

**Maestría en Ingeniería Civil**

**Análisis de la optimización y eficiencia del bordillo o sardinel  
drenante mediante técnicas CFD (ANSYS Fluent)**

**Michael Stephen Mena Cuellar**

**Bogotá, D.C., 4 de noviembre de 2022**



**Análisis de la optimización y eficiencia del bordillo o sardinel  
drenante mediante técnicas CFD (ANSYS Fluent)**

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

**Ing. Germán Ricardo Santos Granados, MSc., PhD.**

**Director**

**Bogotá, D.C., 4 de noviembre de 2022**



La tesis de maestría titulada "Mediante técnicas Análisis de la optimización y eficiencia del bordillo o sardinel drenante mediante técnicas CFD (ANSYS Fluent)" presentada por el ingeniero Michael Stephen Mena Cuellar, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Andrés Humberto Otalora Carmona

Jurado

Miguel Fernando Montoya Vallejo

Bogotá, D.C., día de mes de año

## **Dedicatoria**

Al creador de todo que puso en mi la bendición de poder estudiar una maestría, me acompañó y me sostuvo en los momentos duros y difíciles, a mis padres y hermanas que fueron de apoyo en los momentos duros.

## **Agradecimientos**

Agradecimientos a mi director de proyecto, por su dedicación y sabiduría, a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, la empresa ACO Monoblock, a la Doctora Liseth Enríquez Castillo por su constante apoyo en la etapa de validación del proyecto, a la ingeniera Martha Patricia Plata Beltrán por darme la oportunidad de pertenecer al grupo de revisión de proyectos IDU y aprender sobre los sumideros, a la Ingeniera Alexandra Zamora Martínez por sus sabios consejos y compañía, al ingeniero Carlos Ayala y a la ingeniera Paula Ramírez por su ayuda constante.

## Resumen

En investigaciones anteriores se han empleado las técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés Computational Fluid Dynamics) para estudiar el comportamiento hidráulico de las estructuras de captación de aguas lluvias de tipo rejilla o tipo ventana, determinando la eficiencia hidráulica de cada uno de estos elementos y comparando estos resultados con modelos físicos y las ecuaciones que normalmente permiten identificar la eficiencia hidráulica de estos elementos, concluyendo que la dinámica de fluidos computacional presenta resultados con un error mínimo respecto a los obtenidos en un laboratorio.

Sin embargo, no hay estudios experimentales para identificar como es el comportamiento hidráulico de los bordillos drenantes en condiciones de operación real. Si bien la empresa ACO Monoblock realizó un ensayo de laboratorio, este no representa el comportamiento de los orificios en condiciones reales, ya que se evaluaron los orificios en una plataforma que no tiene las condiciones reales de operación y la pendiente longitudinal no fue variada, por lo que los resultados no son del todo concluyentes.

La presente investigación busca determinar si la ecuación de sumidero de ventana es adecuada para determinar el caudal captado por cada uno de los orificios, identificar el efecto de las pendientes longitudinales en la operación de los bordillos drenantes y en qué condiciones se mejora la eficiencia hidráulica de estos elementos.

La metodología que se propone para generar los modelos hidráulicos es la siguiente: generar un modelo y comparar estos resultados con el modelo experimental para validar los resultados del modelo computacional. Enseguida se establece la física de los modelos en condiciones reales y las condiciones de frontera para simular la operación real. Se varían los caudales de entrada y la pendiente longitudinal. Por último, se generan unos modelos computacionales, para identificar lo que se puede variar para mejorar la eficiencia de captación.

En la presente investigación se concluyó que la ecuación del sumidero de ventana aplica para determinar la eficiencia de captación siempre y cuando la longitud de contacto pueda ser medible. Se encontró que los bordillos drenantes funcionan mejor con pendientes longitudinales bajas. Cuando las pendientes longitudinales son elevadas los bordillos drenantes no son una buena alternativa para captar las aguas lluvia, puesto que los resultados concluyeron que a medida que se aumenta la pendiente la eficiencia de un mismo bordillo disminuye. Para aumentar la capacidad de captación se deben ubicar los bordillos de tal manera que se cuente con la mayor longitud de contacto y si se requiere aumentar más la

capacidad se debe aumentar la pendiente transversal de la plataforma. Así entonces la máxima captación se logra cumpliendo estas tres condiciones; pendiente longitudinal baja (entre 0% y 1%), pendiente transversal alta (4%) y máxima longitud de contacto (varía dependiendo del elemento).

## Tabla de contenido

1.	Objetivos .....	18
1.1	Objetivo General.....	18
1.2	Objetivos específicos .....	18
2.	Marco Teórico .....	18
2.1	Problema de Investigación .....	18
2.2	Proyectos Antecedentes.....	19
2.3	Generalidades del Marco Teórico.....	23
2.4	Funcionamiento de ANSYS - FLUENT .....	24
2.5	Flujo de fluido básico .....	25
2.5.1	Ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento.....	25
2.6	Turbulencia.....	27
2.6.1	Elección modelos de turbulencia.....	27
2.6.2	Tratamiento de la Pared .....	29
2.7	Flujos Multifásicos .....	30
2.7.1	Clasificación de flujos.....	30
2.7.2	Teoría del modelo VOF .....	31
2.8	Condiciones de Frontera .....	31
2.8.1	Condición de Frontera de entrada y salida.....	31
2.8.2	Condición de frontera en las paredes .....	32
2.9	Teoría del solucionador .....	33
2.9.1	Algoritmo SIMPLE .....	34
2.10	Informe de datos .....	34
2.11	Tipos de Mallas y Calidad de la Malla.....	35

2.12	Drenaje Urbano en el mundo .....	36
2.12.1	Metodología para calcular el drenaje puntual urbano .....	38
3.	Metodología.....	40
3.1	Metodología para la modelación en flujo permanente .....	40
3.2	Definición de las metas de modelación .....	41
3.3	Identificación del dominio .....	43
3.1	Creación del dominio .....	44
3.2	Definir la física del problema .....	46
3.3	Diseño y creación de la malla.....	48
3.4	Configuración del modelo solver .....	49
3.5	Calibración del Modelo .....	57
3.1	Modelo en condiciones reales .....	66
4.	Resultados de las modelaciones.....	67
4.1.1	Resultados para la pendiente longitudinal S1 - 0.10 %.....	67
4.1.2	Resultados para la pendiente longitudinal SI 0.25 % .....	71
4.1.3	Resultados para la pendiente longitudinal SI 0.30 % .....	75
4.1.4	Resultados para la pendiente longitudinal SI 1.00 % .....	79
4.1.5	Resultados para la pendiente longitudinal SI 2.50 % .....	82
4.1.6	Resultados para la pendiente longitudinal SI 5.00 % .....	86
4.1.7	Resultados para la pendiente longitudinal SI 10.00 % .....	90
4.2	Análisis resultados .....	94
4.2.1	Comportamiento de las láminas de agua .....	94
4.2.2	Perfiles hidráulicos obtenidos.....	96
4.2.1	Análisis de las líneas de corriente en los orificios para flujo permanente ..	100
4.2.1	Análisis de los ábacos .....	101

4.2.1 Optimización de la instalación de los bordillos drenantes para aumentar la capacidad de captación.....	102
4.2.2 Capacidad de Captación al Variar la Pendiente Transversal.....	108
Conclusiones.....	111
Recomendación .....	114
Referencias .....	117

## Índice de tablas

Tabla 2-1 Estado de Arte de las modelaciones de Dinámica de Fluidos Computacional .....	19
Tabla 3-1 Metodología para realizar la modelación hidráulica.....	41
Tabla 3-2 Variables del dominio.....	43
Tabla 3-3 Configuración General del Modelo .....	49
Tabla 3-4 Configuración del Modelo de Multifase .....	49
Tabla 3-5 Configuración de la pestaña “Phases” .....	50
Tabla 3-6 Configuración de la pestaña “Phase Interaction” .....	51
Tabla 3-7 Configuración del Modelo de Turbulencia .....	51
Tabla 3-8 Configuración de los materiales.....	51
Tabla 3-9 Configuración condición de contorno “Inlet” .....	52
Tabla 3-10 Configuración condición de contorno “outlet”.....	53
Tabla 3-11 Configuración de condición de contorno “Wall” .....	53
Tabla 3-12 Configuración del método de solución.....	54
Tabla 3-13 Configuración de los factores de relajación .....	54
Tabla 3-14 Configuración de los valores de convergencia .....	55
Tabla 3-15 Configuración de las variables de inicio.....	56
Tabla 3-16 Configuración de los calculos .....	56
Tabla 3-17 Sensibilización Multiphase Model Interface Modelling, K-ε SubModel, Transient Formulation, TKE y TDR .....	57
Tabla 3-18 Sensibilización Malla Fina, Media y Gruesa .....	59
Tabla 3-19 Resultados Sensibilización de la Malla.....	60
Tabla 3-20 Sensibilización del paso del tiempo .....	61
Tabla 3-21 Sensibilización de la Variación de la Rugosidad, Tratamiento de la Pared, BC-Inlet y BC Outlet.....	62

Tabla 3-22 Comparación modelo de validación vs modelo modificado .....	63
Tabla 3-23 Condiciones de entrada de los modelos reales .....	66
Tabla 3-24 Identificación de los modelos .....	66
Tabla 4-1 Resultados para la pendiente del 0.1% .....	70
Tabla 4-2 Velocidades Maximas en las plataformas G3S2.....	71
Tabla 4-3 Resultados para la pendiente del 0.25% .....	73
Tabla 4-4 Resultados para la pendiente del 0.3% .....	77
Tabla 4-5 Resultados para la pendiente del 1% .....	81
Tabla 4-6 Resultados para la pendiente del 2.5% .....	85
Tabla 4-7 Resultados para la pendiente del 5% .....	88
Tabla 4-8 Resultados para la pendiente del 10% .....	92
Tabla 4-9 Perfiles hidráulicos con diferentes caidas .....	102
Tabla 4-10 Caudales captados para los diferentes escenarios 1 .....	103
Tabla 4-11 Caudales captados para los diferentes escenarios 2 .....	106
Tabla 4-12 Condiciones de entrada de los modelos reales .....	108
Tabla 4-13 Resultados para los modelos con pendiente longitudinal S3 y variación de la pendiente transversal.....	109
Tabla 4-14 Resultados para los modelos con pendiente longitudinal S5 y variación de la pendiente transversal.....	109
Tabla 4-15 Resultados para los modelos con pendiente longitudinal S6 y variación de la pendiente transversal.....	110

## Índice de figuras

Ilustración 2-1 Elementos de Mallado en 2D y 3D .....	35
Ilustración 3-1 Plataforma empleada en la modelación física .....	43
Ilustración 3-2 Geometría No 1 .....	45
Ilustración 3-3 Geometría No 2 .....	45
Ilustración 3-4 Geometría No 3 .....	46
Ilustración 3-5 Física del problema en laboratorio .....	46
Ilustración 3-6 Física del problema para la Geometría No 1 .....	47
Ilustración 3-7 Física del problema para la Geometría No 2 .....	47
Ilustración 3-8 Física del problema para la Geometría No 3 .....	47
Ilustración 3-9 Definir Métodos de Mallado Geometría No 1, Geometría No 2 y Geometría No 3 .....	48
Ilustración 3-10 Definir Zonas de Mallado Geometría No 1, Geometría No 2 y Geometría No 3 .....	48
Ilustración 3-11 Comportamiento Hidráulico del Modelo Validado vs Modelo Modificado .....	64
Ilustración 3-12 Bordillos drenantes instalados .....	65
Ilustración 4-1 Velocidades Maximas en las plataformas G3S1 .....	67
Ilustración 4-2 Ajuste para los modelos G3S1 (Pendiente 0.10%) .....	71
Ilustración 4-3 Ajuste para los modelos G3S2 (Pendiente 0.25%) .....	75
Ilustración 4-4 Velocidades Maximas en las plataformas G3S3 .....	75
Ilustración 4-5 Ajuste para los modelos G3S3 (Pendiente 0.30%) .....	78
Ilustración 4-6 Velocidades Maximas en las plataformas G3S4 .....	79
Ilustración 4-7 Ajuste para los modelos G3S4 (Pendiente 1.00%) .....	82
Ilustración 4-8 Velocidades Maximas en las plataformas G3S5 .....	82
Ilustración 4-9 Ajuste para los modelos G3S5 (Pendiente 2.50%) .....	86

Ilustración 4-10 Velocidades Maximas en las plataformas G3S6 .....	86
Ilustración 4-11 Ajuste para los modelos G3S6 (Pendiente 5.00%) .....	90
Ilustración 4-12 Velocidades Maximas en las plataformas G3S7 .....	90
Ilustración 4-13 Ajuste para los modelos G3S7 (Pendiente 10.00 %) .....	94
Ilustración 4-14 Líneas de corriente, superficie de agua y vectores .....	95
Ilustración 4-15 Planos en la Geometría No 3 .....	96
Ilustración 4-16 Perfiles Escenario 1 (G3S3Q1) .....	96
Ilustración 4-17 Perfiles Escenario 2 (G3S5Q1) .....	97
Ilustración 4-18 Perfiles Escenario 3 (G3S6Q1) .....	98
Ilustración 4-19 Líneas de corriente Escenario 1 (G3S3Q1), Escenario 2 (G3S5Q1) y Escenario 3 (G3S6Q1).....	100
Ilustración 4-20 Ábacos de eficiencia de los bordillos drenantes.....	101
Ilustración 4-21 Grafica de barras comparativas caudales captados modelo vs ecuación para el escenario 1.....	105
Ilustración 4-22 Grafica de barras comparativas caudales captados modelo vs ecuación para el escenario 2.....	107

## Índice de anexos

Anexo 1. Modelos hidráulicos CFD

125

## Introducción

Actualmente en el mundo se está aumentando el uso de las estructuras de drenaje lineal dado que son estructuras que ocupan poco espacio, son de fácil instalación y arquitectónicamente son agradables. Sin embargo, en la literatura y los catálogos de los diferentes proveedores no es claro cuáles son las condiciones de operación adecuadas, ni si las ecuaciones del sumidero de ventana o lateral aplican para definir la captación de estos. Tampoco se menciona la manera óptima de instalación para que estos elementos generen la máxima eficiencia hidráulica.

Una de las maneras de poder estudiar el comportamiento de estos elementos sin realizar ensayos experimentales consiste en generar modelos con la dinámica de fluidos computacional. En los trabajos de (Cárdenas-Quintero, Carvajal-Serna, & Marbello-Pérez, 2017), (Gómez, Recasens, Russo, & Martínez-Gomariz, 2016), etc. se determinó la eficiencia hidráulica de las estructuras de captación de aguas lluvias y se compararon estos resultados con lo obtenidos en laboratorio. Las diferentes investigaciones concluyen que la modelación numérica es una alternativa al modelo físico, por ejemplo, en la investigación de (Vargas, 2014) el error relativo se encuentra entre el 5% y 10% y para (Cárdenas Quintero, Carvajal Serna, & Marbello Pérez, 2017) el error es del 2%.

En las investigaciones citadas anteriormente se estudiaron los sumideros de rejilla y los sumideros de ventana. En el entendido que falta investigación sobre los bordillos o sardineles drenantes, se tiene uno de los motivos que originan la presente investigación. En los anteriores estudios se varió el caudal y la pendiente longitudinal, y en algunos se compararon los resultados obtenidos con los calculados con las ecuaciones de las diferentes normas.

La suposición es que la eficiencia de captación del bordillo drenante se puede determinar mediante la ecuación del sumidero de ventana. A medida que aumenta la pendiente longitudinal de la vía el caudal captado por el bordillo drenante disminuye y la velocidad del agua aumenta. Al ser un drenaje lineal, se espera que el ancho de inundación disminuya a lo largo de la estructura de drenaje.

La hipótesis principal es que mediante la dinámica de fluidos computacional se puede caracterizar adecuadamente el comportamiento de fluidos en el bordillo drenante. Se debe realizar una investigación del estado de arte de las modelaciones de la dinámica

de fluidos computacional o CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*) de estructuras de captación de aguas lluvias e identificar si han sido validada con ensayos experimentales.

La metodología empleada consiste en generar un mapa conceptual del procedimiento a usar para validar los resultados del modelo numérico con ensayos experimentales. Luego se definen los pasos a seguir para realizar los modelos en condiciones de operación real. A continuación, se identifican en qué condiciones se aumenta la eficiencia hidráulica. Por último, se deben estudiar los resultados obtenidos de cada uno de los modelos hidráulicos, referente a los caudales captados y las eficiencias hidráulicas obtenidas. Para algunos de los modelos se va a comparar los resultados de la ecuación con los resultados del modelo

La suposición es que los bordillos drenantes tienen una disminución de eficiencia hidráulica a medida que se aumenta la pendiente longitudinal y que el ancho de inundación disminuye a medida que el flujo avanza a través de los bordillos. La investigación se diseña de tal manera que se puede identificar cómo afecta la variación de la pendiente longitudinal la captación de los orificios. Con el estudio de las superficies de flujo se puede identificar que sucede con el ancho de inundación y si la ecuación de sumidero de ventana aplica para determinar la eficiencia hidráulica de estos elementos.

Este estudio es un aporte a la investigación teórica dado que permite entender cómo es el funcionamiento hidráulico de los bordillos drenantes y cómo las ecuaciones descritas en las normas colombianas pueden ser aplicables para realizar un correcto dimensionamiento de estas estructuras, además de que complementa las investigaciones relacionadas con la dinámica de fluidos computacional donde mediante esta metodología se pueden evaluar estructuras hidráulicas complejas.

Respecto al campo práctico, el presente estudio va a definir cuáles son las condiciones más óptimas de operación de los bordillos drenantes, para que de esta manera estos elementos no se empleen en condiciones donde no se tiene un buen rendimiento hidráulico, además de lograr identificar la configuración que permite la mayor eficiencia hidráulica.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Caracterizar el comportamiento de fluidos en el bordillo drenante mediante tecnologías basadas en Dinámica Computacional de Fluidos o CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*) y validarlas.

### 1.2 Objetivos específicos

- a. Recopilar bibliografía de modelaciones de estructuras de captación de aguas lluvias que emplean la Dinámica Computacional de Fluidos.
- b. Establecer una metodología para la modelación de los bordillos drenantes.
- c. Configurar un modelo en Ansys Fluent, para obtener resultados cercanos a los medidos en el laboratorio
- d. Estudiar el comportamiento del bordillo drenante, mediante técnicas CFD, cuando se varia la pendiente longitudinal de la plataforma y se tiene diferentes caudales de diseño.
- e. Identificar las condiciones en las que un bordillo drenante funciona mejor.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Problema de Investigación

El problema abordado con la presente investigación consiste en “**definir la eficiencia de captación de los orificios de los bordillos drenantes**”, cuando se varia la pendiente longitudinal de la vía, se cambia el caudal de diseño y se mantiene una pendiente transversal fija del 2%. Aplicando Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), con el software ANSYS-FLUENT.

La empresa ACO-Monoblock realizó un ensayo de laboratorio para determinar la lámina de agua que alcanza los bordillos drenantes de referencia KD 305 y KD 280. El ensayo consistió en evaluar diferentes caudales mediante una plataforma funcionando como un vertedero lateral con una pendiente longitudinal del 0.10% y una transversal del 2 %. Midieron la altura de lámina de agua captada en el orificio. Sin embargo, al revisar el montaje se identificó que este no representa la captación real de los bordillos drenantes,

por lo que se procede a emplear técnicas CFD para representar el funcionamiento real del bordillo drenante: entrada del caudal en sentido de la pendiente longitudinal, variación de la pendiente longitudinal y una pendiente transversal usada generalmente en el diseño geométrico vial.

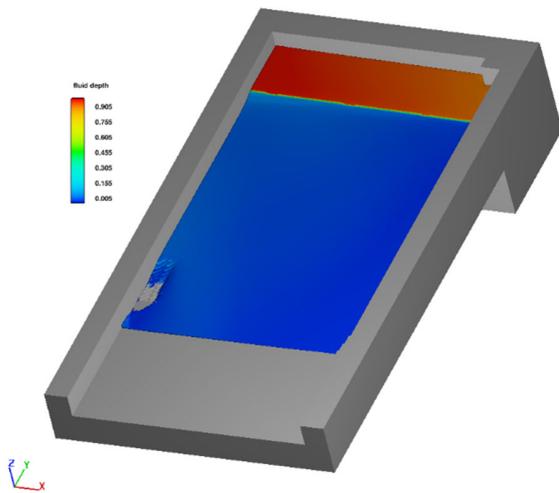
En los últimos años se han realizado investigaciones similares donde el objetivo principal es determinar la eficiencia de captación de los sumideros o estructuras de captación de aguas urbanas tipo rejilla. Estas modelaciones se realizaron tanto físicamente como numéricamente, con el fin de comprobar si las metodologías CFD se pueden emplear para determinar el rendimiento hidráulico. En los siguientes párrafos se presenta en orden cronológico las investigaciones relacionadas con el tema, haciendo mayor énfasis en las que emplearon técnicas CFD.

## 2.2 Proyectos Antecedentes

A continuación, se presenta el estado de arte de la presente investigación.

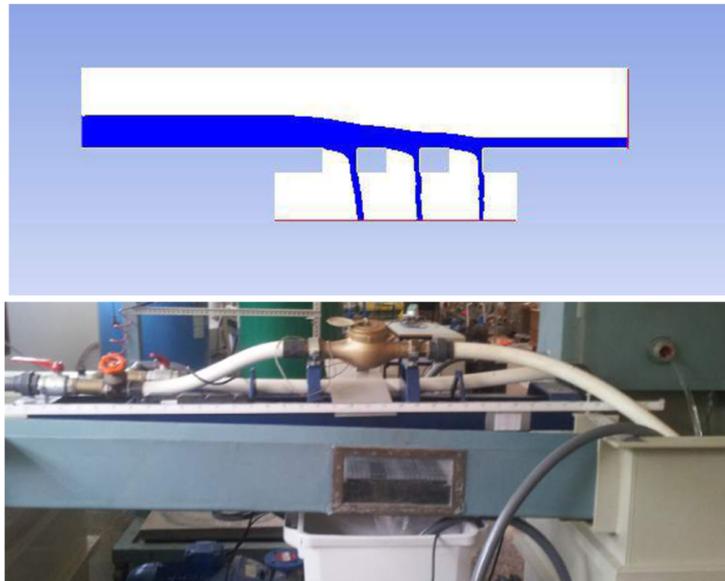
*Tabla 2-1 Estado de Arte de las modelaciones de Dinámica de Fluidos Computacional*

Año	Resumen	Referencia
2010	En el año 2010 se realizó la investigación titulada como <b>“Numerical simulations of efficiency of curb – opening inlets”</b> , mediante la cual se generó una geometría simulando una vía. Se implementaron los sumideros tipo abertura de bordillo, se cambió la pendiente longitudinal empleando 2.1 %, 1 %, 0.5%, y 0.2 %, en cuanto a la pendiente transversal 2 %, 1 % y 0.4 %.	(Fang, Shoudong, & Shoeb, 2010).
2014	Se determinó la eficiencia de captación de aguas lluvias aplicando las técnicas CFD y usando el software FLOW 3D. Para la calibración de los resultados se comparó con los resultados obtenidos en el ensayo realizado por Hammonds y Holley 1995. Se definieron las eficiencias y se calibraron estos resultados, concluyendo que el modelo numérico presenta resultados aproximados a los resultados reales. (Fang, Shoudong, & Shoeb, 2010). Posteriormente en el año 2014 se realizó la investigación <b>“Modelación tridimensional de flujo de entrada en un sumidero – 2014”</b> la cual buscaba determinar si un modelo tridimensional sirve para caracterizar el comportamiento hidráulico de los sumideros tipo rejilla verificando si los resultados obtenidos son similares a los concluidos en los ensayos realizados en el <b>“Estudio del análisis de la capacidad hidráulica de la reja Barcelona”</b> . Para realizar las modelaciones numéricas se empleó el software Flow 3D.	(Recasens Vargas, 2014)

Año	Resumen	Referencia
	<p>En el estudio se empleó como modelo de turbulencia RNG, se revisaron los parámetros de flujo, duración de la simulación, hipótesis de flujo unidimensional, comportamiento de la lámina libre y campo de vectores de velocidad. Se revisó el comportamiento cuando se tiene un caudal de 100 l/s, pendiente longitudinal 2% y pendiente transversal 2%. Se concluyó que los resultados obtenidos en la modelación numérica son similares a los resultados de la modelación experimental. (Recasens Vargas, 2014), a continuación, se presenta una ilustración del ensayo realizado</p>	
		
2015	<p>Seguidamente en el año 2015 se realizó la investigación “<b>Análisis de la eficiencia de rejillas de aguas pluviales mediante técnicas CFD</b>”. Se buscó estudiar la eficiencia hidráulica de un sumidero tipo rejilla, dividiendo la investigación en tres etapas; modelo computacional, proceso experimental y comparación de los resultados.</p> <p>Para el modelo computacional se emplean las técnicas CFD usadas por el software Ansys Workbench. Se define una geometría 2D simulando una rejilla, con una condición de entrada, desagüe y salida. Se estudió el comportamiento de la eficiencia, para determinar cuál es el mejor tamaño de la malla. Respecto al modelo de cálculo y modelo de turbulencia se empleó el modelo con la técnica de volúmenes de fluidos o VOF como modelo de cálculo y K-Épsilon como modelo de turbulencia, en cuanto a la interpretación de los datos CFD se revisa el caudal captado por los orificios con el caudal no captado y de esta manera se define la eficiencia hidráulica.</p> <p>Concluyendo que las técnicas CDF presentan resultados con un error relativo aceptable del 1% al 6% y se pueden emplear este tipo de modelos para determinar la eficiencia hidráulica de las estructuras de captación de aguas lluvias (Pérez Díaz, 2014), en la siguiente ilustración se presenta el</p>	(Pérez Díaz, 2014)

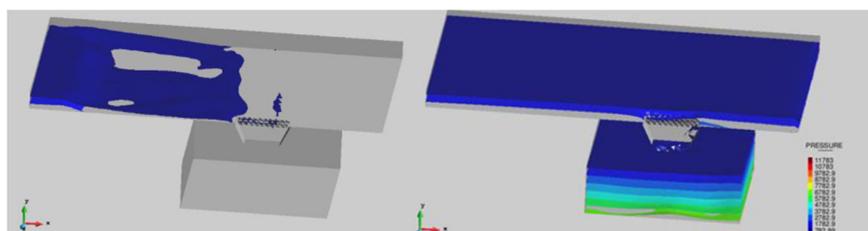
Año	Resumen	Referencia
-----	---------	------------

modelo.



