

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA MEDIANTE CFD EN 3D PARA EL DIAGNÓSTICO DEL
FUNCIONAMIENTO DE UN (01) ALIVIADERO DE ALCANTARILLADO COMBINADO EN EL
SECTOR NORTE DE TUNJA

DARIO SEBASTIAN NUMPAQUE HOLGUÍN

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2025

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA MEDIANTE CFD EN 3D PARA EL DIAGNÓSTICO DEL
FUNCIONAMIENTO DE UN (01) ALIVIADERO DE ALCANTARILLADO COMBINADO EN EL
SECTOR NORTE DE TUNJA

DARIO SEBASTIÁN NUMPAQUE HOLGUÍN

Tesis de grado para obtener el título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en
hidroambiental

Director

PhD. Melquisedec Cortes Zambrano

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TUNJA

2025

A mis padres por todas las cosas que me han brindado a lo largo de los años, por apoyarme en cada instante de mi vida, la vida no me va a alcanzar para agradecerles por todo lo que han hecho por mí. Son los mejores padres del mundo.

DARIO SEBASTIAN NUMPAQUE HOLGUIN

AGRADECIMIENTOS

**“Todos pueden superar sus circunstancias y alcanzar el éxito si están dedicados
y apasionados por lo que hacen”**

Nelson Mandela

Agradecerle a Dios por estar siempre a mi lado y nunca desampararme, por hacer realidad mis sueños y enseñarme a soñar en grande. Estando de la mano de Dios podre alcanzar cualquier meta y salir victoriosos ante cualquier adversidad.

Agradecer a mis padres por apoyarme en todo momento y ser esa voz de aliento en los momentos difíciles.

Al ingeniero Melquisedec Cortes Zambrano por guiarme en todo el proceso de la tesis para que las cosas salieran de la mejor manera, agradecerle por brindarme tantos conocimientos es una excelente persona y un profesional excepcional.

Al ingeniero Harold Álvarez por brindarme la licencia educativa de FLOW 3D, el programa en el que realice las modelaciones hidrodinámicas del aliviadero en estudio.

A la empresa Veolia por facilitarme toda la información de la estructura en estudio, en especial al ingeniero Oscar Camargo.

Tabla de Contenido

Resumen.....	10
Abstract.....	11
1. Introducción.....	12
2. Objetivos	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
3. Delimitación de la zona de estudio.....	16
Descripción de la zona.....	16
Población.....	17
4. Marco conceptual.....	20
4.1. Alcantarillado Combinado.....	20
4.2. Parámetros de diseño de estructuras de alivio en alcantarillados combinados	
21	
4.3. Vertedero	26
4.4. Orificio	29
4.5. Factor de dilución.....	32
4.6. Cfd.....	33
4.7. Descripción de Flow 3D.....	34
4.8. Ecuaciones de Saint-Venant	36
4.8.1. Ecuación de continuidad.....	36

4.8.2.	Ecuación de Momentum	39
4.9.	Ecuaciones de Navier-Stokes	40
4.10.	Ecuación de Transporte.....	40
4.11.	Ecuación de la conservación de la masa	41
4.12.	Flujo subcrítico.....	42
4.13.	Modelos de turbulencia.....	42
4.14.	Calibración	43
4.15.	Validación.....	44
4.16.	Mallado.....	44
5.	Construcción de modelos y simulación	46
5.1.	Generalidades de la estructura.....	46
5.2.	Metodología.....	51
6.	Desarrollo del trabajo.....	56
7.	Análisis de resultados y discusión.....	81
8.	Conclusiones.....	89
9.	Recomendaciones	91
	Referencias	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características principales del diseño de aliviaderos, normativa colombiana...	25
Tabla 2 Características y capacidades Flow 3D	36
Tabla 3 Datos tubería entrada combinada.....	63
Tabla 4 Datos tubería de salida sanitaria.....	64
Tabla 5 Valores de manning iniciales.....	64
Tabla 6 Resultados previos tubería de entrada combinada	65
Tabla 7 Resultados previos tubería de salida sanitaria	65
Tabla 8 Valores de Manning calibrados.....	67
Tabla 9 Valores métricas de evaluación CSO V2.....	69
Tabla 10 Métricas de evaluación datos validación	73
Tabla 11 Hidrograma entrada combinada TR10.....	74
Tabla 12 Punto de estabilización.....	82
Tabla 13 Desarrollo de número de Froude en el tiempo.	85

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Áreas de drenaje distrito Santa Inés	17
Ilustración 2 Cabecera municipal.	18
Ilustración 3 Rural disperso	18
Ilustración 4 Sistema de alcantarillado combinado en tiempo seco.....	21
Ilustración 5 Sistema de alcantarillado combinado en tiempo de lluvia.	21
Ilustración 6 Estructura tipo aliviadero	27
Ilustración 7 Reynolds para orificios.....	31
Ilustración 8 Topología aliviadero.....	46
Ilustración 9 Sección aliviadero de estudio	47
Ilustración 10 Planta aliviadero de estudio.....	48
Ilustración 11 Ubicación estructura de alivio	49
Ilustración 12 Inspección de campo estructura de alivio	50
Ilustración 13 Estructura de alivio.....	50
Ilustración 14 Diagrama de flujo metodología.....	52
Ilustración 15 Modelacion en Flow 3D	52
Ilustración 16 Geometria aliviadero Flow 3D	57
Ilustración 17 Corriente de flujo.....	83
Ilustración 18 Profundidad VCA	87
Ilustración 19 Profundidad VCD	87

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Velocidades CSO V2	70
Gráfico 2 Velocidades CSO V1	71
Gráfico 3 Velocidades CSO V3	72
Gráfico 4 Velocidades CSO V4	72
Gráfico 5 Velocidades CSO V5	73
Gráfico 6 Hidrograma entrada combinada - TR10.....	76
Gráfico 7 Velocidades CSO TR10.....	77
Gráfico 8 Caudales CSO TR10	78
Gráfico 9 Velocidades CSO TR10 VCA.....	79
Gráfico 10 Caudales CSO TR10 VCA.....	79
Gráfico 11 Velocidades CSO TR10 VCD.....	80
Gráfico 12 Caudales CSO TR10 VCD	80
Gráfico 13 Relación de caudal y velocidad en el vertedero.....	86

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo realizar la modelación hidrodinámica mediante mecánica de fluidos computacional (CFD), para una estructura de alivio de vertedero transversal en un sistema de alcantarillado combinado de la ciudad de Tunja, (sector norte). En este trabajo se tomaron 5 medidas de caudal con las cuales se calibraron y posteriormente validaron los parámetros y condiciones del modelo, para comprobar estos valores se proponen tres métricas de evaluación para el modelo. MAE, RMSE y BIAS para todos los casos estas métricas dieron valores excelentes o aceptables.

Durante el desarrollo de este trabajo se implementaron los conceptos técnicos necesarios tanto en el trabajo de campo como en la modelación, con el objetivo de asegurar una correcta recolección de datos. Este enfoque permitió establecer una base sólida para la formulación, calibración y validación del modelo en FLOW 3D.

Finalmente se hizo la evaluación de la estructura para dos modificaciones de la cresta del vertedero, la cual busca brindar consideraciones al diseño actualmente existente, en este proceso se encontró que aumentando el ancho de la cresta mejora la capacidad de descarga del vertedero.

Palabras clave: Aliviadero, CFD, Drenaje Urbano

Abstract

This study aims to conduct hydrodynamic modeling using Computational Fluid Dynamics (CFD) for a transverse spillway relief structure within the combined sewer system of the northern sector of Tunja. Five flow measurements were taken during the study to calibrate and validate the model's parameters and conditions. To assess model performance, three evaluation metrics were employed: MAE, RMSE, and BIAS. In all cases, these metrics indicated excellent or acceptable results.

Throughout the study, technical concepts essential for both fieldwork and modeling were implemented to ensure accurate data collection. This approach provided a robust foundation for the formulation, calibration, and validation of the model in FLOW 3D.

Finally, the structure was evaluated under two crest width modifications, aimed at providing recommendations for the current design. This process identified a relationship between the crest width and the spillway's discharge capacity.

Keywords: Spillway, CFD, Urban Drainage

1. Introducción

El drenaje urbano es el conjunto de medidas que buscan minimizar los riesgos de la población, disminuir los daños producidos por las inundaciones y facilitar el desarrollo urbano armónico, y sustentable. (Reyna, S. et al, 2020) Los sistemas de saneamiento y drenaje urbano son infraestructuras críticas que permiten proteger el medio ambiente recogiendo y devolviendo de forma segura el agua residual y las aguas de escorrentía urbana al medio natural. (Anta, J, et al, 2023). Los sistemas de drenaje urbano nacen como una necesidad debido al crecimiento de las ciudades (Bermúdez - Vaquero, 2021), debido a que el desarrollo de estas se ha realizado de manera desordenada. Las principales modificaciones se producen por los cambios drásticos del suelo originados en las cuencas urbanas. Esto a su vez se da por la tendencia generalizada tanto en el ámbito internacional como local de incrementar los centros poblados y, por tanto, las cuencas urbanas (Zambrano, J & Vélez, J, 2023). Esta situación de descontrol no solo es característica de países subdesarrollados, existen ejemplos muy marcados en Estados Unidos y España en los que, debido al elevado costo de ampliar las redes en este tipo de urbanización, los precios de las viviendas ascienden considerablemente. La situación se agudiza cuando las urbanizaciones obstruyen el cauce natural de ríos y arroyos lo que provoca inundaciones peligrosas tanto para la vida de los residentes como para sus pertenencias materiales (Castillo, C. et al, 2022) ocasionando problemas dentro de los sistemas de alcantarillado de las ciudades. Estos se deben principalmente a que en los tiempos de precipitación y posterior mezcla entre el agua servida con el agua que ingresa al sistema producto de escorrentía superficial y con sistemas de drenaje integrales, las dificultades que se presentan requieren soluciones previas, con el fin de no generar afectaciones en las estructuras siguientes, (PTAR y cuerpos receptores), en el proceso de transporte y vertimiento de aguas (Antonio & Monsalve, 2022). En todas las ciudades del mundo, el fenómeno de la urbanización ha generado la impermeabilización del suelo, a la vez que, se reducen de forma significativa las coberturas vegetales que ayuden a

interceptar el agua lluvia con los consecuentes impactos que se traduce en inundaciones y de una excesiva escorrentía. (Moreira, A, 2022). Esto se debe principalmente al aumento de afectaciones ambientales que se presentan en la actualidad, como el cambio climático, que pueden generar eventos de mayor precipitación que aumentan significativamente los niveles de escorrentía (Cely, N. et al, 2024). Un sistema de drenaje urbano eficiente pretende dar solución al problema de tratamiento de aguas residuales en lo que se refiere a la recogida de aguas residuales urbanas, junto con las que proceden de las precipitaciones, y su conducción hacia las estaciones depuradoras de aguas residuales para su posterior tratamiento, reduciendo el volumen de agua sin tratar que puede escapar de la red debido a desbordamientos producidos por intensas precipitaciones (Cebellin, A, 2024).

Históricamente, en la ciudad de Tunja se ha presentado un fenómeno de ocupación de los cauces naturales de las aguas lluvias, alterando la hidrología de las cuencas naturales. Actualmente, la ciudad experimenta un considerable y acelerado desarrollo urbano hacia el noreste, lo que ha provocado desbordamientos en el sistema de drenaje e inundaciones que han afectado a los habitantes. (Cortes, M. et al, 2021).

Teniendo en cuenta las soluciones previas mencionadas anteriormente, es necesario pensar en una estructura que “alivie” los picos de caudal de la red de drenaje, esto teniendo en cuenta las implicaciones, (positivas o negativas), que esta genera sobre las estructuras siguientes a está, (PTAR y cuerpos receptores) {(Antonio & Monsalve, 2022) Para ello se diseñaron las estructuras de alivio, las cuales están diseñadas para dividir las aguas lluvias de las aguas residuales a drenajes naturales o estructuras de contención de picos de caudal, (estructuras de almacenamiento)(Amaya Tequia, 2019). Estas estructuras se utilizan principalmente en sistemas de alcantarillado combinados y permiten exceder en épocas de invierno aguas lluvias hacia cuerpos receptores, con el fin de evitar un sobredimensionamiento de las tuberías y de la planta de tratamiento (Galindo, C, 2022). Con esto como precedente, se hace necesaria la investigación para el diseño y mejora de las estructuras de alivio, pues en la

actualidad la mayoría de los sistemas de alcantarillado son combinados. Hoy en día el desarrollo de nuevas tecnologías para el diseño de aliviaderos de descarga libre en las diversas obras hidráulicas implica el reto de escoger en una infinidad de tipos de vertederos la mejor opción en cuanto a funcionamiento y desempeño hidráulico (Vásquez, J. et al, 2021).

Los estudios hidráulicos de las estructuras de alivio, actualmente se apoyan por métodos numéricos integrados en la dinámica de fluidos computacional, (CFD). La implementación de modelos con esta tecnología ayuda a recrear las condiciones que podrían ocurrir dentro de la estructura, los cuales al ser calibrados y validados ejemplifican el comportamiento real del caudal que hace tránsito por el aliviadero, abriendo así la puerta para la ejecución de análisis hidráulicos de funcionamiento de estas estructuras, permitiendo modelar cambios en estas que optimicen su diseño de ser necesario (Fonseca Pérez, 2008). Es recomendable que aliviaderos tan complejos como este se estudien además en modelo físico, en cuyo caso la modelización previa permite reducir los plazos de ejecución y, por ende, sus costes (López, D. et al, 2016). En vista de lo anterior, se hace necesario el estudio del comportamiento hidrodinámico del flujo. (Del Rio, A. et al, 2024)

En el presente trabajo se realiza la modelación de una estructura de alivio, ubicada en el sector norte de la ciudad de Tunja, Boyacá, mediante el Software "FLOW 3D". Este programa mediante la dinámica de fluidos computacional, (CFD), realiza modelación numérica tridimensional (Antonio & Monsalve, 2022), la cual permite visualizar el comportamiento hidráulico de la estructura de alivio en estudio. Esta visualización del comportamiento permite diagnosticar hidráulicamente el aliviadero tanto en condiciones normales como variando el dimensionamiento actual de la estructura (ancho de cresta), con el fin de determinar qué cambios presenta en su funcionamiento para plantear estructuras más eficientes en diseños posteriores.

2. Objetivos

Objetivo general

Formular un modelo hidrodinámico mediante dinámica de fluidos computacional 3D para establecer el funcionamiento hidráulico de aliviaderos de la red de drenaje urbano del sistema de alcantarillado en el sector Norte de Tunja.

Objetivos específicos

Construir un modelo hidrodinámico mediante FLOW 3D con el fin de evaluar el funcionamiento hidráulico de un (01) aliviadero de la red de drenaje urbano del sistema de alcantarillado en el sector Norte de Tunja.

Evaluar velocidad y caudal con el fin de determinar el comportamiento del aliviadero, mediante FLOW 3D para dos modificaciones de la estructura del vertedero ante el caudal de diseño.

Diagnosticar hidráulicamente el aliviadero para las condiciones evaluadas de funcionamiento mediante la modelación hidrodinámica CFD 3D en el sector Norte de la ciudad de Tunja.

3. Delimitación de la zona de estudio

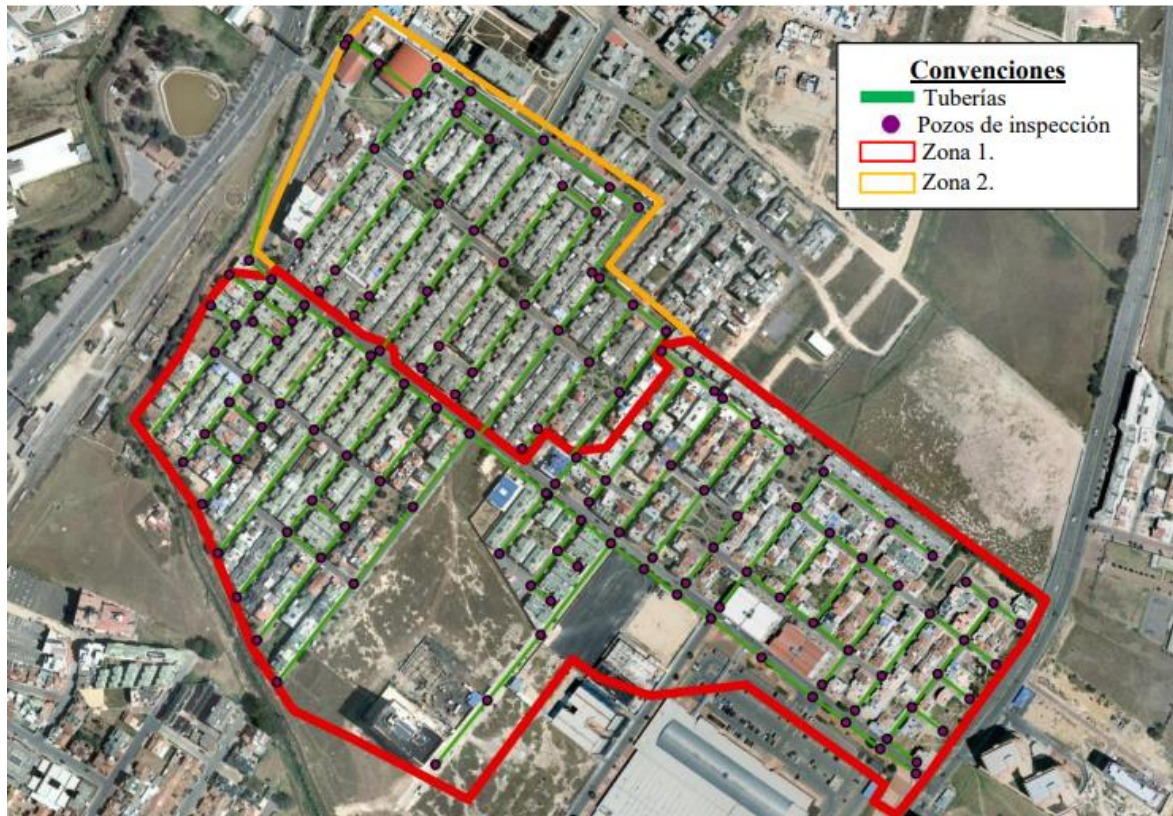
Descripción de la zona

Tunja es un municipio de Boyacá, ubicado dentro de la provincia centro, sobre la cordillera de los Andes al noreste de la capital de Colombia. Cuenta con una extensión territorial de 121 km² de los cuales el 83.7% corresponde al área rural y el 16.3% al área urbana. Dentro del área urbana se encuentran 8 comunas según el acuerdo municipal 010 de 2022 (Acuerdo Municipal N° 010 de 2022, 2022).

El municipio limita por el norte con los municipios de Motavita y Cóbbita, al oriente, con los municipios de Oicatá, Chivata, Soracá y Boyacá, por el sur con Ventaquemada y por el occidente con los municipios de Samacá, Cucaita, Sora y esta atravesado por dos ríos, el río Jordán y el río La Vega, los cuales representan las principales fuentes hídricas del municipio (Acuerdo Municipal N° 010 de 2022, 2022).

Dentro de las comunas que conforman el municipio se encuentra la comuna nororiental, la cual cuenta con un área aproximada de 285ha (Amaya Tequia, 2019) a la cual pertenece el barrio de Santa Inés, distrito en el cual se enfoca el desarrollo de este trabajo, más específicamente en la zona 1 la cual cuenta con un área aproximada de 16 ha. (Ver Ilustración 1)

Ilustración 1 Áreas de drenaje distrito Santa Inés Zona 1

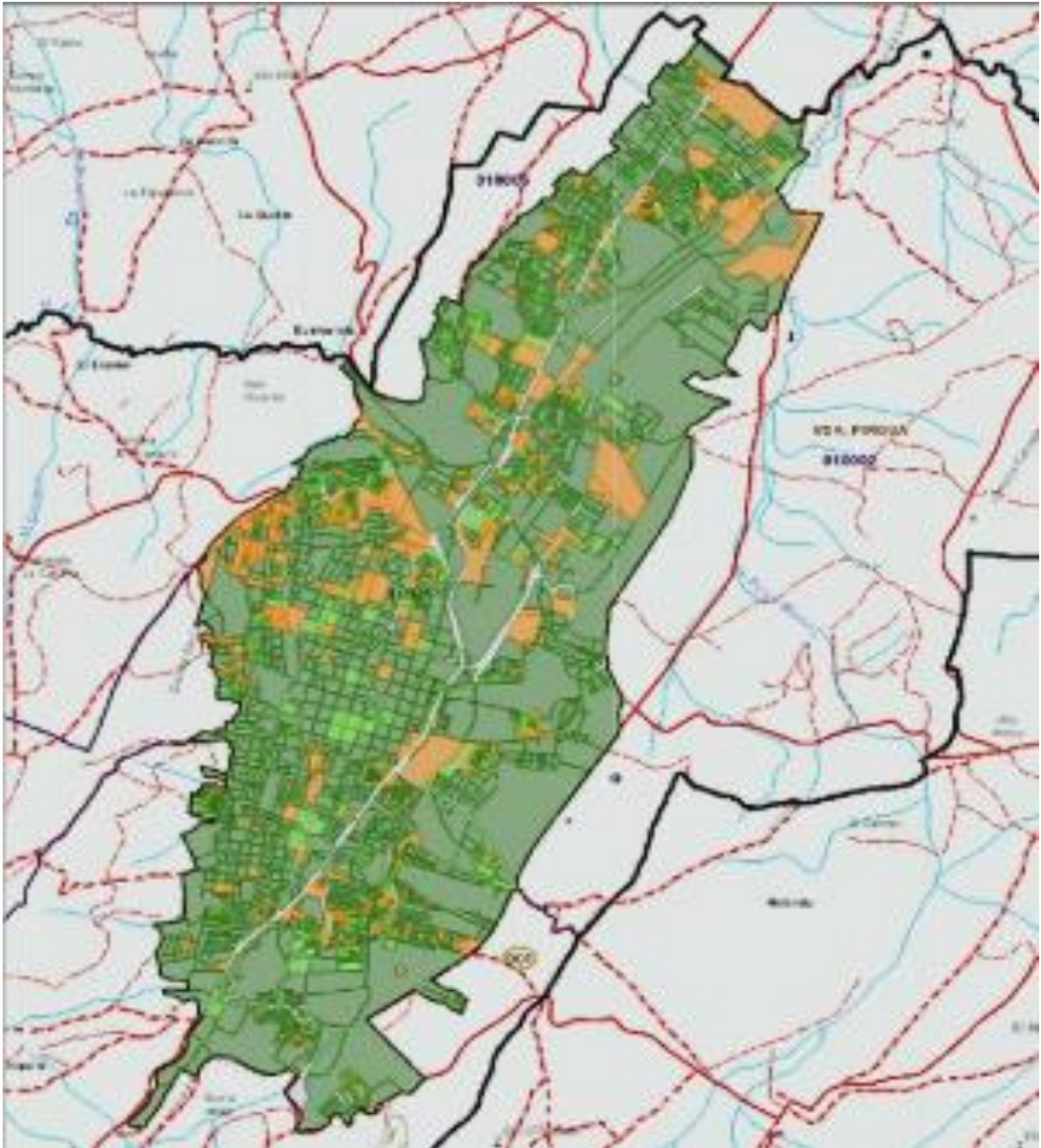


Fuente: Amaya Tequia, 2019.

