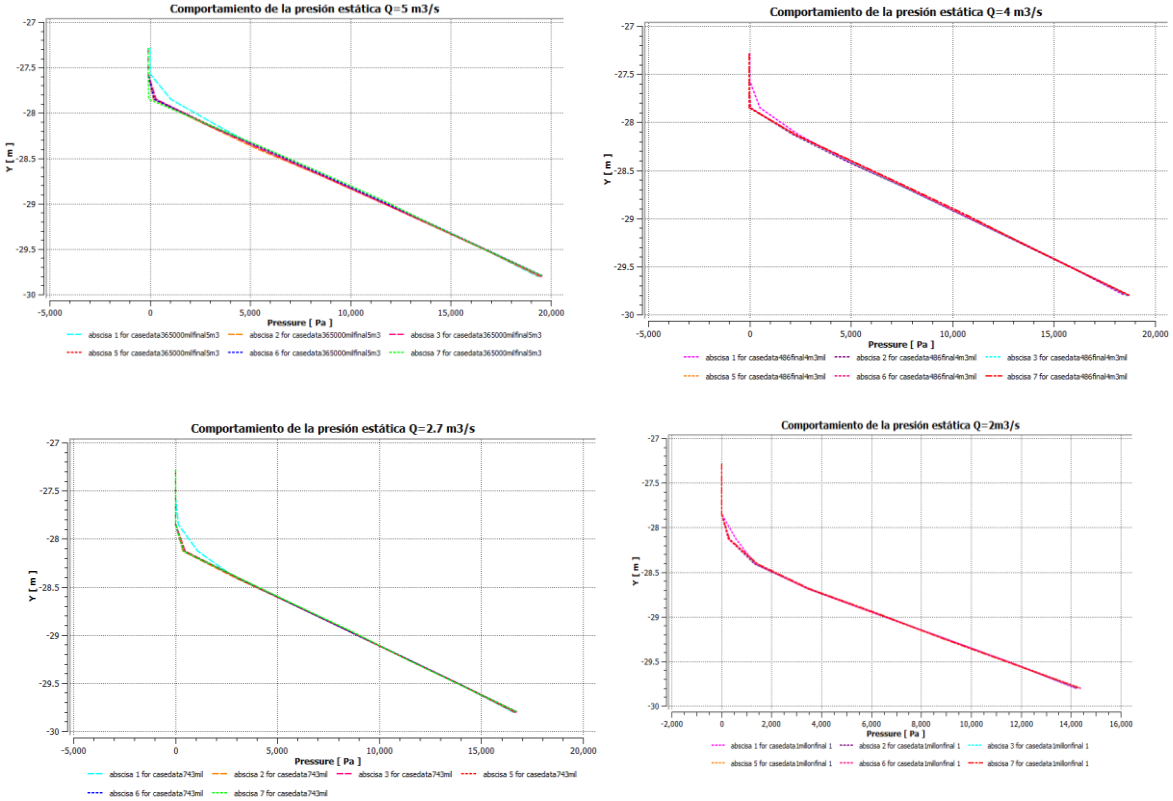



***Figura 38. Comportamiento de la presión estática en siete puntos de control, para los caudales modelados.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

De igual forma, el aumento de la velocidad debido a la reducción de la sección que se presenta en las tuberías causa el aumento de la presión dinámica en las tuberías.

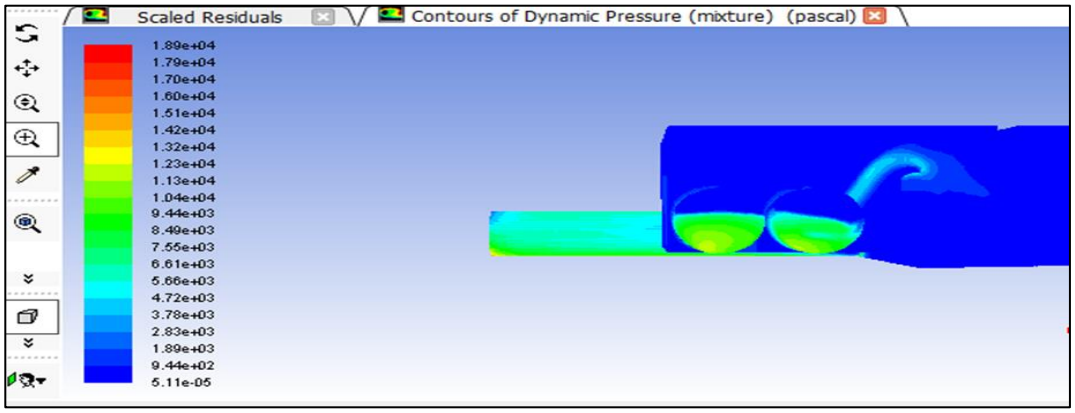



***Figura 39. Contornos de presión dinámica después del vertedero.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

La máxima presión se presenta antes del vertedero dominada por la presión hidrostática de la columna de agua. En las tuberías, la presión total se encuentra

influenciada en mayor medida por la presión dinámica, más que la por la presión estática, debido a los altos valores de las componentes de velocidad resultantes de la disminución de la sección con respecto al box. Las tuberías en su parte superior presentan menos presión y aumenta verticalmente. Vale la pena recordar que la salida se modeló con presión cero.