2015 En el año 2015, para la **“Modelización numérica de elementos de captación de aguas pluviales urbanas”** se emplea el software KRATOS que opera con las técnicas CFD, con el fin de demostrar que aplicando estas técnicas se puede definir la eficiencia de una estructura de captación de aguas lluvias, para ello se definieron 4 elementos principales que conforman el modelo, plataforma, depósito de cabecera e imbornal (sumidero), se emplearon caudales entre 20 y 200 l/s y pendientes longitudinales del 0 al 10%, encontrando que solo dos simulaciones funcionaron correctamente. No se puede llegar a una conclusión consolidada, debido a que es un software no comercial y que se encuentra en desarrollo. (Agustina Reyes, 2015), a continuación, se presenta una ilustración del modelo realizado.

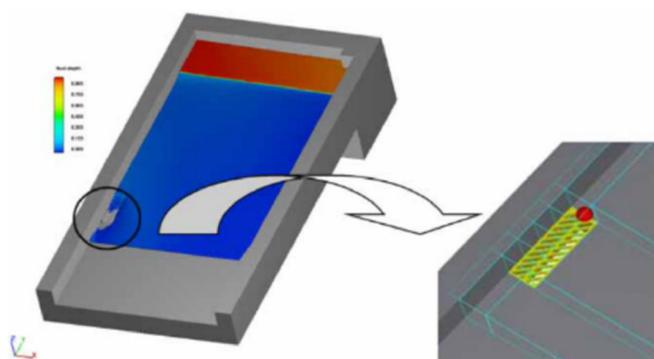
(Agustina Reyes, 2015)



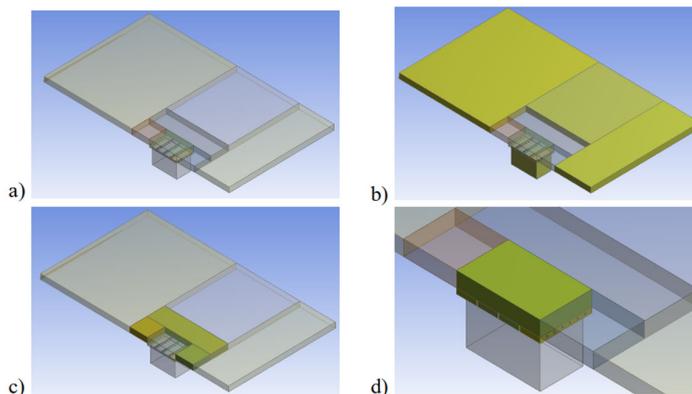
2016 Más adelante en el año 2016, se generó la investigación **“Assessment of inlet efficiency through a 3D simulation: numerical and experimental comparison”**. En esta tesis se buscó verificar si la eficiencia calculada mediante modelación numérica es similar a la eficiencia calculada con un ensayo experimental y determinar si las técnicas CFD son viables para

(Gómez, Recasens, Russo, & Martínez-Gomariz,

Año	Resumen	Referencia
	<p>determinar este tipo de eficiencias. El ensayo experimental se realizó en la plataforma a escala real de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), la modelación numérica se realizó con el software (Flow 3D) utilizando las ecuaciones RANS. (del inglés Reynolds-averaged Navier-Stokes)</p> <p>Respecto al montaje experimental, se empleó una plataforma de 5.5 m x 4 m donde se puede instalar un sumidero a escala real. La plataforma permite variar la pendiente transversal entre 0 y 4%, la pendiente longitudinal entre 0 a 10% y el caudal se puede variar entre 25 a 200 l/s, el flujo interceptado se mide mediante un vertedero en V.</p> <p>En el estudio se concluyó que en la rejilla al inicio se presenta una captación mayor del flujo frontal, pero aguas abajo el flujo frontal disminuye mientras que el lateral aumenta, pero al no trabajar la totalidad de la rejilla la eficiencia disminuye. También se concluyó que el porcentaje de distribución de flujos frontales se encuentra entre 60%-40% y para los flujos laterales 80%-20%. En cuanto mayor pendiente longitudinal, mayor será la porción asociada con el flujo frontal.</p> <p>De la investigación se puede concluir que el modelado tridimensional es una alternativa real a pruebas de laboratorio, proporcionando información útil adicional. Las diferencias entre los valores numéricos y experimentales son aceptables en la mayoría de los casos. Por lo tanto, las rejillas de entrada que no se pueden probar en laboratorio se pueden estudiar con el modelo 3D. (Gómez, Recasens, Russo, &amp; Martínez-Gomariz, 2016).</p>	2016)
2017	<p>Igualmente, en el 2017, se realizó la publicación más reciente <b>“Evaluación numérica tridimensional de un sumidero de reja de fondo”</b>. Se realizaron múltiples simulaciones del proceso de captación de agua en el sumidero Tipo B de las Empresas Públicas de Medellín (EPM E.S.P.) con un modelo hidrodinámico tridimensional (Ansys – CFX).</p>	<p>(Cárdenas-Quintero, Carvajal-Serna, &amp; Marbello-Pérez,</p>



Año	Resumen	Referencia
	<p>Se utilizó un dominio virtual de una vía de 3.0 m de ancho y 5.30 m de largo, variando los caudales de entrada de 50 a 250 l/s, la pendiente longitudinal de 0.1 a 10% y la pendiente transversal de 0 a 5%, generando 105 casos simulados. Los resultados del modelo numérico se compararon con aproximaciones empíricas que representan el proceso de captación en sumideros de reja de fondo, logrando correlaciones satisfactorias.</p> <p>El caudal total captado, se desagregó en el caudal captado por los mecanismos frontal y lateral y se definieron diferentes coeficientes de descarga tipo vertedero y orificio para el caudal captado frontalmente y tipo vertedero para el caudal captado lateralmente. Además, se propone un umbral de potencia unitaria del flujo de aproximación en la reja analizada, para identificar si el proceso de captación frontal es tipo vertedero u orificio. Estos coeficientes fueron evaluados en una segunda reja (Tipo A de EPM E.S.P.), ajustándose notablemente a los modelos empíricos disponibles (Cárdenas-Quintero, Carvajal-Serna, &amp; Marbello-Pérez, 2017).</p>	2017).



Fuente: Elaboración Propia y distintos autores

### 2.3 Generalidades del Marco Teórico

El presente Marco Teórico presenta dos temas, de los cuales se debe tener conocimiento para entender el proyecto de grado. El primer tema es la dinámica de fluidos computacional o CFD y cómo ANSYS FLUENT mediante su algoritmo puede solucionar problemas de este tipo, el segundo tema es el drenaje urbano y cómo se definen los caudales captados para los sumideros de tipo abertura en el bordillo, haciendo un énfasis principal en la metodología empleada en Colombia para determinar el caudal captado por los sumideros de ventana.

## 2.4 Funcionamiento de ANSYS - FLUENT

Para entender el funcionamiento de ANSYS FLUENT se toma como referencia las guías técnicas y los manuales de ANSYS FLUENT. Por otra parte (Mora Uscategui, 2017) en su proyecto de grado, presentó un marco teórico muy completo donde explica cómo es el funcionamiento matemático de ANSYS FLUENT y referencia algunos autores donde se puede profundizar sobre las ecuaciones empleadas en CFD.

De acuerdo (ANSYS, 2013) los pasos para resolver un problema CFD, son los siguientes:

- Definir los objetivos del modelo.
- Crear la geometría y la malla del modelo.
- Configuración del solucionador y los modelos físicos.
- Calcular y monitorear la solución.
- Examinar y guardar los resultados.

También es necesario seguir los siguientes pasos para generar una simulación exitosa con ANSYS Fluent, recomendaciones dadas en (ANSYS, 2013)

- Examine la calidad de la malla en Fluent.
- Escalar la malla y verificar las unidades de longitud.
- Emplear los modelos físicos adecuados.
- Utilizar gradientes basados en nodos con mallas tetraédricas no estructuradas.
- Monitorear la convergencia con el historial de residuos.
- Ejecutar la simulación de CFD utilizando la discretización de segundo orden para una mejor precisión en lugar de una solución más rápida.
- Supervisar los valores de las variables de solución.
- Verificar que se cumpla con la conservación de la propiedad.
- Comprobar la dependencia de la malla.
- Verificar que la solución tenga sentido según el criterio de ingeniería.

A partir de los anteriores pasos se procede a presentar los conceptos teóricos que se deben entender y en que documentos se encuentran las ecuaciones para profundizar sobre el tema.

## 2.5 Flujo de fluido básico

ANSYS FLUENT proporciona capacidades de modelado para una amplia gama de problemas de flujo fluidos laminares y turbulentos incompresibles y compresibles. Se pueden realizar análisis en estado permanente o transitorio. También es útil para el conjunto de modelos de flujo de superficie libre y multifase. Esto se puede utilizar para análisis de flujo gas líquido. Para este tipo de problemas, ANSYS FLUENT proporciona los modelos de volumen de fluidos (VOF), mezcla y Euleriano. Los ejemplos de flujos multifásicos incluyen flujos de canales, aspersiones, sedimentación, separación y cavitación. Los modelos de turbulencia robustos y precisos son un componente vital del conjunto de modelos ANSYS FLUENT. Los modelos de turbulencia proporcionados tienen una amplia gama de aplicabilidad e incluyen los efectos de otros fenómenos físicos, como la flotabilidad y la compresibilidad (ANSYS Inc, 2016).

### 2.5.1 Ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento

La ecuación de conservación de masa se deriva de aplicar la ley de conservación de masa. Este principio se expresa como: el flujo neto másico de salida del volumen de control (VC) debe ser igual al incremento temporal de la masa interior. La ecuación resultante es conocida como la ecuación de conservación de masa o ecuación de continuidad (Gijón-Rivera, 2016), la ecuación con la que trabaja el software ANSYS FLUENT se relaciona a continuación.

Ecuación de conservación de masa forma diferencial

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

*Ecuación 2-1*

Ecuación de conservación de masa forma integral

$$\int_S \vec{V} \cdot \hat{n} \, dS = 0$$

*Ecuación 2-2*

Por otra parte, se tiene la ecuación de la conservación del momento, representación matemática de la segunda ley de Newton y la cual establece que un pequeño elemento de volumen que se mueve en el fluido es acelerado por las fuerzas que actúan sobre él, es decir masa \* aceleración = suma de fuerzas.

En otras palabras, la segunda ley de Newton establece que el incremento temporal del momento lineal en el VC (variación temporal de la cantidad de momento lineal) más el flujo neto de momento lineal de salida del VC (el momento lineal es producto de la masa por la velocidad) debe ser igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre el VC (las fuerzas que actúan son del tipo: fuerzas másicas o de cuerpo y fuerzas superficiales o de contacto) (Gijón-Rivera, 2016), la ecuación de conservación de momento con la que trabaja ANSYS FLUENT se presenta a continuación.

Ecuación de momento forma diferencial

$$\rho * (\vec{V} * \nabla) * \vec{V} = -\nabla_p + \mu * \nabla^2 * \vec{V}$$

*Ecuación 2-3*

Ecuación de momento forma diferencial

$$\int_v \vec{V} dv = - \int_s \vec{V} * (\vec{V} * \hat{n}) dS - \int_s P * \hat{n} * dS + \vec{F}_{vis}$$

*Ecuación 2-4*

Ecuación de momento de flujo incompresible, componente x de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + g_x$$

*Ecuación 2-5*

Ecuación de momento de flujo incompresible, componente y de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + g_y$$

*Ecuación 2-6*

Ecuación de momento de flujo incompresible, componente z de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + g_z$$

*Ecuación 2-7*

## 2.6 Turbulencia

La turbulencia es una característica de los flujos, no de los fluidos como tales, su aparición exige existencia de un fluido en movimiento, en el que los fenómenos de convección (inerciales) asociados a la velocidad sean varios ordenes de magnitud superiores a los efectos difusivos (disipativos) relacionados con la viscosidad del fluido. Esta relación es el conocido número de Reynolds que establece la frontera (aproximada) entre las condiciones de flujo laminar y flujo turbulento (Fernández Oro, 2012). ANSYS FLUENT ofrece diferentes opciones de modelo de turbulencia. En (Mora Uscategui, 2017), se presenta un cuadro comparativo informando sobre las ventajas y desventajas de cada uno de los modelos.

### 2.6.1 Elección modelos de turbulencia

Ningún modelo de turbulencia es adecuado para todas las clases de problemas. Su elección dependerá de consideraciones tales como:

- La física influirá en el flujo
- La práctica establecida para una clase específica de problema
- El nivel de precisión requerido
- Los recursos computacionales disponibles
- Cantidad de tiempo disponible para la simulación.

Para elegir el modelo más apropiado para su aplicación, debe conocer las capacidades y limitaciones de las distintas opciones (ANSYS Inc, 2013). A partir de las

investigaciones realizadas anteriormente se determinó utilizar un modelo de turbulencia de k- $\epsilon$  realizable y este fue calibrado en laboratorio.

#### **2.6.1.1 Modelo K- $\epsilon$ Standard**

El modelo K- $\epsilon$  permite obtener escalas de longitud y velocidad de turbulencia. Las ecuaciones de transporte describen la energía cinética y la tasa de disipación de turbulencia. Una de las ventajas del modelo es efectuar cálculos convergentes con resultados coherentes para distintos regímenes de flujo. En contraste con sus desventajas, el modelo no resulta preciso para flujos en rotación como fluidos en tubos circulares (Toapanta Ramos, y otros, 2019)

#### **2.6.1.2 Modelo K-E-RNG**

En este modelo, los elementos de movimiento de baja escala se eliminan sistemáticamente mediante la aplicación de herramientas estadísticas. Las ecuaciones de control del flujo de fluido se modifican con respecto a los elementos de gran movimiento. Este modelo de turbulencia considera el régimen superior con efectos bajos o nulos de la región amortiguadora.

El modelo RNG K  $\epsilon$  no puede predecir el efecto de las esquinas, debido a la restricción en el uso de la rejilla gruesa cerca de la pared y las esquinas. Este modelo predice una buena concordancia con el medio poroso grande. Con el modelo RNG se producen mejores resultados que con el modelo K- $\epsilon$  Estándar, debido a que considera condiciones anisotrópicas complejas (Toapanta Ramos, y otros, 2019)

#### **2.6.1.3 Modelo K- $\epsilon$ Realizable**

El modelo K- $\epsilon$  Realizable es un modelo relativamente reciente y se diferencia del modelo normal K- $\epsilon$  en dos aspectos importantes:

- El modelo K- $\epsilon$  realizable contiene una nueva formulación para la viscosidad turbulenta.
- $\epsilon$  (Épsilon) ha derivado una nueva ecuación de transporte para la tasa de disipación, a partir de una ecuación exacta para el transporte de la fluctuación de la vorticidad cuadrática media.

El termino realizable significa que el modelo satisface ciertas limitaciones matemáticas sobre las tensiones de Reynolds en consonancia con la física del flujo

turbulento. Un beneficio inmediato del K- $\epsilon$  realizable es que predice con mayor precisión la velocidad de propagación de chorros planos y redondos. También es probable que proporcione un rendimiento superior para flujos que involucran rotación, capas límite bajo fuertes gradientes de presión adverso, separación y recirculación (ANSYS Inc, 2013). Para profundizar más sobre la matemática detrás del modelo se recomienda revisar el capítulo 4.4.3 (ANSYS Inc, 2016).

## **2.6.2 Tratamiento de la Pared**

Los flujos turbulentos se ven afectados significativamente por la presencia de muros. Esto debido a que el campo de velocidad promediada en el tiempo se ve afectado por la condición de no deslizamiento que debe cumplirse en la pared. Sin embargo, las fluctuaciones turbulentas también se modifican por la presencia del muro de formas no triviales. Muy cerca de la pared, la amortiguación viscosa reduce las fluctuaciones de la velocidad tangencial, mientras que el bloqueo cinemático reduce las fluctuaciones normales. Sin embargo, hacia la parte exterior de la región cercana a la pared, la turbulencia aumenta rápidamente por la producción de energía cinética turbulenta en razón a los grandes gradientes en la velocidad media.

Las funciones de pared son un conjunto de fórmulas y funciones semi-empíricas que en efecto "unen" las variables las cantidades en las celdas cercanas a la pared. Las funciones de la pared comprenden.

- Leyes de la pared para la velocidad media y la temperatura (u otros escalares).
- Fórmulas para las cantidades turbulentas cercanas a la pared.

Dependiendo de la elección del modelo turbulento, ANSYS FLUENT ofrece de tres a cuatro opciones de enfoques de función de pared: Funciones de pared estándar (*Standard Wall Functions*), Funciones pared escalable (*Scalable Wall Function*), Funciones de pared de no equilibrio (*Non-Equilibrium Wall Functions*) y Tratamiento de Pared Mejorado (*Enhanced Wall Treatment*). Para profundizar sobre las ecuaciones empleadas para emplear este método se sugiere consultar el capítulo 4.12.3 (ANSYS Inc, 2016).

## **2.7 Flujos Multifásicos**

Una gran cantidad de flujos que se encuentran en la naturaleza son una mezcla de las fases físicas de la materia (gas, líquido y sólido), pero el concepto de fase en un sistema de flujo multifásico se aplica en un sentido más amplio. En el flujo multifásico, una fase se puede definir como una clase identificable de material que tiene una respuesta inercial particular y una interacción con el flujo y el campo potencial en el que está inmerso. Por ejemplo, las partículas sólidas de diferentes tamaños del mismo material se pueden tratar como fases diferentes porque cada colección de partículas con el mismo tamaño tendrá una respuesta dinámica similar al campo de flujo. (ANSYS Inc, 2013).

El modelo numérico de volumen finitos o VOF fue desarrollado originalmente como una forma especial de la formulación en diferencias finitas. El punto de inicio de este método es usar la forma integral de las ecuaciones de conservación. El dominio de estudio es subdividido en un número finito de VC contiguos y las ecuaciones de conservación son aplicadas para cada VC. En el centroide de cada VC recae un nodo computacional en el cual se calcula el valor de las variables (Gijón-Rivera, 2016). Las aplicaciones del modelo VOF incluyen flujos estratigráficos, flujos de superficie libre, llenado, etc.; en general el seguimiento constante o transitorio de cualquier interfaz líquido-gas.

### **2.7.1 Clasificación de flujos**

Aunque los flujos multifásicos podemos clasificarlos de formas muy diversas, la clasificación escogida para la presente investigación es flujo gas – líquido.

En los siguientes regímenes se encuentran flujos gas-líquido.

- Flujo burbujeante: Este es el flujo de burbujas gaseosa o líquidas discretas en un flujo continuo.
- Flujo de gotas: Este es el flujo de gotas de fluido discreto en un gas continuo.
- Flujo de babosa: Este es el flujo de burbujas grandes en un fluido continuo
- Flujo de superficie libre: Este es el flujo de fluidos inmiscibles separado por una interfaz claramente definida.

Para la presente investigación se emplea un régimen gas-líquido, del tipo flujo a superficie libre.

### **2.7.2 Teoría del modelo VOF**

El modelo VOF puede modelar dos o más fluidos inmiscibles resolviendo un solo conjunto de ecuaciones de momento y rastreando la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio. Las aplicaciones típicas incluyen la predicción de la ruptura del jet, el movimiento de burbujas grandes en un líquido, el movimiento del líquido después de la rotura de una presa y el seguimiento constante o transitorio de cualquier interfaz líquido-gas. (ANSYS Inc, 2013). Para profundizar sobre las limitaciones, cálculos VOF en estado permanente y transitorio y la ecuación de fracción de volumen, se puede revisar el capítulo 16.3 (ANSYS Inc, 2013).

## **2.8 Condiciones de Frontera**

Los problemas de dinámica de fluidos y masa computacional son definidos en términos de condiciones de frontera y la condición inicial; de lo contrario la ecuación diferencial correspondiente tendrá numerosas soluciones. (Gijón-Rivera, 2016).

### **2.8.1 Condición de Frontera de entrada y salida**

De acuerdo con (Mogollón Mogollón, 2018), se deben definir las condiciones de entrada y de salida del flujo tanto del flujo másico o caudal, velocidad o de la presión, entre los más utilizados de Ansys Fluent se encuentran los siguientes:

- Entrada de presión (*Pressure Inlet*): Se emplea para definir la presión en la entrada de flujo.
- Entrada de velocidad (*Velocity Inlet*): Se emplea para definir la velocidad en la entrada de flujo.
- Entrada de flujo másico (*Mass Flow Inlet*): Describe la tasa de flujo de masa en entrada, en los flujos incompresibles, cuando la densidad es constante, la condición de frontera *velocity inlet* es equivalente a especificar flujo másico a la entrada.
- Salida de presión (*Pressure outlet*): Define la presión estática en los puntos de flujo. El uso de una condición salida de presión en vez de una condición

salida a presión atmosférica a menudo resulta en una mejor tasa de convergencia cuando en el ocurre reflujo durante la iteración.

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

Si se utiliza un modelo de turbulencia se requiere suministrar los valores de energía cinética turbulenta o TKE (del inglés *Turbulent Kinetic Energy*)  $K$  y la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta o TDR (del inglés *Turbulent Dissipation Rate*)  $\epsilon$  en la entrada. Estos valores se pueden aproximar mediante las siguientes ecuaciones.

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

*Ecuación 2-8*

$$\epsilon = C_u^{3/4} * \frac{k^{2/3}}{L}$$

*Ecuación 2-9*

$$I = 0.16 * NR^{-1/8}$$

*Ecuación 2-10*

Donde  $U$  es velocidad media,  $I$  es intensidad turbulenta ( $0.07 * L$ ) y  $C_u^{3/4}$  es una constante empírica 0.1643 y  $L$  es la longitud de referencia, para la presente investigación se considera  $NR$  (Número de Reynolds)

### **2.8.2 Condición de frontera en las paredes**

Esta condición toma el nombre de no deslizamiento y de no penetración, donde los componentes tangenciales y normales a la velocidad son nulos, respectivamente. Puesto que los flujos turbulentos, son afectados significativamente por la presencia de paredes, para que el modelo de turbulencia  $K-\epsilon$  sea válido cerca de las paredes, se requiere un tratamiento especial.

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

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

*Ecuación 2-11*

Donde  $u_\tau$  es la velocidad de fricción,  $U$  es la velocidad media en el punto,  $u^+$  y  $y^+$  variables adimensionales, y distancia normal a partir del contorno sólido y  $\mu$  es viscosidad del fluido y  $\tau_w$  esfuerzo cortante en el muro.