Población

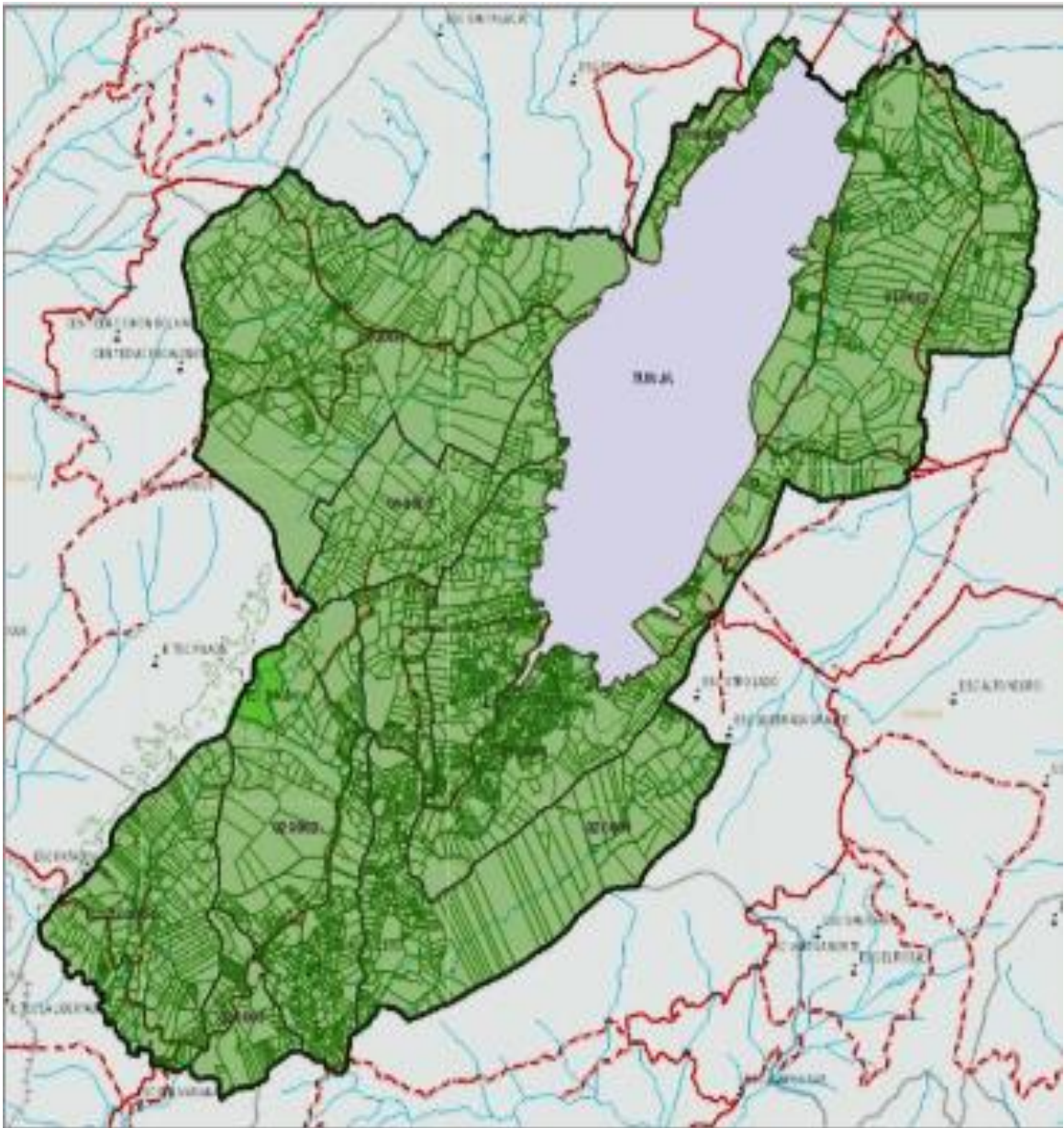
Según el último censo del DANE, realizado en el año 2018, la población total de Tunja era de 167.991, este valor contempla tanto la población de la cabecera municipal como la población de zonas rurales. Ahora bien, el DANE realizó la proyección de población POST-COVID hasta el año 2035, en donde se indica que la población proyectada a cinco años (2029) es de 194.715 personas en total, de las cuales el 96.03% se encuentra en la cabecera municipal y tan solo el 3.97% en la zona rural. (DANE, 2019)

Ilustración 2 Cabecera municipal.



Fuente: Censo 2018

Ilustración 3 Rural disperso



Fuente: Censo 2018

4. Marco conceptual

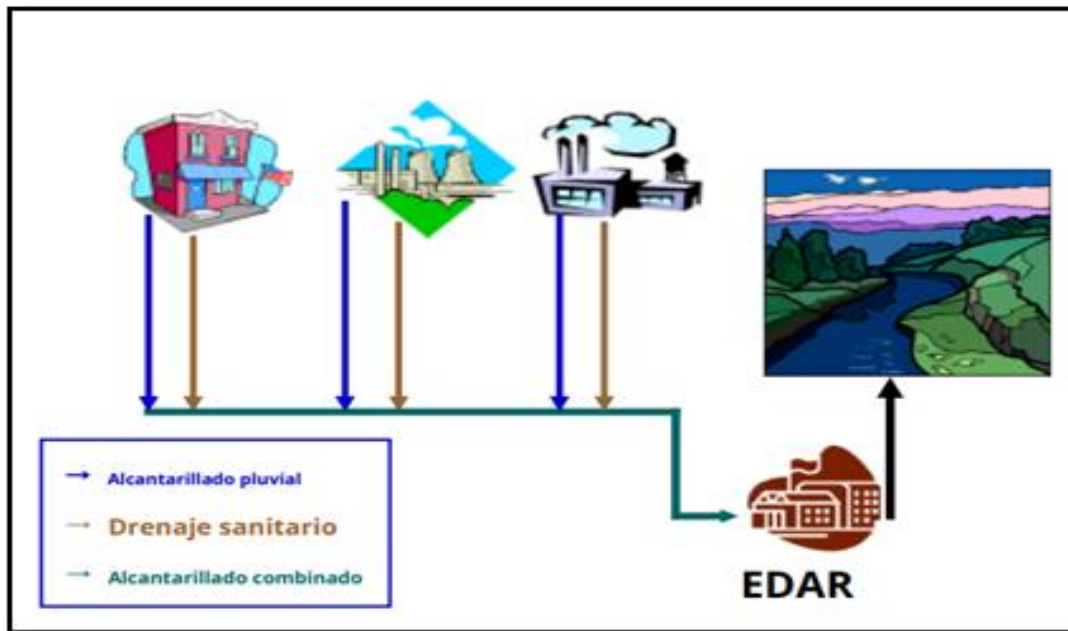
4.1. Alcantarillado Combinado

Los sistemas de alcantarillado combinado colectan y transportan aguas residuales (domésticas e industriales) y aguas provenientes de escorrentías pluviales hacia un sistema de tratamiento, denominado planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Para luego poder hacer una descarga en un cuerpo de agua de forma segura, garantizando condiciones de sanidad.

En épocas de lluvias fuertes el alcantarillado combinado se ve sometido a caudales más grandes lo que genera excesos y que el sistema entre en una condición crítica para el transporte de aguas hacia su tratamiento por lo cual es importante establecer una estructura de alivio dentro del alcantarillado el cual cumple la función de dividir el caudal de aguas lluvia y aguas servidas, en donde el flujo que supere la cota de rebose es vertido a cauces o fuentes naturales receptoras de aguas lluvia y la otra parte es conducida por el sistema hasta la PTAR (S. Fonseca Pérez, 2008).

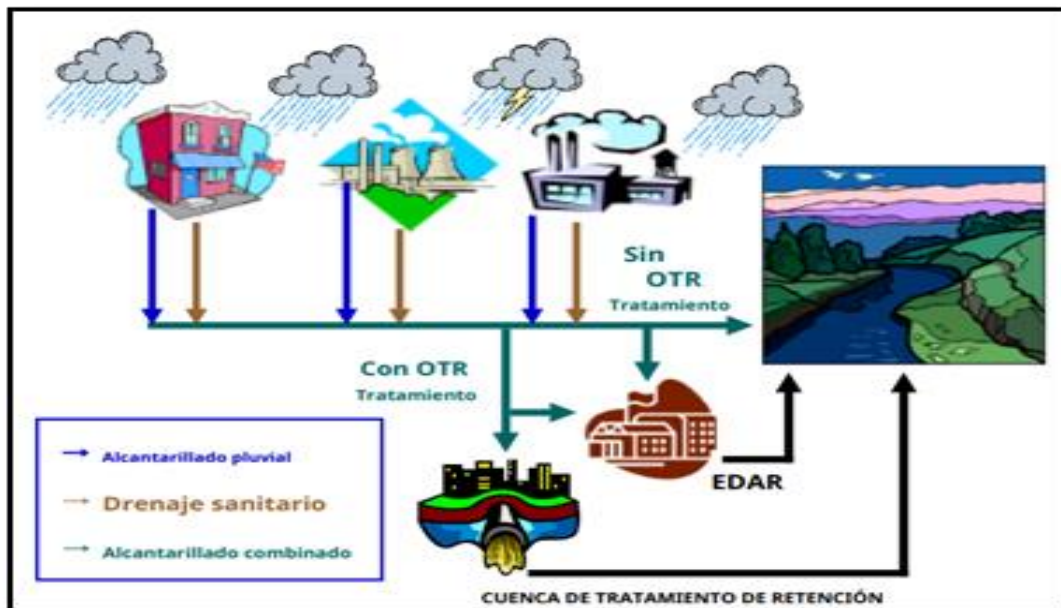
Los aliviaderos representa una disminución de los costos que implica la conducción de aguas hasta su disposición final, es por esta razón que es ampliamente utilizado a nivel mundial, según el informe sobre alcantarillado combinados de la EPA los aliviaderos se encuentran en ciudades grandes como Los Ángeles, Boston, Michigan, entre otras (United States Environmental Protection Agency, 1999) ; ahora bien es importante tener en cuenta que tiempo seco el caudal transportado llegue en su totalidad al sitio de tratamiento, y que en tiempo lluvioso estos logren que los sólidos suspendidos grandes no sean llevados al cuerpo receptor de descarga, sino que, sean transportados hasta la red de interceptores y posteriormente a la PTAR (Empresas Públicas de Medellín E.S.P., 2013)

Ilustración 4 Sistema de alcantarillado combinado en tiempo seco.



Fuente: United States Environmental Protection Agency EPA., 1999

Ilustración 5 Sistema de alcantarillado combinado en tiempo de lluvia.



Fuente: United States Environmental Protection Agency EPA., 1999

4.2. Parámetros de diseño de estructuras de alivio en alcantarillados combinados

Los requisitos mínimos establecidos por la normatividad colombiana, (resolución 0330 de 2017), así mismo se presentan los requerimientos de dos empresas prestadoras de servicios públicos domiciliarios, (acueducto y alcantarillado), teniendo como precedente que estos deberán ser igual o más estrictos en sus consideraciones de diseño que los establecidos en la resolución 0330 de 2017.

4.2.1. Resolución 0330 de 2017

Artículo 157. “Requisitos de diseño de aliviaderos”. Se deben cumplir los siguientes requisitos:

1. El caudal de alivio debe corresponder al caudal medio diario de aguas residuales que llegan a la estructura de alivio multiplicado por el factor de dilución. El factor de dilución será tal, que el vertimiento cumpla con los requerimientos de calidad de la fuente receptora estipulados en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico correspondiente o definido por la autoridad competente. En todo caso este factor de dilución no podrá ser inferior de 5 a 1 de la relación de caudal de aguas lluvias y caudal medio diario de aguas residuales.
2. Se debe realizar un análisis hidráulico considerando el régimen de flujo de los colectores de entrada y salida del aliviadero y las pérdidas de energía generadas por la geometría de la estructura. La descarga de aguas de alivio y residuales no debe afectar la función hidráulica del aliviadero.

3. La estructura debe contar con tapa para inspección y el espacio libre de acceso debe ser mínimo 0.60 m de diámetro o de lado si es rectangular. Se debe proveer escalera de acceso anticorrosiva, la cual podrá ser permanente o móvil. (Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, 2017)

4.2.2 Empresas Públicas de Medellín. EPM

Las consideraciones de diseño para aliviaderos en alcantarillados combinados, (AAC), en EPM están propuestas en el capítulo 8.6.2, la cuales se relacionan a continuación:

1. El diseño debe tratar en lo posible que durante la operación hidráulica no se genere turbulencia que pueda ocasionar la re-suspensión de sólidos.
2. Es muy importante que no exista la posibilidad de depósitos aguas abajo de la estructura de alivio, debido a que éstos cambiarían la relación entre profundidad y caudal en el AAC, ocasionando que empiece a operar prematuramente, entregando un caudal en exceso de aguas combinadas hacia el cuerpo receptor.
3. Se recomienda que la operación de vertimiento en los alivios en alcantarillados combinados ocurra cerca al nivel óptimo. Si el vertimiento ocurre con una altura de lámina de agua relativamente pequeña en las tuberías, se entregará agua contaminada en exceso al cuerpo receptor. (Empresas Públicas de Medellín E.S.P., 2013)

4.2.3 Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. EAAB

En la norma NS-085 de EAAB, (CRITERIOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO), en su ítem 4.6.7., (Aliviaderos), establece inicialmente que la construcción de estructuras de alivio está limitada, pues sugiere otras alternativas para la contención de picos de caudal. Para los casos en donde es avalada la construcción de aliviaderos se debe cumplir con los siguientes criterios:

En los casos en que se permitan vertimientos al alcantarillado pluvial, estos deben seguir los siguientes lineamientos. Los aliviaderos pueden ser laterales, transversales o de tipo vórtice, y deben permitir que el caudal de aguas residuales de tiempo seco continúe por el colector hasta la planta de tratamiento o lugar de disposición final.

El caudal derivado por el aliviadero es una fracción del caudal compuesto de aguas residuales y pluviales, donde los residuos sanitarios y pluviales se mezclan, de tal forma que se diluye la concentración media de las aguas residuales. En consecuencia, el caudal de alivio lleva una carga residual diluida que puede afectar el cuerpo de agua receptor.

En los aliviaderos transversales el vertedero de aguas de alivio debe colocarse de manera perpendicular a la dirección de flujo y derivar el colector con las aguas no aliviadas por aberturas de fondo. En este caso, el caudal de alivio se estima con base en las ecuaciones de vertederos libres de pared delgada, y el caudal no aliviado, con las ecuaciones de orificios.(Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá - EAAB, 2020)

Tabla 1 Características principales del diseño de aliviaderos, normativa colombiana

	RESOLUCION 0330 DE 2017	EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLIN, EPM	EMPRESAS DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTA, EAAB
ASPECTOS CLAVES	-El caudal de alivio debe corresponder al caudal medio diario de aguas	-Se recomienda que la operación de vertimiento en los alivios en alcantarillados	- Los aliviaderos pueden ser laterales, transversales o de tipo vórtice, y deben permitir

	<p>residuales que llegan a la estructura de alivio multiplicado por el factor de dilución.</p> <p>-La estructura debe contar con tapa para inspección y el espacio libre de acceso debe ser mínimo 0.60 m de diámetro o de lado si es rectangular. Se debe proveer escalera de acceso anticorrosiva, la cual podrá ser permanente o móvil</p> <p>- Las estructuras de alivio circulares deben tener un diámetro interno mínimo de 1.20 m y las estructuras rectangulares una distancia interna mínima entre muros opuestos de 1.20 m. La distancia mínima libre entre muros internos debe ser de 0.30 m. (Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, 2017)</p>	<p>combinados ocurra cerca al nivel óptimo. Si el vertimiento ocurre con una altura de lámina de agua relativamente pequeña en las tuberías, se entregará agua contaminada en exceso al cuerpo receptor.</p> <p>- Para sistemas de alcantarillados combinados con diámetros de tuberías mayores o iguales a 800 mm, se recomienda como primera alternativa la evaluación del aliviadero transversal.</p> <p>-Se recomienda que el diseño asegure que se atrapen todos los sólidos grandes, logrando que éstos continúen a través de las tuberías del sistema hacia la planta de tratamiento de aguas residuales o hacia sitios especiales para la disposición y el retiro de dichos sólidos. (Empresas Públicas de Medellín E.S.P., 2013)</p>	<p>que el caudal de aguas residuales de tiempo seco continúe por el colector hasta la planta de tratamiento o lugar de disposición final.</p> <p>- El caudal derivado por el aliviadero es una fracción del caudal compuesto de aguas residuales y pluviales, donde los residuos sanitarios y pluviales se mezclan, de tal forma que se diluye la concentración media de las aguas residuales.</p> <p>-El flujo en un vertedero lateral corresponde a flujo espacialmente variado. Los métodos de cálculo hidráulico para estos vertederos deben basarse en el análisis de conservación de o energía entre dos secciones ubicadas aguas arriba y aguas abajo del vertedero y en la relación entre el caudal de alivio y la longitud del vertedero. (Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá - EAAB, 2020)</p>
<p>DIFERENCIAS</p>	<p>- Se debe realizar un análisis hidráulico considerando el régimen de flujo de los colectores de entrada y salida del aliviadero y las pérdidas de energía generadas por la geometría de la estructura.</p> <p>-Teniendo en cuenta la resolución 0330 de 2017 la geometría de la estructura se basa principalmente en el régimen de flujo que se tiene a la entrada y salida de la misma, teniendo en cuenta estos valores se procede a establecer el dimensionamiento de todos los componentes de la estructura.</p> <p>- El factor de dilución será tal, que el vertimiento cumpla con los requerimientos de calidad de la fuente receptora estipulados en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico correspondiente o</p>	<p>- El diseño debe tratar en lo posible que durante la operación hidráulica no se genere turbulencia que pueda ocasionar la re-suspensión de sólidos.</p> <p>-En la norma de EPM se enfoca en evitar la turbulencia dentro de la estructura para evitar que los sólidos vuelvan a suspenderse lo que generaría que las partículas solidas pasaran la presa evitando que el aliviadero funcione de forma apropiada, debido a que el cuerpo receptor de agua recibiría partículas con altos niveles de contaminación, si el agua contaminada logra pasar la presa.</p> <p>- El análisis de calidad de agua en los cuerpos receptores debe incluir las condiciones iniciales de calidad del agua aguas arriba de la descarga del sistema de alcantarillado, ya sea directa o a través de un aliviadero, y debe proseguir hacia aguas abajo hasta la entrega a un cuerpo mayor de</p>	<p>- Desde el punto de vista hidráulico, los parámetros de diseño de estructuras de alivio corresponden, en el caso de un vertedero lateral, a la profundidad antes de la estructura, régimen de flujo y longitud de vertedero, y si tiene pantalla para incrementar su capacidad, la altura de éste.</p> <p>-Para el diseño de un aliviadero la EAAB recomienda tener en cuenta diferentes parámetros hidráulicos como lo son el régimen de flujo, longitud del vertedero y altura de pantalla.</p> <p>El caudal derivado por el aliviadero es una fracción del caudal compuesto de aguas residuales y pluviales, donde los residuos sanitarios y pluviales se mezclan, de tal forma que se diluye la concentración media de las aguas residuales. En consecuencia, el caudal de</p>

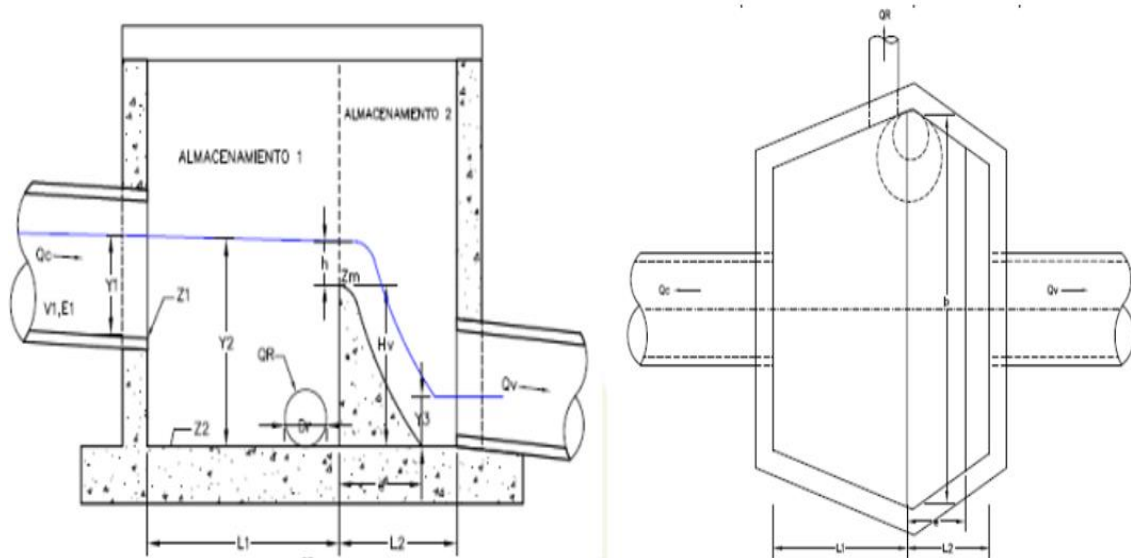
	<p>definido por la autoridad competente. En todo caso este factor de dilución no podrá ser inferior de 5 a 1 de la relación de caudal de aguas lluvias y caudal medio diario de aguas residuales.</p> <p>(Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, 2017)</p>	<p>agua. (Empresas Públicas de Medellín E.S.P., 2013)</p>	<p>alivio lleva una carga residual diluida que puede afectar el cuerpo de agua receptor. Esto depende, entre otros factores, del grado de dilución, de las características hidrológicas de la localidad, del comportamiento hidráulico de los aliviaderos y de las características hidráulicas, hidrológicas, de calidad de agua y de autodepuración de curso o cuerpo de agua receptor y de los volúmenes esperados de alivio, al igual que de la capacidad de almacenamiento de los tanques posteriores al alivio para el primer lavado de época seca, en caso de que éstos existan. Esto indica claramente que las consideraciones ambientales intervienen en su proyección y que constituyen elementos importantes para su operación. (Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá - EAAB, 2020)</p>
OBSERVACIONES	<p>-La resolución 0330 de 2017 se basa principalmente en el diseño del aliviadero, teniendo en cuenta el dimensionamiento que debe presentar en todas las partes de la estructura (tapa, muros, presa).</p>	<p>-La normatividad EPM se enfoca principalmente en brindarle importancia al manejo adecuado de los sólidos sedimentables del alcantarillado combinado, permitiendo que puedan transportarse a la planta de tratamiento garantizando una eficiencia hidráulica de la estructura.</p>	<p>-La EAAB es enfática en buscar el tipo de estructura que se debe diseñar teniendo en cuenta los parámetros hidráulicos que se presentan aguas arriba de la estructura. Estos diseños pueden variar teniendo en cuenta si los aliviaderos son laterales, transversales o de tipo vórtice.</p>

4.3 Vertedero

Un vertedero es una estructura semejante a una pared la cual tiene un biselado por el cual pasa una corriente de flujo. Normalmente esta estructura se emplea para controlar los excesos y son conocidos como vertederos de rebose o también pueden ser empleados para medir caudales y son conocidos como vertederos de medida. Con objeto de este trabajo se analiza una estructura de alivio de tipo: estructura de alivio de alcantarillado combinado de vertedero transversal.

Este vertedero transversal se debe construir de forma perpendicular a la dirección del flujo entrante, lo cual permite que las aguas recogidas por desborde sean colectadas en una tubería para enviar a la corriente receptora y las aguas residuales se dirijan a la PTAR. (Empresas Públicas de Medellín E.S.P., 2013)

Ilustración 6 Estructura tipo aliviadero



Fuente: Normas de diseño de sistemas de alcantarillado de las empresas públicas de medellin e.s.p.

Para este caso el vertedero es rectangular y sin contracciones laterales, el caudal o gasto del vertedero está definido por la ecuación:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L \mu \left(H + \frac{V^2}{2G} \right)^{2/3}$$

Donde:

Q: Caudal (m³/s)

L: Longitud del vertedero (m)

H: Carga hidráulica sobre la cresta (m)

V: Velocidad de llegada al vertedor (m/s)

μ: Coeficiente de gasto

El coeficiente de gasto aparece ya que, si no se incluye, no se estarían considerando las pérdidas por fricción ni los efectos de tensión superficial y por lo tanto no se estaría trabajando con la verdadera distribución de velocidades.