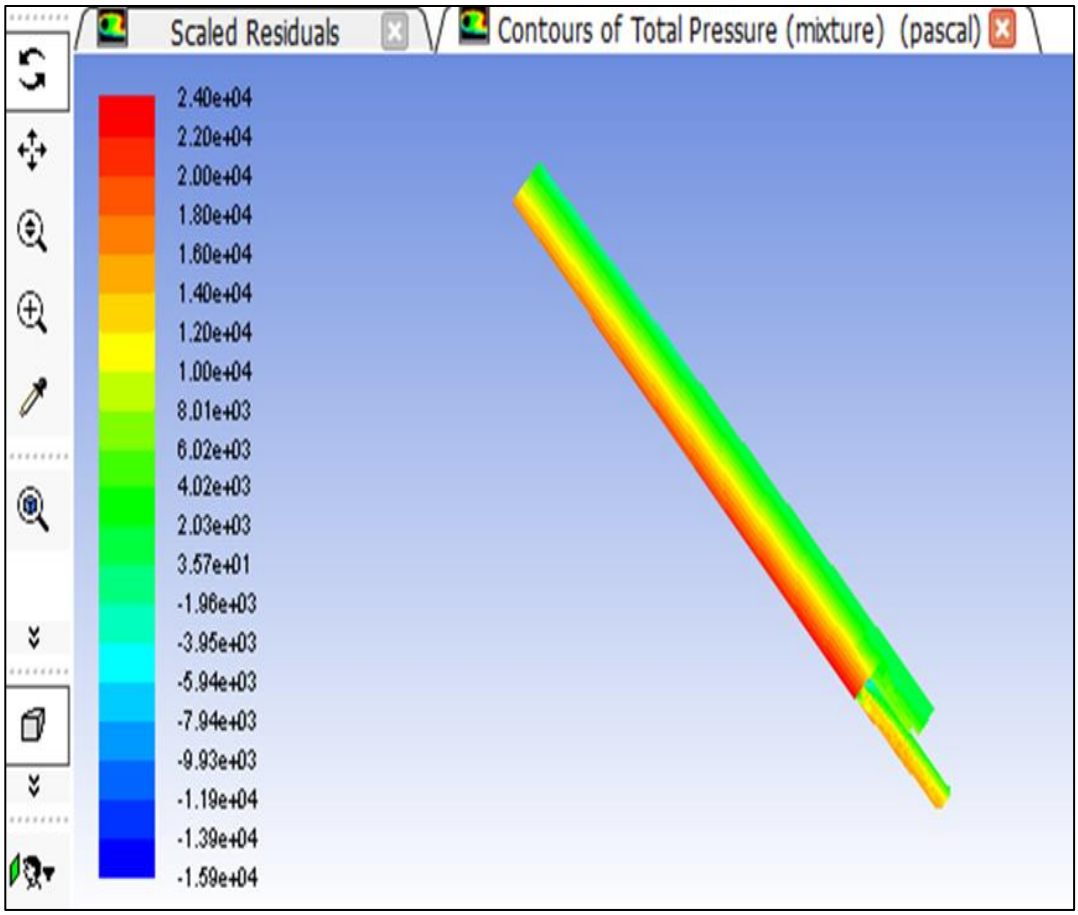



***Figura 40. Contornos de presión total en aliviadero.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

### 4.9.7 Análisis de los esfuerzos cortantes

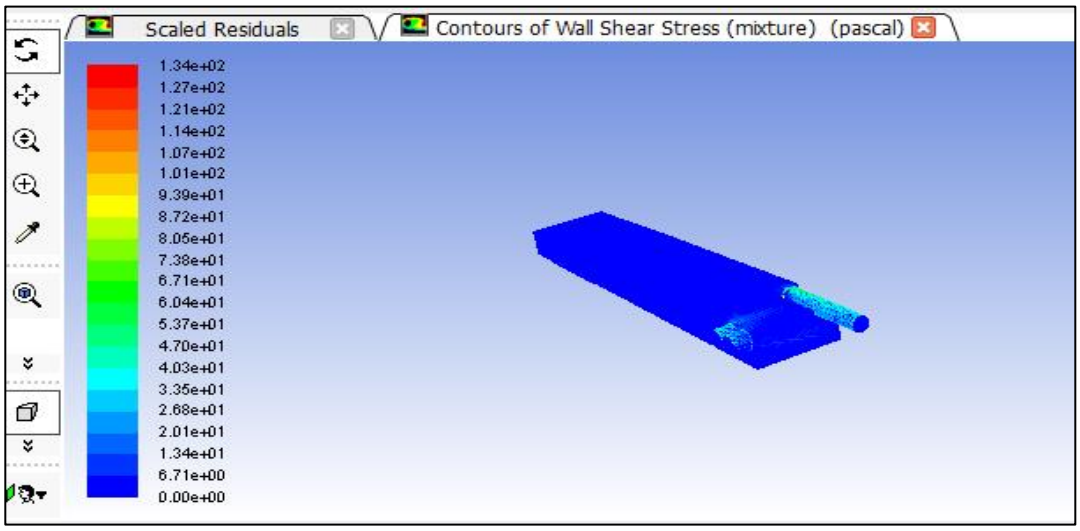



***Figura 41. Distribución de esfuerzos cortantes en paredes.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Se observa que los mayores esfuerzos cortantes ocurren justo en las paredes de las tuberías, donde la velocidad es mayor, mayores serán los esfuerzos cortantes.

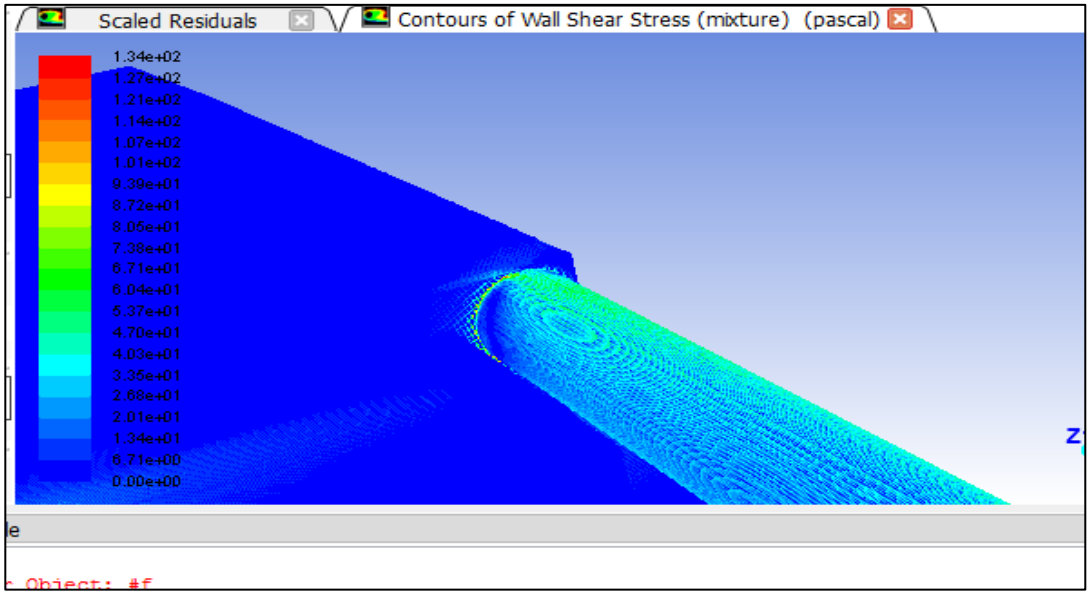



***Figura 42. Distribución de esfuerzos cortantes en la tubería principal.***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

### 4.9.8 Análisis del Skin Friction Coefficient

El esfuerzo cortante en las paredes de la estructura está influenciado por la viscosidad del fluido y su velocidad, un análisis a lo largo del eje x, en la dirección de la corriente se presenta en la figura 46.

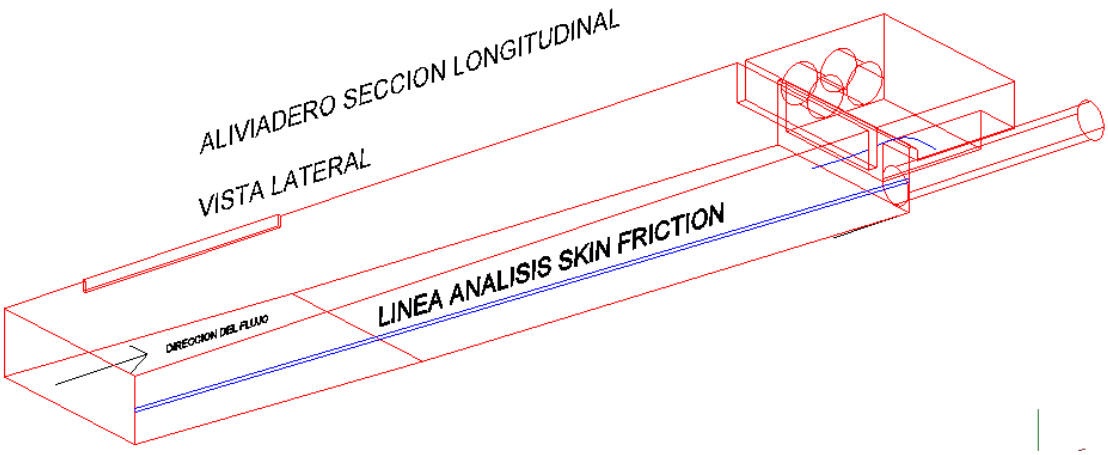



***Figura 43. Plano de análisis del coeficiente de fricción***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

El coeficiente de fricción, o coeficiente de resistencia adimensional que expresa la fuerza de fricción por unidad de área, o la tensión de cizallamiento $\tau_0$ ejercida por el agua en la superficie de la estructura, como se aprecia en la figura 46 coeficiente de fricción en las paredes es de 0.15.

## 5. Comparación de resultados entre Ansys - Fluent y SewerGEMS

El diseño de obras hidráulicas para flujos tridimensionales es complejo y los recursos computacionales son exigentes; por esta razón, se utilizan formulas empíricas. Sin embargo, aplicar fórmulas empíricas implica realizar aproximaciones, ya que estas relaciones están limitadas a las condiciones experimentales. Esto añade incertidumbre a los cálculos por lo que se recurre a herramientas de modelación. En este caso, se estudia el aliviadero el Ejido, donde se evalúan y analizan dos modelaciones una en 1D de SewerGEMS, y modelación 3D en Ansys - Fluent. El objetivo es comparar los resultados de los modelos numéricos y cuantificar las diferencias para tener un mejor criterio a la hora de elegir el modelo matemático y así poder determinar cuál es la mejor alternativa a la hora de utilizar la simulación de estructuras tipo aliviadero.