## **2.9 Teoría del solucionador**

ANSYS FLUENT permite elegir uno de los métodos numéricos para solucionar el flujo, basado en presión o densidad. Históricamente, el enfoque basado en la presión se desarrolló para flujo incompresibles de baja velocidad (Versteeg & Malalasekera, 2007). El campo de velocidad se obtiene a partir de las ecuaciones de cantidad de movimiento. En el enfoque de presión, campo de velocidades se usa para obtener el campo de densidad y el campo de presión se encuentra resolviendo una ecuación de corrección de presión, que se obtiene manipulando las ecuaciones de continuidad y momento.

El método de presión resolverá las ecuaciones integrales que gobiernan la conservación de la masa y el momento, bajo las técnicas basadas en el volumen de control, siguiendo los siguientes pasos:

- División del dominio en volúmenes de control discretos utilizando una malla computacional.
- Integración de las ecuaciones que gobiernan los volúmenes de control individuales para construir ecuaciones algebraicas para las variables dependientes discretas (“incógnitas”) como velocidades, presión, temperatura.

- Linealización de las ecuaciones discretizadas y solución del sistema de ecuaciones lineales resultantes para producir valores actualizados de las variables.

Para profundizar sobre las características del solucionador basado en presión se puede revisar el capítulo 18.1.1 (ANSYS Inc, 2013) y para profundizar sobre la discretización que se emplea en el solucionador basado en presión, se debe revisar el capítulo 8.4 (ANSYS Inc, 2013).

### **2.9.1 Algoritmo SIMPLE**

Patankar y Spalding, en 1972, establecieron el procedimiento de cálculo para describir un flujo parabólico en tres dimensiones. Este procedimiento se estableció posteriormente como el algoritmo SIMPLE, método semi-implícito para vincular las ecuaciones de presión, en problemas de transferencia de calor y flujos tridimensionales. De acuerdo con (Gijón-Rivera, 2016) el algoritmo SIMPLE se resume en los siguientes pasos.

- Paso 1: Descomponer el término fuente de las ecuaciones de momentum, de la forma que la presión aparezca explícitamente.
- Paso 2: Las ecuaciones de conservación de momentum pueden ser resueltas si el campo de presión es conocido o estimado.
- Paso 3: Se propone que la distribución de presión correcta " $P$ " se obtenga partir de una corrección de presión " $P'$ ".
- Paso 4: Este es el último paso solo falta determinar la información adecuada para la corrección de presión " $P'$ ". Esta información se obtiene a partir de la ecuación de continuidad, la cual se integra sobre un volumen de control o VC de la malla principal o centrada.

### **2.10 Informe de datos**

ANSYS FLUENT proporciona herramientas para calcular y reportar cantidades integrales en superficies y fronteras. Estas herramientas le permiten encontrar la tasa de flujo másico y la tasa de transferencia de calor a través de fronteras, las fuerzas y momentos en las fronteras, y el área, integral, tasa de flujo, promedio y promedio másico (entre otras cantidades) en una superficie o en un volumen. Además, puede imprimir

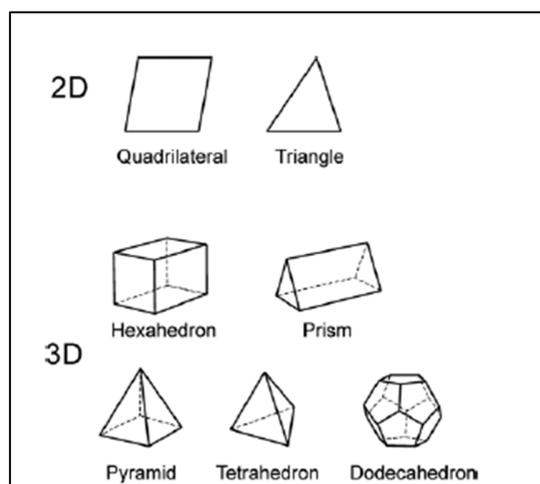
histogramas de datos geométricos y de solución, establecer valores de referencia para el cálculo de coeficientes adimensionales y calcular áreas de superficie proyectadas. También puede imprimir o guardar un informe resumido de los modelos, las condiciones de frontera y la configuración del solucionador (ANSYS Inc, 2013).

## 2.11 Tipos de Mallas y Calidad de la Malla

De acuerdo con (Fernández Oro, 2012) la generación de la malla es la parte más importante en la preparación de un modelo para simulación en CFD. Toda malla empleada en el método de volúmenes finitos discretiza el dominio físico en un número finito de celdas, siendo la unidad fundamental del mallado. Cada celda está asociada a un centroide y también está limitada por un número de superficies o caras que a su vez están ancladas a una serie de nodos o vértices.

ANSYS FLUENT para mallas 3D, puede usar celdas hexaédricas, tetraédricas, piramidales, en cuña y poliédricas. Cada uno de estos tipos de celdas son aceptables tanto las mallas estructuradas de bloque único como las de bloques múltiples, así como las mallas híbridas que contienen celdas cuadriláteras y triangulares o celdas hexaédricas, tetraédricas, piramidales y de cuña; en la siguiente ilustración se presentan los anteriores tipos.

*Ilustración 2-1 Elementos de Mallado en 2D y 3D*



Fuente: Tomado de (Bengt, y otros, Computational Fluid Dynamic for Engineers, 2012)

En cuanto a la calidad de la malla, esta juega un papel importante en la precisión y estabilidad del cálculo numérico. Los atributos asociados con la calidad de la malla son distribución de nodo, suavidad o *skewness* e inclinación. Independientemente del tipo de malla utilizado en el dominio se debe verificar la calidad de la malla, dependiendo del tipo de malla se evalúan diferentes criterios de calidad. Para profundizar sobre el manejo de la calidad de malla se puede revisar el capítulo 6.2.2 de (ANSYS, 2013).

## **2.12 Drenaje Urbano en el mundo**

En las zonas urbanas, se tiene la necesidad de desalojar el agua de lluvia de tal modo que se mitiguen los riesgos para los habitantes, las viviendas, los comercios, las industrias y otras áreas que afectan a la población. Sin embargo, la construcción de edificios, casas, pavimentación de calles, estacionamiento y otras construcciones modifican el entorno natural y generan superficies poco permeables; aumentando los volúmenes de escurrimiento. El drenaje pluvial urbano, tiene como función la captación y desalojo de las aguas de lluvia hasta sitios donde se descarguen en los cuerpos de agua, de tal forma que se reduzcan los daños e inconvenientes a los habitantes donde llegan o cruzan los escurrimientos o que puedan afectar a otras cercanas (Conagua, 2016).

En la bibliografía técnica y en las normativas se indica que para la captación de las aguas lluvias se pueden emplear sumideros de rejilla, ventana, combinados y ranurados; los tres primeros están considerados como drenaje puntual. Es importante aclarar que las estructuras de drenaje tienen diferentes nombres; en España se conocen como imbornales, en México como bocas de tormenta y en Colombia se conocen como sumideros.

A nivel mundial se revisaron las normas y la bibliografía técnica donde se presentan las ecuaciones con las cuales se determina la captación de las estructuras de drenaje puntual en los países Australia, España, Reino Unido, Estados Unidos, México y Colombia.

En lo referente a Australia (Austroads, 2013) se cuenta con el documento *Guide to Road Design Part 5<sup>a</sup>*, donde se incluye la metodología para definir el drenaje y las ecuaciones que se deben aplicar para determinar el espaciamiento entre sumideros, y la capacidad de captación. Considerando que la presente investigación se enfoca en el drenaje puntual de ventana y el drenaje lineal, se enfocará más en estos temas. La

ubicación de las estructuras de captación obedece a la infraestructura de drenaje existente, ubicación de otra infraestructura, puentes y otras estructuras, usuarios de la vía no motorizados, consideraciones estructurales, consideraciones de seguridad. En cuanto a los elementos de drenaje se dividen en elementos de drenaje con ranura (entradas laterales, entradas de rejilla y entradas combinadas). Otros tipos de entradas incluyen drenaje de zanja enrejado, drenaje de acera y entradas ranuradas. En la mayoría de los casos las entradas ranuradas son productos patentados.

En España de acuerdo con (CEDEX) Guía Teórica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano en el capítulo 4 se presentan los componentes de captación superficial de la escorrentía, el cual consta de (imbornales y canales y rejillas de desagüe).

En relación con el Reino Unido (*Bridge, Design Manual for Roads and*, 2020) se cuenta con el documento CG 501 *Design of highway drainage system*, donde se establecen los requisitos y recomendaciones sobre el diseño de drenaje para las Autopistas del Reino Unido y carreteras troncales de uso general. El drenaje de carreteras se puede dividir en drenaje superficial y subterráneo. Se logra mediante la recolección de aguas superficial del pavimento a través de drenaje formal o informal.

Para determinar cuáles son las ecuaciones para determinar el caudal captado y cuáles son las estructuras empleadas para manejar las aguas lluvias en Estados Unidos, se realiza una revisión al capítulo 4 Drenaje de Pavimentos (*Pavement Drainage*) del Manual de Diseño de Drenaje Urbano (*Urban Drainage Design Manual*), el cual especifica que la captación de las aguas lluvias se puede realizar mediante las siguientes estructuras entrada de rejilla (*grate inlets*), entradas que se abren en la acera (*curb-opening inlets*), entradas ranuradas (*slotted inlets*) y entradas combinadas (*combination inlets*).

Respecto a Latinoamérica en México se cuenta con el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – Drenaje Pluvial Urbano – Tomo 19; el cual permite identificar con que término se conocen las estructuras de captación de aguas lluvias y cuales se emplean. Vale la pena mencionar que los sumideros en México son conocidos como bocas de tormenta o coladeras, emplean diferentes tipos de bocas de tormenta entre las cuales se encuentran: la coladera de piso (sumidero de rejilla), la coladera de banqueta deprimida (sumidero de ventana), la coladera de piso y banqueta (sumidero

combinado) y la coladera de ranura o longitudinal (sumideros ranurados). En cuanto a las ecuaciones que se emplean para determinar el caudal interceptado se tienen las ecuaciones presentadas en los manuales del AASHTO (*Amerian Association of State Highway and Transportation*).

Ahora bien, en Colombia se cuenta con el RAS-2016, el cual fue modificado mediante la Resolución 330 de 2017. En este país, las estructuras de captación son conocidas como sumideros y se dividen en sumideros de rejilla, sumideros de ventana y sumidero transversal. En cuanto al cálculo de los caudales, las ciudades principales cuentan con una normativa en la cual se abarca más a fondo el tema.

Es de resaltar que, en la ciudad de Bogotá, gracias a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá se cuenta con la norma de sumideros NS-047 V5.0, según la cual las estructuras de drenaje o tipos de sumideros que se pueden emplear en la ciudad son clasificado en: sumideros de rejilla, sumideros de ventana, sumideros combinados, sistema de drenaje prefabricado bordillo drenante, cuneta especial en G y los canales monolíticos. En cuanto a las ecuaciones que se emplean para determinar el caudal captado se encuentran basadas en lo expuesto en (FHWA-NHI-10-009, 2009).

De la anterior revisión bibliográfica se determinó que las ecuaciones utilizadas para determinar la capacidad de captación de las estructuras dependen de la ubicación de los sumideros, ya que se pueden ubicar en pendiente longitudinal continua y puntos bajos o depresiones.

### **2.12.1 Metodología para calcular el drenaje puntual urbano**

A continuación, se profundizará en las ecuaciones mediante las cuales se determina el caudal captado por los sumideros de ventana. En (Díaz, 2013) se presenta un amplio análisis de los sumideros de ventana. Es de aclarar que el actual trabajo no tiene relación con los sumideros de rejilla, sin embargo, para profundizar sobre este tema se recomienda revisar la referencia bibliográfica.

Para definir la eficiencia de captación en (Díaz, 2013) y (Guo, 2006), se establece que la eficiencia de captación de una estructura de recolección de aguas lluvias se puede definir a partir del caudal de calle o caudal de diseño y el caudal captado por el elemento. A continuación, se presenta la ecuación.

$$E = \frac{Q_{\text{captado}}}{Q_{\text{diseño}}} = \frac{Q_{c_i}}{Q_d - \sum Q_{c_{i-1}}}$$

*Ecuación 2-12*

Donde E es eficiencia de captación,  $Q_{c_i}$  es caudal captado por el elemento,  $Q_{c_{i-1}}$  es la sumatoria de los caudales captados por los anteriores elementos y  $Q_d$  es el caudal de la calle o caudal de diseño.

Los métodos para definir el caudal captado son diferentes si el sumidero lateral o de ventana se encuentra ubicado en una pendiente continua o en hundimiento. A continuación, se presentan las expresiones con las que se puede realizar el cálculo para sumideros ubicados en pendiente continua, ya que el enfoque principal de esta investigación es definir cómo se puede determinar el caudal captado por un orificio en esta condición.

$$L_T = K_U * Q^{0.42} * S_L^{0.30} * \left( \frac{1}{n * S_X} \right)^{0.6}$$

*Ecuación 2-13*

Donde  $K_U$  es 0.817,  $L_T$  (m) es la longitud de la abertura de la acera,  $S_L$  (m/m) es la pendiente longitudinal,  $S_X$  (m/m) es la pendiente transversal y  $Q$  ( $m^3/s$ ) es el caudal de diseño.

La eficiencia de las entradas de apertura de acera más cortas que la longitud requerida para la interceptación esta dado por la siguiente ecuación.

$$E = 1 - \left( 1 - \frac{L_R}{L_T} \right)^{1.8}$$

*Ecuación 2-14*

Donde E (adimensional) es la eficiencia del sumidero en apertura de bordillo,  $L_R$  (m) es la longitud de apertura real y  $L_T$  (m) es la longitud para captar el 100% del caudal de diseño.

Para determinar la capacidad de interceptación del sumidero lateral o sumidero de ventana se debe emplear la siguiente expresión.

$$Q_A = Q_D * E$$

*Ecuación 2-15*

Donde E (adimensional) es la eficiencia del sumidero,  $Q_A$  (m<sup>3</sup>/s) es el caudal interceptado por el sumidero y  $Q_D$  (m<sup>3</sup>/s) es el caudal de diseño.

### **3. Metodología**

En el capítulo relacionado a continuación se describe la metodología definida para definir el caudal captado por cada uno de los orificios empleando la condición de flujo no permanente, considerando lo sugerido por Ansys Fluent, para realizar un buen modelo CFD.

#### **3.1 Metodología para la modelación en flujo permanente**

La metodología por seguir consta de los siguientes pasos:

- Definir las variables a modificar y las variables a evaluar.
- Definir la física del problema.
- Definir las dimensiones de la plataforma.
- Definir las variables (caudales, pendientes longitudinales y dimensiones de la estructura de captación).
- Determinar el mallado y la calidad de malla.
- Realizar un análisis de sensibilidad de la malla.
- Configurar VOF.
- Configurar el modelo de turbulencia.
- Definir las condiciones de frontera.
- Definir y configurar el método de solución.
- Configurar los controles de la solución.
- Configurar el monitor residual.
- Definir la solución inicial.
- Calibrar el modelo con datos de análisis físico.

### 3.2 Definición de las metas de modelación

Los resultados y variables de interés que se requieren conocer son:

- Definir las condiciones del modelo para obtener resultados similares a los resultados obtenidos en la modelación física y a partir de estos datos realizar unas modificaciones a la geometría inicial.
- Modelar la superficie libre de agua en la plataforma de ensayos, variando pendientes longitudinales y caudales, y revisar cual es el caudal captado por los orificios.
- Identificar la eficiencia hidráulica con la que el caudal es captado por los orificios y definir cuál es el porcentaje de caudal remanente después de cada orificio y si estos son similares a los determinados con la ecuación de sumideros.

*Tabla 3-1 Metodología para realizar la modelación hidráulica*

Resumen de la metodología utilizada para la modelación	
	Recopilación de la información básica de CFD
	Comprensión de conceptos de la modelación CFD
	Estudio de los temas de la dinámica de fluidos
Fase 1 Recolección de información sobre el problema de estudio, antecedentes, marco teórico, verificación del dominio computacional y teoría de la mecánica de fluidos computacional.	Investigación del modelo comercial Ansys
	Estudio y análisis de los conceptos del modelo VOF
	Revisión de literatura de los modelos de turbulencia
	Recolección de información sobre el tema de discretización
	Revisión de la teoría de volúmenes finitos
Fase 2 Preprocesamiento Modelación numérica de las estructuras	Análisis de la información detallada de la estructura
	Digitalización de la geometría

---

Resumen de la metodología utilizada para la modelación

---

	Verificación de la geometría CAD – Validación de la geometría
	Elaboración del mallado en Ansys, refinación y sensibilidad
	Validación del mallado por medio de la calidad de malla o <i>mesh quality</i>
	Configuración del <i>solver</i> , estado del flujo, multifase y modelos de turbulencia
	Definición de las condiciones de contorno
	Aplicación de los métodos de solución
	Ejecución de la modelación
	Análisis de los resultados mediante herramienta de visualización
	Control de calidad de los resultados
Fase 3 Verificación de resultados	Verificación de convergencia (residuos y conservación de la masa)
	Análisis de vectores de velocidad, línea de corriente y volumen de fracción
	Control de resultados cuantitativos mediante gráficos
	Control de resultados mediante reportes
Fase 4 Validación de la modelación	Validación de los resultados mediante la comparación con los resultados obtenidos de las ecuaciones
Fase 5 Análisis de resultados y recomendaciones	Discusión de los resultados obtenidos
	Conclusiones acerca de la modelación matemática

---

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3 Identificación del dominio

Inicialmente se emplea la geometría de la modelación física realizada por la empresa internacional ACO para establecer la captación de los orificios cuando se varía el caudal y la pendiente transversal. A continuación, se presentan algunas ilustraciones del modelo realizado en laboratorio.

*Ilustración 3-1 Plataforma empleada en la modelación física*



Fuente: Tomado de (Wearing, 2015)

Debido a que el presente estudio busca determinar la eficiencia de captación de los bordillos drenantes en condiciones reales, y dado que la geometría modelada en el laboratorio no representa esta condición, se deben realizar algunos ajustes a la geometría; en la siguiente tabla se presenta la descripción del modelo.

*Tabla 3-2 Variables del dominio*

---

Variable	Descripción
Dimensiones de la plataforma	Se generan tres plataformas, la primera busca representar el modelo realizado en laboratorio, la segunda busca identificar como sería el comportamiento de la plataforma cambiando las condiciones de contorno de entrada y la tercera busca representar las condiciones reales de

---

Variable	Descripción
	operación de los bordillos drenantes.
Dimensiones del bordillo drenante	En la modelación física se empleó el bordillo drenante de referencia KerbDrain 305, este mismo se emplea en el presente estudio
Pendiente transversal de la vía	La plataforma que representa el modelo realizado del laboratorio presenta una pendiente transversal del 5.00%, la plataforma a la que se le cambian las condiciones de frontera presenta una pendiente transversal del 5.00% y el modelo que representa las condiciones reales de operación presenta una pendiente transversal del 2.00%.
Pendiente longitudinal de la Vía	La plataforma del modelo físico empleo una pendiente longitudinal del 0.10%, sin embargo. el manual de diseño de carreteras establece que la pendiente mínima de diseño de una vía es de 0.30% y máxima del 10%, a partir de lo anterior se definen las siguientes pendientes longitudinales 0.10, 0.25, 0.30, 1.00, 2.50, 5.0 y 10.00, para evaluar el comportamiento de los bordillos drenantes.
Caudales	Como se indicó anteriormente en el modelo físico se evaluaron caudales entre un rango de 0 a 4 l/s, sin embargo, como el presente estudio busca generar un ábaco que a partir del caudal se pueda identificar la eficiencia hidráulica, se toman los siguientes caudales 2, 5, 9.983, 15, 25 y 50

Fuente: Elaboración Propia

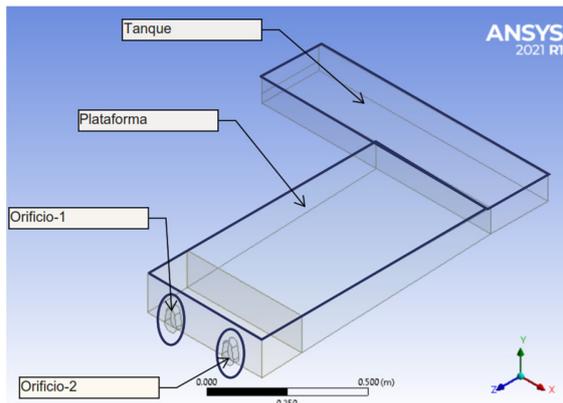
De esta manera en la presente investigación se tienen tres geometrías a evaluar. La primera, de ahora en adelante llamada G1, es una representación del montaje del laboratorio. Con esta geometría se busca calibrar el modelo de turbulencia, tratamiento de la pared y rugosidad absoluta. La segunda geometría, de ahora en adelante llamada G2, tiene las mismas condiciones de contorno, pero se cambia la entrada de caudal. La tercera geometría 3, de ahora en adelante será llamada G3, representa las condiciones reales de operación.

### 3.1 Creación del dominio

Para crear el dominio a partir de las mediciones de la geometría de la plataforma, orificios y bordillos, se empleó la herramienta CAD AutoCAD. Una vez realizado el dibujo se debe exportar como (.iges) al aplicativo Design Modeler. En dicho aplicativo se cambia

el nombre a los elementos, se emplean las distintas herramientas para dividir el sólido en varios elementos y poder refinar el mallado, donde se requiere mayor precisión en los gradientes hidráulicos.

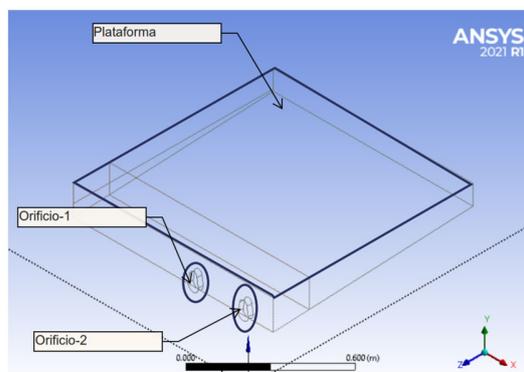
*Ilustración 3-2 Geometría No 1*



La geometría se divide en dos partes (tanque y plataforma). La plataforma se divide en dos para generar un mayor refinamiento cerca de donde se encuentran los bordillos drenantes.

Fuente: Elaboración Propia

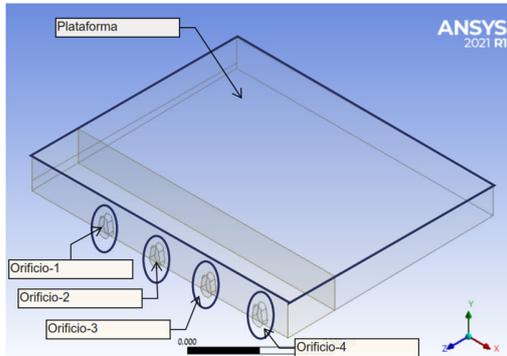
*Ilustración 3-3 Geometría No 2*



La geometría modificada se encuentra conformada por la plataforma y los orificios. La plataforma se divide en dos, con el fin de generar un refinamiento de la malla cerca a los orificios drenantes

Fuente: Elaboración Propia

*Ilustración 3-4 Geometría No 3*



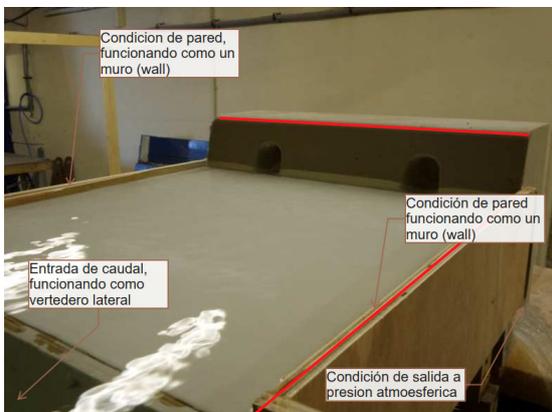
La geometría se encuentra conformada por la plataforma y cuatro orificios. La plataforma se divide en dos con el fin de generar un refinamiento mayor cerca a los orificios y se aumenta a 4 la cantidad de orificios.

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2 Definir la física del problema

Respecto a la física del problema, se parte de la modelación física realizada, con las siguientes condiciones de contorno.