Este coeficiente de gasto tiene un rango de valores característicos entre 0.55 y 0.65.

En la literatura se encuentran varias ecuaciones para calcular el coeficiente de gasto (Sotelo Avila, 1994)

Según las Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín. E. S. P, El caudal se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} (H + 0.0012)^{2/3}$$

Donde:

Q: Caudal aliviado (m³/s)

b: Ancho vertedero (m)

H: Carga hidráulica sobre la cresta (m)

C_d: Coeficiente de descarga

El coeficiente de descarga de esta última ecuación se calcula de acuerdo con la ecuación mostrada a continuación:

$$Q = 0.602 + 0.0832 \times \frac{H}{H_v}$$

Donde:

Cd: Coeficiente de descarga

H: Altura de agua por encima de la cresta del vertedero (m)

Hv: Altura del vertedero (m)

Ahora bien, para el dimensionamiento de la estructura se deben tener en cuenta ecuaciones de masa y conservación de momentum, además de contar con los caudales, el factor de dilución y el caudal de exceso para descargar en la fuente receptora.

4.4 Orificio

Un orificio es una perforación por medio de la cual se evacua agua o fluido contenidos en un depósito, en este caso el orificio cumple la función de evacuar el caudal no aliviado, es decir las aguas residuales más la dilución (Empresas Públicas de Medellín E.S.P., 2013) por lo que se debe entender el funcionamiento de esta estructura. La ecuación general de un orificio es:

$$Q = CdA\sqrt{2gH}$$

En donde:

Cd: Coeficiente de gasto

H: Profundidad del orificio

C_d que representa el coeficiente de gasto está en función del coeficiente de contracción C_c y el de velocidad C_v , de modo que la ecuación en otros términos estaría indicada de la siguiente manera:

$$Q = C_v C_c A \sqrt{2gH}$$

Dichos coeficientes son experimentales sin embargo teniendo en cuenta la ecuación de cantidad de movimiento sobre un volumen de control definido bajo ciertas condiciones de frontera, se pueden determinar los coeficientes. Adicionalmente cabe resaltar que los tres coeficientes son función exclusivamente del número de Reynolds. (Sotelo Avila, 1994)

Para corrección por forma, se tiene la siguiente ecuación que define el coeficiente de contracción.

$$C_c = 2 - \sqrt{4 - \frac{2}{C_v^2}}$$

Para corrección por velocidad, se tiene la siguiente ecuación que define el coeficiente C_v

$$V = C_v \sqrt{2gH}$$

Ahora bien, como se mencionó anteriormente, los coeficientes dependen del número de Reynolds. Si se tiene un $Re > 10^5$, los coeficientes C_d , C_v y C_c son independientes de dicho número y adquieren los siguientes valores constantes: (Sotelo Avila, 1994)

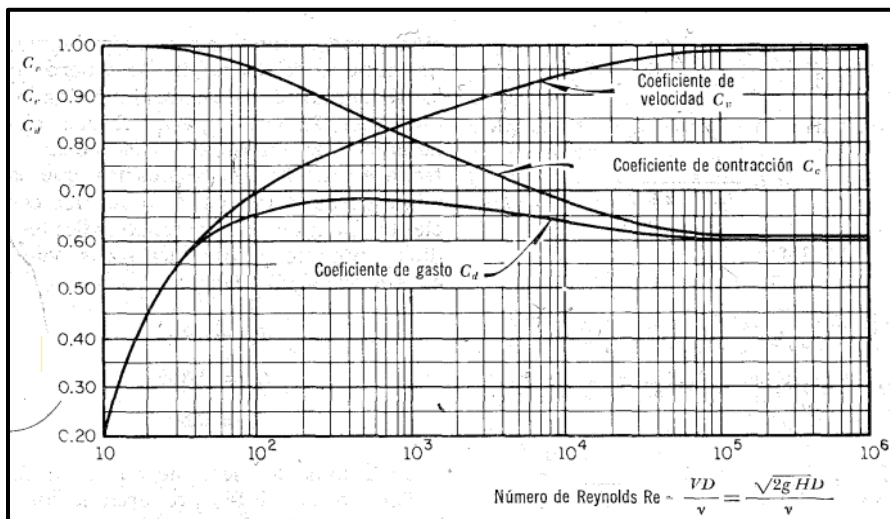
$$C_v = 0.99$$

$$C_c = 0.605$$

$$C_d = 0.60$$

A continuación, se muestra la variación de los coeficientes en función del número de Reynolds para un orificio circular.

Ilustración 7 Reynolds para orificios



Fuente: (Sotelo Avila, 1994)

Por último, se debe considerar la pérdida de energía la cual es proporcional a la carga de velocidad media en la sección contraída (Sotelo Avila, 1994), por tanto, el coeficiente de pérdida (K) está definido en función del coeficiente de velocidad:

$$K = \frac{1}{C_v^2} - 1 \quad (1)$$

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{K + 1}}$$

Según las Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado de las Empresas Públicas de Medellín. E. S. P, El caudal de descarga del orificio depende del área de la tubería de salida y la cabeza efectiva sobre el orificio:

$$Q = CdAo\sqrt{2gho}$$

Donde:

Q: Caudal de descarga (m³/s)

Cd: Coeficiente de descarga

Ao: Área del orificio (m²)

ho: Cabeza efectiva (m)

Se recomienda que el diámetro de la tubería de salida de aguas lluvias sea como mínimo el diámetro de la tubería de aguas combinadas (Empresas Públicas de Medellín E.S.P., 2013).

Las anteriores ecuaciones (orificio y vertedero) representan la hidráulica general con el fin de encontrar los parámetros de diseño de los vertederos teniendo en cuenta las magnitudes halladas, se procede a dimensionar la estructura en general.

4.5 Factor de dilución

Existen factores de control que se deben tener en cuenta en estructuras de alivio de alcantarillados combinados relacionados con la carga contaminante que se vierten en los cuerpos de agua cuando el caudal no puede ser dirigido a la PTAR, por tal motivo es importante establecer una proporción entre aguas residuales y pluviales que garanticen que el agua aliviada no genera una gran contaminación, sino que se encuentra dentro de los parámetros establecidos en el plan de saneamiento y manejo de vertimientos (PSMV) o en el plan de ordenamiento del recurso hídrico establecidos para el municipio.

El municipio de Tunja no cuenta con el PSMV por lo cual se adopta lo dispuesto en el RAS 2017, donde se indica que, de no contar con la información del cuerpo de agua, el factor de dilución será necesariamente mayor a 1 y puede llegar hasta un valor de 5 dependiendo del tamaño de la estructura, ubicación de la estructura dentro del perímetro urbano, volumen de almacenamiento y el caudal aliviado. Valores bajos de este factor corresponde a tramos secundarios que alivian cursos de agua con poco caudal, mientras que valores altos corresponden a interceptores o emisarios finales que descargan a un cauce con gran caudal (Título D Del Reglamento Técnico Del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, 2016) para este caso se trabaja con un factor de dilución de 3 para el diseño de las estructuras.

4.6 Cfd

En física el modelamiento matemático, se realiza mediante el uso de métodos numéricos y algoritmos de aproximación. En mecánica de fluidos la dinámica de fluidos computacional CFD, (computational fluid Dynamics), busca solucionar e interpretar los sistemas de movimiento de los fluidos y sus consecuencias, (Transporte de sólidos, transferencia de calor, entre otros), a través de la aproximación de derivadas e integrales de las ecuaciones mediante expresiones algebraicas discretas, (discretización espacial y temporal), las cuales resueltas realizan una predicción del comportamiento del flujo, haciendo uso de herramientas de software, (para el pre y post proceso de la información), los cuales mediante aproximaciones, dan solución a la ecuaciones inicialmente planteadas. (Diaz Rúa, 2021; Navas Montilla et al., 2021)

La dinámica computacional de fluidos tiene su origen en métodos de discretización como lo son el método de las diferencias finitas, el método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos, siendo este último el más utilizado. Ahora bien, el método de volúmenes finitos se basa en las ecuaciones de Navier-Stokes (las cuales son ideales para el análisis de flujo a superficie libre) en donde un conjunto de volúmenes de control es utilizado para representar la

condición real o inicial. Hoy en día existen muchas aplicaciones de los CFD para el análisis de sistemas de alcantarillado combinado para analizar aspectos como el desbordamiento de agua, los vertimientos de aguas no tratadas a cuerpos de agua, simulaciones de trampas invertidas, entre otras.

4.7 Descripción de Flow 3D

Los estudios hidráulicos de las estructuras de alivio, actualmente se apoyan por métodos numéricos integrados en la dinámica de fluidos computacional, (CFD). La implementación de modelos con esta tecnología ayuda a recrear las condiciones que podrían ocurrir dentro de la estructura, los cuales al ser calibrados y validados ejemplifican el comportamiento real del caudal que hace tránsito por el aliviadero, abriendo así la puerta para la ejecución de análisis hidráulicos de funcionamiento de estas estructuras, permitiendo modelar cambios en estas que optimicen su diseño de ser necesario (Fonseca Perez, 2008).

Para este caso se decidió trabajar con el software FLOW 3D el cual, utilizado para manejar problemas complicados de flujo confinado y de superficie libre, del tipo denominado CFD (Computational Fluid Dynamics) para análisis tridimensionales. Es empleado para numerosas aplicaciones al incorporar un entorno "Multi Físico" y destaca especialmente su comportamiento para la simulación de fluidos en lámina libre. Se ha demostrado que las predicciones de la dinámica de fluidos computacional (CFD) reproducen adecuadamente las características hidráulicas de operación. (Cortes, M. et al, 2023). La combinación de datos reales adquiridos mediante estudios de campo con simulaciones numéricas realizadas mediante software especializado, como Flow-3D, constituye una base sólida para la toma de decisiones informadas por parte de ingenieros y diseñadores hidráulicos (Cely, N. et al, 2023).

Los códigos CFD están estructurados en torno a algoritmos numéricos que pueden abordar los problemas de flujo de fluidos. Para proporcionar un fácil acceso a su capacidad de

resolución, todos los paquetes comerciales de CFD incluyen interfaces de usuario sofisticadas para ingresar parámetros de problemas y examinar los resultados (Carrion, E, 2022).

Este software resuelve numéricamente la ecuación de Navier-Stokes promediada por Reynolds a demás resuelve la ecuación de continuidad, cantidad de movimiento de forma tridimensional junto con un modelo de volumen fluido (VOF)(Diaz Rúa, 2021). En este sentido, describir matemáticamente el comportamiento hidráulico en estructuras de control, conlleva a ecuaciones diferenciales acopladas no lineales, las cuales en la mayoría de los problemas de ingeniería no poseen una solución analítica (Ladino, E. et al 2018). El campo de la hidráulica y del diseño hidráulico ya ha incursionado en las simulaciones CFD, como una herramienta complementaria de los laboratorios de hidráulica, en donde los fenómenos son representados a escala, con un costo elevado (Silva, R, 2019). FLOW 3D se caracteriza por tener una interfaz de modelado fácil de usar, además de ser útil para el diseño de proyectos hidroeléctricos, ambientales, de recursos hídricos y relacionados. (Soporte Flow 3D)

En cuanto a problemas hidráulicos, el programa presenta las siguientes características y capacidades.

Tabla 2 Características y capacidades Flow 3D

CARACTERÍSTICAS	CAPACIDADES
<ul style="list-style-type: none"> • Simula fluidos en superficie libre en régimen transitorio. • Hidráulica costera. • Estudios de erosión. • Depuración de aguas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Incluye diversos modelos de turbulencia Interacción aire-fluido Efectos del viento y oleaje. • Arrastres de sedimentos. • Fuerzas gravitatorias en las tres direcciones. • Marco de referencia no inercial. • Cavitación. • Medios porosos. • Interacción fluido-estructura completa.

Fuente: (Recasens & Gómez Valentín, 2014b)

Como se mencionó anteriormente, el programa está basado en varias ecuaciones matemáticas las cuales se detallan a continuación:

4.8 Ecuaciones de Saint-Venant

Las ecuaciones de Saint-Venant constituyen un modelo de ecuaciones diferenciales que describen los cambios de caudal en el espacio y en el tiempo. Estas ecuaciones son las más generales encontradas en el campo de la hidráulica y están compuestas por las ecuaciones de continuidad y momentum.

4.8.1 Ecuación de continuidad

La ecuación general de continuidad expresa la conservación de la masa sobre un volumen de control y está dada por:

$$V_f \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial}{\partial x} \right) * (R * \left(\frac{\partial}{\partial y} \right) * (\rho v A_y) + \left(\frac{\partial}{\partial z} \right) * (\rho w A_z) + \varepsilon \left(\frac{\rho u A_x}{x} \right) = R_{dif} + R_{sor}$$

Siendo VF el volumen fraccional abierto al flujo, ρ la densidad del fluido, RDIF un término difusión turbulenta y RSOR una fuente de masa. Los componentes de la velocidad (u, v, w) están en las coordenadas (x, y, z) o (r, θ, z) . A_x es el área fraccional abierta al flujo en la dirección x , A_y y A_z son fracciones de área similares para el flujo en las direcciones y y z , respectivamente. El coeficiente R depende de la elección del sistema de coordenadas. Cuando se utilizan coordenadas cilíndricas, las derivadas deben ser convertidas a derivadas azimutales.

$$\frac{\partial}{\partial y} \rightarrow \frac{1}{r} * \frac{\partial}{\partial \theta}$$

Esta transformación se lleva a cabo mediante el uso de la forma equivalente:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \rightarrow \frac{r_m}{r} \frac{\partial}{\partial y}$$

Donde $y = r_m \theta$ y r_m es un radio de referencia fijo. La transformación dada por la ecuación anterior es particularmente conveniente, dado que para su aplicación sólo se requiere el multiplicador $R = r_m/r$. Cuando se utilizan las coordenadas cartesianas, R se ajusta a la unidad y ξ se hace cero.

El primer término del miembro derecho de la Ecuación 1 es un término de difusión turbulenta:

$$R_{DIF} = \frac{\partial}{\partial x} \left(v_p A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + R \frac{\partial}{\partial y} \left(v_p A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_p A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) + \varepsilon \frac{\rho v_p A_x}{x}$$

Donde el coeficiente ν_p es igual a $c_p\mu/\rho$, μ es el coeficiente de difusión del momentum (es decir, la viscosidad) y c_p es una constante cuyo valor recíproco se denomina como el número turbulento de Schmidt. Este tipo de difusión de masa sólo tiene sentido para el proceso de mezcla turbulenta en fluidos que poseen una densidad no uniforme.

El último término, R_{SOR} , es un término de fuente de densidad que se puede utilizar, por ejemplo, para modelar la inyección de masa a través de las superficies de los obstáculos porosos.

Los problemas de flujo compresible requieren la solución de la ecuación completa de transporte de densidad como se indica en la Ecuación 1. Para fluidos incompresibles, ρ es una constante y la ecuación se reduce a la condición de incompresibilidad.

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + R\frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) + \varepsilon\frac{uA_x}{x} = \frac{R_{SOR}}{\rho}$$

Para problemas en los que la propagación de las ondas de presión acústica es importante, y el fluido puede ser tratado como incompresible de otra manera, la derivada temporal de la densidad se aproxima por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t}$$

Siendo c^2 el cuadrado de la velocidad del sonido y p la presión. Esta aproximación es válida en el rango:

$$\left| \frac{\delta \rho}{\rho} \right| < 0.1$$

Con esta aproximación, la ecuación de continuidad modificada se convierte entonces en:

$$\frac{V_f}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + R \frac{\partial u A_y}{\partial y} + \frac{\partial u A_z}{\partial z} + \varepsilon \frac{\partial u A_x}{\partial x} = \frac{R_{sor}}{\rho}$$

(Jimenez Motta, 2019)

4.8.2 Ecuación de Momentum

La ecuación de conservación de momento indica como cambia la cantidad de momentum del flujo debido al desbalance de fuerzas de superficie y volumen (Antonio & Monsalve, 2022)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right]$$

Donde:

u_i u_j son las componentes del vector velocidad.

μ es la viscosidad dinámica del fluido

g es la aceleración de la gravedad

P es la presión

Ahora bien, las ecuaciones de Saint-Venant se pueden definir en 1 o 2 dimensiones, dependiendo del tránsito de avenidas que se quiera representar. Para este caso se requiere hacer uso del modelo de onda cinemática bidimensional, el cual sirve para representar la escorrentía superficial y la concentración de flujo (Aquise Obregón, 2017)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(uvh)}{\partial y} = gh(S_{ox} - S_{fx})$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(uvh)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left(v^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) = gh(S_{0y} - S_{fy})$$

4.9 Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes expresan las ecuaciones de Saint-Venant en función del campo de velocidades y de presión para así describir el movimiento de los fluidos.

Cuando la densidad del fluido ρ tiene una variación muy pequeña, se pueden obtener las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido newtoniano, monofásico (homogéneo) e incompresible, a partir de la ecuación de momentum.

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i}$$

donde: $Du_i / Dt = (\partial u_i / \partial t + u_j \partial u_i / \partial x_j)$ es la derivada material de la velocidad (aceleración local y aceleración advectiva); $\partial^2 u_i / \partial x_j^2$ es el Laplaciano de las componentes del vector velocidad que indica un cambio de momentum a causa de desbalances de esfuerzos viscosos.

(Aguise Obregón, 2017)

4.10 Ecuación de Transporte

Las ecuaciones de conservación de masa y de momentum se pueden expresar de manera general como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) + S_\varphi$$

donde: φ es una sustancia o partícula (escalar) que es transportada en el fluido; Γ es un coeficiente de difusión y S_φ es un término de generación o destrucción de la sustancia que transporta el sistema.

La anterior ecuación se utiliza como punto de partida para procedimientos computacionales llevados a cabo mediante el método de volúmenes finitos.

(Aguise Obregón, 2017)

4.11 Ecuación de la conservación de la masa.

La ecuación general de la conservación de la masa es:

$$V_f \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) + \varepsilon \frac{\rho u A_x}{x} = R_{dif} + R_{sor}$$

Dónde:

V_f : Fracción de volumen abierto a flujo (volumen de control).

ρ : Densidad del fluido.

RDIF: Término de difusión de masa debido a turbulencia.

RSOR: Fuente de masa.

Las componentes de velocidad (u,v,w) están en el sistema coordenadas (x,y,z). A_x es el área fraccional en la dirección x, A_y y A_z son las áreas de flujo fraccionales similares en la

dirección y y z respectivamente. Los coeficientes R y E dependen del sistema de coordenadas seleccionados. En el sistema cartesiano R=1 y E=0.

(Patiño Fernández & Vintimilla Vintimilla, 2015)

Las anteriores ecuaciones diferenciales (Ecuaciones de Saint-Venant, ecuación de continuidad, ecuación de momentum, ecuación de Navier-Stokes, ecuación de transporte) son con las que cuenta el programa (FLOW 3D) dentro de sus métodos, soluciona en función del número de variables que se le introduzcan al mismo. Entiéndase como variables a todos los datos de entrada reales tomados en campo.

4.12 Flujo subcrítico

Este tipo de flujo se conoce comúnmente como flujo lento, en donde se comparan las fuerzas de inercia y de gravedad en el flujo, medidas a través del número de Froude, el cual se define como:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD_H}}$$

Donde, D_H es la profundidad hidráulica y V es la velocidad media en la sección del canal (m/s).

Cuando el número de Froude es menor a 1 ($F < 1$), representa que las fuerzas gravitacionales son más influyentes que las fuerzas inerciales por lo cual el flujo tendrá una velocidad baja. Estas características de del flujo denomina un régimen subcrítico.

4.13 Modelos de turbulencia

Los flujos en las redes de drenaje en su mayoría son inestables, tridimensionales, con una aleatoriedad alta en sus condiciones de paso, lo cual genera flujos turbulentos que dificultan el cálculo teórico y numérico. Estos modelos turbulentos están basados en las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos viscosos; donde dentro del software de simulación FLOW 3D, tenemos seis variantes de simulación para modelos turbulentos, de estos proporcionan mejores resultados los modelos de grandes vórtices (Large Eddy Simulation, LES), los modelos de dos ecuaciones $k-\omega$, $k-\epsilon$ y $k-\epsilon/\text{RNG}$ (basado en los métodos Renormalization - Group)(Monroy González, 2021) (Jimenez Motta, 2019)

4.14 Calibración

La calibración de los modelos realizados por CFD, corresponde a eliminar o minimizar los errores numéricos posibles, a fin de lograr que las ecuaciones planteadas inicialmente para resolver la modelación sean solucionadas correctamente, para ello es necesario verificar que los residuos y errores resultantes del proceso iterativo estén dentro del intervalo de tolerancia definido para el método, toda vez que se cumpla con la conservación de consistencia en la formulación planteada. (Navas Montilla et al., 2021)

Dentro de las variables más sensibles del programa se encuentran el tamaño de la malla y la rugosidad superficial de los elementos de la estructura [(Mogollón Mogollón, 2018)]. Por lo anterior se entiende, que cuando el tamaño de la malla es reducido, los errores de discretización teóricamente deben tender a cero(Navas Montilla et al., 2021). Para asegurar la convergencia de los resultados se hace necesario realizar un análisis de sensibilidad de malla, que proporcione resultados representativos con relación al tiempo de procesamiento computacional del programa de modelación.

Al final de la calibración se deberán hacer una serie de correlaciones entre lo medido en campo con lo simulado, estas comparaciones son las que al final darán la aceptación o no del modelo, dichas relaciones se pueden realizar según valores de caudal, velocidad, alturas de lámina, coeficientes de descarga y demás datos tanto medidos como simulados.

4.15 Validación

Consiste en aplicar diferentes condiciones iniciales para un ajuste de calibración previo, donde se espera tener un error aceptable dentro de los límites establecidos para la aceptación del modelo; este procedimiento se debe elaborar para determinar que el modelo en diferentes condiciones replica las condiciones medidas en campo. Para lo cual se deben hacer las verificaciones realizadas en la calibración.

Para considerar un modelo válido, varios autores, así como el Manual FLOW-3D, recomiendan errores menores al 5% en las comparaciones cuantitativas del modelo físico y numérico; caso contrario deberán revisarse parámetros, modelo de turbulencia y de no ajustarse es posible que exista error en el modelo físico. (Fonseca Pérez, 2008)

De acuerdo a la calibración, el modelo también se da como válido según consideraciones del caudal, en tanto a picos de paso, curvas de comportamiento y demás.

4.16 Mallado

La malla de cálculo definida permite determinar qué fenómenos o procesos pueden ocurrir o ser recreados en la simulación, es decir, la malla genera una discretización espacial que para

el caso del software FLOW 3D corresponde a hexaedros los cuales se asocian a resultados en cada una de las celdas. (Monroy González, 2021)

Para la generación del mallado es importante tener en cuenta aspectos como el tamaño que se va a definir en función de áreas de detalle o importancia, ya que se pueden asignar diferentes tamaños por bloques, pero esto puede incurrir en errores de interpretación del programa por lo que lo ideal es trabajar con un único bloque de malla con el tamaño más pequeño deseado aun así esto implique un coste computacional más elevado ((Recasens & Gómez Valentín, 2014a)

El programa Flow 3D maneja los conceptos “Mesh-Block” y “Mesh-plane” los cuales definen los bloques del programa y los planos principales de la malla.