A continuación, se describen las diferencias en cuanto a caudales, velocidades y alturas de láminas de agua.

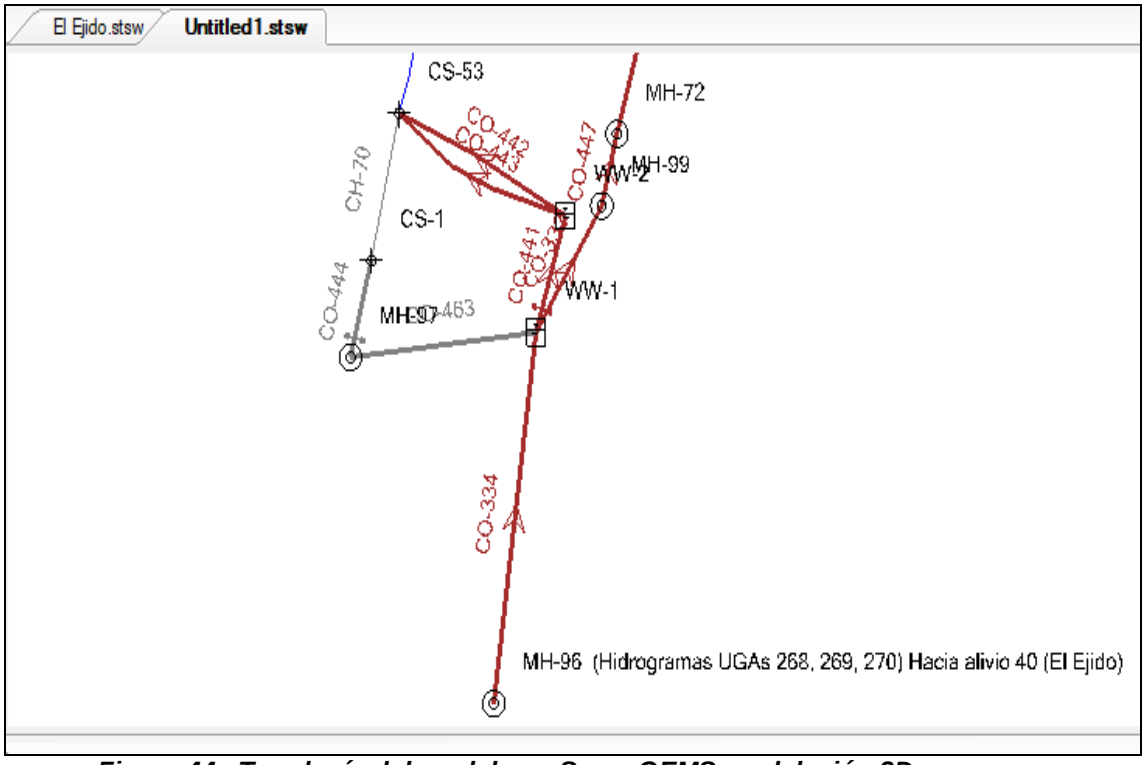



***Figura 44. Topología del modelo en SewerGEMS modelación 2D.***
***Fuente: (Pulido, 2012)***

Dónde:

MH-96 = corresponde a pozo de entrada hacia aliviadero.

CO334= corresponde al conducto que simula el box de entrada

CO332= conducto que simula el Interceptor comuneros

WW1= simula el vertedero frontal

WW2= simula la cámara de alivio de excesos pasando el vertedero frontal

CO441= corresponde al flujo o chorro que pasa el vertedero.

CO442 y CO443 = se refiere a las 2 tuberías de alivio que salen de la cámara de excesos hacia canal comuneros.

Para cada caudal modelado en SewerGEMS se obtuvo como resultado los perfiles de flujo en la sección longitudinal, reportes de caudal que pasa por cada sección, altura de láminas de agua y las velocidades en cada tramo. Con base en estos datos se compararon con la modelación 3D de Ansys - Fluent y se cuantificaron las diferencias.