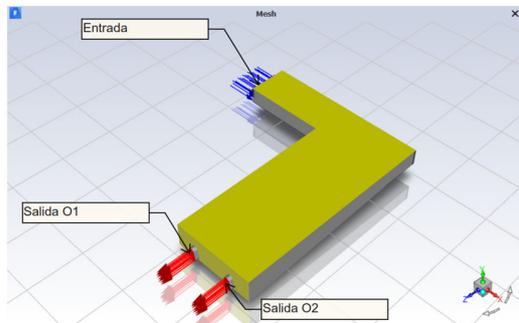
*Ilustración 3-5 Física del problema en laboratorio*



El modelo de laboratorio presentaba un ingreso de caudal lateral. Las únicas condiciones de salida eran por los orificios por lo que demás actuaba como paredes.

Fuente: Elaboración Propia

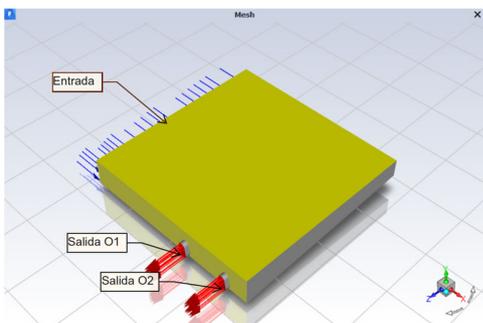
*Ilustración 3-6 Física del problema para la Geometría No 1*



El modelo identificado como G1, representa el modelo ensayado en laboratorio. Para generar la entrada lateral se genera un canal paralelo a la plataforma de ensayos y las caras de los dos orificios se convierten en condiciones de salida, lo demás se toma como paredes y la cara superior de todo el modelo se toma como una condición de simetría.

Fuente: Elaboración Propia

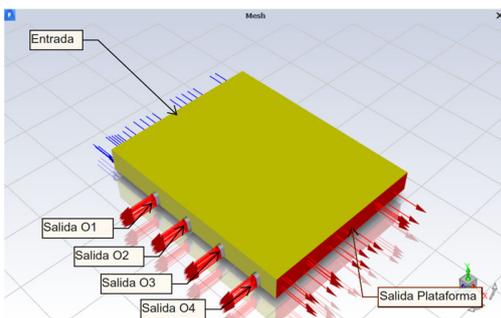
*Ilustración 3-7 Física del problema para la Geometría No 2*



El modelo identificado como G2, presenta una condición de contorno de entrada en sentido de la pendiente longitudinal. Las condiciones de contorno de salida son los orificios y los demás operan como paredes, excepto la parte superior de la plataforma que actúa como una condición de simetría.

Fuente: Elaboración Propia

*Ilustración 3-8 Física del problema para la Geometría No 3*



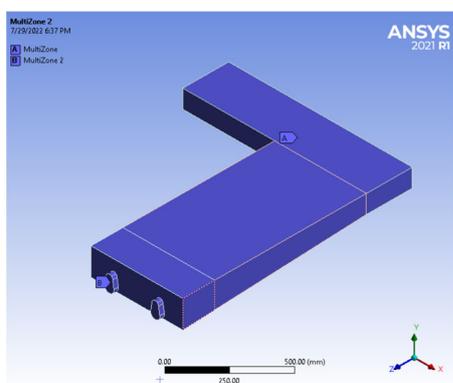
El modelo identificado como G3, presenta una condición de contorno de entrada en sentido de la pendiente longitudinal. El final de la plataforma y los orificios funcionan como condición de salida, los demás elementos funcionan como paredes, excepto la parte superior que funciona con una condición de simetría.

Fuente: Elaboración Propia

### 3.3 Diseño y creación de la malla

Para crear la malla 3D se utilizó la herramienta de la plataforma de ANSYS, a partir de lo determinado en la geometría se identificaron cuatro cuerpos (tanque, plataforma, orificios y bordillo), realizando diferentes análisis se identificó que una de las maneras de mejorar la calidad de la malla es dividir los cuerpos en geometrías más sencillas, rectángulos y círculos. A continuación, se presentan los pasos para generar la creación de la malla, estos son los mismos pasos para todas las geometrías.

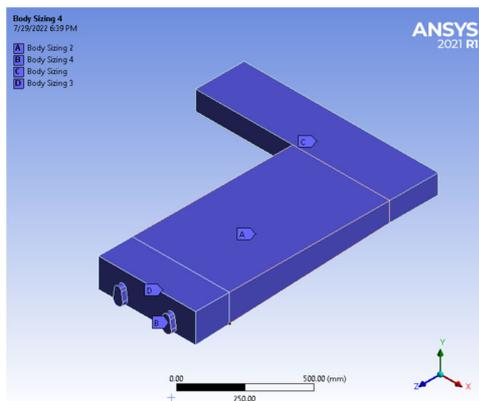
*Ilustración 3-9 Definir Métodos de Mallado Geometría No 1, Geometría No 2 y Geometría No 3*



En primer lugar, se define el método de mallado como MultiZone y el Mapped Mesh Type como Hexa, lo demás se deja con la configuración por default.

Fuente: Elaboración Propia

*Ilustración 3-10 Definir Zonas de Mallado Geometría No 1, Geometría No 2 y Geometría No 3*



Lo segundo es definir el tamaño de los diferentes elementos.

Body Sizing: Tanque

Body Sizing 2: Plataforma 1

Body Sizing 3: Plataforma 2

Body Sizing 4: Orificios

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4 Configuración del modelo solver

A continuación, se presenta una descripción de la configuración preliminar empleada en la solución de las modelaciones en 3D, flujo no permanente.

*Tabla 3-3 Configuración General del Modelo*

<b>Configuración General</b>	
<b>Mesh (malla)</b>	
Escala	N/A
<b>Solver (Solucionador)</b>	
Tipo	Pressure-Based
Tiempo	Transient
Formulación de la velocidad	Absolute
<b>Gravity (Gravedad)</b>	
Aceleración de la gravedad	Aplica
Dirección	Negativa
X	0
Y	-9.81
Z	0

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-4 Configuración del Modelo de Multifase*

<b>Multiphase Model</b>
-------------------------

<b>Multiphase Model</b>	
<b>Model Multiphase (Modelo Multifase)</b>	
Model	Volume of Fluid
<b>Coupled Level Set + VOF</b>	
Coupled Level Set + VOF	No aplica
<b>Volume Fraction Parameters</b>	
Formulation	Implicit
Volume Fraction Cutoff	1e-06
<b>Body force formulation</b>	
Implicit Body Force	Aplica
<b>Number of Eulerian Phase</b>	
Number of Eulerian Phase	2
<b>Vof Sub-Models</b>	
Vof Sub-Models	No aplica
<b>Interface Modeling</b>	
Type	Variable

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-5 Configuración de la pestaña "Phases"*

<b>Phases</b>	
Primary Phase	Aire
Secondary Phase	Agua

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-6 Configuración de la pestaña “Phase Interaction”*

<b>Phase Interaction</b>	
Air-Water	Ninguna

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-7 Configuración del Modelo de Turbulencia*

<b>Configuración del modelo de turbulencia</b>	
<b>Viscous Model</b>	
Modelo	K-epsilon (2 eqn)
k-epsilon	Variable
<b>Near-Wall Treatment</b>	
Near-Wall Treatment	Scalable Wall Functions
<b>Options</b>	
Options	Curvature Correction
<b>Model Constants</b>	
Cmu	0.0845
C1-Epsilon	1.42
C2-Epsilonr	1.68
<b>User-Defined Functions</b>	
Turbulent Viscosity	None

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-8 Configuración de los materiales*

<b>Configuración de materiales</b>
------------------------------------

<b>Configuración de materiales</b>	
Name	Water-Liquid
Material Type	Fluid
Density (kg/m3)	998.2
Viscosity (kg/m-s)	0.001003
Name	Air
Material Type	Fluid
Density (kg/m3)	1.225
Viscosity (kg/m-s)	1.7894 e-05

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-9 Configuración condición de contorno "Inlet"*

<b>Velocity Inlet – Condición de contorno de entrada</b>	
Velocity Specification Method	Magnitud, Normal to Boundary
Reference Frame	Absolute
Velocity Magnitud (m/s)	Variable
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pa)	0
<b>Turbulence</b>	
Specification Method	K and Epsilon
Turbulent Intensity (%)	Variable
Turbulent Viscosity Ratio	Variable

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-10 Configuración condición de contorno “outlet”*

<b>Pressure Outlet – Condición de contorno de salida</b>	
Gauge Pressure (pa)	0
Pressure Profile Multiplier	1
Backflow Direction Specification Method	From Neighboring Cell
Backflow Pressure Specification	Total Pressure
<b>Turbulence</b>	
Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent Intensity (%)	5
Turbulent Viscosity Ratio	10

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-11 Configuración de condición de contorno “Wall”*

<b>Wall – Condición de contorno de pared</b>	
<b>Wall Motion</b>	0
Wall Motion	Stationary Wall
<b>Shear Condition</b>	
Shear Condition	No Slip
<b>Wall Roughness</b>	
Roughness Models	Standard
<b>Saind – Grain Roughness</b>	
Roughness Height (m)	Variable

<b>Wall – Condición de contorno de pared</b>	
Roughness Constant	0.5

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-12 Configuración del método de solución*

<b>Solution-Methods</b>	
<b>Pressure-Velocity Coupling</b>	0
Scheme	SIMPLE
<b>Spatial Discretization</b>	
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	PRESTO!
Momentum	Second Order Upwind
Volume Fraction	Compressive
Turbulent Kinetic Energy	Variable
Turbulent Dissipation Rate	Variable
<b>Transient Formulation</b>	
Transient Formulation	Variable

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-13 Configuración de los factores de relajación*

<b>Solution-Controls</b>
<b>Under-Relaxation Factors</b>

<b>Solution-Controls</b>	
Pressure	0.30
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.25
Volume Fraction	0.4
Turbulent Kinetic Energy	0.45
Turbulent Dissipation Rate	0.45
Turbulent Viscosity	0.6

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-14 Configuración de los valores de convergencia*

<b>Residuals Monitors</b>	
Continuity	0.001
x-velocity	0.001
y-velocity	0.001
z-velocity	0.001
K	0.001
Epsilon	0.001
Vf-water	0.001

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-15 Configuración de las variables de inicio*

<b>Solution Initialization</b>	
Initialization Method	Standard Initialization
Compute	Inlet
Reference Frame	Relative to Cell Zone
<b>Initial Values</b>	
Gauge Pressure (pascal)	0
x-velocity (m/s)	0
y-velocity (m/s)	0
z-velocity (m/s)	0
Turbulent Kinetic Energy (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	Standard
Turbulent Dissipation Rate	Standard
Water Volume Fraction	0

Fuente: Elaboración Propia

*Tabla 3-16 Configuración de los calculos*

<b>Run Calculation</b>	
Type	Fixed
Method	User-Specified
<b>Parameters</b>	
Number of Time Steps	Variable
Time Step Size	Variable
Max Iterations/Time Step	15

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5 Calibración del Modelo

Para generar la calibración del modelo se emplea un modelo matemático SIMPLE y un modelo de turbulencia K- $\epsilon$ , con las siguientes configuraciones.

- Pressure: PRESTO.
- Momentum: Second Order Upwind.
- Volume Fraction: Compressive.
- Turbulent Kinetic Energy: First Order Upwind.
- Turbulent Dissipation Rate: First Order Upwind.
- Transient Formulation: First Order Implicit.
- Number of time step: 1200.
- Time Step Size: 0.05 s.
- Max Iterations/Time Step: 15.

Con la anterior configuración se procede a revisar como es el comportamiento del modelo cuando se realiza la variación de diferentes parámetros.

*Tabla 3-17 Sensibilización Multiphase Model Interface Modelling, K- $\epsilon$  SubModel, Transient Formulation, TKE y TDR*

	Modelo	Laboratorio	CFD Seleccionado	CFD	Error CFD	Error Experimental
Multiphase Model Interface Modelling	G1-SHARP	38	48.393	50.366	4.14%	32.54%
	G1- SHARP/DISPERSED	38	48.393	49.967	3.25%	31.49%
	G1-DISPERSED	38	48.393	51.283	5.97%	34.96%
K-Epsilon Submodelo	G1-STANDARD	3b8	48.393	50.564	4.49%	33.06%
	G1-RNG	38	48.393	50.303	3.95%	32.38%
	G1-REALIZABLE	38	48.393	50.882	5.14%	33.90%

	Modelo	Laboratorio	CFD Seleccionado	CFD	Error CFD	Error Experimental
Transient Formulation	G1-FOI	38	48.393	50.303	3.95%	32.38%
	G1-SOI	38	48.393	49.646	2.59%	30.65%
	G1-BOI	38	48.393	49.188	1.64%	29.44%
TKE (Turbulent Kinetic Energy) y TDR (Turbulent Dissipation Rate)	G1-FOU	38	48.393	50.685	4.74%	33.38%
	G1-SOU	38	48.393	48.578	0.38%	27.84%
	G1-QUICK	38	48.393	48.578	0.38%	27.84%
	G1-TOMUSCL	38	48.393	49.059	1.38%	29.10%

Fuente: Elaboración Propia

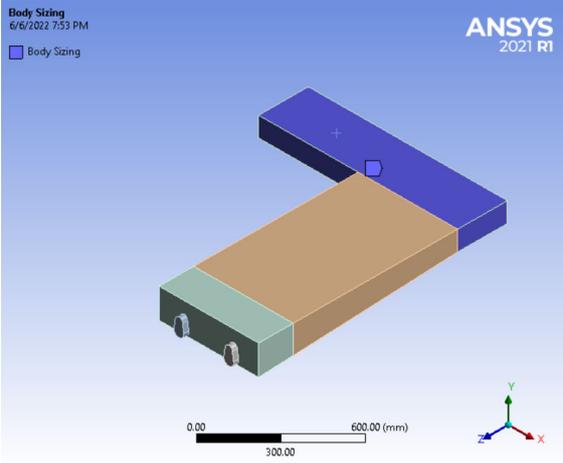
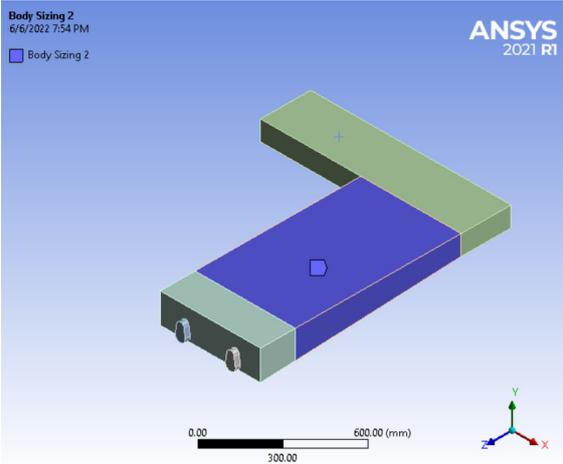
Del anterior análisis se tiene que G1-FOI es First Order Implicit, G1-SOI es Second Order Upwind, G1-BOI es Bounded Second Order Implicit, G1-FOU es First Order Implicit, G1-SOU Second Order Upwind y G1-TOMUSCL es Third Order MUSCL.

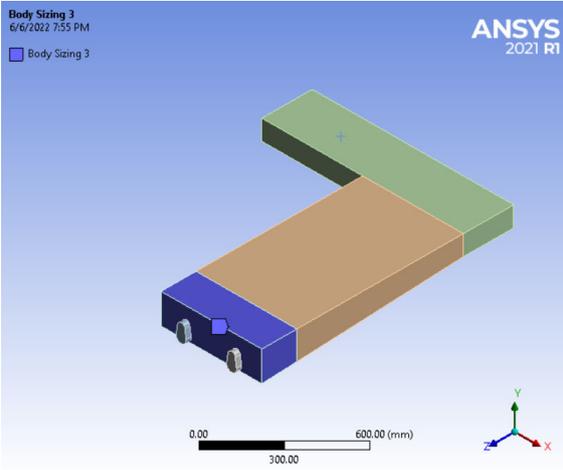
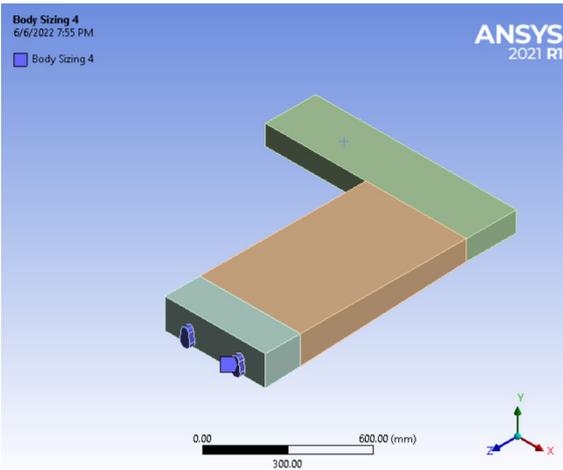
De los anteriores análisis se encontró que la configuración que presenta el menor error es la siguiente:

- Multiphase Model Interface Modelling es Sharp.
- K-Epsilon submodel es RNG.
- Transient Formulation es BOI (Bounded Second Order Implicit).
- Turbulent Kinetic Energy es SOU (Second Order Upwind).
- Turbulent Dissipation Rate es SOU (Second Order Upwind).

A partir de la anterior configuración, se procede a realizar el análisis de malla fina, media y gruesa; considerando un aumento del tamaño del elemento a una razón del 30%, como se evidencia a continuación.

Tabla 3-18 Sensibilización Malla Fina, Media y Gruesa

Elemento	M1 (Fina)	M2 (Media)	M3 (Gruesa)
	14.7	21	27.3
	15.4	22	28.6

Elemento	M1 (Fina)	M2 (Media)	M3 (Gruesa)
	7	10	13
	2.1	3.0	3.9
Número de celdas	787873	283129	146027
Ortogonalidad	0.89	0.90	0.86

Fuente: Elaboración Propia

De la anterior configuración se obtuvieron los siguientes resultados.

*Tabla 3-19 Resultados Sensibilización de la Malla*

Malla	Profundidad experimental	CFD Seleccionado	Profundidad CFD	Error CFD	Error Experimental
-------	--------------------------	------------------	-----------------	-----------	--------------------

G1-FINA	38	48.393	50.035	3.39%	31.67
G1-MEDIA	38	48.393	48.578	0.38%	27.84
G1-GRUESA	38	48.393	49.533	2.36%	30.35

Fuente: Elaboración Propia

Considerando que el menor error se presenta cuando se configura una malla de tamaño media, se procede a realizar la sensibilización del time step, obteniendo los siguientes resultados.

*Tabla 3-20 Sensibilización del paso del tiempo*

<b>Variables</b>	<b>G1-S1</b>	<b>G1-S2</b>	<b>G1-S3</b>	<b>G1-S4</b>	<b>G1-S5</b>	<b>G1-S6</b>
NTS	6000	2000	1200	857.14	666.67	600
TSS	0.01	0.03	0.05	0.07	0.09	0.11
Tiempo	60 s					
Pro exp	38 mm					
CFD Seleccionado	48.393	48.393	48.393	48.393	48.393	48.393
Profundidad CFD-O1	51.147	50.741	50.685	48.578	49.159	49.724
Error CFD	5.69%	4.85%	4.74%	0.38%	1.58%	2.75%
Error Experimental	34.60	33.53	33.38	27.84	29.37	30.85

Fuente: Elaboración Propia

Una vez que se realiza el análisis de sensibilidad del time step, se procede a realizar la sensibilización de los parámetros de rugosidad absoluta, tratamiento de la pared, variación de K-E y condición de frontera de salida.

*Tabla 3-21 Sensibilización de la Variación de la Rugosidad, Tratamiento de la Pared, BC-Inlet y BC Outlet.*

	<b>Modelo</b>	<b>Laboratorio</b>	<b>CFD Seleccionado</b>	<b>CFD</b>	<b>Error CFD</b>	<b>Error Experimental</b>
Variación Rugosidad	G1-R1 (0.00018)	38	48.393	48.949	1.15%	28.81
	G1-R2 (0.00036)	38	48.393	51.356	6.12%	35.15
	G1-R3 (0.00060)	38	48.393	49.994	3.31%	31.56
Tratamiento de la pared	G1-StWF	38	48.393	48.393	0.00%	27.5
	G1-ScWF	38	48.393	48.949	1.15%	28.81
	G1-No-EWF	38	48.393	49.782	2.87%	31.01
	G1-EnWT	38	48.393	48.648	0.53%	28.02
BC-Inlet	G1-K-Epsilon	38	48.393	48.393	0.00%	27.35
	G1-lyLs	38	48.393	49.994	3.31%	31.56
BC-Outlet	G1-BC-O (NeighboringCell)	38	48.393	48.393	0.00%	27.35
	G1-BC-O (NormalBoundary)	38	48.393	48.393	0.00%	27.35

Fuente: Elaboración Propia

Del anterior cuadro es importante saber que G1-R1 representa un coeficiente de Manning de 0.011, G1-R2, representa un coeficiente de Manning de 0.013, G1-R3, representa un coeficiente de Manning de 0.015.

Así entonces se define la siguiente configuración a emplear para los demás modelos.

- Multiphase Model Interface Modelling es SHARP
- K-Epsilon Submodelo es RNG
- Transient Formulation es BOI (Bounded Order Implicit)

- Turbulent Kinetic Energy es SOU (Second Order Upwind)
- Turbulent Dissipation Rate es SOU (Second Order Upwind)
- Mesh es Media
- Time Step es 0.07
- Rugosidad absoluta es 0.00018
- Tratamiento de la pared StWF (Standard Wall Function)
- Condición de contorno turbulencia a la entrada K and Epsilon
- Condición de contorno de salida es Neighboring Cell

Como es necesario comprobar como es el comportamiento del modelo cuando se varían las condiciones de contorno se configura la geometría con las anteriores características y a continuación se presentan los resultados obtenidos.

*Tabla 3-22 Comparación modelo de validación vs modelo modificado*

<b>Variables</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>
Rugosidad absoluta	0.18 mm	0.18 mm
Pendiente	0.10 %	0.10 %
Velocidad	0.2323	0.0606 m/s
Área	0.00929	0.035617 m <sup>2</sup>
Caudal entrada	2.159 l/s	2.160 l/s
Caudal salida - O1	0.951 l/s	1.079 l/s
Caudal salida - O2	1.206 l/s	1.080 l/s
Profundidad experimental	38 mm	38 mm
Profundidad CFD - O1	48.44 mm	52.88 mm
Profundidad CFD - O2	58.34 mm	53.087

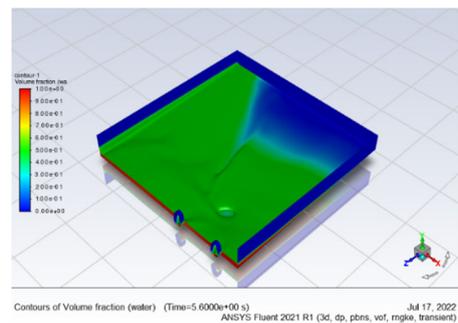
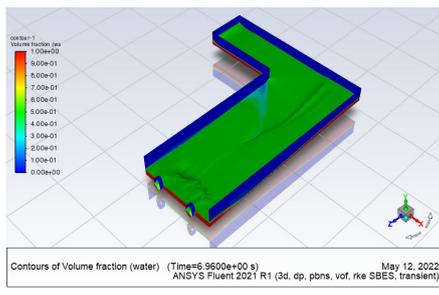
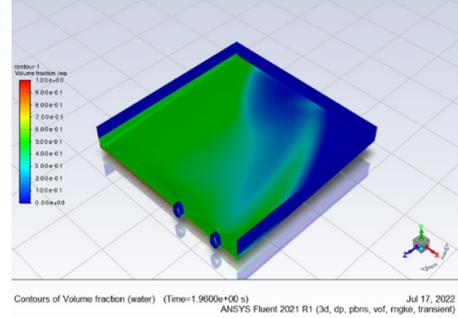
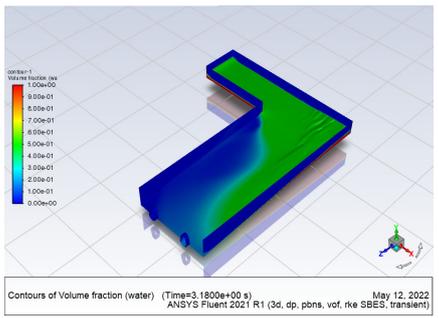
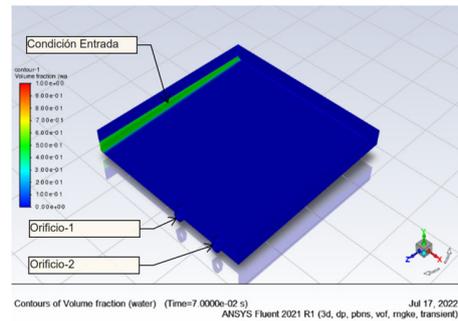
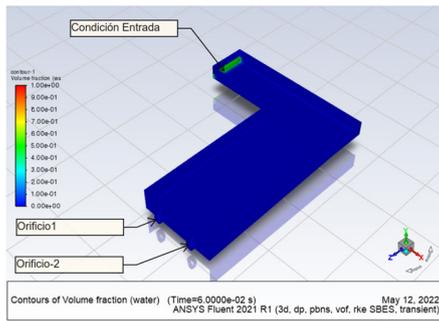
Fuente: Elaboración Propia

Ansys fluent permite generar unas animaciones con los cuales se puede comprender como es el funcionamiento de los modelos hidráulicos ensayados, como se evidencia en las siguientes ilustraciones.