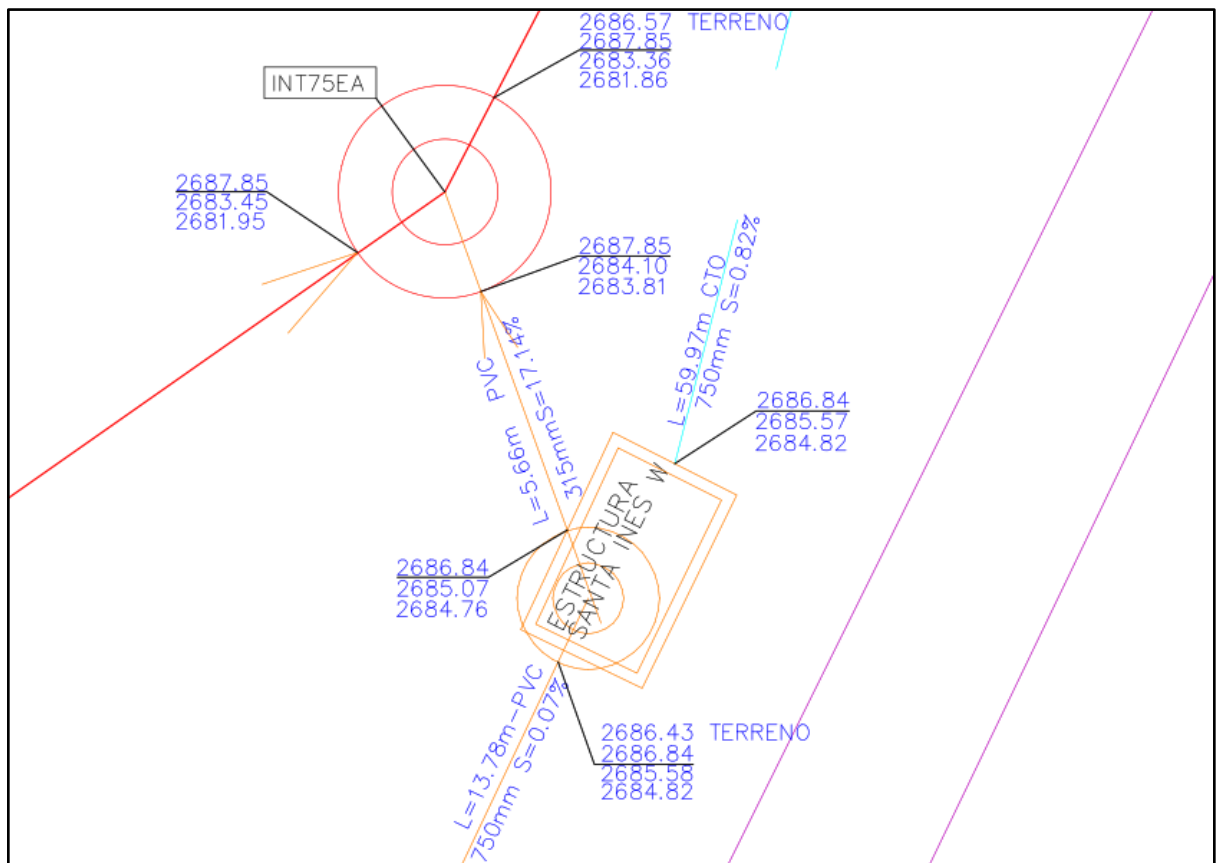
5 Construcción de modelos y simulación

5.1. Generalidades de la estructura.

- Dimensionamiento

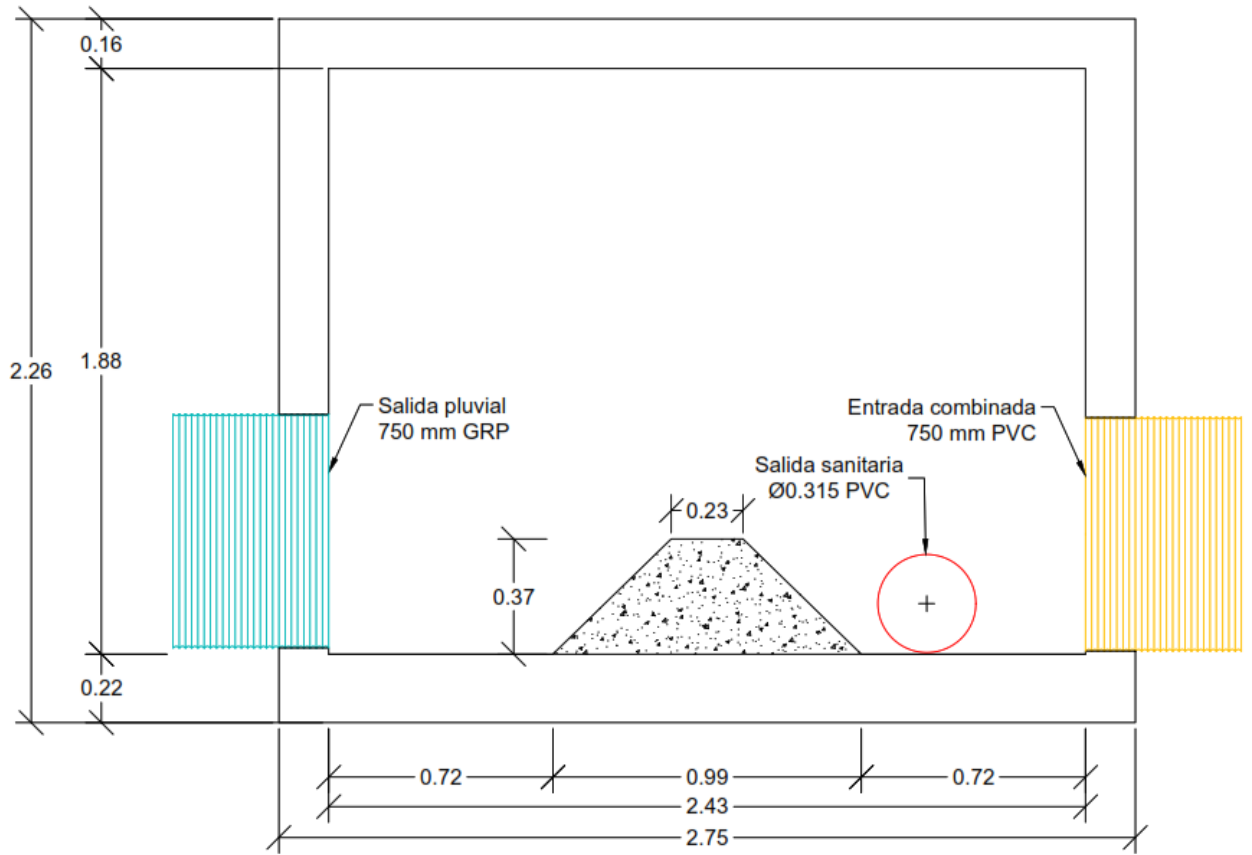
La estructura de alivio del distrito de Santa Inés es de vertedero transversal, está tiene entrada de alcantarillado combinado en tubo de 750 mm - PVC, la salida sanitaria, (empalme a red de colectores de la ciudad), es de 315 mm - PVC, la tubería de salida pluvial, (descarga al río Jordán), es de 715 mm - GRP. Esta tiene actualmente una profundidad de 1.88 m, largo de 2.43 m y ancho de 1.78 m, (Ver Ilustración 8, Ilustración 9 e Ilustración 10).

Ilustración 8 Topología aliviadero



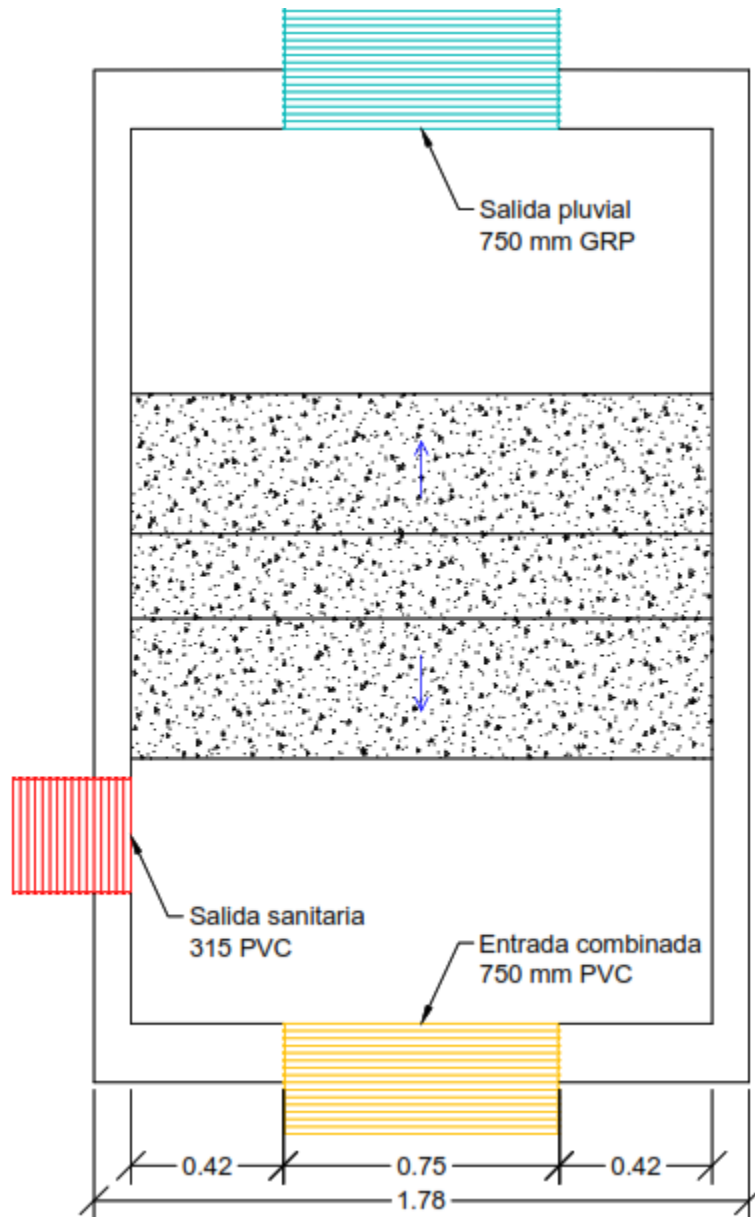
Fuente: VEOLIA

Ilustración 9 Sección aliviadero de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 10 Planta aliviadero de estudio



Fuente: Elaboración propia.

- Inspección en campo

En trabajo conjunto con la empresa Veolia Aguas de Tunja S.A.E.S.P., (actual concesionario de los servicios públicos de acueducto y alcantarillado de la ciudad), se adelantó la inspección en campo de la estructura de alivio en concreto, la cual tenía como objetivo

comprobar la información topológica existente en el sistema de información geográfica de Veolia, (Tipos de tubería, diámetros y pendiente), a continuación, se muestra la evidencia de la inspección realizada.

Ilustración 11 Ubicación estructura de alivio



Fuente: Google earth

Ilustración 12 Inspección de campo estructura de alivio



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 13 Estructura de alivio



Fuente: Elaboración propia.

- Diagnóstico de diseño

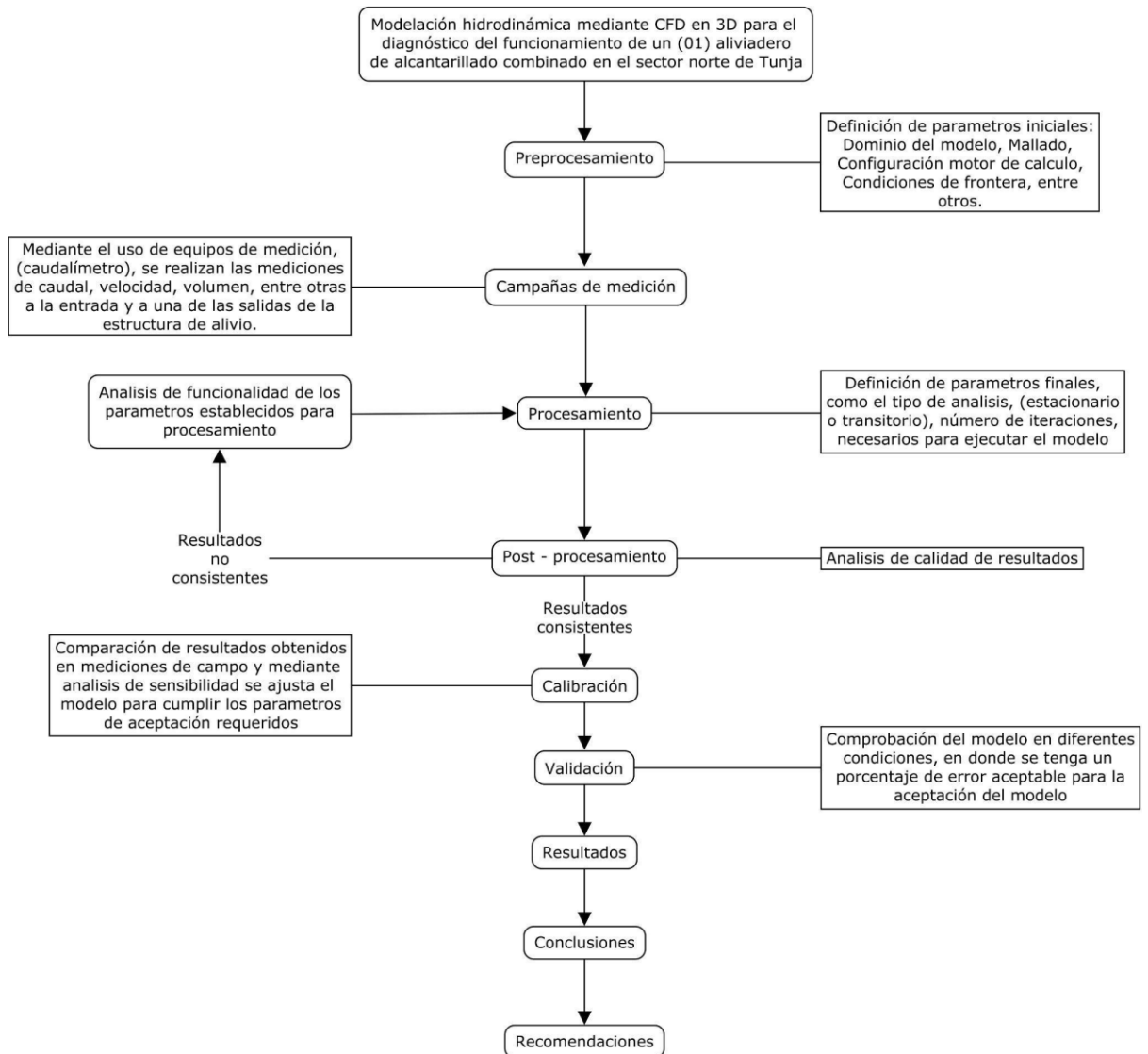
La estructura de alivio cumple con el criterio de funcionalidad en tiempo seco, pues como se observa en la Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 13, no existe rebose en tiempo seco y el borde libre existente entre la lámina de agua y la altura del vertedero es considerable, así mismo no se encontró acumulación de sedimentos considerable dentro de la estructura, lo cual indica que el criterio de autolimpieza se está cumpliendo. Las dimensiones de la estructura están parcialmente aceptadas, bajo el entendido y la suposición de funciona correctamente. Esto será verificado posteriormente con los datos medidos en campo y los resultados de la modelación tridimensional de la estructura.

5.2. Metodología

Para cumplir con la calibración y validación del modelo hidrodinámico propuesto para la estructura de alivio ubicada en el distrito de alcantarillado “Santa Inés”, (sector norte de Tunja), se plantea el siguiente proceso metodológico, el cual presenta el flujo de las etapas que dieron lugar a los resultados:

Ilustración 14 Diagrama de flujo metodología



Fuente: Elaboración propia.

- Etapa de Preprocesamiento: esta parte del proceso consiste en definir los diferentes parámetros que se tendrán en cuenta a la hora de realizar el modelo, tales como lo son la creación del dominio del modelo, tamaño del mallado, configuración del modelo (motor de cálculo), tipo de flujo a modelar, condiciones de frontera y demás.

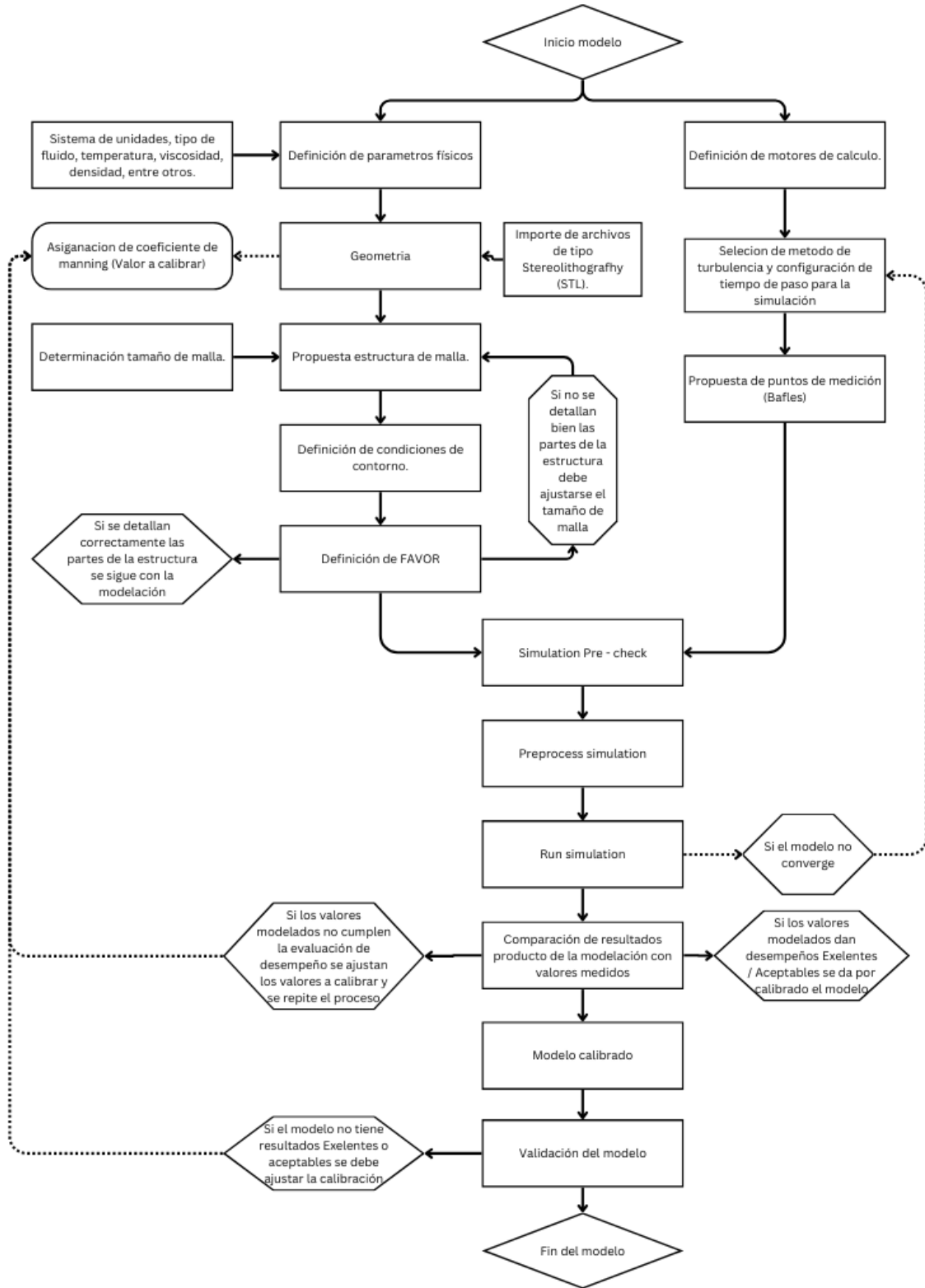
- Etapa de campañas de medición: Mediante el uso de equipo especializado, en esta parte del proceso, se realizan mediciones de caudal, velocidad, volumen y demás datos a la entrada y salida de la estructura de separación con el fin de tener la información necesaria para las calibraciones y validaciones del modelo.
- Etapa de Procesamiento: Consiste en definir los últimos puntos del modelo antes de su corrida, como por el ejemplo el tipo de análisis escogido (estacionario o transitorio), el número de iteraciones, tiempo de la duración de la simulación, evaluación de la consistencia de las soluciones y ya por último la puesta en marcha.
- Etapa de Post-Procesamiento: En este paso se analiza la calidad de los resultados que se están obteniendo y se resuelve, si continuar con la calibración y validación o por el contrario realizar las correcciones necesarias en las etapas anteriores.
- Etapa de Calibración y Validación: Se realiza la comparación de los resultados que se están obteniendo con las mediciones tomadas en campo y mediante análisis de sensibilidad se ajusta el modelo hasta cumplir con los criterios de aceptación.
- Resultados, conclusiones y recomendaciones: En esta última etapa se analiza el comportamiento de la estructura bajo diferentes condiciones, con el fin de dar un análisis y conclusiones de la misma, además de poder dar recomendaciones para futuras investigaciones(Antonio & Monsalve, 2022; Toapaxi-Alvarez et al., 2022).

Ahora bien, en la Ilustración 15 se representa el proceso de modelación en el programa Flow 3D, mediante un diagrama de flujo y los pasos para la verificación de cada uno de los mismo y la acción a seguir una vez cumplida cada una de las partes.

Los flujos sobre aliviaderos han sido ampliamente investigados mediante simulación numérica, que ha sido una de las herramientas más útiles para estudiar la interacción fluido estructura en los últimos años (Imanian, H & Mohammadian, A, 2019). Los modelos de simulación tanto hidrológicos como hidráulicos para las aguas de lluvia, son una forma resumida del sistema real (Guanipa, R. et al, 2020). De igual forma sucede en el estudio de modelos para aguas combinadas.

La modelación de estructuras hidráulicas con CFD es una actividad que permite evaluar el comportamiento del flujo con fines de diseño y análisis. Los códigos de CFD contienen tres elementos o etapas principales: Pre procesamiento, solución y post-procesamiento. (Zamora, M. et al, 2024)

Ilustración 15 Modelación en flow 3D



Fuente: Elaboración propia

6 Desarrollo del trabajo

6.1. Preprocesamiento

El modelamiento general en el software Flow-3D implica un preproceso, proceso y un postproceso. El preproceso implica un establecimiento y definición de datos del sistema que se quiere analizar para ser ingresados en el software y se genere un buen acople para que el post proceso genere resultado acertados.

Ahora bien, una vez definido lo anterior, sigue el proceso está definido por una geometría, un mallado para generar un número finito de subdominios en función de la geometría, la precisión que se requiera, las propiedades del fluido, las condiciones de contorno, condiciones iniciales y por último la selección de los fenómenos a modelarse. Para que así, finalmente el programa mediante las ecuaciones de Navier Stokes y demás descritas en el marco teórico, nos lleven a la etapa de postproceso en donde encontramos los resultados de la modelación y podemos hacer un análisis a partir de ellos.

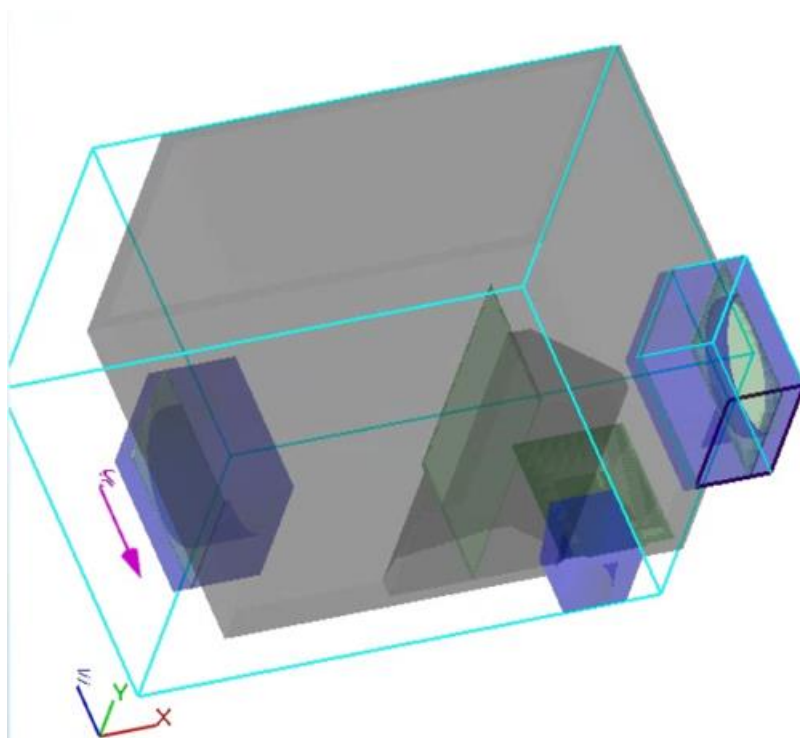
Para nuestro caso de estudio, los elementos del procesamiento se definen como se muestra a continuación:

a. Geometría:

El programa permite crear la geometría mediante elementos coordenados en el programa o mediante el importe de Stereolithography (STL). Para la estructura de alivio de análisis se usó el segundo método mencionado.