## 5.1 Comparación de los perfiles de la lámina de agua sobre el vertedero

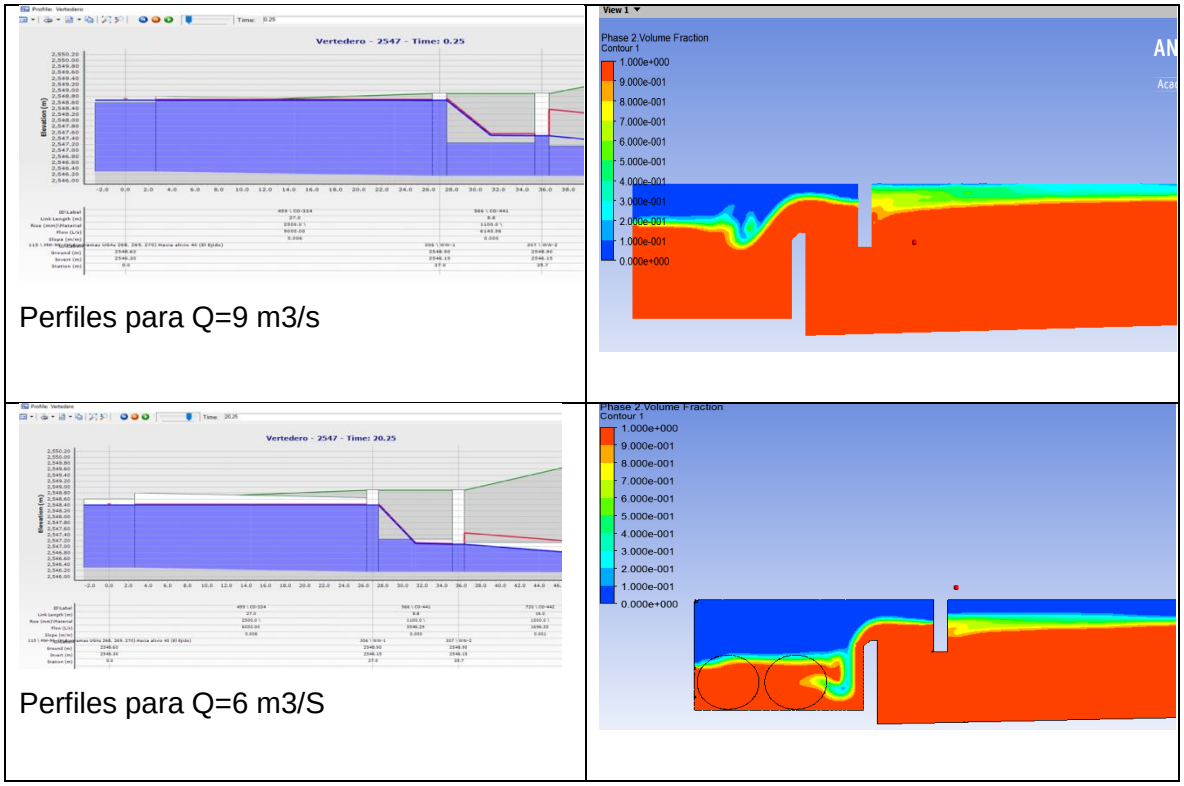



***Figura 45. Perfiles de flujo en Ansys vs SewerGEMS para diferentes caudales. 9 m3/s y 6 m3/s***

***Fuente: Elaborada por el Autor***

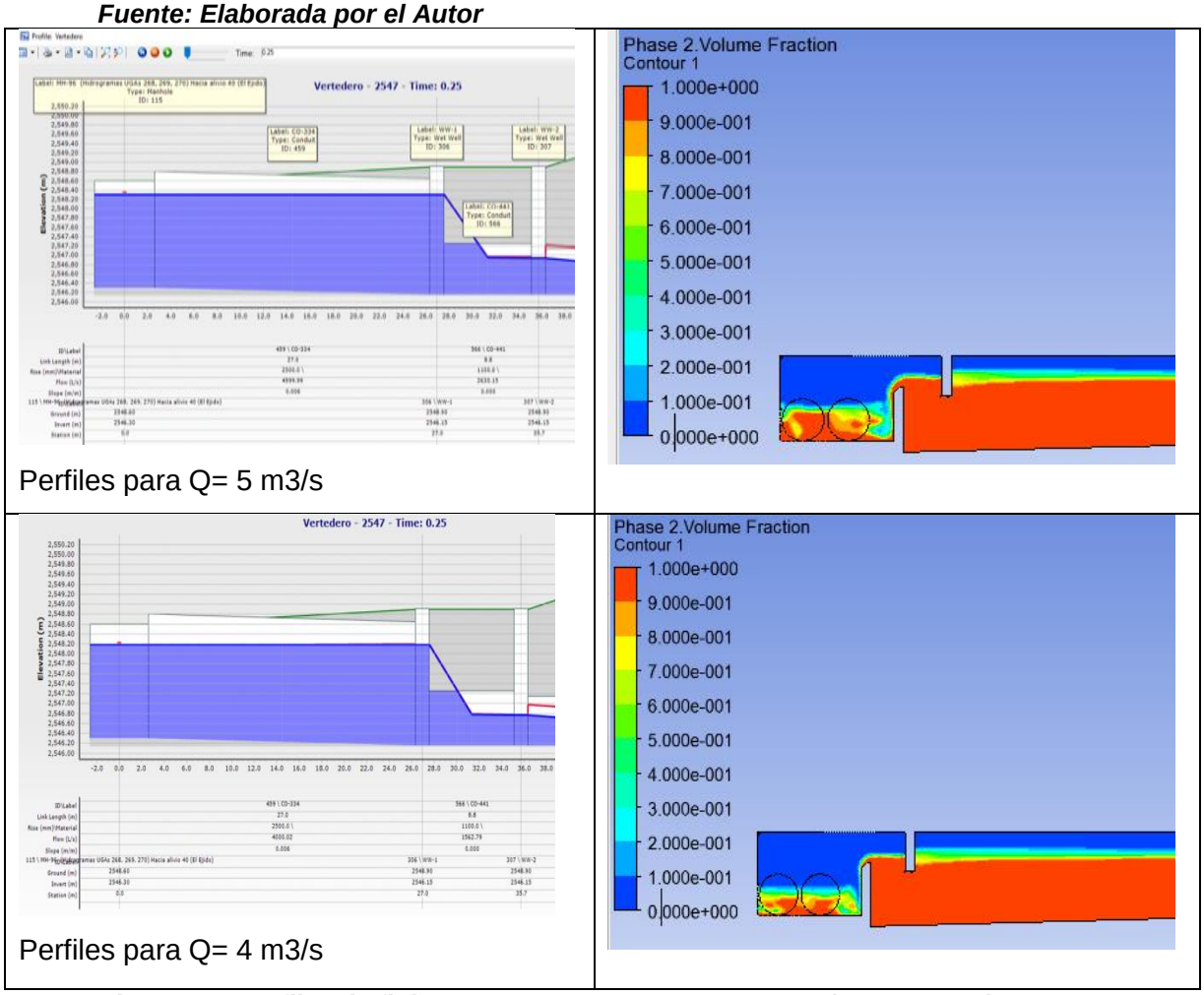



***Figura 46. Perfiles de flujo SewerGEMS vs Ansys Q= 5 m3/s y Q= 4 m3/s***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

En las comparaciones realizadas se puede observar gráficamente que en el modelo Ansys Fluent se ve mejor representada la información, con resultados en las tres componentes de la velocidad mientras que en el modelo 1D la información es limitada al eje de estudio.

Las líneas de corriente, interface agua-aire, los contornos de presión son unas de las muchas variables que no se pueden observar en el modelo de SewerGEMS y que pueden tener información valiosa a la hora de evaluar una estructura hidráulica, es por esto que con base en este estudio se puede recomendar un modelo 3D a la hora de realizar el trabajo de simulación para cualquier estructura mecánica o civil donde se analice el comportamiento del fluido.

## 5.2 Resumen cuantitativo de los resultados entre los dos modelos matemáticos

| Resultados modelación sewerGEMS vs ANSYS Fluent | | |
|---|---|---|
| **item** | **modelo 2d Sewer Gems** | **modelo 3d ANSYS Fluent** |
| | | |
| **Geometría** | cámara rectangular con vertedero transversal | cámara rectangular con vertedero transversal |
| | vertedero de pared delgada | vertedero de pared delgada |
| | longitud vertedero 11 m | longitud vertedero 5 m |
| | altura de vertedero 1.7 m | altura de vertedero 1.7 m |
| | salida principal=interceptor comuneros | salida principal=interceptor comuneros |
| | diámetro interceptor 1.1 m | diámetro interceptor 1.1 m |
| | salidas secundarias= 2 tuberias 1m diámetro | salidas secundarias= 2 tuberias 1m diámetro |
| | sin vertedero lateral de 6 m | con vertdero transversal de 6 m |
| | modelación con pendiente de cámara | modelación con pendiente de cámara |
| | | |
| **Tipo de flujo** | **No permanente** | **No permanente** |
| | modelacion permanente para comparacion | No permanente |
| | | |
| **Modelacion 9m3** | **Resultados** | **Resultados** |
| | | |
| **entrada** | 9 m3/s | 9 m3/s |
| **Q Interceptor** | 2.84 m3/s | 3.70 m3/s |
| **Q vertedero** | 6.15 m3 | 4.73 m3/s |
| **Q salida tuberia 2** | 3.055 m3 | 2.36 m3/s |
| **Q salida tuberia 3** | 3.066 m3 | 2.36 m3/s |
| **vel box** | 0.74 m/s | 0.78 m/s |
| **vel interceptor** | 2.99 m/s | 4.75 m/s |
| **vel vertedero** | 1.12 m/s | 1 m/s |
| **vel salidas canal** | 4.15 m/s | 4 m/s |
| **altura lamina box** | 2.45m | 2.45 m |
| **altura lamina vertedero** | N/A | |
| **altura lamina inteceptor** | 1.10 m | |

***Tabla 25. Resumen de los resultados generados en ANSYS y SewerGEMS para un Caudal Q= 9 m3/s***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Se presenta una diferencia de 0.9 $m3/s$ en la salida principal con mayor caudal en Ansys, también en el caudal que pasa por el vertedero hay una diferencia de 1.42 m3/s, en cuanto a las velocidades medias hay una gran similitud en el box, presentándose diferencias en la velocidad de la tubería principal de salida entre los dos modelos con una variación de hasta el 37%, las alturas de lámina de agua justo en el box son similares sin

diferencias significativas. Es posible que las diferencias se deban a la condición de frontera de la tubería principal, que en Ansys se tomó como caída libre y que realmente está controlada, además hay que hacer énfasis en la simplificación que se realizó en la simulación de SewerGEMS en la cual el vertedero frontal se asumió de 11 m lo cual afecta significativamente los resultados. No se tuvo en cuenta la pantalla de aquietamiento o retención de solidos que se ubica un metro antes del vertedero frontal.