*Ilustración 3-11 Comportamiento Hidráulico del Modelo Validado vs Modelo Modificado*

**Modelo validado (G1)**

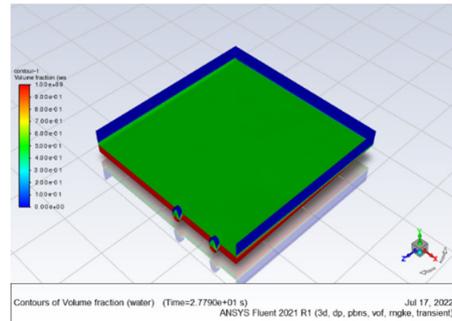
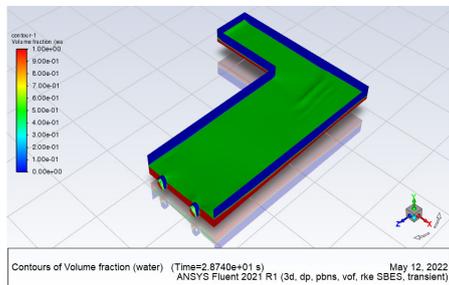
**Modelo modificado (G2)**



---

**Modelo validado (G1)****Modelo modificado (G2)**

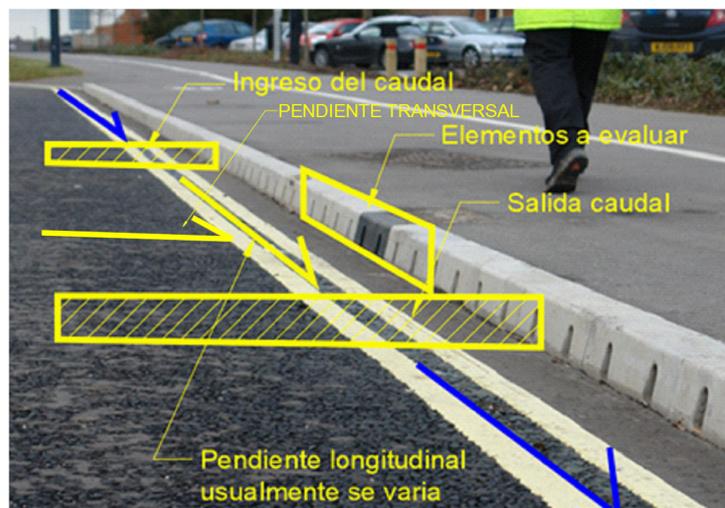
---



Fuente: Elaboración Propia

De las anteriores ilustraciones se puede identificar que el modelo realizado en el laboratorio no representa las condiciones reales de operación de los bordillos drenantes, ya que la captación en el laboratorio (G1) se realiza primero por el orificio 2 y luego pasa al orificio 1, contrario a lo que sucede cuando el caudal ingresa en el sentido de la pendiente longitudinal, como se evidencia en (G2) primero el caudal ingresa por el orificio 1 y luego por el orificio 2, también se identificó que en una condición real el caudal no se restringe si no que continua de largo, por lo que el comportamiento real no se evidencia ni en el modelo (G1) o (G2), en la siguiente ilustración se presenta un bordillo drenante en condiciones de operación reales.

*Ilustración 3-12 Bordillos drenantes instalados*



Fuente: Tomado (Monoblock, 2022)

### 3.1 Modelo en condiciones reales

Una vez que se identifica que la metodología propuesta para realizar los cálculos genera unos valores satisfactorios, se procede a realizar las modelaciones para las condiciones reales de operación, es decir con el caudal ingresando en el sentido de la pendiente longitudinal y tres condiciones de salida (plataforma y orificios), partiendo de las siguientes condiciones iniciales.

Tabla 3-23 Condiciones de entrada de los modelos reales

Variables	Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5	Qd6
Caudales	2 l/s	5 l/s	10 l/s	15 l/s	25 l/s	50 l/s
Área	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327	0.0327
Velocidades	0.061	0.153	0.306	0.459	0.765	1.530
EKT	1.82E-5	9.07E-5	3.05E-4	6.20E-4	1.52E-3	5.10E-3
TDT	4.22E-7	4.91E-7	5.51E-7	5.90E-7	6.42E-7	7.21E-7

Fuente: Elaboración Propia

En la anterior tabla EKT hace referencia a *Turbulent Kinetic Energy* y TDR *Turbulent Dissipation Rate* y Qd es caudal de diseño.

Como se informó anteriormente, puesto que se busca determinar cuál es la eficiencia de captación de los bordillos drenantes en condiciones reales de operación. La pendiente transversal se modifica a un 2 % y la pendiente longitudinal se varia con los siguientes valores S1 (0.10%), S2 (0.25%), S3 (0.30%), S4 (1%), S5 (2.50%), S6 (5%) y S7 (10%) y para los caudales Q1 (2 l/s), Q2 (5l/s), Q3 (10 l/s), Q4 (15 l/s), Q5 (25 l/s) y Q6 (50 l/s). En la siguiente tabla se presenta la identificación de los modelos según la combinación.

Tabla 3-24 Identificación de los modelos

Variables	Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5	Qd6
	2 l/s	5 l/s	10 l/s	15 l/s	25 l/s	50 l/s

Variables	Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5	Qd6
	2 l/s	5 l/s	10 l/s	15 l/s	25 l/s	50 l/s
S1-0.10	G3S1Q1	G3S1Q2	G3S1Q3	G3S1Q4	G3S1Q5	G3S1Q6
S2-0.25	G3S2Q1	G3S2Q2	G3S2Q3	G3S2Q4	G3S2Q5	G3S2Q6
S3-0.30	G3S3Q1	G3S3Q2	GS3Q3	G3S3Q4	G3S3Q5	G3S3Q6
S4-1.00	G3S4Q1	G3S4Q2	G3S4Q3	G3S4Q4	G3S4Q5	G3S4Q6
S5-2.50	G3S5Q1	G3S5Q2	G3S5Q3	G3S5Q4	G3S5Q5	G3S5Q6
S6-5.00	G3S6Q1	G3S6Q2	G3S6Q3	G3S6Q4	G3S6Q5	G3S6Q6
S7-10.00	G3S7Q1	G3S7Q2	G3S7Q3	G3S7Q4	G3S7Q5	G3S7Q6

Fuente: Elaboración Propia

En la anterior tabla Qd hace referencia al caudal de diseño, S hace referencia a la pendiente longitudinal y G hace referencia a la geometría.

#### 4. Resultados de las modelaciones

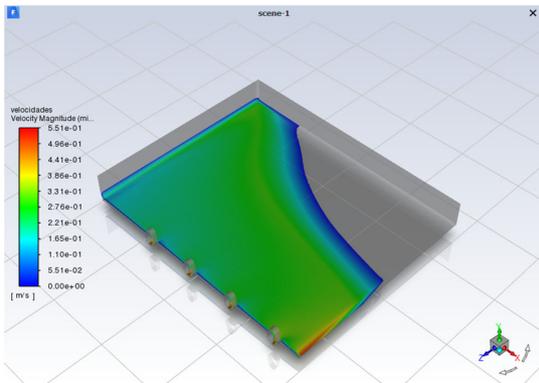
En los siguientes párrafos se presenta el resumen de los resultados obtenidos para cada una de las modelaciones realizadas: los caudales captados por cada uno de los orificios, la eficiencia hidráulica y las líneas de corriente.

##### 4.1.1 Resultados para la pendiente longitudinal S1 - 0.10 %

Se presenta el campo de velocidades en la plataforma, manteniendo una pendiente longitudinal de 0.10% para los diferentes flujos evaluados, y los resultados se muestran cuando se alcanza un estado permanente en la estructura, en la imagen de abajo, el azul indica velocidad 0 y el rojo indica máxima velocidad

*Ilustración 4-1 Velocidades Maximas en las plataformas G3S1*

Escenario G3S1Q1	Descripción
------------------	-------------



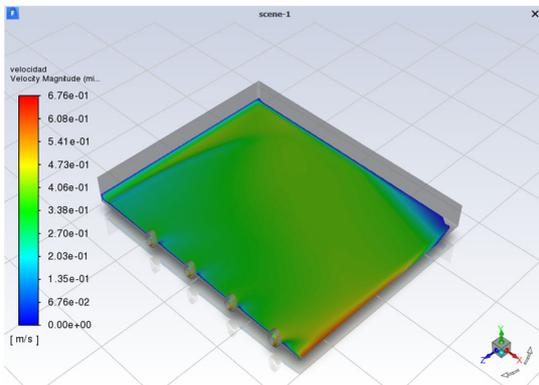
Caudal evaluado de 2 l/s

En la plataforma se presenta una velocidad máxima de 0.55 m/s.

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximadamente 1 cm.

### Escenario G3S1Q2

### Descripción



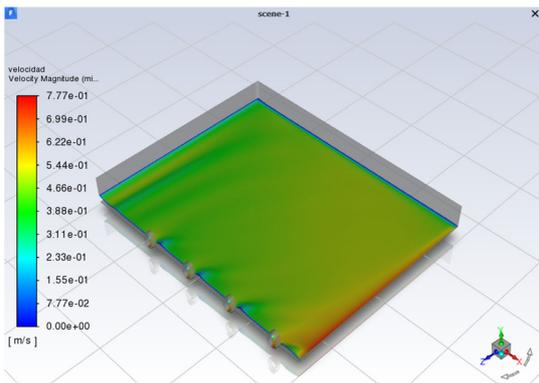
Caudal evaluado de 5 l/s

En la plataforma se presenta una velocidad máxima de 0.68 m/s.

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximadamente 1 cm

### Escenario G3S1Q3

### Descripción



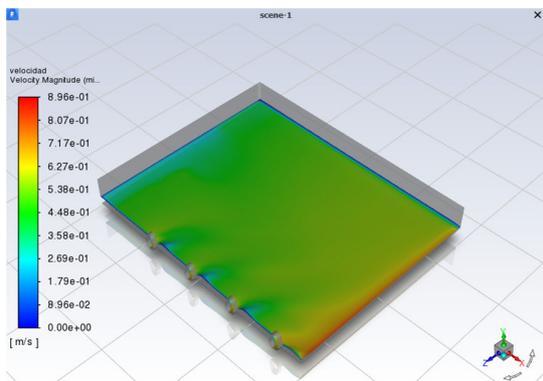
Caudal evaluado de 10 l/s

En la plataforma se presenta una velocidad máxima de 0.77 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximadamente 1 cm

### Escenario G3S1Q4

### Descripción



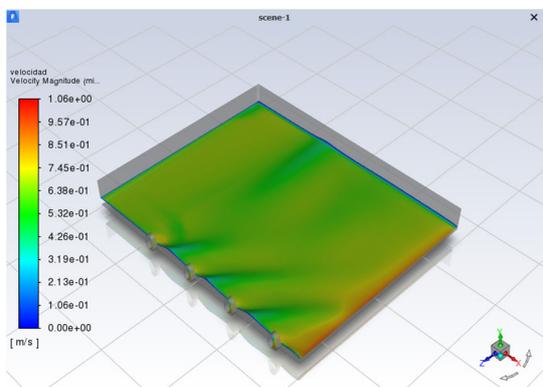
Caudal evaluado de 15 l/s

En la plataforma se presenta una velocidad máxima de 0.89 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximadamente 1 cm

### Escenario G3S1Q5

### Descripción



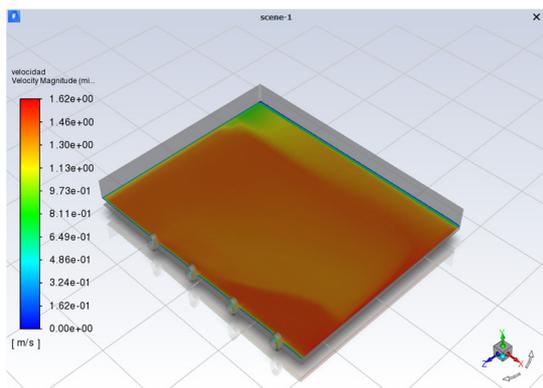
Caudal evaluado de 25 l/s

En la plataforma se presenta una velocidad máxima de 1.06 m/s.

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximadamente 1 cm.

### Escenario G3S1Q6

### Descripción



Caudal evaluado de 50 l/s

En la plataforma se presenta una velocidad máxima de 1.62 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximadamente 1 cm

Fuente: Elaboración Propia

El software ANSYS Fluent mediante la herramienta de reportes permite obtener el resultado el flujo másico en la entrada y las distintas salidas, a partir de estos datos y

aplicando la ecuación de eficiencia se determina esta característica para cada uno de los orificios.

*Tabla 4-1 Resultados para la pendiente del 0.1%*

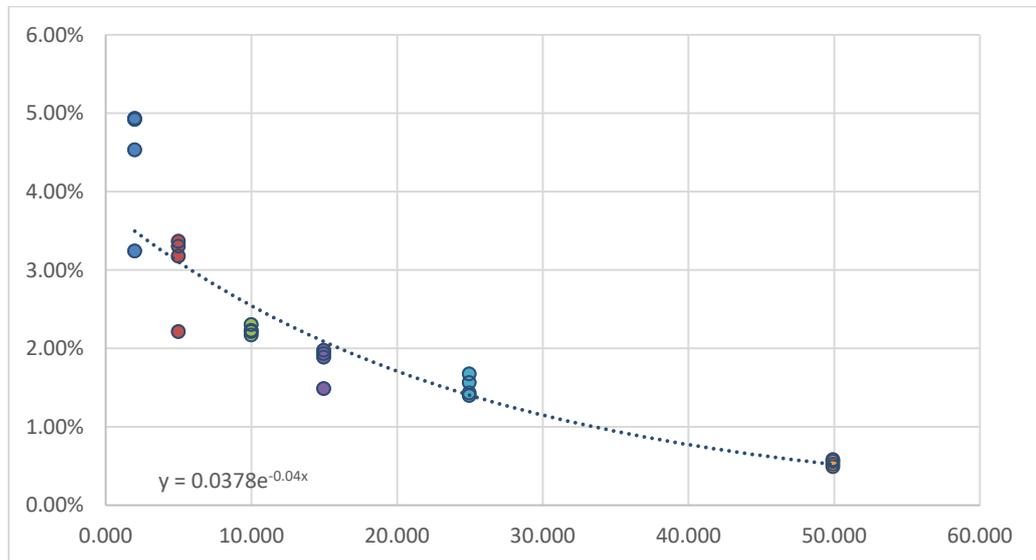
<b>Variables</b>	<b>Qd1</b>	<b>Qd2</b>	<b>Qd3</b>	<b>Qd4</b>	<b>Qd5</b>	<b>Qd6</b>
	<b>2 l/s</b>	<b>5 l/s</b>	<b>10 l/s</b>	<b>15 l/s</b>	<b>25 l/s</b>	<b>50 l/s</b>
<b>Q-Inlet</b>	1.997	4.992	9.983	14.971	24.955	49.909
<b>Qc-O1</b>	0.099	0.165	0.223	0.289	0.349	0.245
<b>Qc-O2</b>	0.093	0.163	0.225	0.290	0.411	0.259
<b>Qc-O3</b>	0.082	0.148	0.207	0.272	0.378	0.276
<b>Qc-O4</b>	0.056	0.100	0.148	0.210	0.341	0.285
<b>Qnc</b>	1.667	4.416	9.180	13.910	23.476	48.844
<b>E-O1</b>	0.049	0.033	0.022	0.019	0.014	0.005
<b>E-O2</b>	0.049	0.034	0.023	0.020	0.017	0.005
<b>E-O3</b>	0.045	0.032	0.022	0.019	0.016	0.006
<b>E-O4</b>	0.032	0.022	0.016	0.015	0.014	0.006

Fuente: Elaboración Propia

En la anterior tabla Qd hace referencia al caudal de diseño, Qc es caudal captado por cada uno de los orificios, E hace referencia a la eficiencia hidráulica de cada uno de los orificios y Qnc es caudal no captado.

Seguidamente, se presenta la comparación gráfica de las eficiencias vs caudales obtenidos a partir de estos datos se realizó el análisis de las líneas de tendencia para encontrar la ecuación y así determinar la ecuación que se ajusta a los resultados obtenidos.

Ilustración 4-2 Ajuste para los modelos G3S1 (Pendiente 0.10%)



Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.2 Resultados para la pendiente longitudinal SI 0.25 %

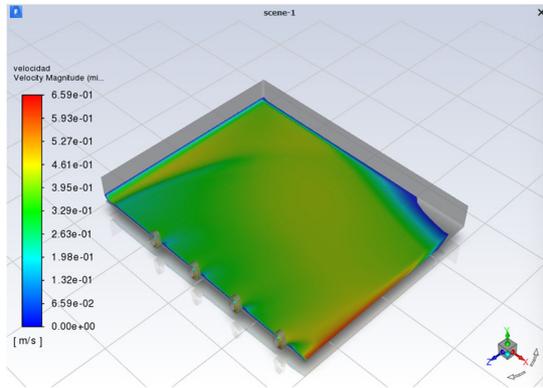
Se presentan los campos de velocidad en la plataforma, para los distintos caudales evaluados manteniendo una pendiente longitudinal del 0.25%, los resultados se muestran cuando se alcanza el régimen permanente en la estructura, en las siguientes ilustraciones el color azul hace referencia a una velocidad 0 y en rojo se presenta la velocidad máxima.

Tabla 4-2 Velocidades Maximas en las plataformas G3S2

Escenario G3S2Q1	Descripción
	<p>Caudal evaluado de 2 l/s</p> <p>En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 0.56 m/s</p> <p>La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm</p>

### Escenario G3S2Q2

### Descripción



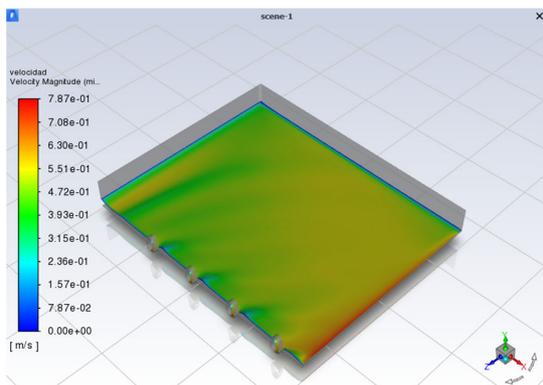
Caudal evaluado de 5 l/s

En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 0.65 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

### Escenario G3S2Q3

### Descripción



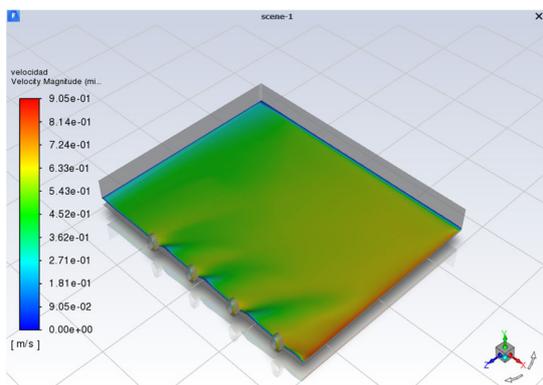
Caudal evaluado de 10 l/s

En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 0.78 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

### Escenario G3S2Q4

### Descripción



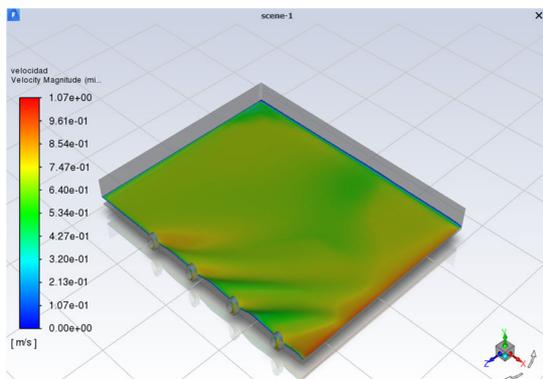
Caudal evaluado de 15 l/s

En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 0.90 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

### Escenario G3S2Q5

### Descripción



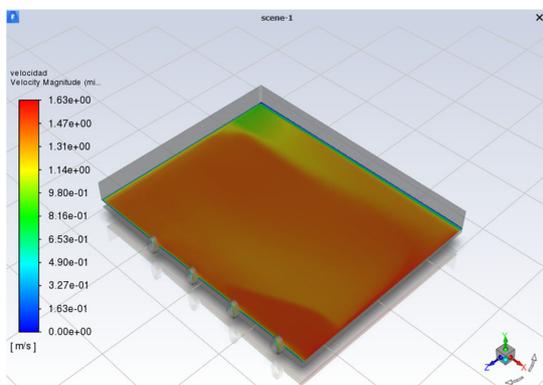
Caudal evaluado de 25 l/s

En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 1.07 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Escenario G3S2Q6

Descripción



Caudal evaluado de 50 l/s

En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 1.63 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Fuente: Elaboración Propia

El software ANSYS Fluent mediante la herramienta de reportes permite obtener el resultado el flujo másico en la entrada y las distintas salidas, a partir de estos datos y aplicando la ecuación de eficiencia se determina esta característica para cada uno de los orificios.

Tabla 4-3 Resultados para la pendiente del 0.25%

Variables	Qd1 2 l/s	Qd2 5 l/s	Qd3 10 l/s	Qd4 15 l/s	Qd5 25 l/s	Qd6 50 l/s
Q-Inlet	1.997	4.992	9.983	14.971	24.955	49.909
Qc-O1	0.088	0.146	0.207	0.253	0.307	0.243

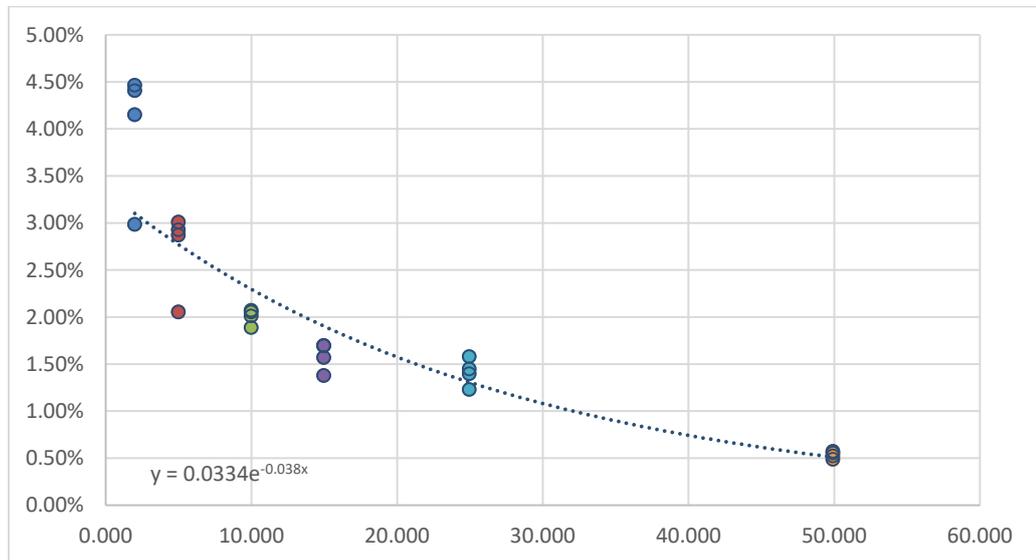
Variables	Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5	Qd6
	2 l/s	5 l/s	10 l/s	15 l/s	25 l/s	50 l/s
<b>Qc-O2</b>	0.085	0.146	0.197	0.250	0.344	0.260
<b>Qc-O3</b>	0.076	0.135	0.181	0.227	0.384	0.273
<b>Qc-O4</b>	0.052	0.094	0.142	0.196	0.346	0.281
<b>Qnc</b>	1.696	4.471	9.256	14.045	23.574	48.852
<b>E-O1</b>	0.044	0.029	0.021	0.017	0.012	0.005
<b>E-O2</b>	0.045	0.030	0.020	0.017	0.014	0.005
<b>E-O3</b>	0.041	0.029	0.019	0.016	0.016	0.006
<b>E-O4</b>	0.030	0.021	0.015	0.014	0.014	0.006

Fuente: Elaboración Propia

En la anterior tabla Qd hace referencia al caudal de diseño, Qc es caudal captado por cada uno de los orificios, E hace referencia a la eficiencia hidráulica de cada uno de los orificios y Qnc es caudal no captado.