Dentro de la geometría se crean varios elementos, tubería de entrada (EC), vertedero (VE), tubería de salida sanitaria (SS), tubería de salida pluvial (SP) y la estructura (ET) restante que conforma el aliviadero.

Ilustración 16 geometría aliviadero Flow 3D



Fuente: Elaboración propia – FLOW 3D.

b. Mallado:

Flow 3D propone dos tipos de estructuras de malla, mallado de bloque único o mallado multi bloque, esto lo hace bajo el concepto que la refinación de la malla es la responsable de la exactitud o de los detalles, cuanto más fina sea la malla dará resultados más cercanos a la realidad, sin embargo, modelos muy detallados requieren de capacidades computacionales grandes, por lo tanto, se debe proponer una estructura que tenga un punto de equilibrio entre resolución y velocidad de procesamiento (Díaz Rúa, 2021) .

Para el caso de este análisis, se propuso una estructura de malla multi bloque, la cual divide la estructura en dos partes, una para la tubería de entrada (EC), y otra para los demás elementos de la estructura.

c. Coeficiente de rugosidad

Para la construcción del modelo se propone una serie inicial de coeficientes de Manning para cada uno de los elementos de la estructura. Estos valores son los que se modificaran para la calibración del modelo, como se mencionaba anteriormente el aliviadero se compone de cuatro partes principales, así:

- a. Tubería de entrada (EC)
- b. Tubería de salida sanitaria (SS)
- c. Tubería de salida pluvial (SP)
- d. Vertedero (VE)
- e. Estructura (ET)

Una vez calibrado los valores son 0.0105, 0.0095, 0.0105, 0.0132 y 0.0135 respectivamente.

d. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno corresponden a los datos del estado inicial de las variables del fluido en el instante cero de la resolución numérica de las ecuaciones. (Chandi Pozo & Escobar Montenegro, 2018)

Las condiciones de contorno se aplican a las 6 caras que tiene cada bloque de malla, (X_{\min} , X_{\max} , Y_{\min} , Y_{\max} , Z_{\min} , Z_{\max}). Para la estructura de alivio al tener dos bloques de malla se proponen las siguientes configuraciones de condiciones de contorno:

Entrada combinada (bloque 1): Para X_{\min} , Y_{\min} , Y_{\max} , Z_{\min} la condición de Symetry, para X_{\max} Volume flow rate y para Z_{\max} Pressure.

CSO (bloque 2): Para X_{\max} , Y_{\max} , Z_{\min} Symetry, X_{\min} , Y_{\min} Outflow y para Z_{\max} Pressure.

e. Selección de fenómenos a modelarse

El programa Flow-3D maneja 6 modelos de turbulencia, para este caso se escoge trabajar con el modelo k-E ya que es el modelo más sofisticado y el que muestra aproximaciones más razonables para diferentes tipos de flujo, lo llamativo de este modelo es que trabaja dos ecuaciones de transporte diferentes (una para la energía cinética turbulenta y otra para la tasa de disipación)

f. Campañas de medición

El desarrollo de esta actividad en la investigación es importante, debido a que la información recolectada es un insumo esencial para realizar los procesos de calibración y validación, para poder obtener buenos resultados al momento de modelar en Flow 3D.

Las campañas de medición se elaboraron de la siguiente manera:

- **Instalación de equipo**

Se instalaron dos equipos de caudalímetro, uno en la entrada del aliviadero y el otro equipo en la salida sanitaria, con el fin de verificar los parámetros hidráulicos reales de la estructura en estudio.

- **Diligenciamiento y revisión de los permisos de trabajo**

Para el ingreso al interior de los pozos o estructuras de alivio, el personal debe contar con la preparación y certificación necesaria en trabajo en alturas, así como de trabajo en espacio confinados, por ende, es necesario dejarlo estipulado en los diferentes formatos el cumplimiento de estos requerimientos.

- **Delimitación de la zona**

Con la ayuda de conos y cinta de señalización se despeja el área de trabajo, con el fin de garantizar la seguridad de los trabajadores como de los transeúntes, así

como de generar un espacio suficiente para el desarrollo de las demás actividades.

▪ **Medición de gases dentro de la estructura**

Se realiza la apertura del (pozo o estructura) por parte de los funcionarios de la empresa Veolia, en seguida se deben hacer 3 lecturas con la ayuda de un medidor de gases para determinar la concentración de gases nocivos para los funcionarios. (O₂, H₂S, CO, CL₂, LEL).

▪ **Revisión de EPP**

Antes de hacer el ingreso por parte de los operarios es importante revisar que cuente con todos los implementos de protección personal, tales como lo son

- Botas de seguridad
- Casco
- Mascarilla de protección
- Impermeable
- Guantes de caucho
- Impermeable
- Ropa adecuada

▪ **Instalación del trípode de seguridad para el ingreso y salida**

Por seguridad de los operarios, se requiere utilizar un trípode de rescate para espacios confinados, este equipo se divide de la siguiente manera:

- Base para múltiples dispositivos.
- Patas antideslizantes.
- Poleas.
- Parales de altura graduable.

- Pasadores de armado rápido.
 - **Instalación del equipo de medición (Caudalímetro: sensor Flo Dar - almacenamiento y fuente de alimentación Hach)**

Para la instalación del equipo de medición, lo primero que hace el operario es anclar a la pared del pozo y/o estructura, la base del equipo, posteriormente se coloca el sensor sobre la base de tal manera que quede nivelado, este se ubica de tal forma que los sensores estén dirigidos hacia la entrada del pozo; por último se coloca la fuente de almacenamiento en la parte más alta posible del pozo, debido a que debe estar lo menos posible en contacto con el agua, la base se puede asegurar con cadenas; con los equipos ubicados y asegurados se dispone a conectar los cables y proceder con la calibración.

- **Calibración del equipo para medición**

Para la calibración del equipo se requiere del software FsData, que es el programa utilizado por el caudalímetro para la calibración, manejo y descarga de la información; una vez conectada la fuente de poder al dispositivo con el programa, nos va requerir datos de entrada, como la altura de los sensores, tanto al fondo como a la lámina de agua, diámetro y forma del tubo de entrada, si hay o no sedimentos y demás datos, esto con el fin de hacer correcciones de los datos que arrojan los sensores, una vez se realiza el ajuste de estos datos el dispositivo quedará registrando información válida en los intervalos de tiempo definidos.

- **Salida de estructura y cerrado**

Se procede a recoger el equipo ingresado al pozo, se da salida al operario y se finaliza la instalación con el cerrado del pozo.

- **Desinstalación de equipo**

Posteriormente de la instalación se da un tiempo prudente donde el equipo realizará las mediciones de caudal producto de la precipitación, cuando se crea que ha sido suficiente se procede con la desinstalación del equipo, para lo cual se realizan los mismos procedimientos de la instalación hasta el numeral 5; posteriormente se procede con los siguientes pasos:

- **Descarga de los datos**

Haciendo uso del mismo software de calibración FsData, se procede a hacer un chequeo rápido de los datos registrados y descargarlos en formato CSV, esto para posteriormente realizar el correspondiente manejo y análisis de esta información.

- **Desinstalación**

Se procede a desconectar el equipo de la fuente de poder, y se comienzan a extraer los equipos del pozo, se inicia con la fuente, el cableado, posteriormente el sensor y por último la base, esta se debe desatornillar del pozo.

- **Salida de estructura y cerrado**

Se procede a recoger el equipo ingresado al pozo, se da salida al operario y se finaliza la desinstalación con el cerrado del pozo.

6.8 Procesamiento

Una vez terminadas las campañas de medición se obtienen mediciones de caudal en la entrada combinada del sistema y en la salida sanitaria, se realiza la medición de los dos puntos para la posterior calibración.

Estas mediciones se dan resultados cada 5 minutos, ya que una de las limitaciones que presentan los dispositivos de medición usados es la duración de la carga de baterías. Al ser un proceso de medición continuo y por un por tiempos prolongados, teniendo esto en cuenta en el anexo Tabla 4, se presentan los resultados obtenidos.

Con los datos obtenidos se propone la modelación de cinco caudales medidos, con el caudal dos se hizo el proceso de calibración y con las cuatro mediciones se realizó la validación de los parámetros calibrados anteriormente.

Tabla 3 Datos tubería entrada combinada

# Medición	<u>ENTRADA</u>				
	Fecha y hora	Nivel (cm)	Nivel (m)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /h)
1	12/07/2023 03:05 AM	14.10	0.14	0.34	53.65
2	07/15/2023 03:10 PM	14.00	0.14	0.33	50.84
3	07/16/2023 04:25 AM	14.10	0.14	0.32	50.33
4	07/18/2023 05:50 AM	14.10	0.14	0.34	52.96
5	07/19/2023 09:40 AM	14.10	0.14	0.32	50.27

Fuente: Elaboración autor.

Tabla 4 Datos tubería de salida sanitaria

# Medición	SALIDA				
	Fecha y hora	Nivel (cm)	Nivel (m)	Velocidad (m/s)	Caudal (m3/h)
1	12/07/2023 03:05 AM	7.40	0.07	0.20	16.21
2	07/15/2023 03:10 PM	7.30	0.07	0.21	15.88
3	07/16/2023 04:25 AM	7.40	0.07	0.21	16.44
4	07/18/2023 05:50 AM	7.70	0.08	0.22	18.52
5	07/19/2023 09:40 AM	7.30	0.07	0.22	17.17

Fuente: Elaboración autor.

6.9 Post procesamiento

Con la medición de caudal número 2 se propone el modelo construido con los lineamientos mencionados en capítulos anteriores, en este paso se espera realizar el análisis de los primeros resultados obtenidos, estos resultados se propusieron con las condiciones iniciales de Manning para cada uno de los elementos de la estructura. En la Tabla 5 se pueden ver los valores ingresados al modelo.

Tabla 5 Valores de manning iniciales

Manning			
Estructura	Vertedero	T	T
		Entrada	Sanitaria
0.0135	0.013	0.01	0.009

Fuente: Elaboración propia.

Con la propuesta de estos valores se midieron tres puntos de verificación para corroborar la estabilización de los resultados simulados, en los segundos 35, 40 y 45 se tomaron resultados para revisar los valores que daban y si eran cercanos a lo medido, para verificar la pertinencia de los resultados y proponer un valor de calibración se propuso la siguiente tabla que basa en la expresión $(1 - V_{medida}/V_{simulada} \geq -0.1$ y $1 - V_{medida}/V_{simulada} \leq 0.1)$, "Cumple", "Null", esta expresión propone un intervalo de diferencia entre medidas de no mas de 10%, con esto como precedente en la Tabla 6 y Tabla 7 se muestran los resultados

Tabla 6 Resultados previos tubería de entrada combinada

Velocidad E Combinada [m/s]				Vel E Combinada [m/s]	1- (V medida / V simulada) [%]	Cumple
35 seg	40 seg	45 seg	Promedio			
0.338	0.334	0.346	0.339	0.330	2.750	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7 Resultados previos tubería de salida sanitaria

Velocidad T Sanitaria [m/s]				Vel T Sanitaria [m/s]	1- (V medida / V simulada) [%]	Cumple
35 seg	40 seg	45 seg	Promedio			
0.197	0.189	0.193	0.193	0.210	-8.846	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en ambas mediciones se cumple con la verificación de resultados, por lo tanto, se procede a la calibración de los valores para tener valores de simulación cercanos a lo medido.

Como aclaración importante las modelaciones se hicieron con un valor de caudal fijo, ya que como se mencionó en el ítem 6.3 de este documento los valores medidos están cada 5 minutos en su intervalo más pequeño y los tiempos de procesamiento de Flow son elevados ante la propuesta de malla de 2 cm x 2 cm, en ese sentido, las modelaciones se realizaron de 60 segundos para los caudales medidos y para los escenarios de periodo de retorno 10 años de 15 segundos, en cada uno de los casos la simulación encuentra el punto de estabilización y responde con resultados estables para el resto del tiempo. Para las simulaciones de los caudales medidos este punto de estabilización del modelo esta a los treinta y cinco segundos aproximadamente y para los escenarios de TR10 en el segundo 9.

El concepto de punto de estabilización lo que busca explicar es el tiempo en el que el llenado de la estructura se completa, que en las modelaciones no se considera un flujo base sino se entra con el volumen total de caudal medido o simulado, para la evaluación de la estructura de alivio.

6.10 Calibración y validación

Calibración

El proceso de calibración del modelo propuesto se realizó modificando el valor de Manning de cada uno de los elementos que componen el aliviadero, esto para tratar de reproducir de la forma más aproximada el tránsito de caudal a lo largo de la estructura de alivio.

Para verificar que el modelo este siendo consecuente los valores medidos, se realiza un análisis de eficiencia de MAE, RMSE, BIAS, iniciando en el punto de estabilización hasta el final del tiempo de modelación, en la Tabla 8 se presenta el proceso de variaciones al coeficiente de

rugosidad de los elementos de la estructura, así mismo, en la Tabla 9 se presentan los resultados del análisis de eficiencia.

La comparación de estos índices se realiza con la medición en el modelo llamada posición real caudalímetro, ya que por condiciones de la estructura el sensor de medición de este no pudo ser ubicado en la salida sanitaria, sino a 0.05 metros de esta.

Tabla 8 Valores de Manning calibrados

No	Manning			
	Estructura	Vertedero	T Entrada	T Sanitaria
1	0.0135	0.013	0.01	0.009
2	0.0135	0.13	0.0095	0.0095
3	0.0132	0.013	0.011	0.009
4	0.0135	0.0132	0.0105	0.0095

Fuente: Elaboración propia.

En las tres métricas implementadas se proponen una serie de intervalos teniendo en cuenta las características de cada una de estas, teóricamente no están propuestos unos intervalos, sin embargo, para el objeto de estudio nos apoyamos por lo propuesto por Moriasi y otro en el 2007 en su artículo “Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations” (D. N. Moriasi et al., 2007), sin embargo para la métrica de BIAS se proponen intervalos más pequeños, esto para evaluar de mejor manera los resultados del modelo.

Aunado a lo anterior, en la observación segundo a segundo de los resultados se encuentra que una vez estabilizado el flujo se crea una corriente dentro de la estructura, (delimitada por líneas blancas, Ilustración 17 Corriente de flujo.), esto soporta el comportamiento

de sedimentación en la estructura, ya que en las regiones en donde las velocidades tienden a cero la suspensión de sedimentos se ve incrementada por efectos gravitacionales, estas zonas deben ser controladas o incluidas dentro del plan de mantenimiento de redes de alcantarillado, ya que la exposición prolongada a la sedimentación genera pérdida de volumen en la sección, lo que consecuentemente se traduce en aumento de caudal aliviado.

La verificación de estas métricas se propone en términos de velocidad, variable que es objeto de calibración en este estudio, teniendo en cuenta la anterior formulación y propuesta de intervalos de cada una de estas se presenta de la siguiente manera:

$$\mathbf{BIAS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_m - V_i)$$

V_m : Velocidad medida y V_i : Velocidad simulada

Los intervalos propuestos para la evaluación del BIAS en términos de velocidad son los siguientes:

$-0.01 < \mathbf{BIAS} < 0.01 \rightarrow$ **Excelente**

$0.01 \leq \mathbf{BIAS} < 0.1$ o $-0.1 \leq \mathbf{BIAS} < -0.01$ $-0.1 \leq \mathbf{BIAS} < -0.01$ $-0.1 \leq \mathbf{BIAS} < -0.01$

\rightarrow **Aceptable**

$\mathbf{BIAS} \geq 0.1$ o $\mathbf{BIAS} \leq -0.1$ $\mathbf{BIAS} \leq -0.1$ $\mathbf{BIAS} \leq -0.1$ \rightarrow **Deficiente**

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_m - V_i)^2}$$

V_m : Velocidad medida y V_i : Velocidad simulada

Los intervalos propuestos para la evaluación del RMSE en términos de velocidad son los siguientes:

$RMSE \leq 0.1 \rightarrow$ **Excelente**

$0.1 < RMSE \leq 0.3 \rightarrow$ **Aceptable**

$0.3 < RMSE \leq 0.5 \rightarrow$ **Moderado**

$RMSE > 0.5 \rightarrow$ **Deficiente**

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_m - V_i)$$

V_m : Velocidad medida y V_i : Velocidad simulada

Los intervalos propuestos para la evaluación del MAE en términos de velocidad son los siguientes:

$MAE \leq 0.1 \rightarrow$ **Excelente**

$0.1 < MAE \leq 0.3 \rightarrow$ **Aceptable**

$0.3 < MAE \leq 0.5 \rightarrow$ **Moderado**

$MAE > 0.5 \rightarrow$ **Deficiente**

Con estos intervalos propuestos y como fue mencionado anteriormente en la Tabla 9, los valores de cada una de estas métricas dan como resultado que el proceso de calibración se realizó de forma acertada, por lo tanto, los resultados producto de la simulación obedecen a valores reales.

Tabla 9 Valores métricas de evaluación CSO V2

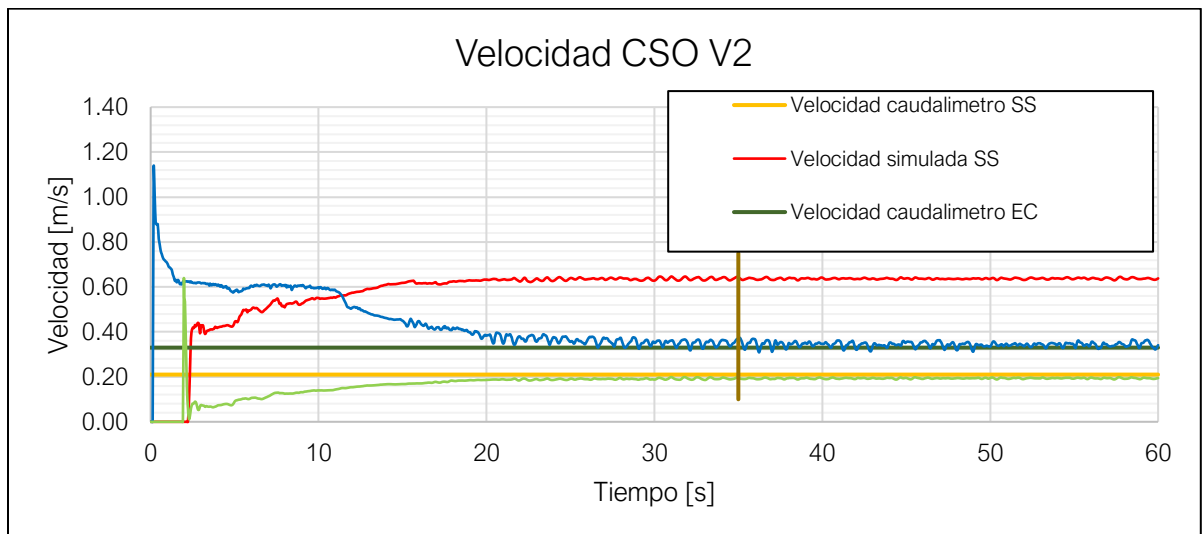
CSO V2	Salida sanitaria	Nivel confiabilidad
MAE	0.0168	Excelente

CSO V2	Salida sanitaria	Nivel confiabilidad
RMSE	0.1295	Aceptable
BIAS	0.016770	Aceptable
Vm	0.2100	
n	523	

Fuente: Elaboración propia.

En el Gráfico 1 se observa el comportamiento de la velocidad medida respecto del simulado tanto en la entrada combinada como en la salida sanitaria, como se observa en el grafico las velocidades del modelo tienen un buen desempeño respecto a las simuladas, esto también es confirmado por los valores de MAE, RMSE y BIAS, los cuales están dentro del rango excelente y aceptable, lo que indica que se propuso un modelo con las condiciones acertadas.

Gráfico 1 Velocidades CSO V2



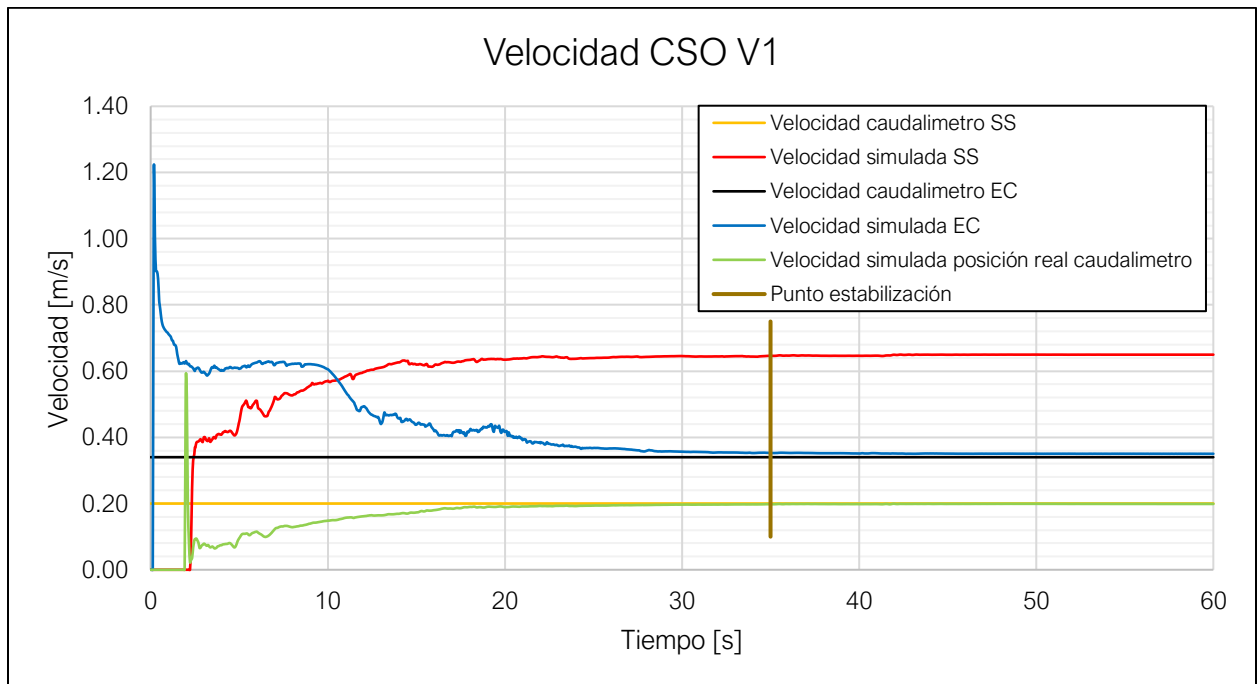
Fuente: Elaboración propia.

Validación

En el proceso de validación se usaron los valores calibrados de Manning para cada una de los elementos de la estructura, así mismo se hicieron los cálculos de las métricas de evaluación para cada uno de los 4 escenarios de validación.