| Resultados modelación sewerGEMS vs ANSYS Fluent | | |
|---|---|---|
| **item** | **modelo 2d Sewer Gems** | **modelo 3d ANSYS Fluent** |
| | | |
| **Geometría** | cámara rectangular con vertedero transversal | cámara rectangular con vertedero transversal |
| | vertedero de pared delgada | vertedero de pared delgada |
| | longitud vertedero 11 m | longitud vertedero 5 m |
| | altura de vertedero 1.7 m | altura de vertedero 1.7 m |
| | salida principal=interceptor comuneros | salida principal=interceptor comuneros |
| | diámetro interceptor 1.1 m | diámetro interceptor 1.1 m |
| | salidas secundarias= 2 tuberias 1m diámetro | salidas secundarias= 2 tuberias 1m diámetro |
| | sin vertedero lateral de 6 m | con vertdero transversal de 6 m |
| | modelación con pendiente de cámara | modelación con pendiente de cámara |
| | | |
| **Tipo de flujo** | **No permanente** | **No permanente** |
| | modelacion permanente para comparacion | No permanente |
| | | |
| **Modelacion 6 m3/s** | **Resultados** | **Resultados** |
| | | |
| **entrada** | 6 m3/s | 6 m3/s |
| **Q Interceptor** | 2.603 m3/s | 3.3 m3/s |
| **Q vertedero** | 3.55 m3 | 2.6 m3/s |
| **Q salida tuberia 2** | 1.696 m3 | 1.3 m3 |
| **Q salida tuberia 3** | 1.696 m3 | 1.3m3 |
| **vel box** | 0.55 m/s | 0.781 m/s |
| **vel interceptor** | 2.74m/s | 3.9 m/s a 4.68 m/s |
| **vel vertedero** | 0.69 m/s | 1.56 m/s a 2.34 m/s |
| **vel salidas canal** | 2.71 m/s | 3.12 m/s a 3.90 m/s |
| **altura lamina box** | 2.18- 2.25m | 2.25 m |
| **altura lamina vertedero** | N/A | |
| **altura lamina inteceptor** | 1.10 m | 1.10 m |

***Tabla 26. Resumen de los resultados generados en Ansys y SewerGEMS para un Caudal Q= 6 m3/s***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

Para un caudal de 6 $m3/s$ se presentan las mismas relaciones con respecto a los

resultados de la modelación para 9 $m3/s$, donde el caudal que transporta el interceptor o salida principal es mayor con una diferencia de 0.7 m3/s. el caudal que pasa por el vertedero es mayor en el modelo de SewerGEMS con una diferencia de 1.05 $m3/s$.

El interceptor transporta mayor caudal en la modelación de Ansys y se ve reflejado con las diferencias de velocidades de hasta 2 $m/s$ mayores en este modelo. Las velocidades en el box y las alturas de lámina de agua son muy similares sin diferencias significativas entre los dos modelos numéricos.

| Resultados modelación sewerGEMS vs ANSYS Fluent | | |
|---|---|---|
| **item** | **modelo 2d Sewer Gems** | **modelo 3d ANSYS Fluent** |
| | | |
| **Geometría** | cámara rectangular con vertedero transversal | cámara rectangular con vertedero transversal |
| | vertedero de pared delgada | vertedero de pared delgada |
| | longitud vertedero 11 m | longitud vertedero 5 m |
| | altura de vertedero 1.7 m | altura de vertedero 1.7 m |
| | salida principal=interceptor comuneros | salida principal=interceptor comuneros |
| | diámetro interceptor 1.1 m | diámetro interceptor 1.1 m |
| | salidas secundarias= 2 tuberias 1m diámetro | salidas secundarias= 2 tuberias 1m diámetro |
| | sin vertedero lateral de 6 m | con vertdero transversal de 6 m |
| | modelación con pendiente de cámara | modelación con pendiente de cámara |
| | | |
| **Tipo de flujo** | **No permanente** | **No permanente** |
| | modelacion permanente para comparacion | No permanente |
| | | |
| **modelacion 5 m3/s** | **Resultados** | **Resultados** |
| | | |
| **Entrada** | 5 m3 | 5 m3 |
| **Q Interceptor** | 2.506m3 | 3.22m3 |
| **Q vertedero** | 2.63 m3 | 1.829 m3 |
| **Q salida tuberia 2** | 1.247 m3 | 0.91 m3 |
| **Q salida tuberia 3** | 1.247 m3 | 0.91m3 |
| **vel box** | 0.48 m/s | 0.45 m/s a 0.9 m/s |
| **vel interceptor** | 2.64m/s | 3.17 m/s a 6.35 m/s |
| **vel vertedero** | 0.66 m/s | 1.56 m/s a 3.38 m/s |
| **vel salidas canal** | 2.40 m/s | 3.12 m/s a 3.90 m/s |
| **altura lamina box** | 2.07- 2.15m | 2.15 m |
| **altura lamina vertedero** | N/A | |
| **altura lamina inteceptor** | 1.10 m | 1.10 m |

***Tabla 27. Resumen de los resultados generados en ANSYS y SewerGEMS para un Caudal Q= 5 m3/s***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

En la modelación del caudal 5 $m3/s$, se observa los mismos comportamientos que presentan los otros caudales modelados con mayor velocidad en el interceptor, por tanto, mayor caudal en la modelación de Fluent. El caudal que pasa por el vertedero frontal es mayor en el modelo de SewerGEMS con diferencias de hasta 0.8 $m3/s$.

Las velocidades en el box y altura de lámina de agua son similares en los 2 modelos, se observa mayor velocidad pasando el vertedero en el modelo de Ansys con gran diferencia entre 0.9 $m/s$ hasta 2.7 $m/s$.

| Resultados modelación sewerGEMS vs ANSYS Fluent | | |
|---|---|---|
| **item** | **modelo 2d Sewer Gems** | **modelo 3d ANSYS Fluent** |
| | | |
| **Geometría** | cámara rectangular con vertedero transversal | cámara rectangular con vertedero transversal |
| | vertedero de pared delgada | vertedero de pared delgada |
| | longitud vertedero 11 m | longitud vertedero 5 m |
| | altura de vertedero 1.7 m | altura de vertedero 1.7 m |
| | salida principal=interceptor comuneros | salida principal=interceptor comuneros |
| | diámetro interceptor 1.1 m | diámetro interceptor 1.1 m |
| | salidas secundarias= 2 tuberias 1m diámetro | salidas secundarias= 2 tuberias 1m diámetro |
| | sin vertedero lateral de 6 m | con vertdero transversal de 6 m |
| | modelación con pendiente de cámara | modelación con pendiente de cámara |
| | | |
| **Tipo de flujo** | **No permanente** | **No permanente** |
| | modelacion permanente para comparacion | No permanente |
| | | |
| **modelacion 4 m3/s** | **Resultados** | **Resultados** |
| | | |
| **entrada** | 4 m3/s | 4 m3/s |
| **Q Interceptor** | 2.393m3 | 3.07 m3/s |
| **Q vertedero** | 1.562 m3 | 0.98 m3/s |
| **Q salida tuberia 2** | 0.8 m3 | 0.49 m3/s |
| **Q salida tuberia 3** | 0.8 m3 | 0.49 m3/s |
| **vel box** | 0.41 m/s | 0.45 m/s a 0.9 m/s |
| **vel interceptor** | 2.52 m/s | 3.17 m/s a 6.35 m/s |
| **vel vertedero** | 0.50 m/s | 1.56 m/s a 3.38 m/s |
| **vel salidas canal** | 2.06 m/s | 3.12 m/s a 3.90 m/s |
| **altura lamina box** | 1.96- 2.04m | 2.15 m |
| **altura lamina vertedero** | N/A | |
| **altura lamina inteceptor** | 1.10 m | 1.10 m |

***Tabla 28. Resumen de los resultados generados en ANSYS y SewerGEMS para un Caudal Q= 6 m3/s***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

## 5.3 Análisis de la presurización del sistema en el interceptor comuneros

Con base en la información geométrica del interceptor “Comuneros” se procedió a la verificación de cotas y lámina de agua cuando la estructura trabaja a superficie libre y a presión con base en la magnitud de caudal transitado.