A continuación, se presenta la comparación gráfica de las eficiencias vs caudales obtenidos a partir de estos datos se realizó el análisis de las líneas de tendencia para encontrar la ecuación y así determinar la ecuación que se ajusta a los resultados obtenidos.

Ilustración 4-3 Ajuste para los modelos G3S2 (Pendiente 0.25%)



Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.3 Resultados para la pendiente longitudinal SI 0.30 %

Se presentan los campos de velocidad en la plataforma, para los distintos caudales evaluados manteniendo una pendiente longitudinal del 0.30%, los resultados se muestran cuando se alcanza el régimen permanente en la estructura, en las siguientes ilustraciones el color azul hace referencia a una velocidad 0 y en rojo se presenta la velocidad máxima.

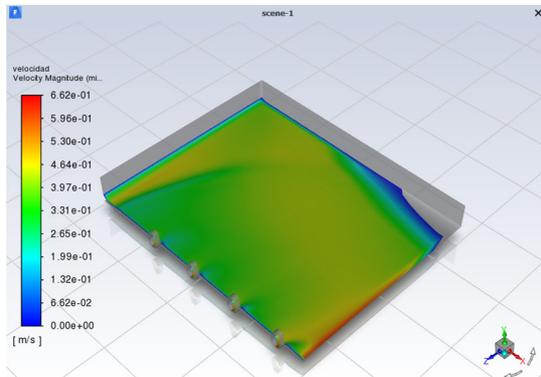
Ilustración 4-4 Velocidades Maximimas en las plataformas G3S3

Escenario G3S3Q1	Descripción
	<p>Caudal evaluado de 2 l/s</p> <p>En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 0.58 m/s</p> <p>La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm</p>

---

### Escenario G3S3Q2

### Descripción



Caudal evaluado de 5 l/s

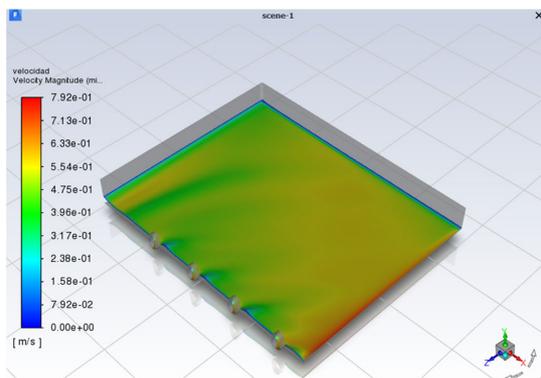
En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 0.66 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

---

### Escenario G3S3Q3

### Descripción



Caudal evaluado de 10 l/s

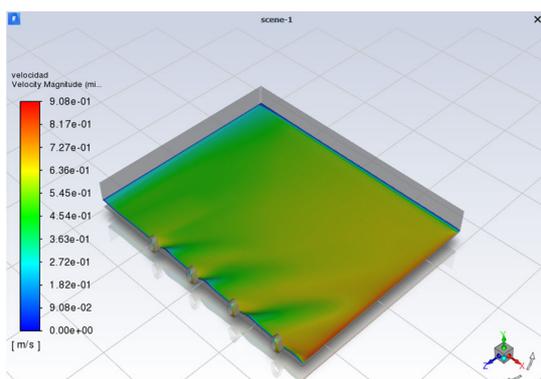
En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 0.79 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

---

### Escenario G3S3Q4

### Descripción



Caudal evaluado de 15 l/s

En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 0.91 m/s

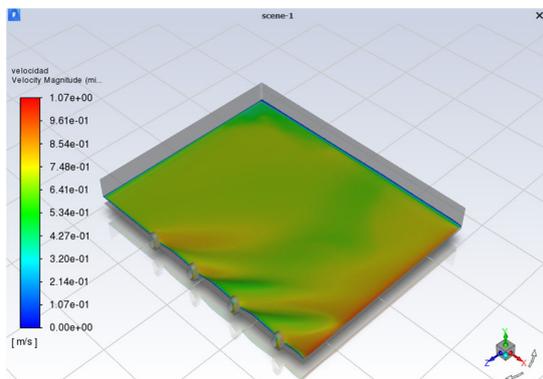
La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

---

### Escenario G3S3Q5

### Descripción

---



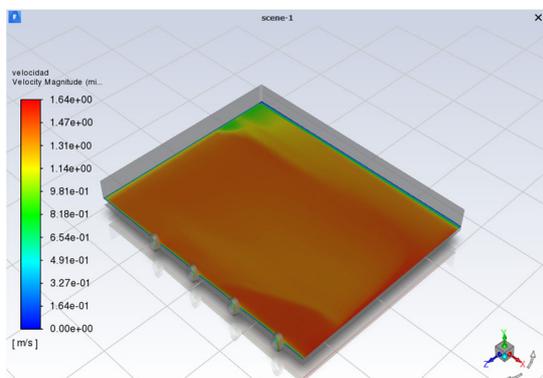
Caudal evaluado de 25 l/s

En la plataforma se presenta una magnitud de velocidad máxima de 1.06 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Escenario G3S3Q6

Descripción



Caudal evaluado de 50 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.64 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Fuente: Elaboración Propia

El software ANSYS Fluent mediante la herramienta de reportes permite obtener el resultado el flujo másico en la entrada y las distintas salidas, a partir de estos datos y aplicando la ecuación de eficiencia se determina esta característica para cada uno de los orificios.

Tabla 4-4 Resultados para la pendiente del 0.3%

Variables	Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5	Qd6
	2 l/s	5 l/s	10 l/s	15 l/s	25 l/s	50 l/s
Qc-Inlet	1.997	4.992	9.983	14.971	24.955	49.909
Qc-O1	0.084	0.141	0.196	0.245	0.301	0.242
Qc-O2	0.082	0.141	0.190	0.239	0.326	0.260

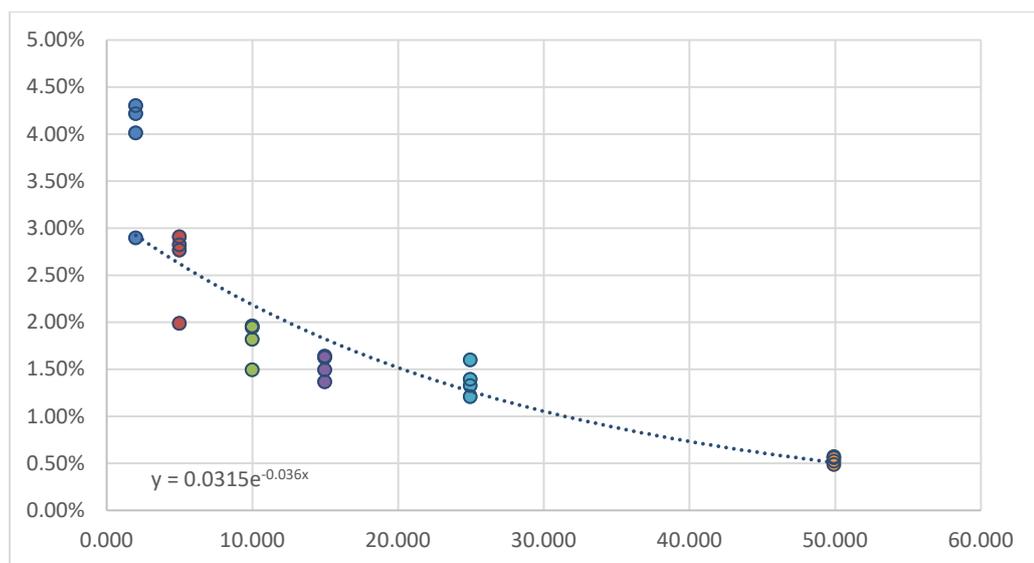
<b>Qc-O3</b>	0.073	0.130	0.174	0.216	0.389	0.275
<b>Qc-O4</b>	0.051	0.091	0.141	0.195	0.333	0.280
<b>Qnc</b>	1.707	4.489	9.282	14.076	23.606	48.852
<b>E-O1</b>	0.042	0.028	0.020	0.016	0.012	0.005
<b>E-O2</b>	0.043	0.029	0.019	0.016	0.013	0.005
<b>E-O3</b>	0.040	0.028	0.018	0.015	0.016	0.006
<b>E-O4</b>	0.029	0.020	0.015	0.014	0.014	0.006

Fuente: Elaboración Propia

En la anterior tabla Qd hace referencia al caudal de diseño, Qc es caudal captado por cada uno de los orificios, E hace referencia a la eficiencia hidráulica de cada uno de los orificios y Qnc es caudal no captado.

A continuación, se presenta la comparación gráfica de las eficiencias vs caudales obtenidos a partir de estos datos se realizó el análisis de las líneas de tendencia para encontrar la ecuación y así determinar la ecuación que se ajusta a los resultados obtenidos.

*Ilustración 4-5 Ajuste para los modelos G3S3 (Pendiente 0.30%)*

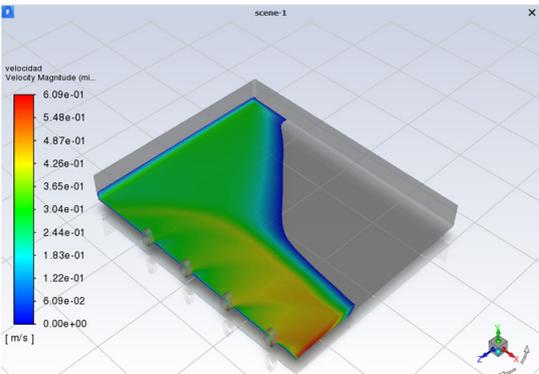
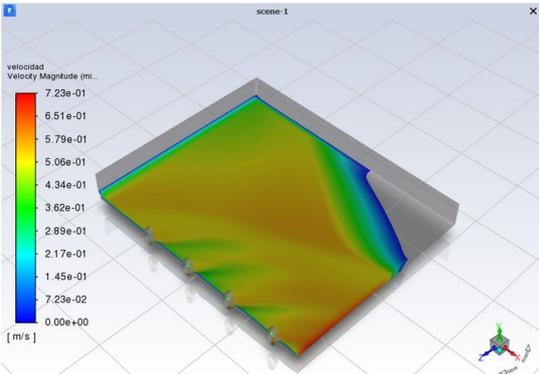


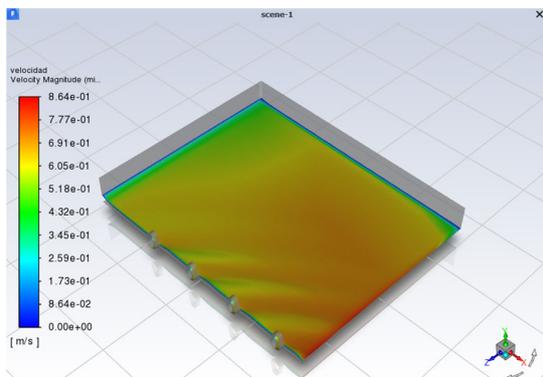
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.4 Resultados para la pendiente longitudinal SI 1.00 %

Se presentan los campos de velocidad en la plataforma, para los distintos caudales evaluados manteniendo una pendiente longitudinal del 1%, los resultados se muestran cuando se alcanza el régimen permanente en la estructura, en las siguientes ilustraciones el color azul hace referencia a una velocidad 0 y en rojo se presenta la velocidad máxima.

Ilustración 4-6 Velocidades Maximimas en las plataformas G3S4

Escenario G3S4Q1	Descripción
	<p>Caudal evaluado de 2 l/s</p> <p>En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 0.61 m/s</p> <p>La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm</p>
Escenario G3S4Q2	Descripción
	<p>Caudal evaluado de 5 l/s</p> <p>En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 0.72 m/s</p> <p>La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm</p>
Escenario G3S4Q3	Descripción



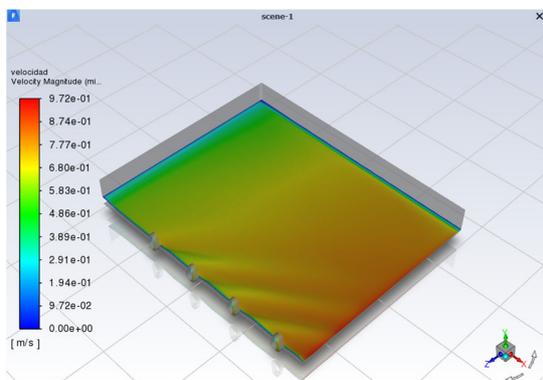
Caudal evaluado de 10 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 0.86 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

#### Escenario G3S4Q4

#### Descripción



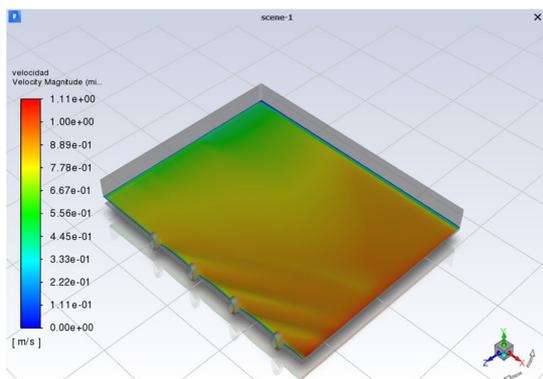
Caudal evaluado de 15 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 0.97 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

#### Escenario G3S4Q5

#### Descripción



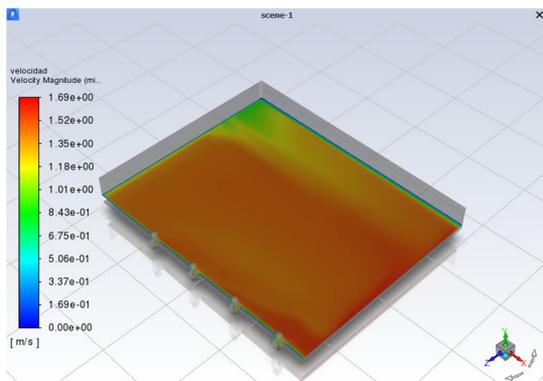
Caudal evaluado de 25 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.11 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

#### Escenario G3S4Q6

#### Descripción



Caudal evaluado de 50 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.69 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Fuente: Elaboración Propia

El software ANSYS Fluent mediante la herramienta de reportes permite obtener el resultado el flujo másico en la entrada y las distintas salidas, a partir de estos datos y aplicando la ecuación de eficiencia se determina esta característica para cada uno de los orificios.

Tabla 4-5 Resultados para la pendiente del 1%

Variables	Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5	Qd6
	2 l/s	5 l/s	10 l/s	15 l/s	25 l/s	50 l/s
<b>Q-Inlet</b>	1.997	4.992	9.983	14.971	24.955	49.909
<b>Qc-O1</b>	0.038	0.057	0.113	0.174	0.259	0.231
<b>Qc-O2</b>	0.049	0.079	0.132	0.184	0.256	0.240
<b>Qc-O3</b>	0.044	0.081	0.134	0.183	0.258	0.249
<b>Qc-O4</b>	0.040	0.080	0.129	0.174	0.269	0.251
<b>Qnc</b>	1.826	4.695	9.475	14.256	23.913	48.938
<b>E-O1</b>	0.019	0.011	0.011	0.012	0.010	0.005
<b>E-O2</b>	0.025	0.016	0.013	0.012	0.010	0.005
<b>E-O3</b>	0.023	0.017	0.014	0.013	0.011	0.005

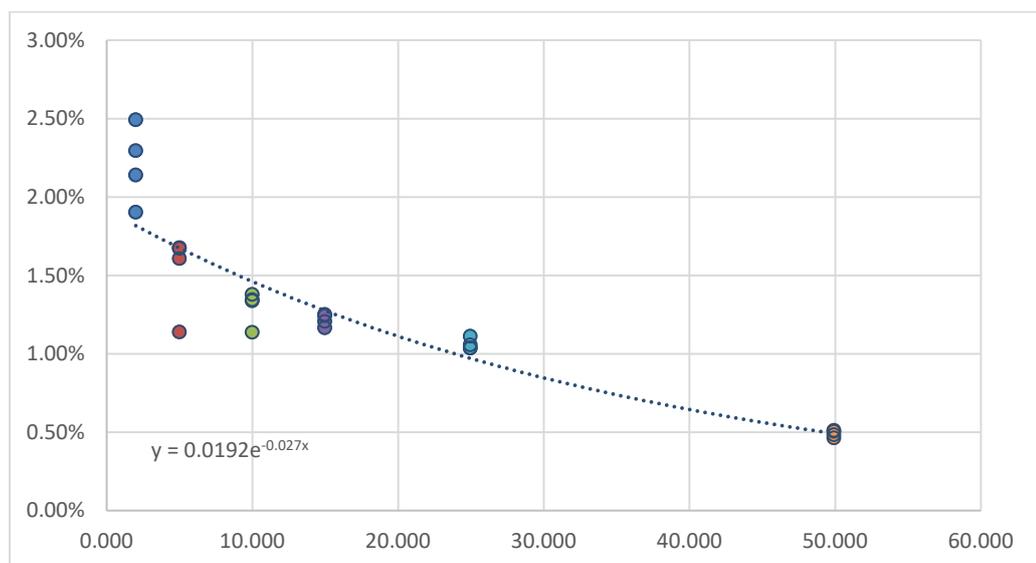
Variables	Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5	Qd6
	2 l/s	5 l/s	10 l/s	15 l/s	25 l/s	50 l/s
<b>E-O4</b>	0.021	0.017	0.013	0.012	0.011	0.005

Fuente: Elaboración Propia

En la anterior tabla Qd hace referencia al caudal de diseño, Qc es caudal captado por cada uno de los orificios, E hace referencia a la eficiencia hidráulica de cada uno de los orificios y Qnc es caudal no captado.

A continuación, se presenta la comparación gráfica de las eficiencias vs caudales obtenidos a partir de estos datos se realizó el análisis de las líneas de tendencia para encontrar la ecuación y así determinar la ecuación que se ajusta a los resultados obtenidos.

*Ilustración 4-7 Ajuste para los modelos G3S4 (Pendiente 1.00%)*



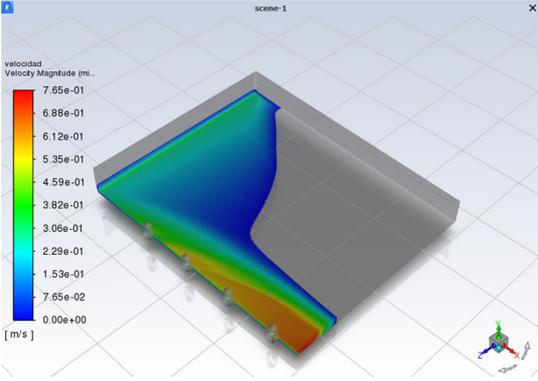
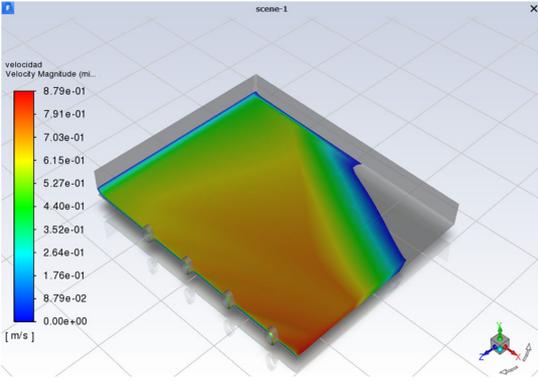
Fuente: Elaboración Propia

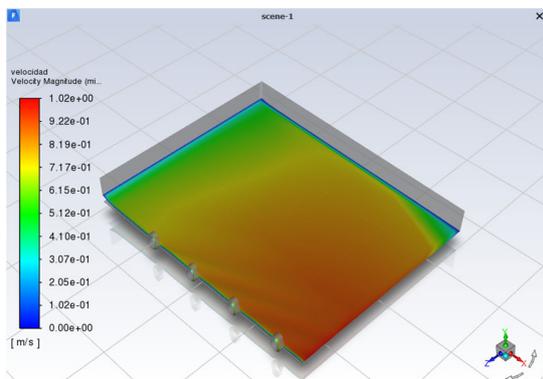
#### **4.1.5 Resultados para la pendiente longitudinal SI 2.50 %**

Se presentan los campos de velocidad en la plataforma, para los distintos caudales evaluados manteniendo una pendiente longitudinal del 2.50%, los resultados se muestran cuando se alcanza el régimen permanente en la estructura, en las siguientes

ilustraciones el color azul hace referencia a una velocidad 0 y en rojo se presenta la velocidad máxima.

*Ilustración 4-8 Velocidades Maximas en las plataformas G3S5*

Escenario G3S5Q1	Descripción
	<p>Caudal evaluado de 2 l/s</p> <p>En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 0.76 m/s</p> <p>La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm</p>
Escenario G3S5Q2	Descripción
	<p>Caudal evaluado de 5 l/s</p> <p>En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 0.87 m/s</p> <p>La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm</p>
Escenario G3S5Q3	Descripción



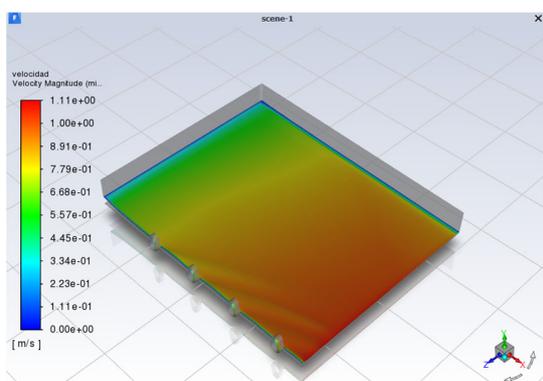
Caudal evaluado de 10 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.02 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

#### Escenario G3S5Q4

#### Descripción



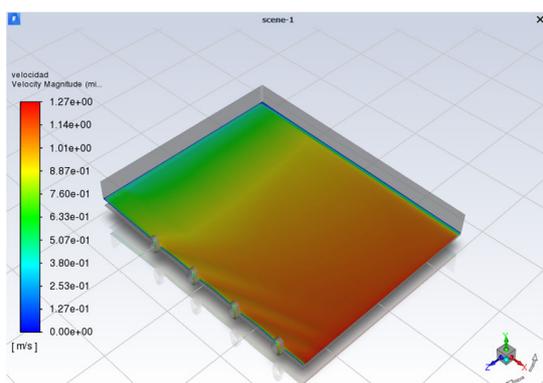
Caudal evaluado de 15 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.11 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

#### Escenario G3S5Q5

#### Descripción



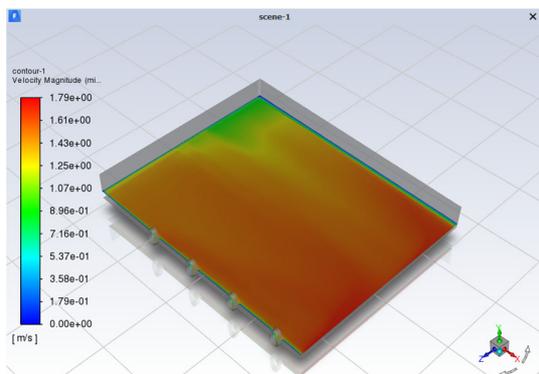
Caudal evaluado de 25 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.27 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

#### Escenario G3S5Q6

#### Descripción



Caudal evaluado de 50 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.79 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Fuente: Elaboración Propia

El software ANSYS Fluent mediante la herramienta de reportes permite obtener el resultado el flujo másico en la entrada y las distintas salidas, a partir de estos datos y aplicando la ecuación de eficiencia se determina esta característica para cada uno de los orificios.