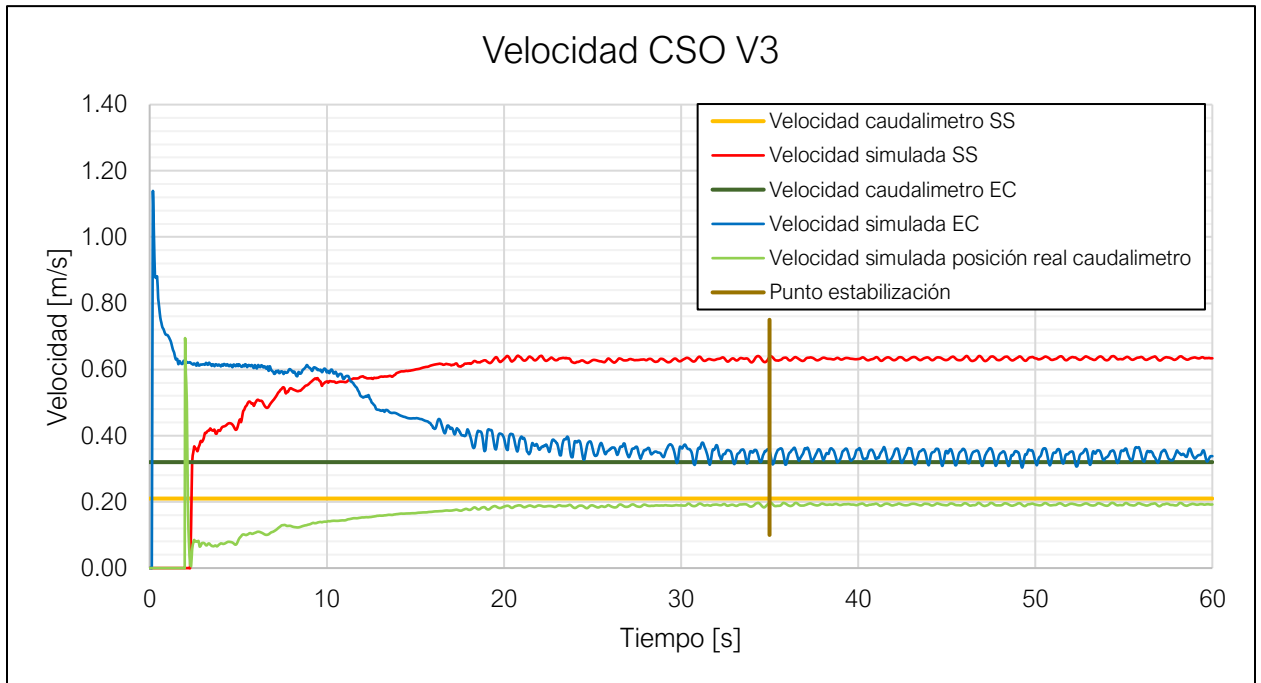
En el Gráfico 2, Gráfico 3, Gráfico 4 y Gráfico 5 se representa el comportamiento de las velocidades de la estructura con los valores calibrados, así mismo en la Tabla se presentan los valores de las métricas de eficiencia, en todos los casos estas responden bien y validan que el modelo está representando de una buena forma el comportamiento real de la estructura.

Gráfico 2 Velocidades CS0 V1



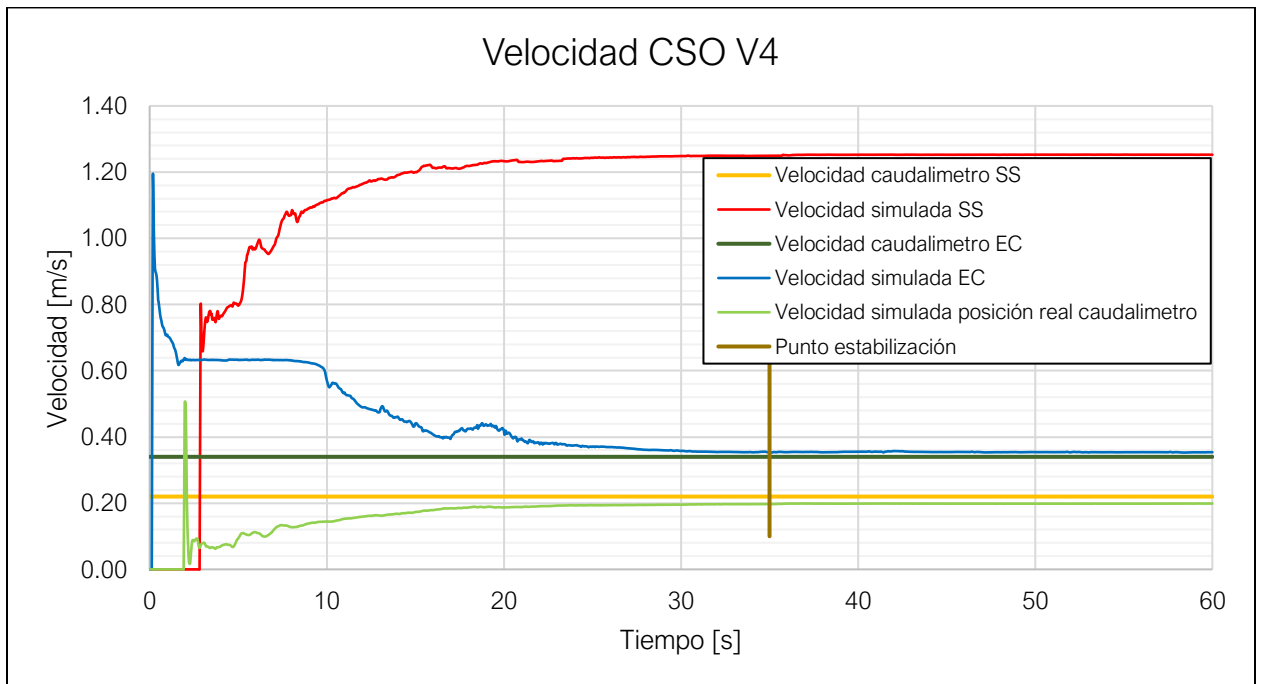
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 3 Velocidades CSO V3



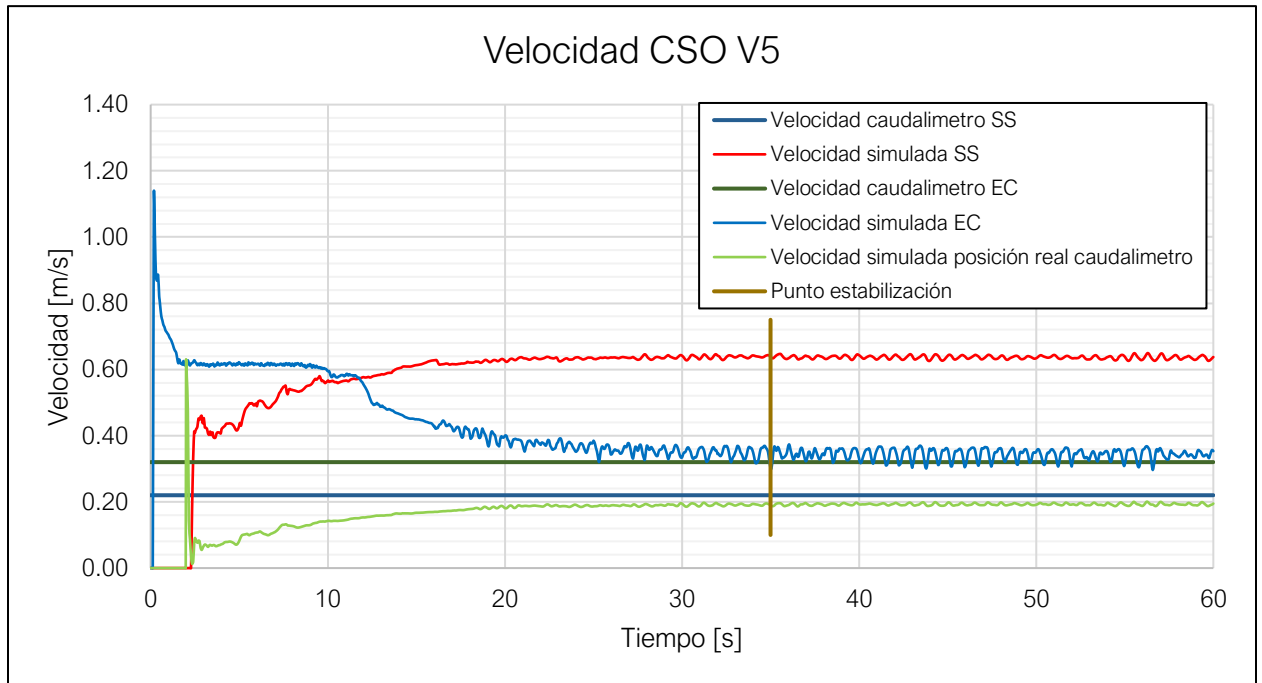
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 4 Velocidades CSO V4



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 5 Velocidades CSO V5



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10 Métricas de evaluación datos validación

Medición	MAE		RMSE		BIAS	
	Valor	Nivel confiabilidad	Valor	Nivel confiabilidad	Valor	Nivel confiabilidad
CSO V1	0.00139	Excelente	0.03728	Excelente	0.00139	Excelente
CSO V3	0.01822	Excelente	0.13498	Aceptable	0.01822	Aceptable
CSO V4	0.02160	Excelente	0.14697	Aceptable	0.02160	Aceptable
CSO V5	0.02764	Excelente	0.16626	Aceptable	0.02764	Aceptable

Fuente: Elaboración propia.

6.11 Modelación TR10

La modelación para el periodo de retorno de diseño, (10 años), se hizo para 3 escenarios posibles, el primero corresponde a la modelación con la estructura actual, y dos restantes con modificación al vertedero de control, (variación en el ancho de la cresta).

La simulación para TR10 se realizó a partir de la configuración de parámetros del modelos calibrado y validado, sin embargo, el periodo de datos no proyecta el periodo de retorno de diseño, por lo tanto y bajo el entendido que la calibración de esta estructura es el proceso siguiente a la calibración de la cuenca de alcantarillado, el hidrograma de entrada para el escenario TR10 se toma del modelo calibrado de la cuenca. [(Amaya Tequia, 2019)

Como se observa en la Tabla 1 y en el Gráfico 6, el hidrograma generado por el modelo para la entrada a la estructura de alivio tiene intervalos de tiempo de 5 minutos, por lo tanto, se decide evaluar la estructura con el caudal pico que proyecta el hidrograma, (min 65), esto debido a los largos tiempos de cómputo que tiene cada modelación.

Tabla 1 Hidrograma entrada combinada TR10

Time (min)	PATLAL4812 - Base - Flow (m ³ /s)
5	0
10	0
15	0
20	0
25	0.01

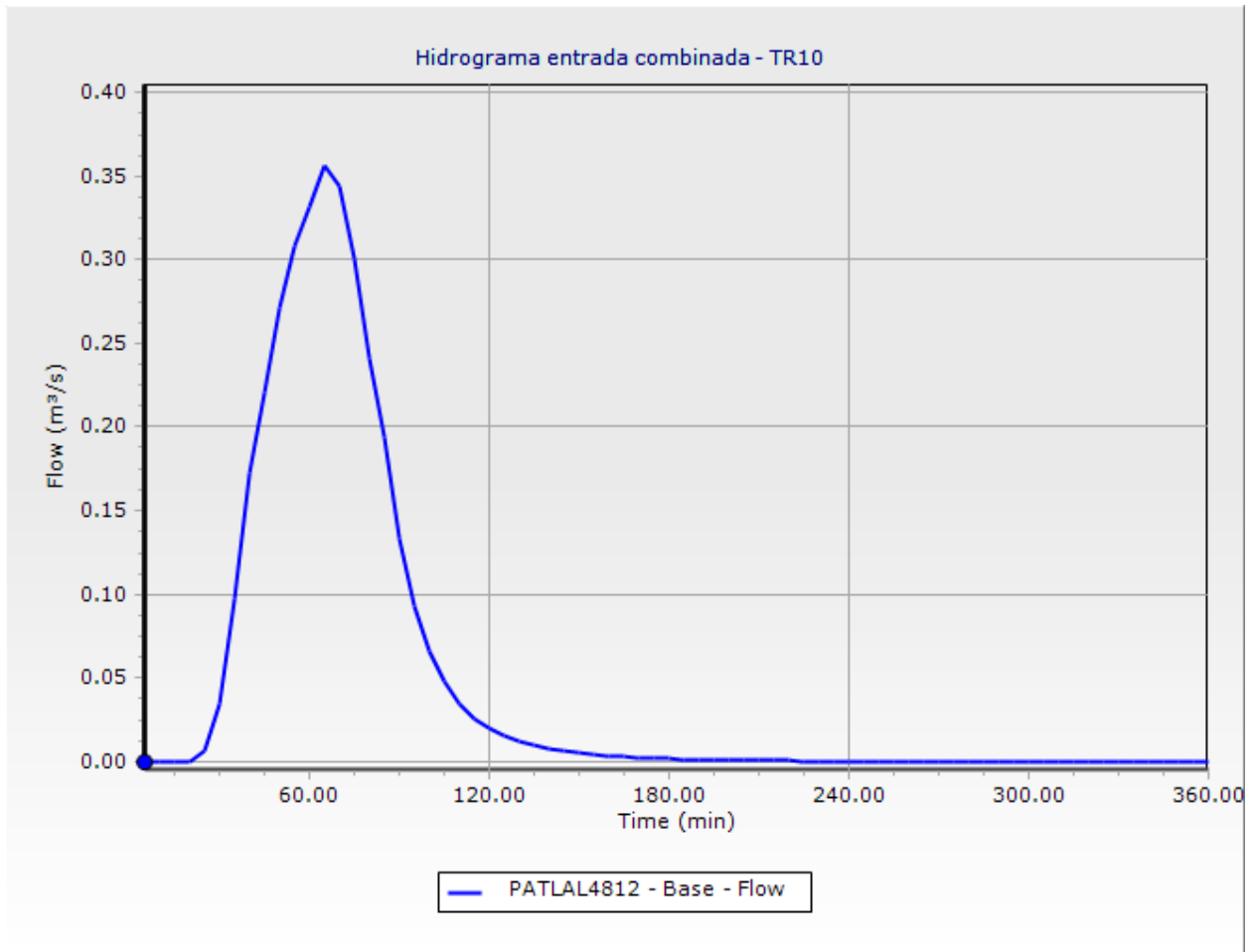
Time (min)	PATLAL4812 - Base - Flow (m ³ /s)
30	0.03
35	0.1
40	0.17
45	0.22
50	0.27
55	0.31
60	0.33

Time (min)	PATLAL4812 - Base - Flow (m ³ /s)
65	0.36
70	0.34
75	0.3
80	0.24
85	0.19
90	0.13
95	0.09
100	0.07
105	0.05
110	0.04
115	0.03
120	0.02
125	0.02
130	0.01
135	0.01
140	0.01
145	0.01
150	0.01
155	0
160	0
165	0
170	0
175	0

Time (min)	PATLAL4812 - Base - Flow (m ³ /s)
180	0
185	0
190	0
195	0
200	0
205	0
210	0
215	0
220	0
225	0
230	0
235	0
240	0
245	0
250	0
255	0
260	0
265	0
270	0

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6 Hidrograma entrada combinada - TR10



Fuente: Amaya, 2019 – Sewer gems.

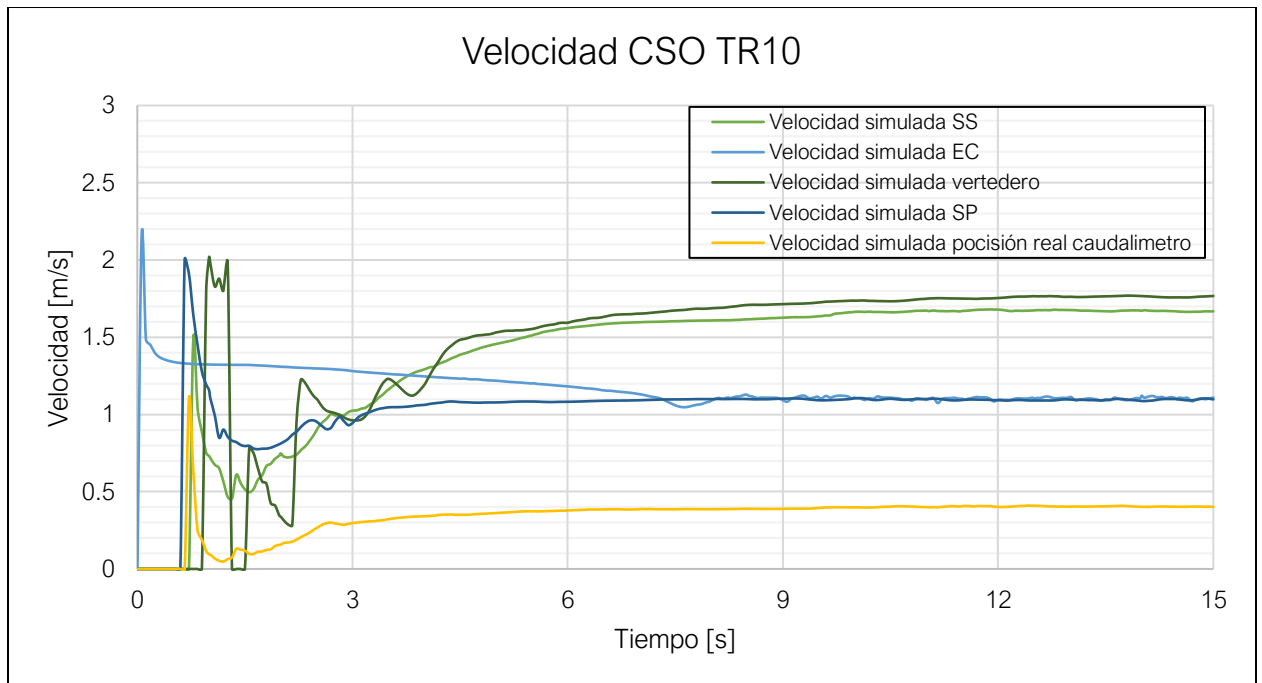
Estructura actual

Con los datos obtenidos de Amaya, 2019, y con los valores de Manning calibrados y validados anteriormente se construye un modelo en Flow 3D, para verificar cual es el funcionamiento de la estructura para un periodo de retorno de 10 años, (periodo de diseño según la resolución 0330 de 2017). Esta simulación se hizo para un intervalo de tiempo de 15 segundos, ya que el modelo tiene el punto de estabilización cercano a los 9 segundos, realizar esto nos

permitió ver en menor tiempo los resultados de la simulación, ya que se disminuye considerablemente el tiempo de cómputo.

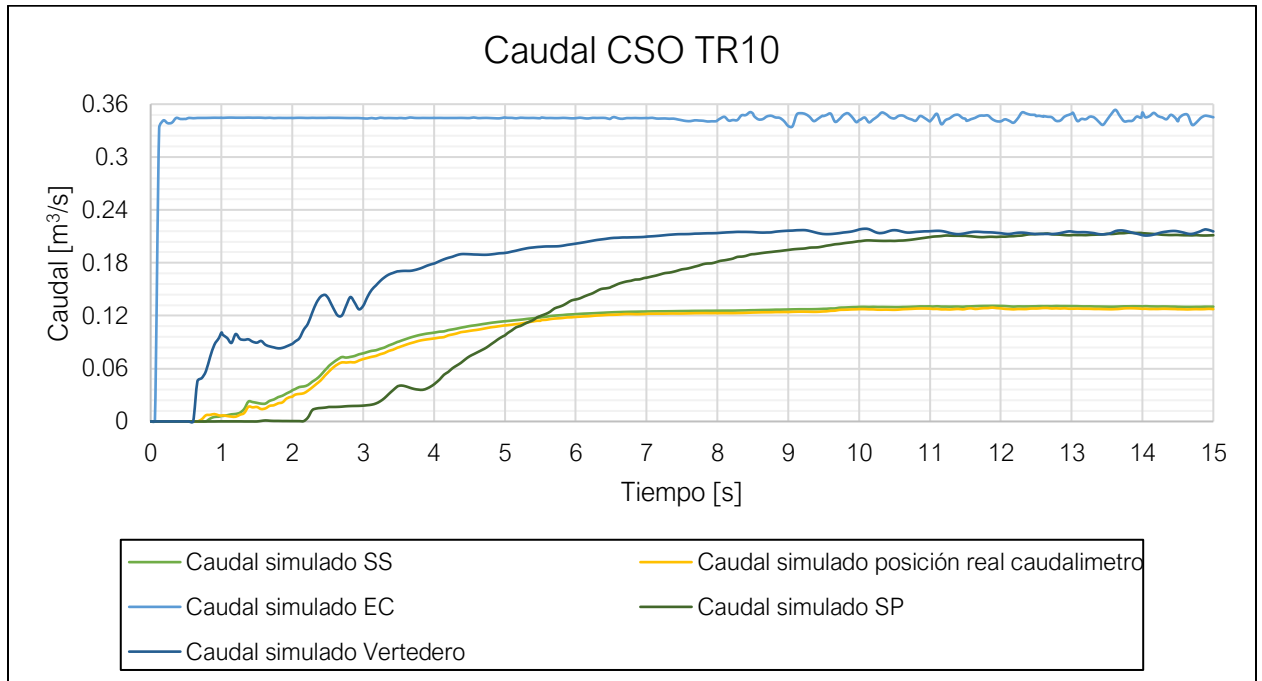
En el Gráfico 7 se observa el comportamiento de las velocidades en cada uno de los puntos de medición, así mismo, en el Gráfico 8 se representan el comportamiento del caudal.

Gráfico 7 Velocidades CS0 TR10



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 8 Caudales CSO TR10

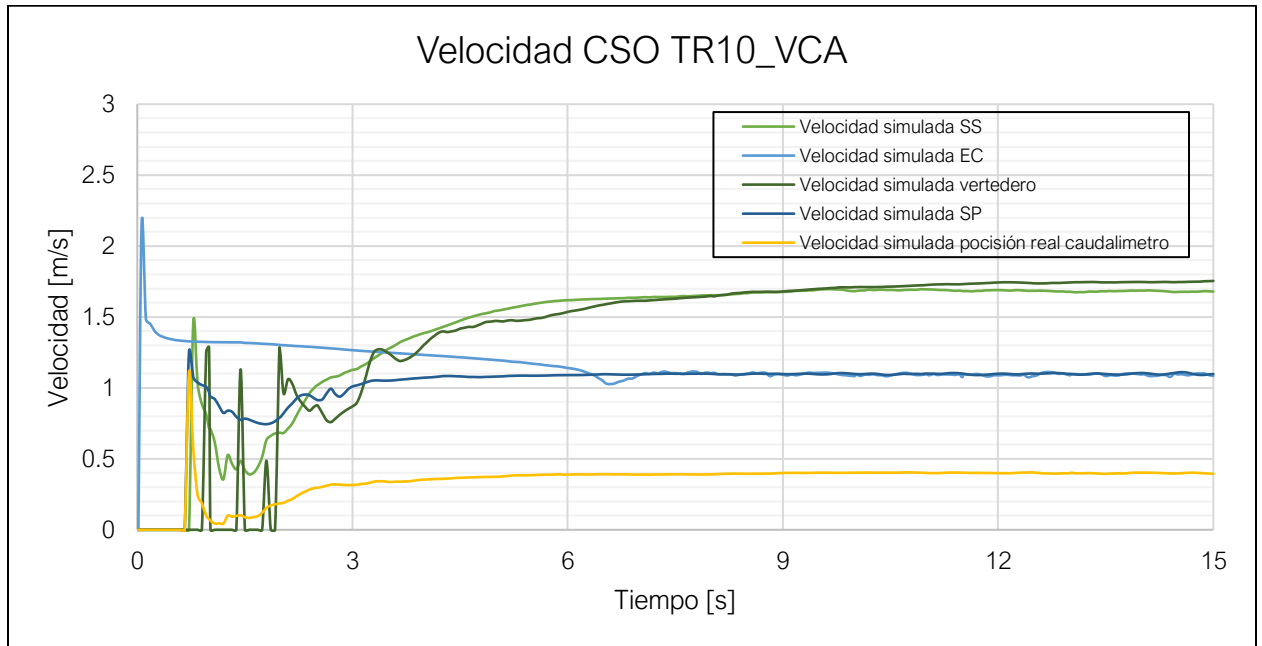


Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para la modelación de TR10 y con objeto de ampliar el análisis de este documento se proponen dos tipos de modificaciones a la estructura actual esto con el objeto de evaluar su comportamiento y proponer consideraciones para diseños futuros. Estas modificaciones consisten en la ampliación y reducción del ancho de la cresta del vertedero.