Las características de la sección del interceptor comuneros II de aguas residuales que salen al sistema sanitario deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Geométricas

Tipo de conducto = circular

Diámetro (do) = 1,1 m

y = altura de la lámina de agua (m)

Cota batea al inicio ($H_0$) = 2.546,15 msnm

Pendiente (S) = 0,38 %

h = $H_0$ + y = cota lámina de agua (msnm)

A = área mojada ($m^2$)

$$A = \frac{\pi}{8} \cdot do^2 + \left(y - \frac{do}{2}\right)\sqrt{\left(\frac{do}{2}\right)^2 - \left(y - \frac{do}{2}\right)^2} + Atn\left[\frac{\left(\frac{2 \cdot y}{do} - 1\right)}{\sqrt{-\left(\frac{2 \cdot y}{do} - 1\right)^2 + 1}}\right] \cdot \left(\frac{do}{2}\right)^2$$

P = perímetro mojado (m)

$$P = \frac{do}{2} \cdot \left(\pi + Atn\left[\frac{\left(\frac{2 \cdot y}{do} - 1\right)}{\sqrt{-\left(\frac{2 \cdot y}{do} - 1\right)^2 + 1}}\right] \cdot 2\right)$$

P = ancho en superficie (m)

$$T = 2 \cdot \sqrt{y \cdot (do - y)}$$

Q = caudal transportado ($m^3/s$)

*Tipo de flujo*

Flujo crítico

$$Q = \sqrt{\frac{g \cdot A^3}{T}}$$

$$g = 9.806\, m/s^2$$

Flujo uniforme

$$Q = \frac{1}{n}\frac{A^{5/3}}{P^{2/3}} \cdot S^{1/2}$$

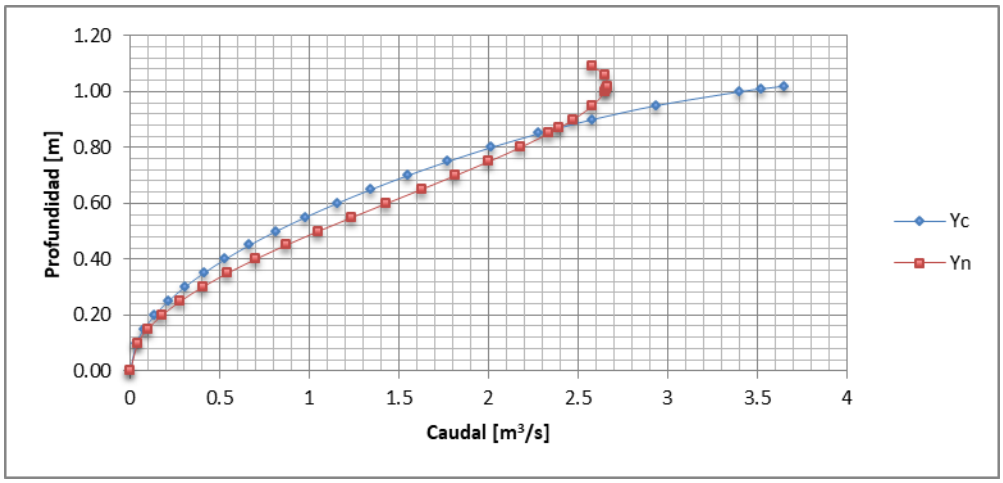



***Figura 47. Curva de Gasto colector comuneros II***
***Fuente: (Pulido, 2012, p.104)***

En la figura 47 se muestra que Yc > Yn (pendiente supercrítica donde nivel de control se encuentra a la entrada de la tubería), y caudal máximo del sistema Qx=2,66 $m3/s$.
Cuando la lámina de agua supera el diámetro de la tubería y presuriza el interceptor:

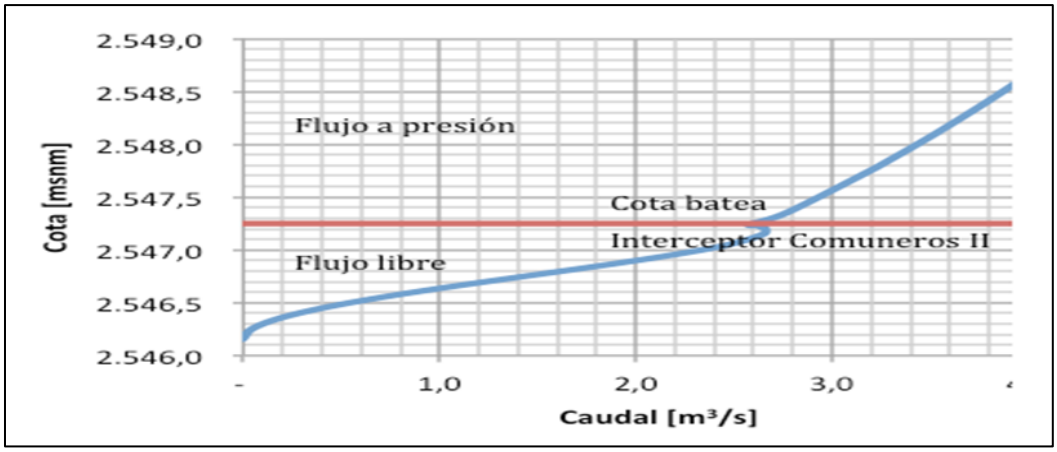



***Figura 48. Curva de gasto (nivel vs Caudal) colector comuneros II***
***Fuente: (Pulido, 2012, p.105)***

Con el fin de verificar si la tubería del interceptor principal trabaja a superficie libre a partir de cota 2547.25 m, se realizaron modelaciones con caudales cercanos a este nivel de referencia así:

| cota | Cálculo teórico altura lámina | Q m3/s |
|---|---|---|
| 2546.25 | 0.10 | 0.04 |
| 2546.35 | 0.20 | 0.18 |
| 2546.45 | 0.30 | 0.40 |
| 2546.55 | 0.40 | 0.70 |
| 2546.65 | 0.50 | 1.05 |
| 2546.75 | 0.60 | 1.43 |
| 2546.85 | 0.70 | 1.82 |
| 2546.95 | 0.80 | 2.18 |
| 2547.05 | 0.90 | 2.47 |
| 2547.15 | 1.00 | 2.65 |
| 2547.20 | 1.05 | 2.66 |
| 2547.22 | 1.07 | 2.64 |
| 2547.23 | 1.08 | 2.61 |
| 2547.24 | 1.09 | 2.58 |
| 2547.35 | 1.20 | 2.77 |
| 2547.75 | 1.60 | 3.19 |
| 2548.15 | 2.00 | 3.57 |
| 2548.45 | 2.30 | 3.83 |
| 2548.70 | 2.55 | 4.03 |

| cota | resultados simulacion numérica interceptor | |
|---|---|---|
| | Q m3/s | Lámina de agua (m) |
| 2546.25 | 0.1 | 0.03 |
| 2547.15 | 1 | 0.5 |
| 2548.15 | 2 | 0.8 |
| 2548.75 | 2.6 | 1.1 |
| 2548.85 | 2.7 | 1.3 |
| 2550.15 | 3.6 | 2 |
| 2551.15 | 3.81 | 2.18 |
| 2552.15 | 4.1 | 2.45 |
| 2555.15 | | |

***Tabla 29. Resumen de los resultados generados en ANSYS y SewerGEMS para un Caudal Q= 6 m3/s***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