Tabla 4-6 Resultados para la pendiente del 2.5%

Variables	Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5	Qd6
	2 l/s	5 l/s	10 l/s	15 l/s	25 l/s	50 l/s
<b>Qc-Inlet</b>	1.997	4.992	9.983	14.971	24.955	49.909
<b>Qc-O1</b>	0.018	0.036	0.079	0.128	0.210	0.217
<b>Qc-O2</b>	0.021	0.042	0.081	0.122	0.191	0.211
<b>Qc-O3</b>	0.025	0.049	0.085	0.121	0.180	0.210
<b>Qc-O4</b>	0.028	0.056	0.089	0.120	0.173	0.207
<b>Qnc</b>	1.905	4.809	9.649	14.480	24.201	49.064
<b>E-O1</b>	0.009	0.007	0.008	0.009	0.008	0.004
<b>E-O2</b>	0.011	0.008	0.008	0.008	0.008	0.004
<b>E-O3</b>	0.013	0.010	0.009	0.008	0.007	0.004

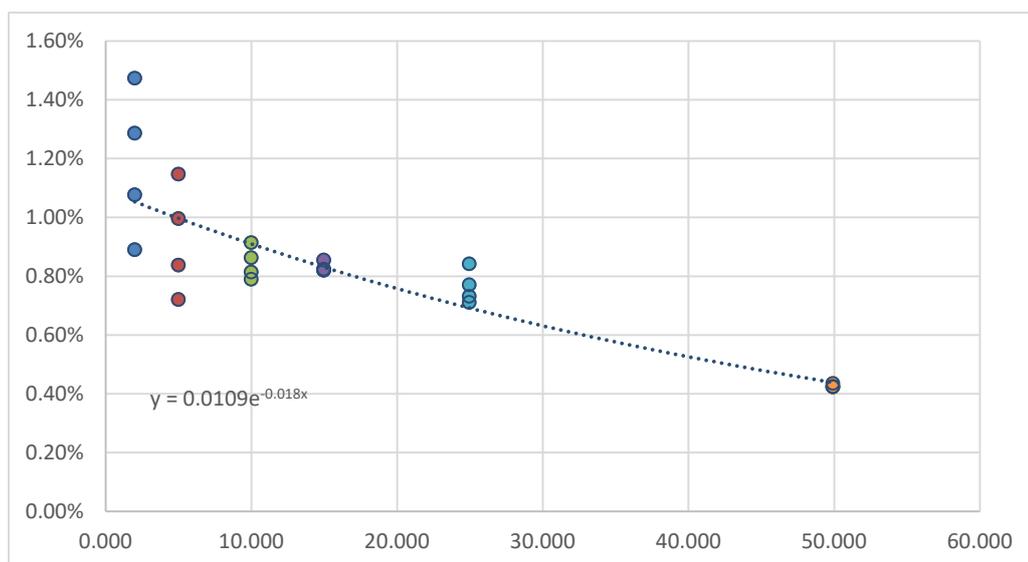
<b>E-O4</b>	0.015	0.011	0.009	0.008	0.007	0.004
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Fuente: Elaboración Propia

En la anterior tabla Qd hace referencia al caudal de diseño, Qc es caudal captado por cada uno de los orificios, E hace referencia a la eficiencia hidráulica de cada uno de los orificios y Qnc es caudal no captado.

A continuación, se presenta la comparación gráfica de las eficiencias vs caudales obtenidos a partir de estos datos se realizó el análisis de las líneas de tendencia para encontrar la ecuación y así determinar la ecuación que se ajusta a los resultados obtenidos.

*Ilustración 4-9 Ajuste para los modelos G3S5 (Pendiente 2.50%)*

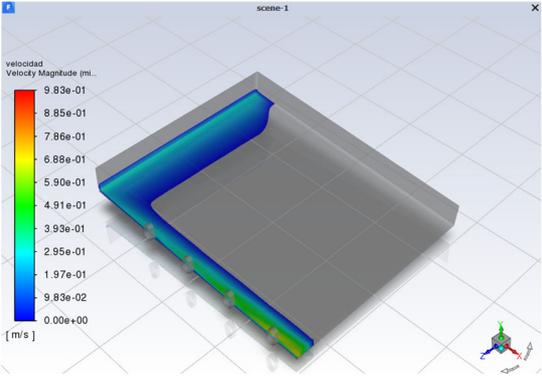
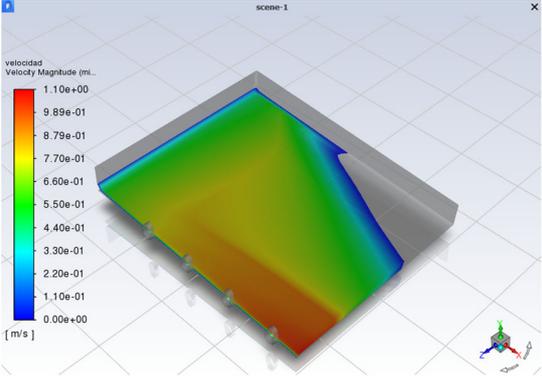
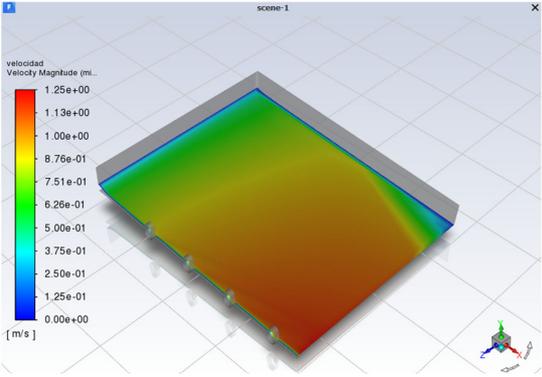


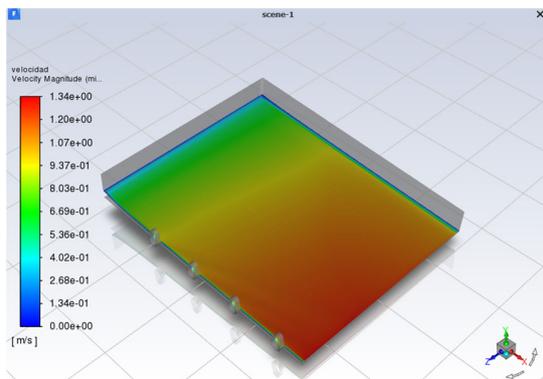
Fuente: Elaboración Propia

#### **4.1.6 Resultados para la pendiente longitudinal SI 5.00 %**

Se presentan los campos de velocidad en la plataforma, para los distintos caudales evaluados manteniendo una pendiente longitudinal del 5%, los resultados se muestran cuando se alcanza el régimen permanente en la estructura, en las siguientes ilustraciones el color azul hace referencia a una velocidad 0 y en rojo se presenta la velocidad máxima.

Ilustración 4-10 Velocidades Maximas en las plataformas G3S6

Escenario G3S6Q1	Descripción
	<p>Caudal evaluado de 2 l/s</p> <p>En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 0.98 m/s</p> <p>La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm</p>
	<p>Caudal evaluado de 5 l/s</p> <p>En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.09 m/s</p> <p>La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm</p>
	<p>Caudal evaluado de 10 l/s</p> <p>En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.25 m/s</p> <p>La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm</p>
Escenario G3S6Q4	Descripción



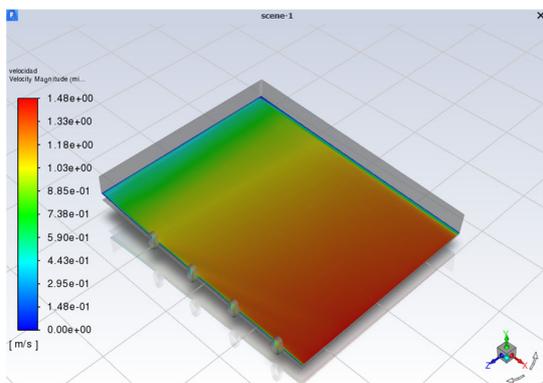
Caudal evaluado de 15 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.33 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Escenario G3S6Q5

Descripción



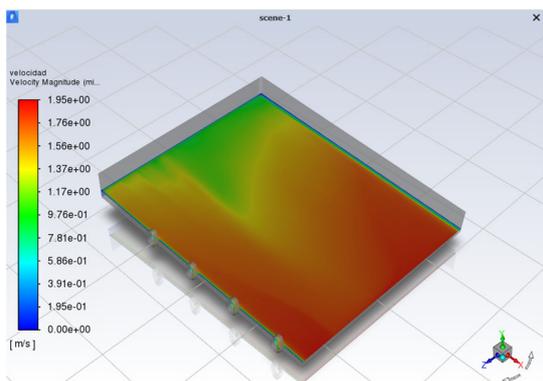
Caudal evaluado de 25 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.48 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Escenario G3S6Q6

Descripción



Caudal evaluado de 50 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.95 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Fuente: Elaboración Propia

El software ANSYS Fluent mediante la herramienta de reportes permite obtener el resultado el flujo másico en la entrada y las distintas salidas, a partir de estos datos y

aplicando la ecuación de eficiencia se determina esta característica para cada uno de los orificios.

*Tabla 4-7 Resultados para la pendiente del 5%*

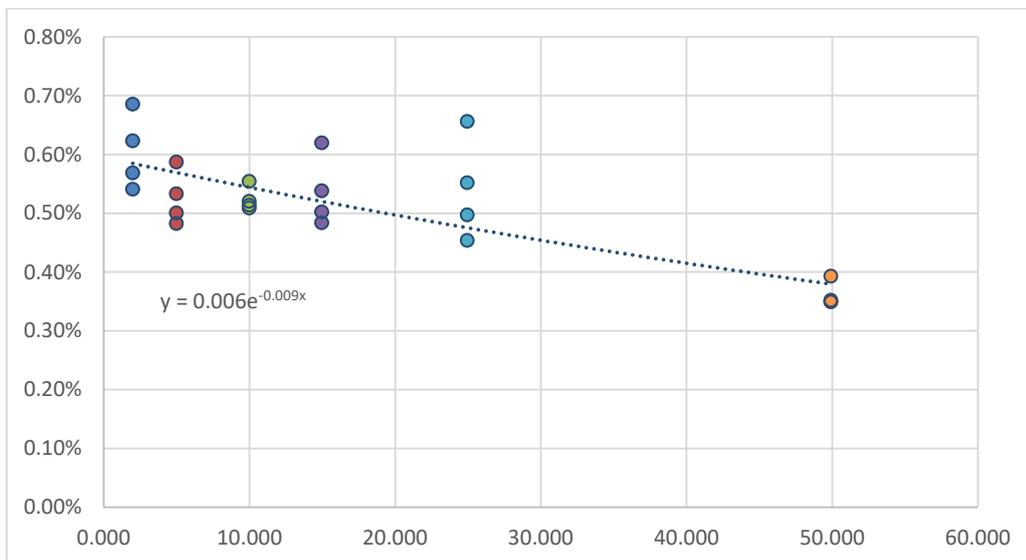
<b>Variables</b>	<b>Qd1</b>	<b>Qd2</b>	<b>Qd3</b>	<b>Qd4</b>	<b>Qd5</b>	<b>Qd6</b>
	<b>2 l/s</b>	<b>5 l/s</b>	<b>10 l/s</b>	<b>15 l/s</b>	<b>25 l/s</b>	<b>50 l/s</b>
<b>Q-Inlet</b>	1.997	4.992	9.983	14.971	24.955	49.909
<b>Qc-O1</b>	0.011	0.024	0.055	0.093	0.164	0.196
<b>Qc-O2</b>	0.011	0.025	0.051	0.080	0.137	0.175
<b>Qc-O3</b>	0.012	0.026	0.050	0.074	0.123	0.173
<b>Qc-O4</b>	0.013	0.029	0.051	0.071	0.111	0.155
<b>Qnc</b>	1.950	4.888	9.776	14.653	24.420	49.210
<b>E-O1</b>	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.004
<b>E-O2</b>	0.006	0.005	0.005	0.005	0.006	0.004
<b>E-O3</b>	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.003
<b>E-O4</b>	0.007	0.006	0.005	0.005	0.005	0.003

Fuente: Elaboración Propia

En la anterior tabla Qd hace referencia al caudal de diseño, Qc es caudal captado por cada uno de los orificios, E hace referencia a la eficiencia hidráulica de cada uno de los orificios y Qnc es caudal no captado.

A continuación, se presenta la comparación gráfica de las eficiencias vs caudales obtenidos a partir de estos datos se realizó el análisis de las líneas de tendencia para encontrar la ecuación y así determinar la ecuación que se ajusta a los resultados obtenidos.

Ilustración 4-11 Ajuste para los modelos G3S6 (Pendiente 5.00%)



Fuente: Elaboración Propia

#### 4.1.7 Resultados para la pendiente longitudinal SI 10.00 %

Se presentan los campos de velocidad en la plataforma, para los distintos caudales evaluados manteniendo una pendiente longitudinal del 10%, los resultados se muestran cuando se alcanza el régimen permanente en la estructura, en las siguientes ilustraciones el color azul hace referencia a una velocidad 0 y en rojo se presenta la velocidad máxima.

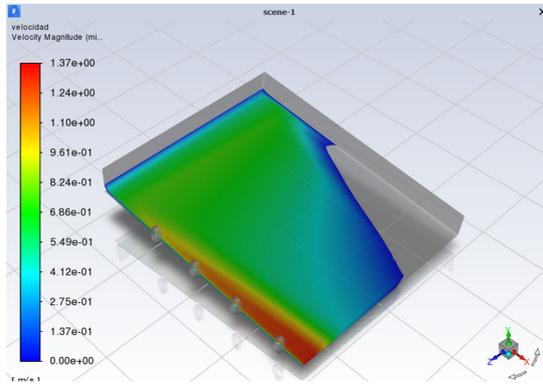
Ilustración 4-12 Velocidades Maximas en las plataformas G3S7

Escenario G3S7Q1	Descripción
	<p>Caudal evaluado de 2 l/s</p> <p>En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.30 m/s</p> <p>La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm</p>

---

### Escenario G3S7Q2

### Descripción



Caudal evaluado de 5 l/s

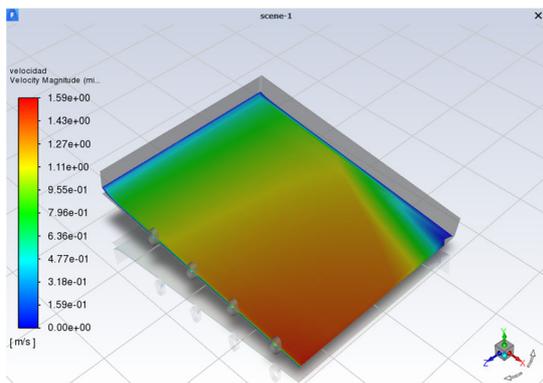
En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.37 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

---

### Escenario G3S7Q3

### Descripción



Caudal evaluado de 10 l/s

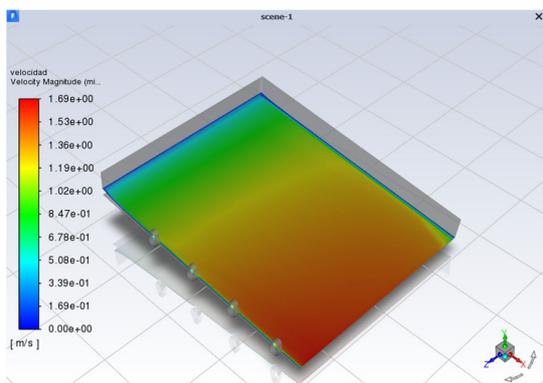
En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.59 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

---

### Escenario G3S7Q4

### Descripción



Caudal evaluado de 15 l/s

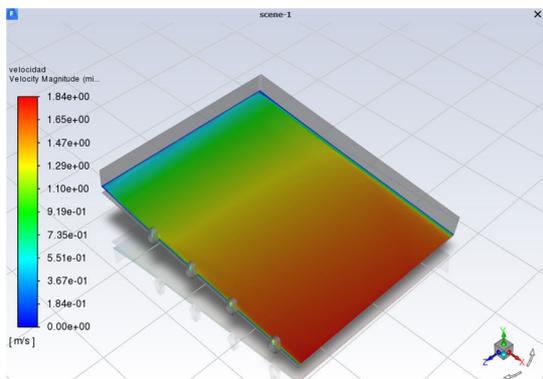
En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.69 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

---

### Escenario G3S7Q5

### Descripción



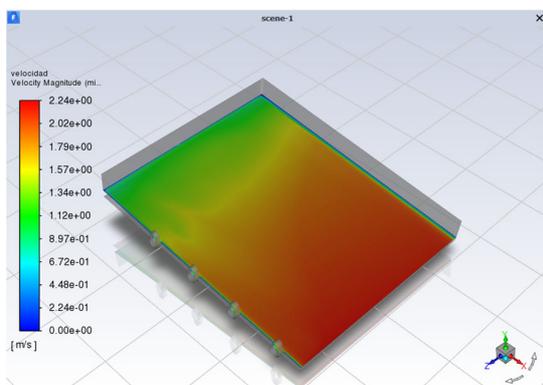
Caudal evaluado de 25 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 1.84 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Escenario G3S7Q6

Descripción



Caudal evaluado de 50 l/s

En la plataforma se presentó una magnitud de velocidad máxima de 2.24 m/s

La longitud de contacto entre la plataforma y los orificios es aproximada de 1 cm

Fuente: Elaboración Propia

El software ANSYS Fluent mediante la herramienta de reportes permite obtener el resultado el flujo másico en la entrada y las distintas salidas, a partir de estos datos y aplicando la ecuación de eficiencia se determina esta característica para cada uno de los orificios.

Tabla 4-8 Resultados para la pendiente del 10%

Variables	Qd1	Qd2	Qd3	Qd4	Qd5	Qd6
	2 l/s	5 l/s	10 l/s	15 l/s	25 l/s	50 l/s
<b>Q-Inlet</b>	1.997	4.992	9.983	14.971	24.955	49.909
<b>Qc-O1</b>	0.005	0.014	0.033	0.058	0.111	0.157

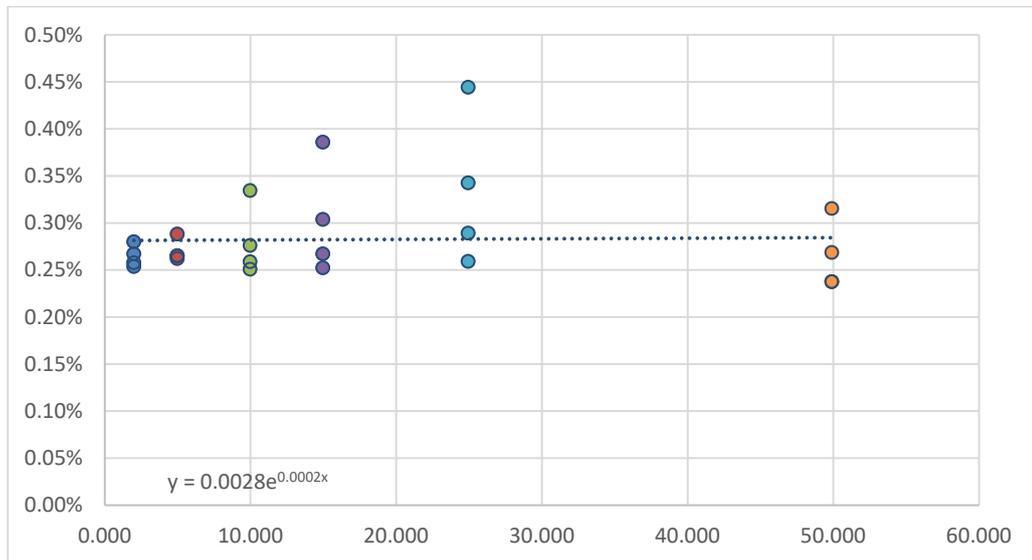
<b>Variables</b>	<b>Qd1</b>	<b>Qd2</b>	<b>Qd3</b>	<b>Qd4</b>	<b>Qd5</b>	<b>Qd6</b>
	<b>2 l/s</b>	<b>5 l/s</b>	<b>10 l/s</b>	<b>15 l/s</b>	<b>25 l/s</b>	<b>50 l/s</b>
<b>Qc-O2</b>	0.005	0.013	0.027	0.045	0.085	0.134
<b>Qc-O3</b>	0.005	0.013	0.026	0.040	0.072	0.118
<b>Qc-O4</b>	0.006	0.013	0.025	0.037	0.064	0.106
<b>Qnc</b>	1.976	4.939	9.872	14.791	24.623	49.394
<b>E-O1</b>	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.003
<b>E-O2</b>	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
<b>E-O3</b>	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002
<b>E-O4</b>	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002

Fuente: Elaboración Propia

En la anterior tabla Qd hace referencia al caudal de diseño, Qc es caudal captado por cada uno de los orificios, E hace referencia a la eficiencia hidráulica de cada uno de los orificios y Qnc es caudal no captado.

A continuación, se presenta la comparación gráfica de las eficiencias vs caudales obtenidos a partir de estos datos se realizó el análisis de las líneas de tendencia para encontrar la ecuación y así determinar la ecuación que se ajusta a los resultados obtenidos.

Ilustración 4-13 Ajuste para los modelos G3S7 (Pendiente 10.00 %)



Fuente: Elaboración Propia

## 4.2 Análisis resultados

Para entender el comportamiento de los bordillos drenantes, se revisa el comportamiento del modelo hidráulico para un caudal que produzca una lámina cercana al comportamiento en un calado normal, Se analizan tres pendientes longitudinales 0.30 % (G3S3), 2.50 % (G3S5) y 5.00 % (G3S6), para las que la modelación en CFD de la plataforma muestra una superficie de agua similar a la obtenida en una calzada delimitada por los bordillos. Para cada uno de los modelos se analizan las láminas de agua, los perfiles hidráulicos obtenidos, el caudal antes del orificio, el caudal captado, el caudal de salida y el comportamiento de las líneas de corriente.

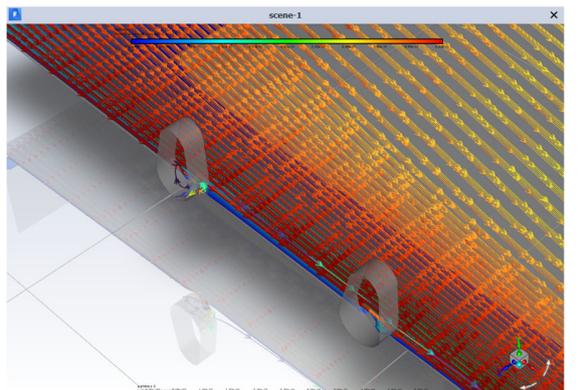
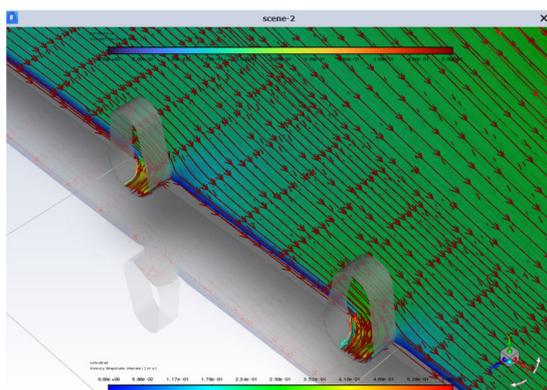
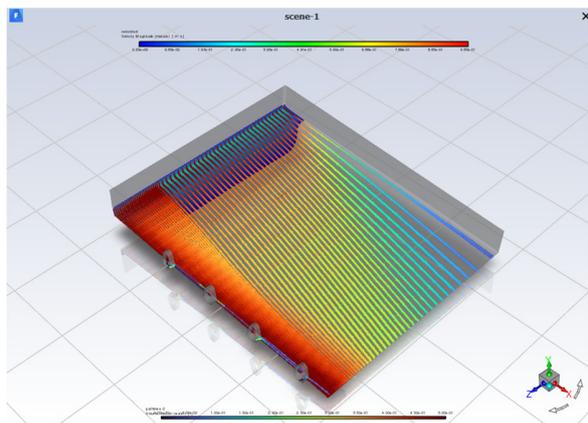
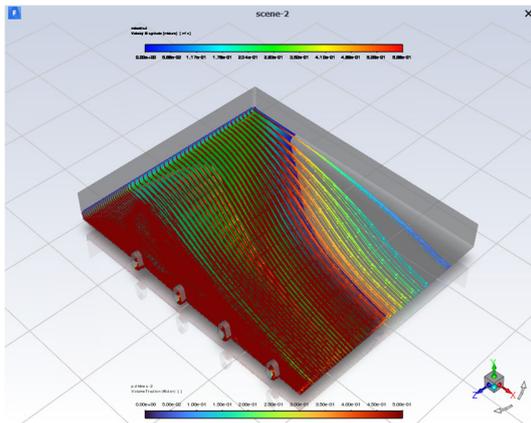
### 4.2.1 Comportamiento de las láminas de agua

El software Ansys Fluent cuenta con las herramientas para visualizar las trayectorias (*pathlines*) y líneas de nivel (*Surface contours*) para diferentes variables y las fracciones de volumen (*volumen fraction*). Para el parámetro de fracción de volumen se define un valor de 0.5, para visualizar el comportamiento de la lámina de agua en la plataforma como se evidencia a continuación.