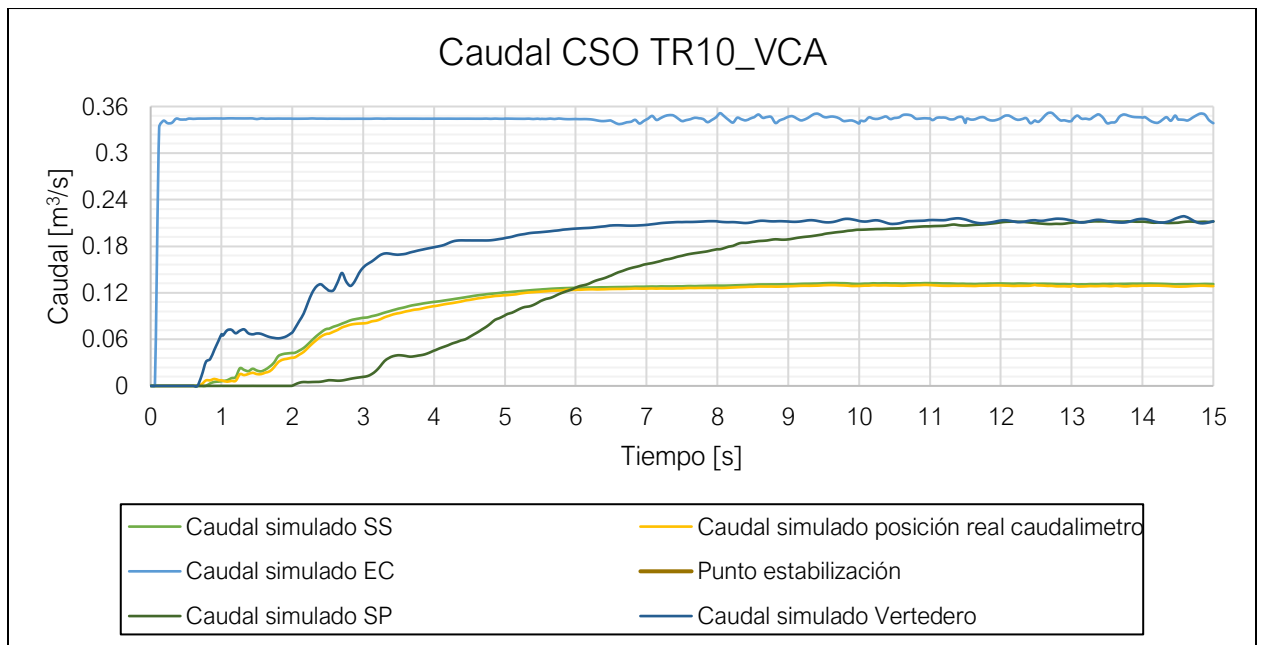
El criterio para definir si la cresta era más ancha o delgada a partir de la actualmente construida es el un aumento o reducción del ancho en un factor de 30%, así las cosas, el llamado vertedero de cresta ancha tendría un ancho total de 30 cm y el de cresta delgada un ancho de 16 cm. Para cada uno de los casos se usaron los valores de Manning calibrados en este trabajo y el valor de caudal pico del hidrograma de entrada a la estructura para un periodo de retorno de 10 años (TR10). En el Gráfico 9, Gráfico 10, Gráfico 11 y Gráfico 12, se representan los resultados de velocidad y caudal para cada uno de los escenarios.

Gráfico 9 Velocidades CSO TR10 VCA



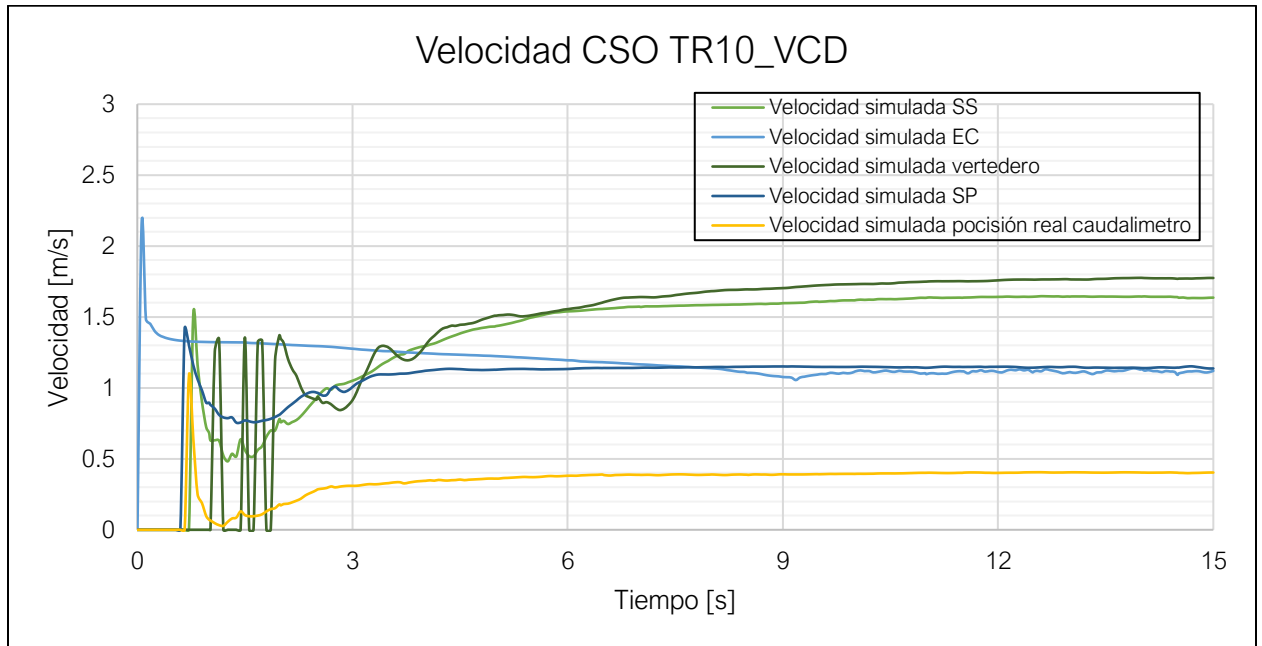
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10 Caudales CSO TR10 VCA



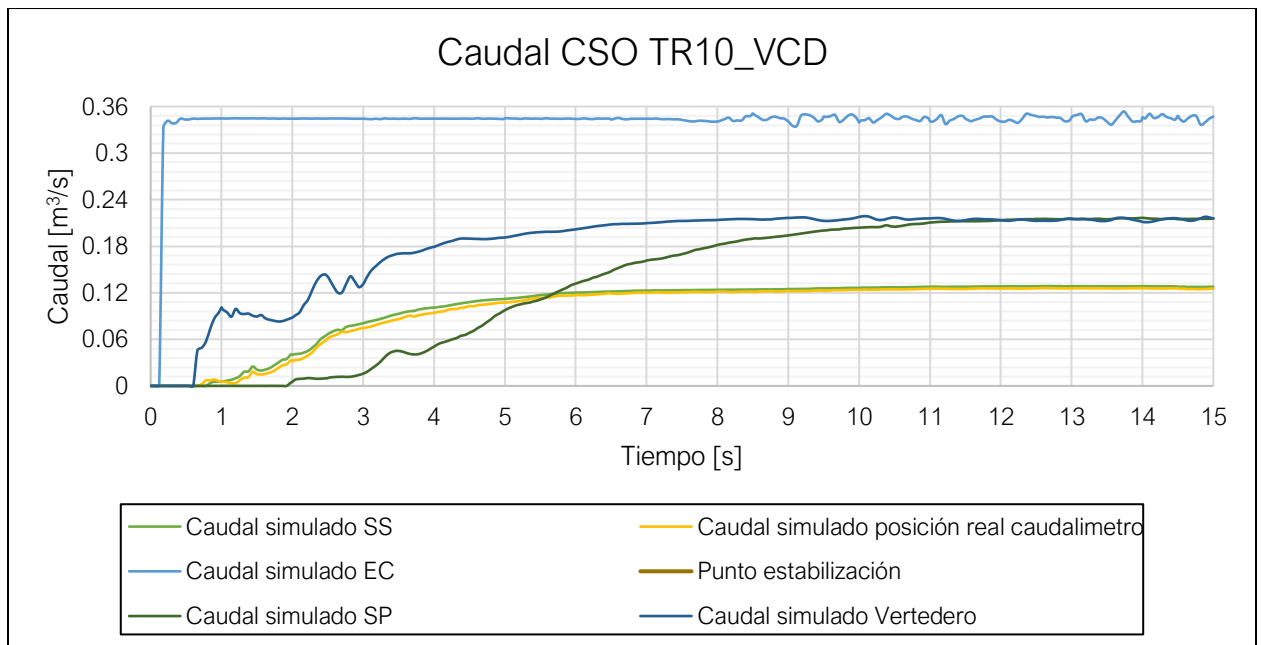
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 11 Velocidades CSO TR10 VCD



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 12 Caudales CSO TR10 VCD



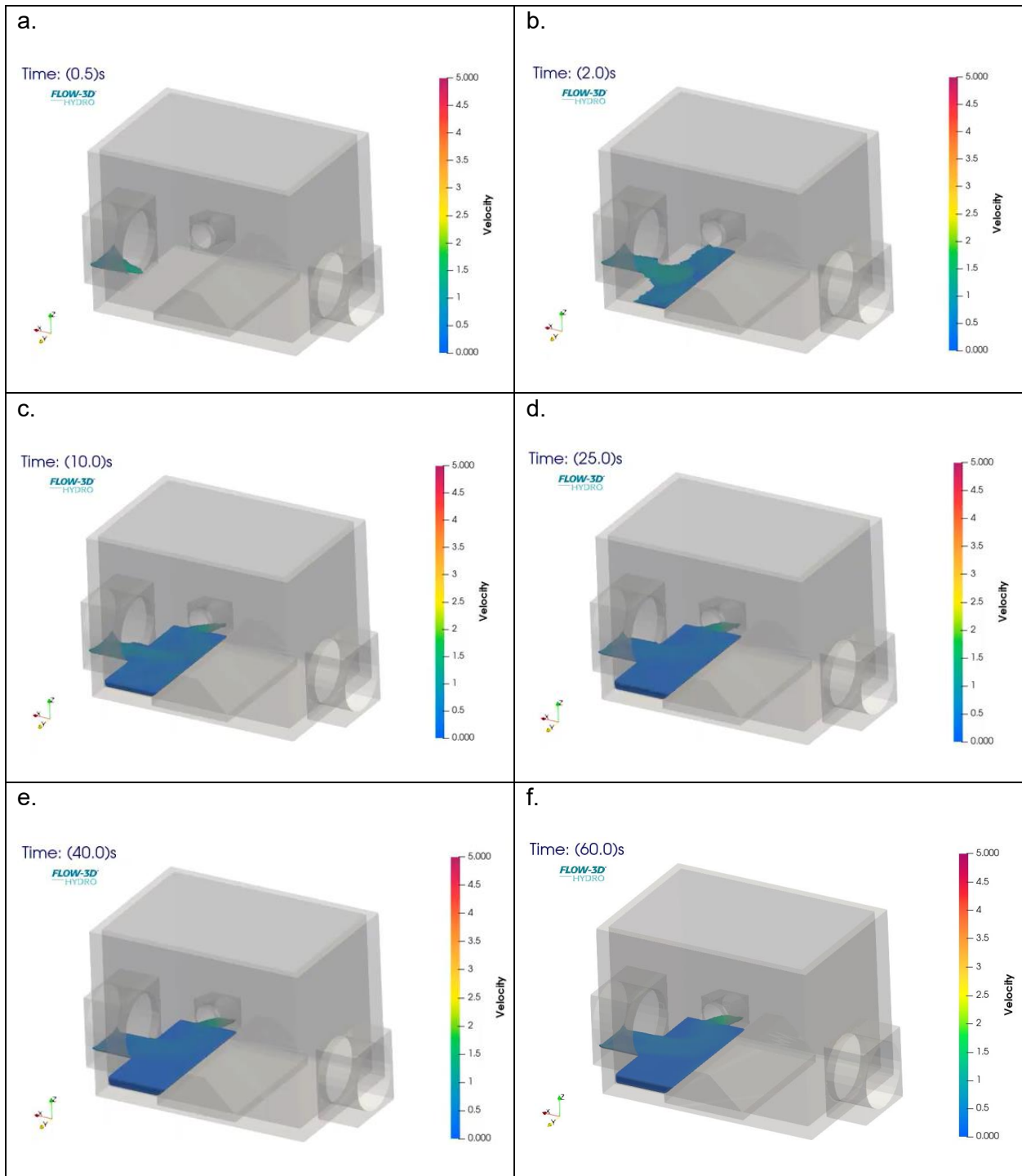
Fuente: Elaboración propia.

7 Análisis de resultados y discusión

El mallado de la estructura es un proceso dentro de la construcción del modelo crucial, ya que la correcta definición de esta propone la eficiencia del modelo en términos de cómputo, para modelos en que se usan estructuras de malla múltiples es necesario o se recomienda que la relación entre bloques de malla guarde proporcionalidad, 1 a 1, 1 a 2, 1 a 3... esto para que el cálculo se pueda hacer celda a celda, también se debe prever la linealidad entre estas, todo esto para que no se genere una condición en las que una celda no quede entregando información a dos o más celdas, lo cual genera tiempos de cómputo más largos y variaciones en los resultados, pues la partícula que en este caso es de agua perdería la ruta que debería tener, entendiendo que el funcionamiento de los análisis tridimensionales se basa en la transmisión de información celda a celda.

Con esta definición de mallado entendida, en cada modelo se debe controlar el inicio de la modelación para determinar en qué tiempo los resultados representan las condiciones reales de la estructura, en este trabajo se llamó punto de estabilización, la eficiente determinación de este parámetro nos permite establecer el momento desde el cual se establecerán las métricas de evaluación del modelo, gráficamente para el análisis de este término se usara como ejemplo el modelo CSO V4, en el Gráfico 4 y Tabla 2 se puede ver el desarrollo de la modelación a largo del tiempo, en las imágenes de la tabla 12 se detalla como es el llenado de la estructura a lo largo del tiempo, como se ve desde el inicio de la modelación empieza a salir caudal por la tubería sanitaria, sin embargo esta no representa el flujo normal de la estructura, primero debe hacerse el llenado de la estructura y estabilización del volumen que amortigua la estructura ante el cambio de sección y de giro en el alivio.

Tabla 12 Punto de estabilización



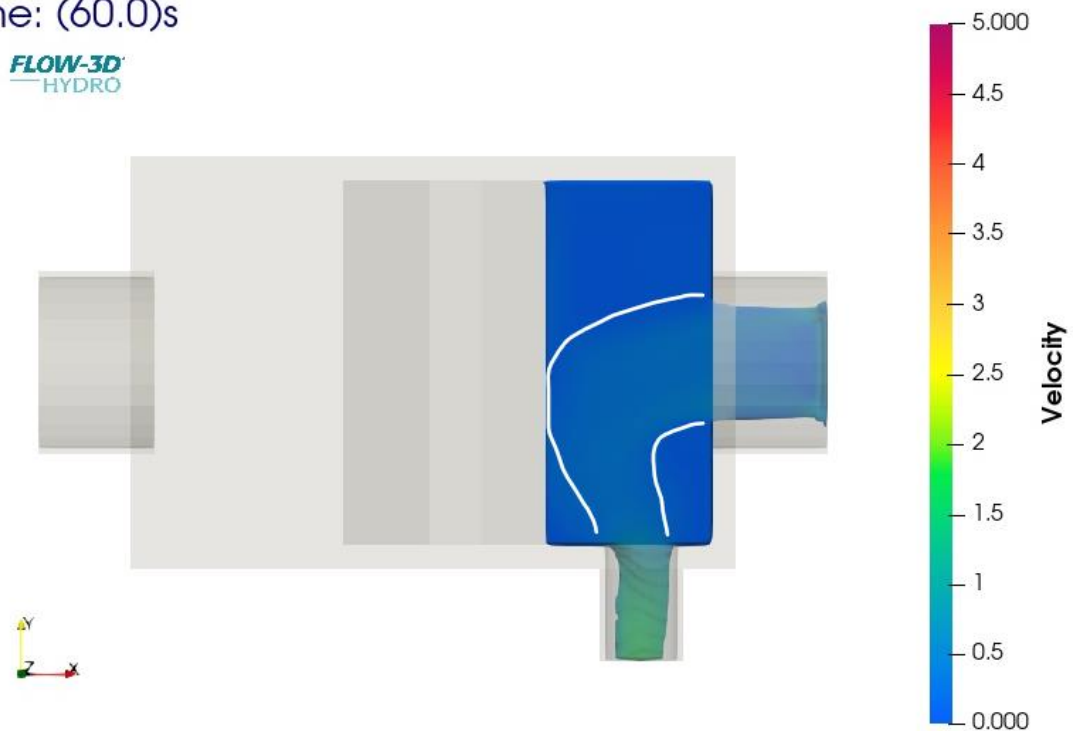
Fuente: Elaboración propia – FLOW 3D.

Aunado a lo anterior, en la observación segundo a segundo de los resultados se encuentra que una vez estabilizado el flujo se crea una corriente dentro de la estructura, (delimitada por líneas blancas, Ilustración 17 Corriente de flujo.), esto soporta el comportamiento de sedimentación en la estructura, ya que en las regiones en donde las velocidades tienden a cero la suspensión de sedimentos se ve incrementada por efectos gravitacionales, estas zonas deben ser controladas o incluidas dentro del plan de mantenimiento de redes de alcantarillado, ya que la exposición prolongada a la sedimentación genera pérdida de volumen en la sección, lo que consecuentemente se traduce en aumento de caudal aliviado.

Ilustración 17 Corriente de flujo.

Time: (60.0)s

FLOW-3D
HYDRO



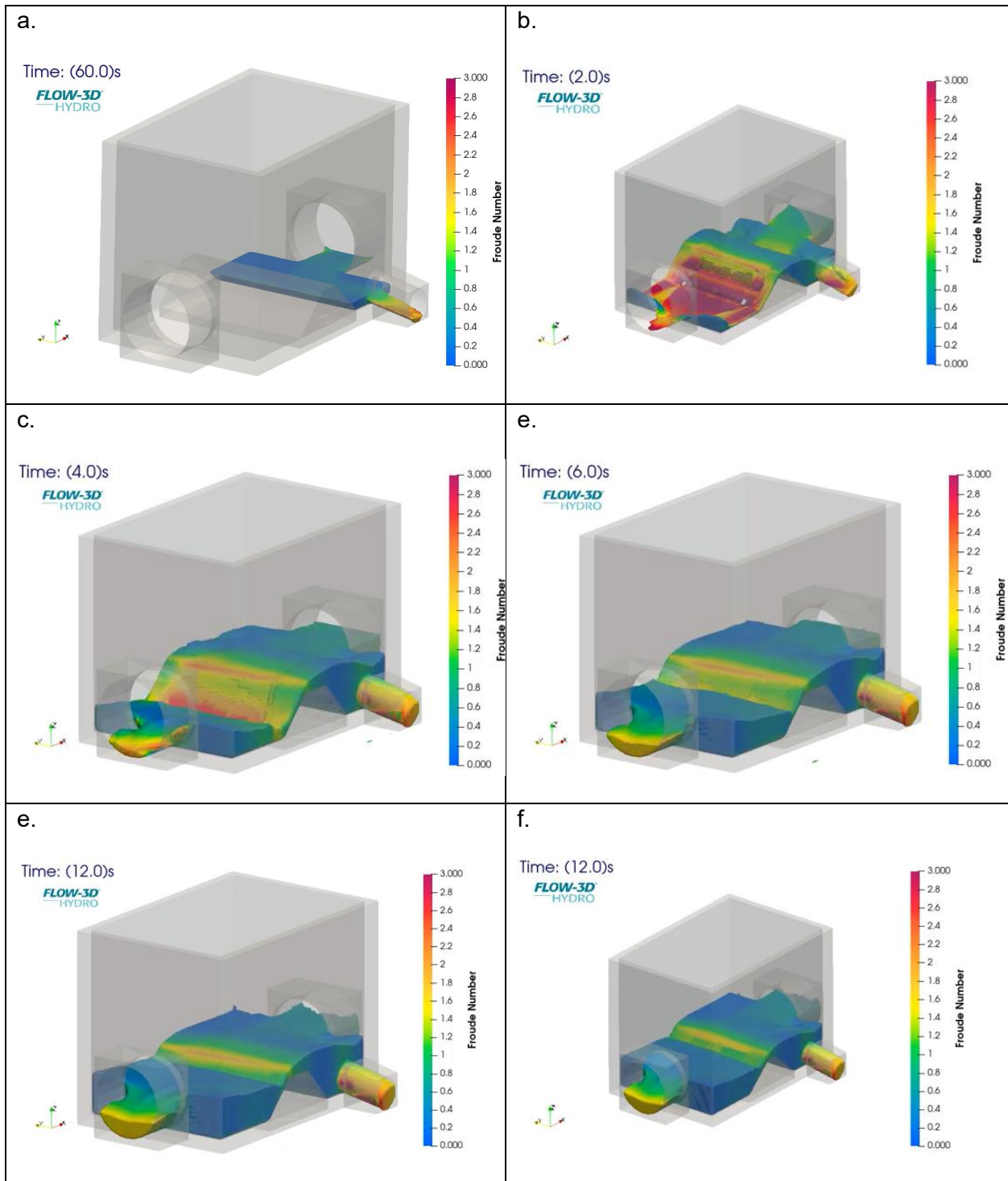
Fuente: Elaboración propia – FLOW 3D.

Para las modelaciones de calibración y validación, se encontró que las métricas de evaluación responden satisfactoriamente según los intervalos planteados para el ejercicio,

teniendo en cuenta que estos se basan en lo descrito por (D. N. Moriasi et al., 2007), para este caso los resultados muestran que en el proceso de validación para CSO V1 estas métricas respondieron aún mejor que en proceso de calibración dando en excelente las tres evaluadas, ahora bien, analizando el Gráfico 2 se aprecia que el comportamiento de la velocidad después del punto de estabilización es estable lo cual al ser contrastado con una medición puntual nos representa veracidad en lo propuesto en el modelo, de igual forma y pese a que las métricas de evaluación no presentan el mismo rendimiento que CSO V1 en CSO V4 también se repite el evento de estabilidad en el resultado, para las otras mediciones modeladas no se tiene esta tendencia, sin embargo, las oscilaciones de la variable no son grandes, lo cual también nos da un buen indicador sobre la modelación.

El tipo de flujo que se presenta a la entrada, dentro y a la salida de la estructura es un factor importante para la correcta definición de la altura del vertedero, para todos los casos de esta investigación, (calibración, validación y periodo de retorno de diseño), se tiene que el tipo de flujo de entrada es subcrítico al tener valores de número de Froude menor a uno, el desarrollo dentro de la estructura sigue la misma característica, sin embargo, en la salida sanitaria y una vez superado el vertedero el fluido experimenta una transición a flujo supercrítico, para el primer caso la transición a flujo supercrítico es constante, esto se debe a que la tubería sanitaria tiene una pendiente de salida del dieciocho por ciento lo que genera esa transición de flujo para todos los casos expuestos en la Tabla 13 se evidencia esta situación, para el segundo caso el fluido experimenta esta transición mientras se genera el llenado de la cámara que esta después del vertedero, en las imágenes b, c y d de la Tabla 13 se detalla. Sin embargo, sobre la cresta del vertedero se genera una zona de flujo supercrítico, dependiendo del ancho de la cresta esta zona tiene más o menos longitud de desarrollo, para vertederos de cresta ancha la longitud es mayor y para vertederos de cresta delgada es menor. En la Tabla 3 en las imágenes e y f respectivamente se observa lo aquí planteado.