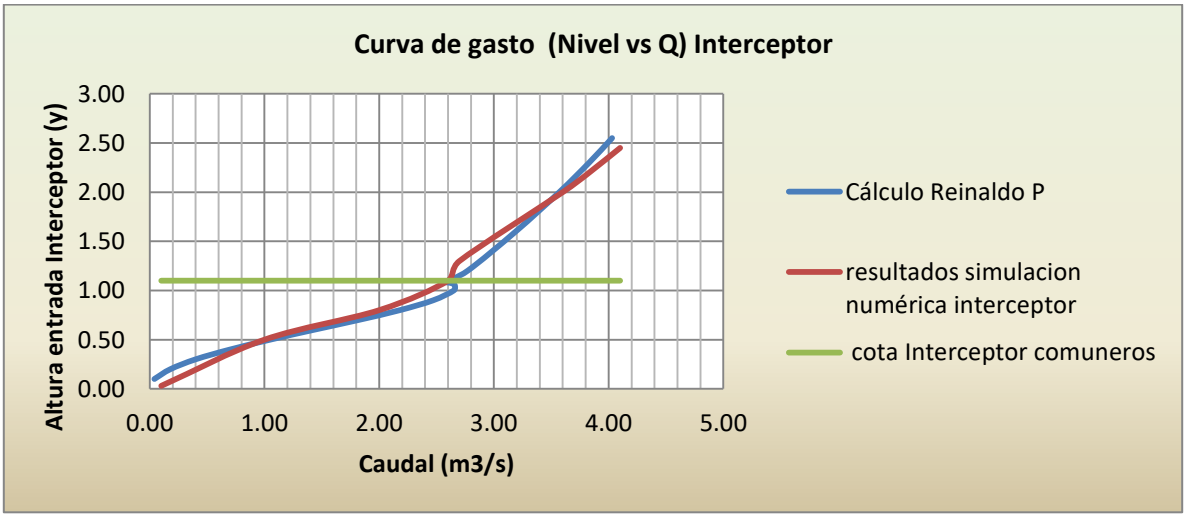



***Figura 49. Gráfico curva de gasto (Tesis Reinaldo P vs modelación Ansys)***
***Fuente: Elaborada por el Autor***

De acuerdo a la figura 49, se puede observar que hay similitud entre los datos obtenidos a partir del cálculo teórico realizado en la tesis "Evaluación de estructuras de alivio para alcantarillado combinado" y los datos obtenidos en la modelación de Ansys Fluent. La

gráfica presenta la línea de cota clave de la tubería de salida con diámetro de 1.1 m que corresponde a una cota de 2547.25 m.

En los resultados de la simulación de Ansys Fluent, para un caudal de 2.7 $m3/s$ se obtuvo una altura de lámina de agua 1.3m, muy próxima a la entrada a la tubería del interceptor, también se observa en los contornos de fracción de volumen, que para este caudal la tubería trabaja a tubo lleno con pequeñas bolsas de aire en la salida. Para los caudales inferiores a 2.7 $m3/s$ se observa la presencia de aire en el conducto, con el tubo parcialmente lleno lo que nos permite inferir que se trabaja a superficie libre.

Para caudales de 2.7 $m3/s$, 4 $m3/s$, 5 $m3/s$, 6 $m3/s$ y 9 $m3/s$ simulados en este estudio, la tubería principal trabaja a presión ya que en los contornos de fracción de volumen se observa que en la totalidad del interceptor contiene agua al 100%, para comprobar lo anteriormente expuesto, en los perfiles de flujo presentados en la figura 28 se representa con mayor claridad los valores del perfil de flujo para cada uno de los caudales.

# 6. Conclusiones y Recomendaciones

1. La utilidad del modelo numérico como apoyo al diseño de estructuras hidráulicas es de gran importancia ya que permite tener unos resultados adicionales a los cálculos analíticos y modelos físicos utilizados en la toma de decisiones a la hora de evaluar o diseñar una estructura hidráulica. En tal sentido, la simulación numérica en 3D proporciona un ahorro económico y es eficiente para obtener datos precisos sobre los detalles del comportamiento de flujo y el desempeño de la estructura. En este estudio se modeló una estructura construida con anterioridad que está operando en el sistema de alcantarillado de la ciudad de Bogotá de la que se tiene información de campo detallada por un estudio realizado por la Escuela Colombiana de Ingeniería por Encargo de la Empresa de Alcantarillado de Bogotá.

2. La simulación numérica se realizó mediante el paquete informático Ansys- Fluent, para diferentes caudales, aportando datos cuantitativos y cualitativos. Los resultados obtenidos se visualizaron mediante tablas o gráficas de cada una de las variables estudiadas en el sistema de conducción de aguas combinadas o aliviadero, dejando información precisa y relevante del flujo, mediante los gráficos de velocidades, presiones, volumen del fluido y esfuerzos cortantes principalmente.

3. Con base en los resultados obtenidos, se puede afirmar que el modelo numérico realizado mediante las técnicas de CFD, es muy efectivo para calcular la superficie de láminas de agua, los caudales y velocidades que se presentan en toda la estructura, especialmente en las tuberías de salida y el flujo sobre el vertedero frontal y la ventana lateral. Debido a que la estructura tiene una geometría y características especiales la cual hace que se tenga una información limitada, en este caso concreto ciertos parámetros solo se pueden comparar de forma cualitativa.

4. Las ventajas que presenta esta simulación numérica frente a los datos de mediciones del aliviadero son significativas, empezando porque los modelos numéricos admiten cambios en las condiciones de frontera, se puede llevar un

proceso de prueba y error, jugando con muchas variables en la configuración y en la geometría, algo que en los modelos físicos implicaría construir un nuevo modelo o realizar movimiento de los equipos a la hora de tomar las mediciones.

5. Se hizo un análisis de sensibilidad de las mallas, para tal fin se realizaron simulaciones para cuatro mallados, con distinto grado de complejidad para un mismo caudal de 6 $\frac{m3}{s}$. A) Una malla principal con 1.763.276 celdas, de tipo hibrido hecha con el mallador de Ansys Fluent, en la que existe predominio de elementos hexaédricos en el box culvert y elementos tetraédricos en las conexiones entre cámara-vertedero y tuberías-box con refinamiento especial. B) Mallado tipo Hexaédrico con 978.000 celdas sin refinamiento C) Mallado Hibrido sin refinamiento especial con 618.782 celdas y D) mallado tipo tetraédrico de 563.453 celdas. Para evaluar la sensibilidad de cada mallado se obtuvieron datos de altura de lámina de agua en siete puntos de control, como se observa en la figura 7. A partir de los resultados obtenidos se puede concluir, que al emplear un mallado de tipo hibrido con mayor densidad de elementos, se logró reproducir adecuadamente los efectos del flujo en las zonas donde se realizó refinamiento (tuberías, vertedero, cambios bruscos de la geometría), mientras que un mallado hexaédrico o tetraédrico en su totalidad no reproduce adecuadamente los fenómenos del flujo en las zonas complejas. Esto se puede apreciar en los contornos mediante la fracción de volumen.

6. Debido a que la estructura se encuentra sellada en la parte superior, con poca presencia de aire en todo el sistema y aireación nula debajo del chorro, la lámina se presenta de forma adherida a la pared del vertedero frontal, esto ocurre para todos los caudales simulados. Se puede explicar esta forma de la lámina vertiente debido a que las velocidades son insuficientes para despegar el chorro, por la presencia de una pantalla de aquietamiento y retención de solidos un metro antes del vertedero frontal.

7. Con respecto a esta simulación numérica CFD en Ansys Fluent para los diferentes caudales, se puede observar en los resultados de la tubería de salida o

interceptor principal para un caudal de 2 $m^3/s$ la tubería trabaja a superficie libre con llenado al 75% de la capacidad, al ir aumentando el caudal a 2.7 $m^3/s$ lentamente se evacua el aire y se llena completamente la tubería, ésta se presuriza hasta alcanzar estabilidad a una altura de lámina de agua en el box de hasta 1.67 m, dando lugar al aumento de velocidades en el interceptor debido a la presión que ejerce la columna de agua. Para caudales mayores a 2.7 $m^3/s$ la tubería principal trabaja a presión sin presencia de bolsas de aire en la tubería de salida.