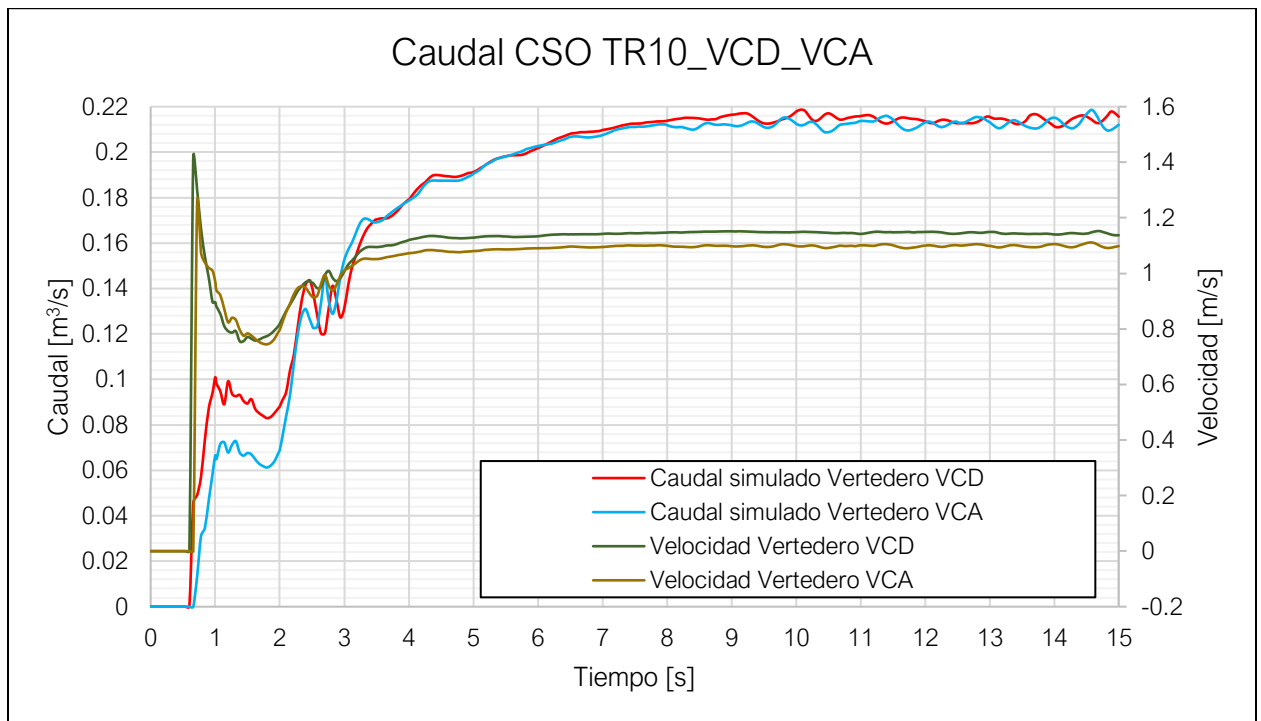
Tabla 13 Desarrollo de número de Froude en el tiempo.



Fuente: Elaboración propia – FLOW 3D.

La variación en el ancho de la cañuela tiene una relación con el volumen de caudal descargado, en el Gráfico 13 se representan el comportamiento del caudal y la velocidad en la configuración de vertedero de cresta ancha (VCA) y el vertedero de cresta delgada (VCD), como se observa al aumentar el ancho de la cresta el caudal descargado disminuye, por lo anterior, el ancho de la cresta debe ser controlado para futuros diseños ya que este puede modificar el volumen de caudal vertido por la tubería pluvial.

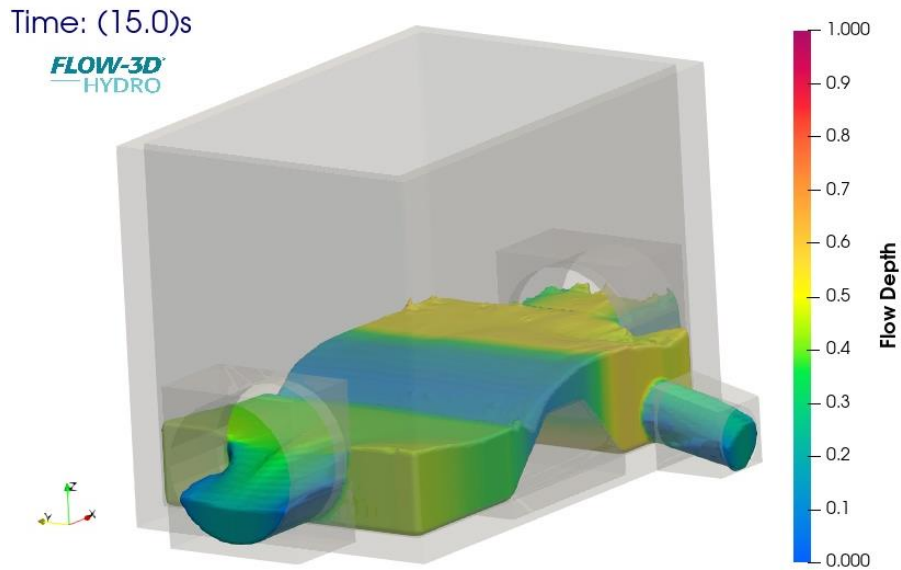
Gráfico 13 Relación de caudal y velocidad en el vertedero.



Aunado a lo anterior, la configuración de vertederos de cresta ancha propone una carga hidráulica mayor aguas arriba del vertedero, lo que produce que el caudal saliente por la tubería sanitaria sea mayor, en la Ilustración 18 se observa una profundidad mayor en la cámara de llegada de la estructura respecto a la representada en la Ilustración 19, esto coadyuba lo mencionado anteriormente de la relación directa entre el ancho de la cresta y caudal que

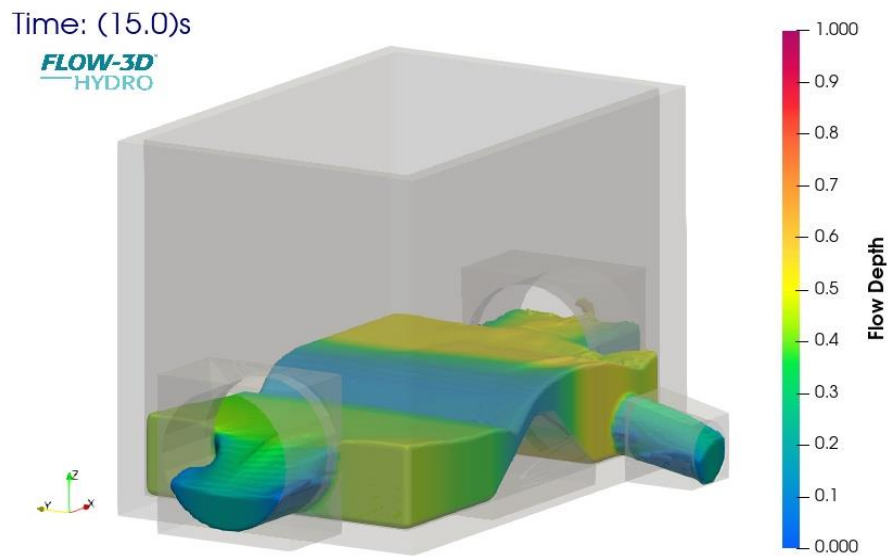
descarga el vertedero, en el Gráfico 13 se observa que la línea roja perteneciente al caudal descargado por la configuración de cresta delgada es mayor en la mayoría del tiempo, respecto a la línea azul la cual representa el caudal descargado por la configuración de cresta ancha a lo largo del tiempo.

Ilustración 18 Profundidad VCA



Fuente: Elaboración propia – FLOW 3D.

Ilustración 19 Profundidad VCD



Fuente: Elaboración propia – FLOW 3D.

Aunado a lo anterior es importante resaltar que el diseño actual de la estructura responde a las condiciones para las cuales fue diseñada, sin embargo en términos de caudal aliviado se deben prever las acciones necesarias de mantenimiento para que el volumen efectivo de la cámara de llegada no se vea afectado y se mantenga el control sobre el caudal aliviado, ahora bien, en caso de que las actividades de mantenimiento sean dispendiosas se propone modificar la estructura del vertedero a una cresta más ancha, lo cual permitirá un mayor volumen efectivo por la relación que hay entre ancho de la cresta y volumen descargado, adicionalmente, al generar mayor carga hidráulica sobre la tubería sanitaria la succión generada será mayor y el factor de autolimpieza de la estructura funcionara de forma más eficiente.

Finalmente, una de las posibles fuentes de error de este trabajo es el intervalo de tiempo de los datos medidos, dado que se modelo con un valor de caudal fijo y no con valores de caudal variables tal y como ocurre en la realidad, sin embargo, esto se hizo ya que al ser modelaciones robustas los tiempos de modelación son significativamente altos, por lo cual para estudios futuros se recomienda optar por estrategias de medición que tengan intervalos de tiempo significativamente menores.

8 Conclusiones

La calibración de estructuras de alivio en sistemas de alcantarillado combinados es determinante para reducir la contaminación de cuerpos receptores y aliviar los picos de caudal a tratar en plantas de tratamiento de aguas, esta calibración puede hacerse mediante estudios hidrodinámicos que permitan representar de forma precisa el comportamiento de la estructura ante diferentes escenarios de lluvia.

La propuesta de mallados de 0.02 metros en modelos hidrodinámicos en FLOW 3D permite simulaciones con valores cercanos a las mediciones de campo, con tiempos de procesamiento no tan extensos, lo cual da un punto de equilibrio entre el nivel de detalle y los tiempos de procesamiento. Los resultados obtenidos no tuvieron un sesgo (BIAS) mayor al 3% lo cual indica que los modelos propuestos no tienden a subestimar o sobrestimar los valores.

La configuración de vertederos de cresta ancha permite controlar de mejor forma el punto de transición de flujo, lo cual, ante situaciones en donde el control de caudal debe tener una precisión alta es un factor determinante. En este caso la estabilidad de la lámina de agua antes del vertedero era mayor, por lo tanto, el valor de la carga hidráulica para el orificio se puede asumir constante para el tiempo de caudal pico y así estimar de forma acertada la dimensión y posicionamiento del orificio de evacuación de caudales.

El mantenimiento preventivo de la estructura de alivio es una tarea que debe hacerse con regularidad, esto debido a que como se observó a lo largo del desarrollo de este documento cuando la estructura funciona en condiciones de tiempo seco en la cámara de llegada se crean zonas de remanso que son potencialmente sedimentables, lo que genera pérdida de volumen efectivo en la estructura y consecuentemente aumento en el caudal aliviado hacia el cuerpo

receptor, limitando así el principio de reducir la contaminación del cauce al aumentar la carga contaminante sobre el mismo.

La estructura de alivio evaluada da como resultado que opera correctamente para la condición para la cual fue diseñada, sin embargo, esta evaluación se realizó para caudal líquido con agua a 20 grados, para siguientes trabajos se recomienda evaluar el funcionamiento de esta estructura incluyendo caudal sólido a las simulaciones, caudal que ante una tormenta con periodo de retorno significativo puede presentarse, aunado a lo anterior, la inclusión de este tipo de caudal puede dar mejor visión de las zonas potencialmente sedimentables dentro de la estructura y así poder proponer de forma consiente los procesos y periodos para el mantenimiento de la estructura de alivio aquí evaluada.

Ahora bien, dentro de estudios futuro de sedimentación en este tipo de estructuras se debe analizar la influencia de la carga hidráulica a la que va a estar expuesto el orificio de salida o la tubería de salida sanitaria, y su variación con el ancho de la cresta, ya que al aumentar este ancho el valor de altura de lámina de agua dentro de la estructura aumenta y consecuentemente la succión que tendría el oficio podría evitar ciertos procesos de sedimentación proponiendo una eficiencia mayor en el criterio de autolimpieza de la estructura.

Para el caso de las estructuras de alivio de la ciudad de Tunja y teniendo en cuenta su estructura de redes de alcantarillado y la forma de la expansión urbana, se recomienda que la construcción de futuros alivios de esta misma tipología, sea con vertederos de cresta ancha, esto para tener un mejor control de la carga hidráulica y consecuentemente el caudal que ingresa al orificio de salida sanitaria, esto para prever estrategias de tratamiento para los volúmenes esperados de agua al final del sistema.

El modelo de turbulencia implementado $k-\varepsilon$ genera simulaciones que representan eficientemente los procesos modelados en este trabajo, en los videos adjuntos a este trabajo en los anexos se observa el desarrollo de zonas de transición entre flujo que se generan por la estructura del aliviadero, lo cual se traduce como una ventaja de las modelaciones con CFD respecto a las modelaciones unidimensionales y bidimensionales, ya que conocer el funcionamiento de estas zonas nos da el control de proponer geometrías más eficientes en términos de control de carga hidráulica y zonas de interés dentro de la estructura.

En la actualidad la cresta del aliviadero se encuentra bien diseñada debido a que la cresta está diseñada para que entre en operación una vez que ocurra una lluvia de un periodo de retorno de 10 años. Teniendo en cuenta lo anterior, cuando sucede una lluvia convencional la cresta no debe dejar pasar agua por la salida pluvial. Para futuras modelaciones que puedan tener una mayor exactitud, se debe realizar la modelación con la carga solida con el fin de revisar patrones de sedimentación, por ahora teniendo en cuenta que la modelación se realizó con caudal liquido la cresta de la estructura se encuentra bien diseñada.

Realizando una evaluación de la estructura con una cresta 30% más ancha que la actual, se evidencia que la estructura controla de mejor forma la carga hidráulica debido a que el caudal de salida del orificio presenta menos fluctuaciones teniendo en cuenta el cambio de carga al ingresar a la estructura. Se facilita la obtención de la ecuación de orificio debido a que la carga tiende a ser constante.

9 Recomendaciones

Para futuras modelaciones los modelos deben contemplar una longitud de desarrollo de la lámina de agua en la tubería de entrada, es decir se debe modelar una sección más larga de

tubería que la aquí propuesta, esto para estabilizar el comportamiento de la lámina de agua antes de entrar a la estructura de alivio, en esta también aplicara el concepto de punto de estabilización descrito en este trabajo, el control de esta medida puede hacerse con la instalación de 3 o más baffles o puntos de medición en la tubería, esto para tener control en varios puntos y así poder reducir el sesgo en la determinación de la longitud de tubería, se deben proponer 3 o más puntos de medición en aras de determinar la longitud mínima requerida, ya que de no hacerse así y proponer longitudes mayores a esta, los tiempos de cómputo del modelo se ven considerablemente afectados.

Para modelaciones futuras se debe prever de mediciones con intervalos más cortos, ya que si bien es cierto la medición cada 5 minutos nos da una resolución precisa del comportamiento de la tormenta, para simulaciones de CFD estos intervalos de tiempo son extensos, considerando los tiempos de cómputo de cada uno de los modelos propuestos.

La configuración del mallado para futuros modelos se recomienda que sea de múltiples bloques, para optimizar las áreas de análisis y así poder tener mejores resoluciones de malla que permiten mejores resultados, esto ya que al momento de ejecutar el FAVOR dentro del programa de FLOW 3D la definición de la estructura a modelar mejora considerablemente.

La experticia del diseñador es muy importante en el momento de asignar el dimensionamiento del mallado, si el diseñador tiene claro el direccionamiento del flujo, este podrá realizar un ajuste en el mallado en una altura conveniente que le permita reducir el número de celdas, lo que ocasionará directamente una reducción en el tiempo de cómputo del modelo. Este ajuste se debe realizar en casos específicos teniendo en cuenta que lo ideal es realizar el estudio con el dimensionamiento real de la estructura, cuando se reduce el dimensionamiento de la malla

es porque se cuenta con la seguridad de que el flujo en estudio se encuentra dentro del rango de dimensión variado.

Se debe establecer un balance entre definición de malla y tiempos de procesamiento, ya que el proceso iterativo de calibración puede resultar muy largo en los casos en que prime la definición de malla, o se presenta disminución en la exactitud de los valores calibrados en el caso de tener como argumento principal tiempos de cómputo cortos.

La orientación de la estructura al momento de proponer la geometría desde AutoCAD o desde el programa usado, se debe tener en cuenta que el sentido de flujo debe estar orientado hacia en el sentido positivo del eje sobre el cual se proyecte, en caso de no hacerlo así los resultados se verán en valores negativos, esto no indica que la modelación este mal, sino que la dirección del vector velocidad va hacia el lado negativo del eje sobre el cual se proyectó el flujo.

Referencias

- Cebellin, A (2024). Técnicas inteligentes de Supervisión y Control Predictivo Distribuido aplicadas a redes de drenaje urbano. Universidad de Salamanca. Departamento de Informática y Automática Facultad de Ciencias.
- Zamora, M. Ferriño, A. Guerra, V (2024). Análisis hidrodinámico por CFD de una obra de toma de agua potable en una presa de almacenamiento. Ingeniería Investigación y tecnología, volumen XXV (número 2).
- Cely, N. Cortes, M. Galvis, A. Carrillo, G (2024). Estructuras flexibles como contramedida para reducir la erosión local a lo largo de los muros longitudinales. Aplicaciones en la ciencia de la ingeniería.
- Del Rio, A. Cely, N. Cortes, (2024). Evaluación de mini-espigones como contramedida para la reducción de socavación local en muros longitudinales de ríos con lecho granular usando Flow-3D y AHP. Revista UIS Ingenierías. Vol. 23, n.º3, pp.61-70, 2024.
- Cely, N. Cortes, M. Galvis, A. Carrillo, G (2023). Análisis numérico tridimensional enfoque de modelado para predecir la socavación procesos en paredes longitudinales de ríos con lecho granular. EUREKA: Física e Ingeniería. Número 4
- Zambrano, J & Vélez, J (2023). Drenaje urbano en Colombia. Universidad Nacional de Colombia.
- Anta, J. Puertas, J. Cea, L. Suarez, J. Naves, J. Carreres, D. Ciambra, A (2023). Co-UDlabs: una red europea de grandes instalaciones de investigación en drenaje urbano. Universidade da Coruña. Grupo de Investigación de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA).
- Acuerdo Municipal N° 010 de 2022 (2022).
- Cortes, M. Monroy, E. Amaya, E (2022). Evaluación numérica tridimensional de la eficiencia hidráulica y el coeficiente de descarga en las entradas de la rejilla. Revista de investigación, ingeniería y gestión medioambiental. Vol. 78 / Núm. 4 / 2022.

- Moreira, A (2022). Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible. Polo de conocimiento. Ciencias técnicas y aplicadas.
- Antonio, L., & Monsalve, H. (2022). *Evaluación hidrodinámica de aliviaderos de cañuela elevada en régimen supercrítico mediante simulación CFD.*
- Galindo, C (2022). Uso de la teoría de fractales para entender la hidráulica de las redes de drenaje urbano. Universidad de los Andes. Maestría en ingeniería Civil
- Toapaxi-Alvarez, J., Silva-Bastidas, R., & Torres-Jacobowitz, C. (2022). Three-Dimensional Numerical Modeling of the Palmer-Bowlus Measuring Flume Applying the FLOW-3D Software. *Revista Politecnica*, 49(1), 43–52. <https://doi.org/10.33333/rp.vol49n1.04>
- Castillo, C. Diaz, T. Alvarez, L. Alvarez, M (2022). Estrategias para el diseño de sistemas de drenaje urbano en la ciudad de Santa Clara. Ingeniería hidráulica y ambiental.
- Vásquez, J. Vásquez, A. Piedra, J. Arriola, G (2021). Evaluación de la ecuación general del usbr para el diseño de aliviaderos tipo Creager de descarga libre. *Rev. INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*
- Cortes, M. Amaya, W. Gamba, D (2021). Implementación de la modelación hidráulica del drenaje urbano en el sector nororiente, Tunja, Boyacá. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia.*
- Monroy, H. (2021). *Evaluación de eficiencia hidráulica en rejillas de sumideros mediante investigación numérica tridimensional y verificación de resultados de experimentación física de prototipos.*
- Navas, A. Navarro, P. G., & Pato, J. F. (2021). *Introducción a la mecánica de fluidos computacional* Prensas de la Universidad *Introducción a la mecánica de fluidos computacional*. <http://puz.unizar.es>
- Diaz Rúa, A. E. (2021). *Análisis del comportamiento hidráulico del flujo en una rápida escalonada comparando los resultados de un modelo físico con un modelo numérico en Openfoam.*

- Empresa de acueducto y alcantarillado de Bogotá - EAAB. (2020). *NS-085 Criterios de diseño sistemas de alcantarillado.*
- Bermúdez - Vaquero, M. (2021). *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE (SUDS) EN AMERICA LATINA: ¿UNA SOLUCION BASADA EN LA NATURALEZA CON CRITERIO SOCIAL?*
- Reyna, S. Reyna, T. Labaque, M. Riha, C. Fulginiti, F (2020) Plan de drenaje urbano. Ciudad de Arroyito. Brazilian Journal of Development
- Guanipa, R. Lugo, A. Rincón, J (2020). Análisis de sensibilidad de parámetros hidrológicos e hidráulicos del modelo SWMM y su aplicación en sistemas de drenaje urbano. Revista Gaceta Técnica. Artículo de Investigación. 21(1), 44-64.
- Amaya Tequia, W. E. (2019). *Modelización hidráulica de drenaje urbano, aplicación sector nororiental distrito Santa Inés Tunja.*
- DANE. (2019). *Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 Sogamoso, Tunja, Boyacá.*
- Imanian, H & Mohammadian, A (2019). Simulación numérica del flujo sobre aliviaderos con cresta ojival bajo una alta relación de carga hidráulica. Aplicaciones de ingeniería de la mecánica de fluidos computacional. Vol 13, Num 1, 983-100.
- Jimenez Motta, J. V. (2019). *EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL ALIVIADERO DE LA PRESA GALLITO CIEGO MEDIANTE MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL.*
- Chandi Pozo, P., & Escobar Montenegro, J. (2018). *MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE LOS VERTEDEROS DE EXCESOS DE LA PRESA TOACHI MEDIANTE EL PROGRAMA FLOW-3D.*
- Mogollón Mogollón, F. (2018). *Modelación numérica de estructuras hidráulicas 3D en Ansys – Fluent. Caso de estudio Aliviadero el Ejido.*

Aquise Obregón, V. (2017). *Aplicación de las ecuaciones de Saint Venant al modelamiento bidimensional de cuencas y ríos.*

Reglamento Técnico Para El Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS (2017).

Lopez, D. Diaz, R. Rebollo, J. Ramos, T. F, Andres, Berga, M (2016). Aplicación del método SPH al estudio hidráulico de estructuras. Análisis hidrodinámico del aliviadero en pozo de la presa de Nagore (Navarra).

Título D Del Reglamento Técnico Del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS (2016).

Patiño Fernández, D. F., & Vintimilla Vintimilla, D. M. (2015). *Análisis del comportamiento de flujo a través de un vertedero en abanico y su subsecuente cuenco dissipador mediante un modelo matemático de flujo en tres dimensiones.*

Recasens, J., & Gómez Valentín, M. (2014a). *Ingeniería del agua Data.*

Recasens, J., & Gómez Valentín, M. (2014b). *Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero.*

Empresas Públicas de Medellín E.S.P. (2013). *Normas de diseño de sistemas de alcantarillado de las empresas públicas de Medellín e.s.p.*

Fonseca, S. (2008). *Herramienta computacional para análisis y evaluación del comportamiento de aliviaderos de alcantarillados combinados (caso estudio, Bogotá).*

Moriasi, D. Arnold, G. Van Liew, M. Bingner, Harmel, R. Veith, T (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

United States Environmental Protection Agency. (1999). *Combined Sewer Overflow Technology Fact Sheet Retention Basins DESCRIPTION.*

Sotelo Avila, G. (1994). *Hidráulica General (Vol. 1).*