8. Para los caudales de 4 $m^3/s$, 5 $m^3/s$ y 6 $m^3/s$, la tubería de salida principal trabaja a tubo lleno, no se presenta salida de agua por el vertedero lateral pero si hay flujo sobre el vertedero frontal que cae por gravedad a la cámara de excesos para posteriormente permitir la salida a superficie libre por las dos tuberías al canal comuneros II.

9. Para un caudal de 9 $m^3/s$ se presenta flujo en el vertedero lateral, permitiendo la salida de 0.6 $m^3/s$. Con base en este caudal simulado, el cual es similar al presentado en el evento ocurrido el 8 de noviembre de 2008, se puede concluir que la estructura simulada trabaja de forma correcta con la presencia del vertedero lateral de 6 m de longitud ya que permite el alivio de grandes caudales, descargando al canal comuneros. Según el análisis se puede inferir que: la no presencia del vertedero lateral, la sedimentación en el box, y el taponamiento de las tuberías pudo ocasionar la presurización total del sistema que conllevo al evento ocurrido en el año 2008, dejando pérdidas materiales e impactos ambientales en la zona contigua a esta estructura.

10. Se hizo comparación entre los resultados obtenidos en la modelación numérica y los datos de medición realizados por medio de equipos y sensores. Se presentan grandes diferencias como se observa en la figura 16, se pueden discutir los resultados ya que la información obtenida en las mediciones no es realmente representativa debido a dificultad en la toma de los datos, la presencia de factores como la sedimentación, estado de los equipos y la ubicación de los sensores.

11. Se realizó el cálculo del coeficiente de descarga equivalente para modelar unidimensionalmente la estructura con base en la ecuación general para vertederos rectangulares de pared delgada. La medición de la carga total se realizó por medio de los resultados de la modelación en Ansys, en los contornos de velocidad y altura de lámina de agua sobre el vertedero por medio de la fracción de volumen. Se ha observado que los resultados son altos, ya que la geometría del aliviadero, las condiciones particulares del chorro, la pantalla de retención de sólidos y las condiciones turbulentas del flujo hacen que se presenten resultados diferentes a los obtenidos teóricamente para un vertedero con descarga libre.

12. Los vectores de velocidad obtenidos como resultados de las modelaciones proporcionaron información valiosa, donde se logró determinar con precisión la velocidad media en cada una de zonas de interés, se analizaron las distribución de las velocidades en las tuberías de salida, los vertederos frontal y lateral permitiendo establecer la dirección y magnitud del flujo para cada parte de la estructura estudiada.

13. Al hacer comparación de los resultados obtenidos entre el modelo 1D de SewerGEMS y el modelo 3D de Ansys, se pueden ver grandes diferencias en los caudales que salen por el interceptor, caudales que pasan sobre el vertedero frontal, las tuberías de salida hacia el canal comuneros II. Estas diferencias se pueden explicar ya que en la simulación de Ansys se tomó como condición de frontera descarga libre o Pressure Outlet, mientras que en la simulación de SewerGEMS se simuló con control aguas abajo en el interceptor comuneros. Otra particularidad que puede generar las grandes diferencias, consiste en la simplificación que se realizó en SewerGEMS, donde no se tuvo en cuenta la pantalla de aquietamiento, y el vertedero frontal se asumió de 11 m. Como recomendación para una próxima simulación en Ansys, realizar el cambio en las condiciones de frontera con el fin de controlar la descarga principal para evaluar los resultados en condiciones similares a la simulación de SewerGEMS.

14. Para dar continuidad a este estudio, se propone evaluar la estructura bajo otras condiciones que no se tuvieron en cuenta en esta simulación. Como recomendación se propone realizar un mallado más denso con un mayor número de elementos utilizando computadores más avanzados que puedan reducir el tiempo computacional, haciendo un análisis de sensibilidad con mallados que presenten un número de celdas superior a cuatro millones. Con esto se logrará determinar con mayor precisión los efectos que se producen en las zonas de transición del flujo, aportando información detallada de cada variable estudiada.

15. También se propone realizar un cambio en las condiciones de frontera en las tuberías de salida, aquí se utilizó la condición de descarga libre (Pressure Outlet), se desea que se evalúe con valores de las descargas controladas, esto podría generar un cambio significativo en el comportamiento del flujo en la estructura de alivio.

16. El modelo de turbulencia utilizado K-Épsilon estándar, que se utilizó en este trabajo es uno de los más utilizados en la dinámica de fluidos computacional para simular las características del flujo turbulento. Para seguir la investigación se propone un cambio en el modelo, utilizando el K-$\omega$ para analizar, estudiar y concluir cuál de los dos describe mejor los efectos del flujo turbulento en una estructura tipo aliviadero.

17. Para la recreación de un escenario muy similar al presentado en la estructura de alivio el Ejido, se propone simular bajo las condiciones de sedimentación existente en toda la cámara, en las tuberías y en el box. Además, complementar la modelación hidráulica con una de la calidad del agua.

## Referencias Bibliográficas


Ansys. (2013). *ANSYS Fluent Theory Guide.* Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos.

Cengel, Y & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos, Fundamentos y aplicaciones.* México D.F: McGraw-Hill.

Dios, M ; Angulo, M ; Del Blanco , M ; Liscia, S. (2008). *Modelación matemática y física de un vertedero modificado.* La Plata, Argentina: Laboratorio de Hidromecánica – Área Departamental Hidráulica – Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata.

Freitas , C & Campagnole, D. (2017). Two-phase CFD simulation of research reactor siphon breakers: A verification, validation and applicability study. *Nuclear Engineering and Design*, 12 (5), 84-111.

Garzón,S. (2014). *Modelación en CFD de un tramo del rio Arzobispo.* Bogota: Panamericana editores.

Ives, R ; Keir, S ; Bassey, E y Hamad, F . (2017). Investigation of the Flow Around an Aircraft Wing of Section. *Aerospace Europe 6th CEAS conference* (pág. 10). Middlesbrough, United Kingdom: CEAS.

Liu, J ; Hekkenberg, R ; Jiang, Z ; Chu, X. (2017). Mesh Properties for RANS Simulations of Aerofoil-Shape Rudder Hydrodynamics. *10th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics* (pág. 11). Kenlung, Taiwan: Wuhan University of Technology.

Niño, Y. (2002). *Método de los volumenes finitos, Modelación númerica Hidráulica y Ambiental.* Santiago, Chile: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Otálora,A. (2016). *Modelación Numérica 3D con ANSYS -FLUENT del Vertedero Laberinto de la Central Hidroeléctrica "La Naveta", en Apulo – Cundinamarca, a partir de un Modelo Físico a Escala.* Bogotá: Norma editores.

Pulido,R. (2010). *Evaluacion de estructuras de alivio para alcantarillado combinado.* Bogotá: (Tesis de maestria). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Rocha,A. (2015). Formulas de vertederos. *Hidraulica de Tuberias y canales - Manual de Construccion*, 7 (9), 45-56.

Samaniego,S. (2015). *Simulacion numérica del funcionamiento hidraulico de una rejilla de efecto Coanda utilizando metodología CFD.* Loja, Ecuador.

Shames, I. (1995). *Mecánica de fluidos, Tercera Edición.* Santafé de Bogotá: Mc Graw-Hill.

Stamper, E. (2015). Advanced Meshing. *Enginnierin Advantage* (págs. 2-20). Middlebury, Estados Unidos: CAE, ASSOCIATES.

Versteeg, H & Malalasekera, W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method.* Longman House, Burnt Mill, Harlow, England.: Longman Group Ltd.

Zhu, Z. (2017). 3D CFD simulation of Multi-phase flow separators. *Journal of Physics: Conference Series* (pág. 6). Beijing, China: School of petroleum engineering, China University of petroleum.