Ilustración 4-14 Líneas de corriente, superficie de agua y vectores

Escenario 1 –Caudal 1.997 l/s y Pendiente 0.30 %  
(G3S3Q1)

Escenario 2 –Caudal 1.997 l/s y Pendiente 5.00 %  
(G3S6Q1)



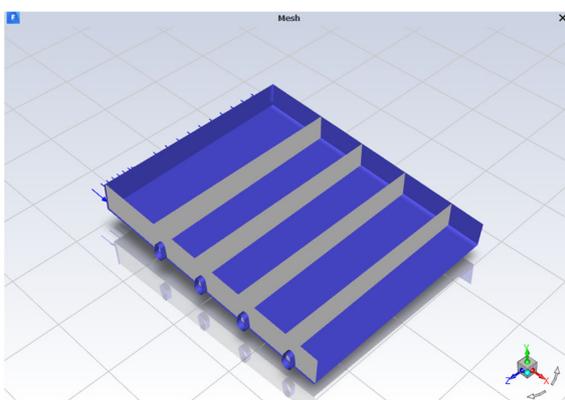
Fuente: Elaboración Propia

En las anteriores ilustraciones se comparan los resultados obtenidos cuando se tiene una pendiente baja y una alta, al mirar en detalle el comportamiento de los *pathline* (líneas de corriente) que se presenta en los orificios se identifica que entre menor sea la pendiente mayor es la cantidad de agua que ingresa, lo que en consecuencia indica que cuando se tiene una pendiente longitudinal alta la captación es mínima y no se presenta disminución del ancho de inundación.

### 4.2.2 Perfiles hidráulicos obtenidos

Dentro de la herramienta superficies, Ansys Fluent permite generar planos con los que se puede revisar el comportamiento de la fracción de volumen en las diferentes secciones. Se evalúan secciones perpendiculares al sentido del flujo antes de cada uno de los orificios y dos secciones paralelas al sentido de flujo: una antes de los orificios y la otra en la mitad de los orificios.

Ilustración 4-15 Planos en la Geometría No 3

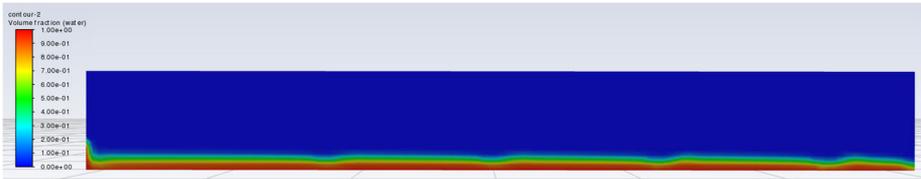
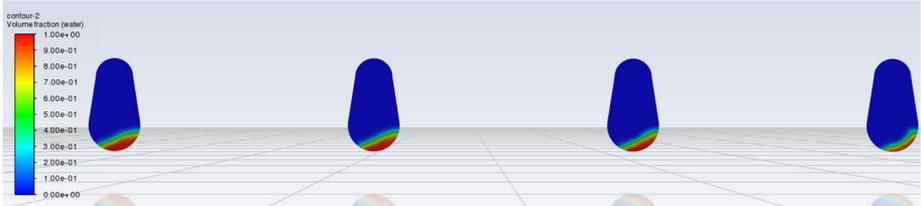


En color azul se presentan los muros y en gris se presentan los planos para determinar el comportamiento de la fracción de volumen.

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el escenario No 1

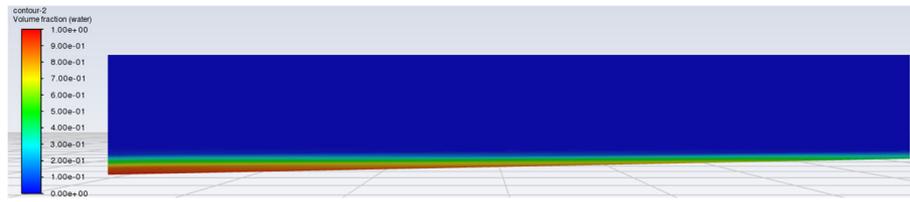
Ilustración 4-16 Perfiles Escenario 1 (G3S3Q1)

Identificación	Ilustración
Perfiles 1	 A contour plot showing the volume fraction of air in a horizontal cross-section. The plot is titled 'contour-2 Volume fraction (air)'. The color scale ranges from 0.00e+00 (blue) to 1.00e+00 (red). The plot shows a thin layer of air near the bottom surface, with the rest of the domain being blue (0.00e+00).
Perfiles 2	 Four contour plots showing the volume fraction of water in vertical cross-sections. The plots are titled 'contour-2 Volume fraction (water)'. The color scale ranges from 0.00e+00 (blue) to 9.00e-01 (red). Each plot shows a localized region of high water volume fraction (red/yellow) near the bottom, with the rest of the domain being blue (0.00e+00).

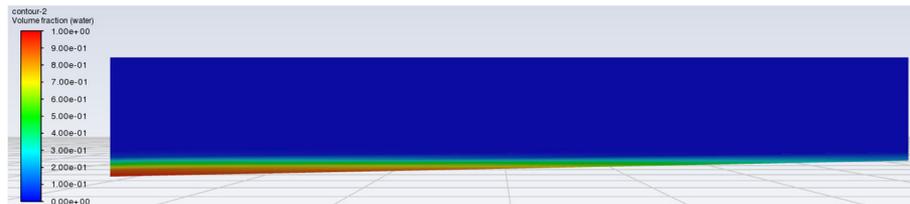
Identificación

Ilustración

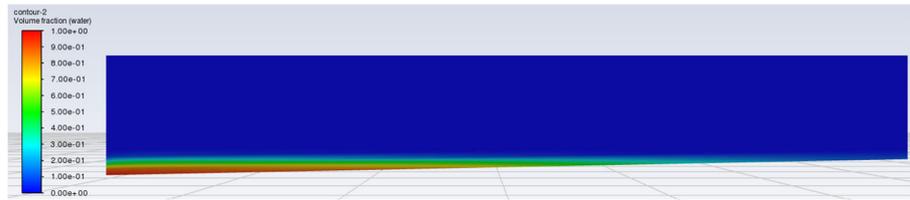
Plano-o1



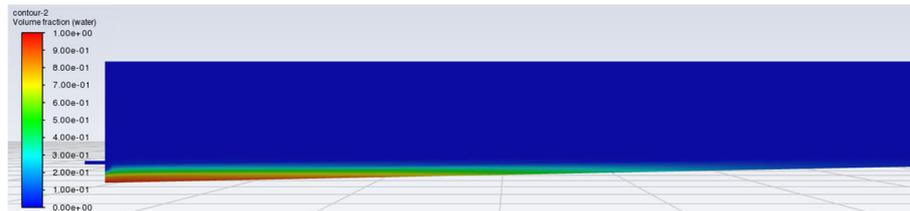
Plano-o2



Plano-o3



Plano-o4



Fuente: Elaboración Propia

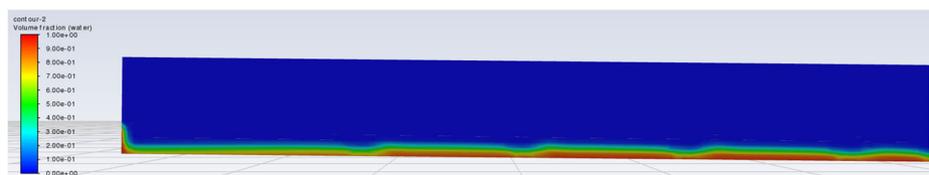
A continuación, se muestran los resultados para el escenario 2.

*Ilustración 4-17 Perfiles Escenario 2 (G3S5Q1)*

Identificación

Ilustración

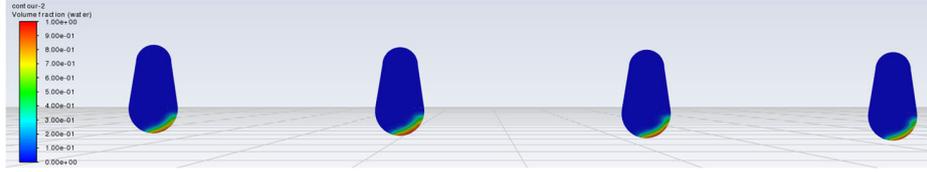
Perfiles 1



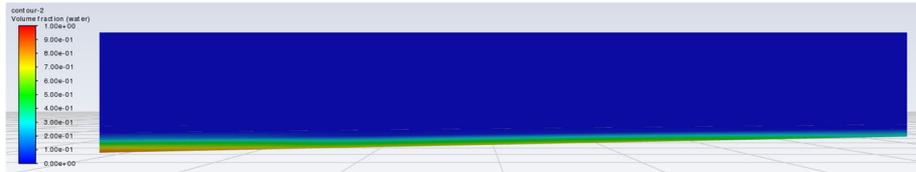
Identificación

Ilustración

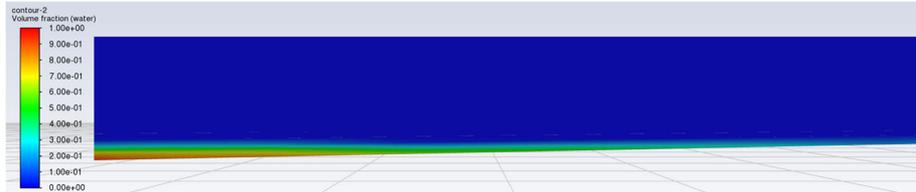
Perfiles 2



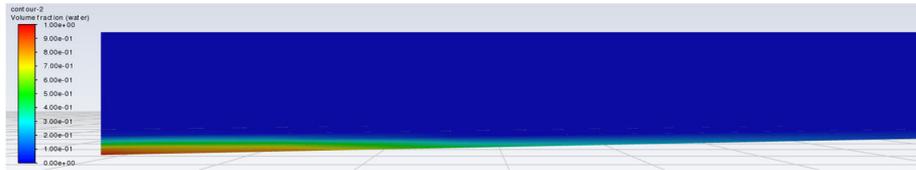
Plano-o1



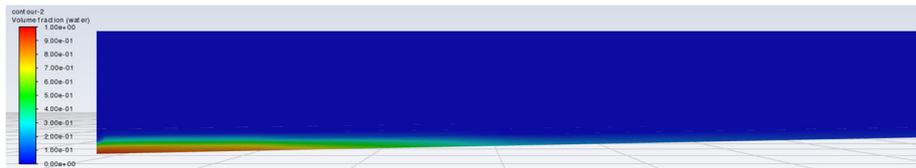
Plano-o2



Plano-o3



Plano-o4



Fuente: Elaboración Propia

Posteriormente se presentan los resultados del escenario 3

*Ilustración 4-18 Perfiles Escenario 3 (G3S6Q1)*

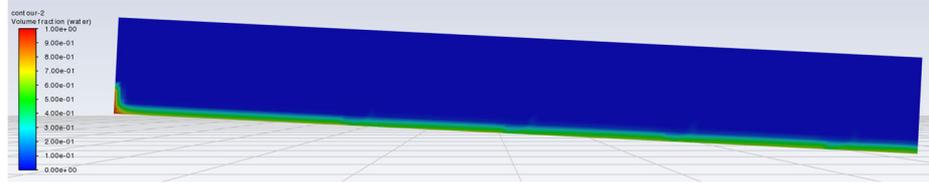
Identificación

Ilustración

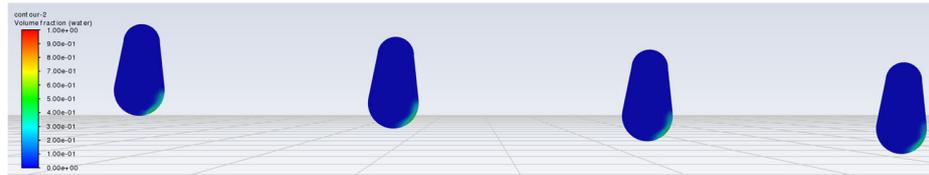
Identificación

Ilustración

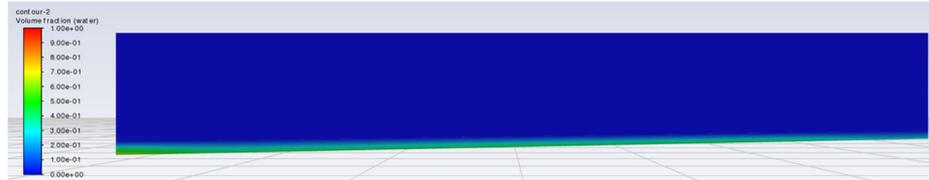
Perfiles 1



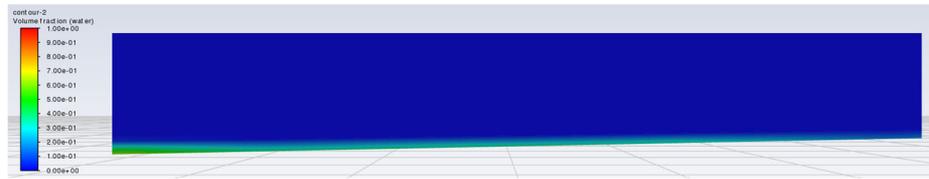
Perfiles 2



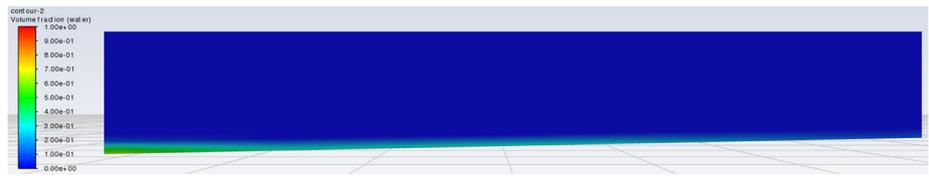
Plano-o1



Plano-o2



Plano-o3



Plano-o4

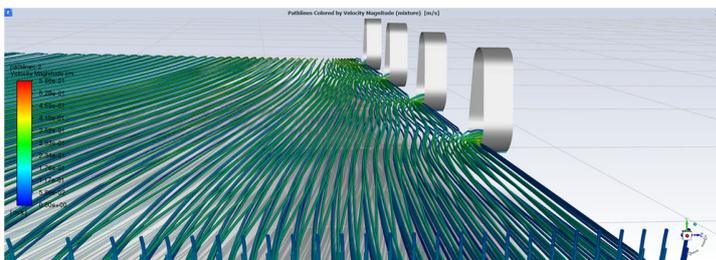


Fuente: Elaboración Propia

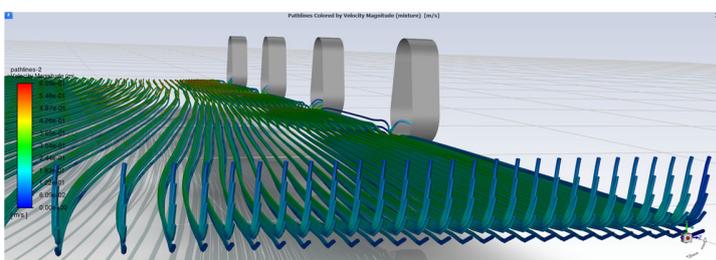
#### 4.2.1 Análisis de las líneas de corriente en los orificios para flujo permanente

Otra manera de verificar el comportamiento de los bordillos drenantes con la variación en la pendiente longitudinal son las trayectorias. Puesto que el software Ansys Fluent cuenta con la herramienta *Pathlines* (líneas de corriente), se configura la herramienta para visualizar la velocidad definiendo las líneas de corriente desde la condición de entrada. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

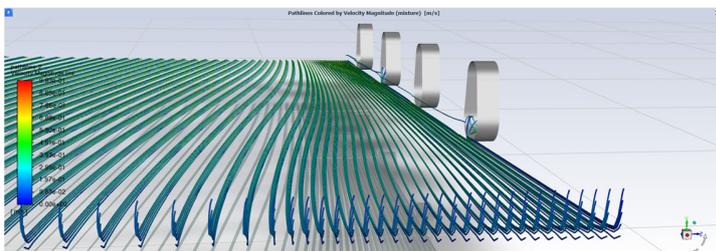
Ilustración 4-19 Líneas de corriente Escenario 1 (G3S3Q1), Escenario 2 (G3S5Q1) y Escenario 3 (G3S6Q1)



G3S3Q1



G3S5Q1



G3S6Q1

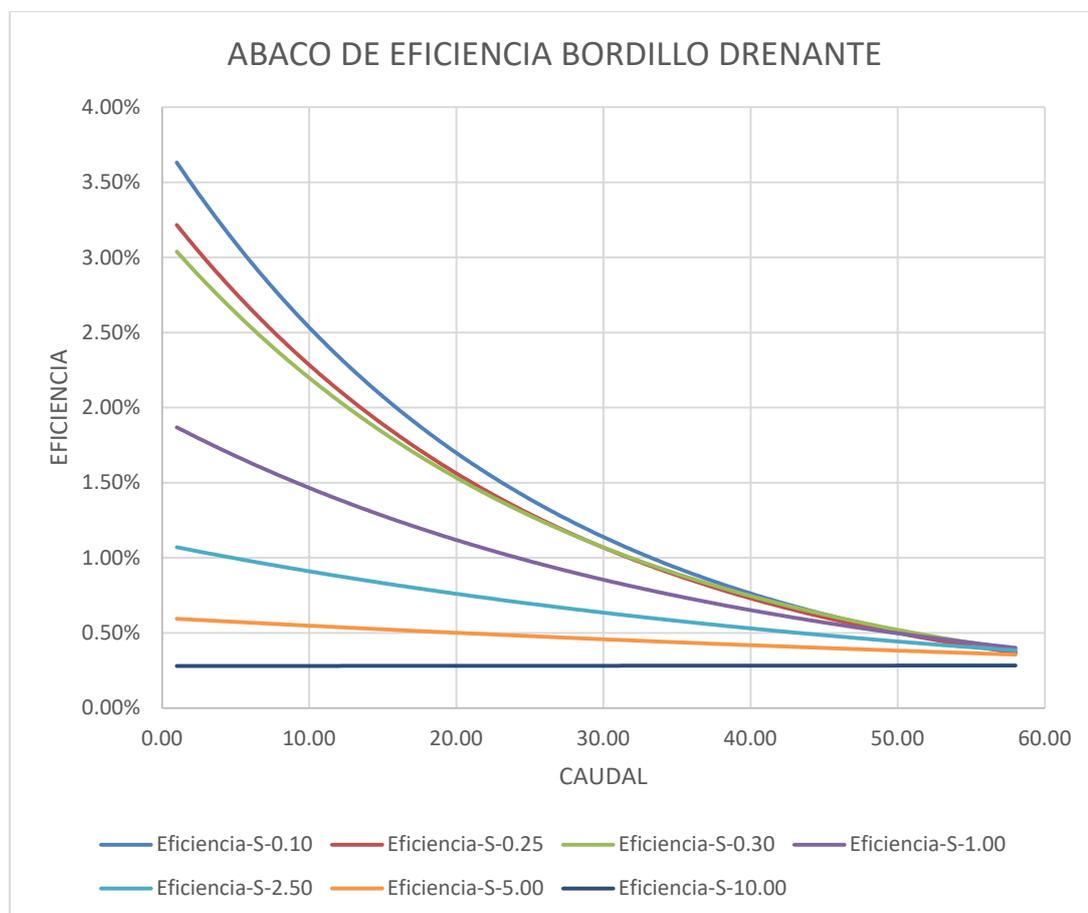
De las líneas de corriente se evidencia que a medida que se aumenta la pendiente menos es la cantidad de líneas de corriente aferentes a cada uno de los orificios, por lo que entre menor es la pendiente longitudinal mayor es la capacidad de captación de los orificios.

Fuente: Elaboración Propia

### 4.2.1 Análisis de los ábacos

Como se indicó anteriormente se realizaron diferentes modelos variando la pendiente longitudinal de la vía y el caudal de ingreso. A partir de estos datos se generaron graficas con las líneas estadísticas de tendencia de la eficiencia de captación que se presentan en el siguiente ábaco.

Ilustración 4-20 Ábacos de eficiencia de los bordillos drenantes

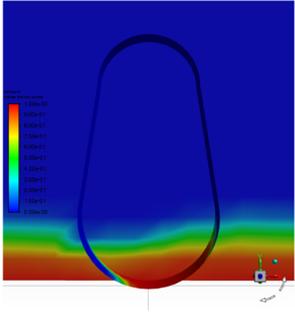
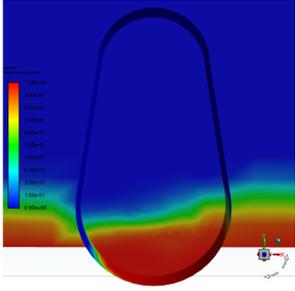


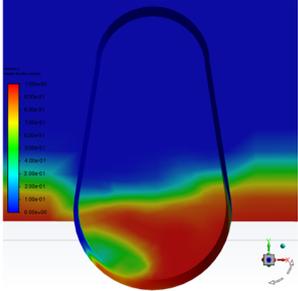
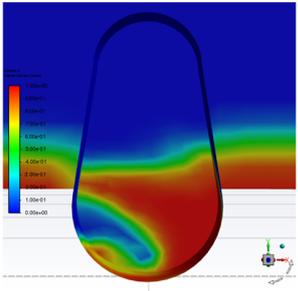
Fuente: Elaboración Propia

#### 4.2.1 Optimización de la instalación de los bordillos drenantes para aumentar la capacidad de captación.

Los anteriores análisis fueron realizados suponiendo que los bordillos drenantes se instalan sin caída. Sin embargo, con el fin de comprobar si al dejar caída entre el bordillo y el pavimento se genera un aumento del caudal captado, se realizaron 4 ensayos para el escenario 1 (G3S3Q1): dejando el orificio del bordillo sin caída, una caída de 1 cm (G3S3Q1-C2), una caída de 2 cm (G3S3Q1-C3) y una caída de 3 cm (G3S3Q1-C4), como se evidencia en las siguientes ilustraciones en color azul se presentan las velocidades cercanas a 0 y en rojo el color de la velocidad máxima

Tabla 4-9 Perfiles hidráulicos con diferentes caídas

Escenarios	Descripción	Ilustración
Escenario-1-1 G3S3Q1-C1	El escenario No 1 consiste en dejar la conexión entre la plataforma y el bordillo al nivel sin ningún tipo de caída. Se evidencia que la superficie de contacto es aproximadamente 0.01 m, en el orificio No 2	
Escenario-1-2 G3S3Q1-C2	El escenario No 2 consiste en dejar la conexión entre la plataforma y el bordillo con una caída de 1 cm, aumentando la superficie de contacto a 0.051 m en el orificio No 2.	

Escenarios	Descripción	Ilustración
Escenario-1-3 G3S3Q1-C3	El escenario No 3 consiste en dejar la conexión entre la plataforma y el bordillo una caída de 2 cm, aumentando la superficie de contacto a 0.058 m, en el orificio No 2	
Escenario-1-4 G3S3Q1-C4	El escenario No 4 consiste en dejar la conexión entre la plataforma y el bordillo una caída de 3 cm, dejando la superficie de contacto a 0.056, en el orificio No 2	

Fuente: Elaboración Propia

A partir de las modelaciones se analizaron los resultados con el fin de saber si al cambiar la ubicación de los orificios se genera una mayor captación o si no se presentan cambios.

*Tabla 4-10 Caudales captados para los diferentes escenarios 1*

Variables	Escenario-1-1	Escenario-1-2	Escenario-1-3	Escenario-1-4
	G3S3Q1-C1	G3S3Q1-C2	G3S3Q1-C3	G3S3Q1-C4
<b>Q-Entrada</b>	<b>1.997</b>	<b>1.997</b>	<b>1.997</b>	<b>1.997</b>
<b>Q-CaMo-O1</b>	0.099	0.151	0.169	0.165
<b>Q-CaMo-O2</b>	0.093	0.146	0.164	0.159
<b>Q-CaMo-O3</b>	0.082	0.128	0.144	0.141
<b>Q-CaMo-O4</b>	0.082	0.088	0.099	0.097

<b>Variables</b>	<b>Escenario-1-1</b>	<b>Escenario-1-2</b>	<b>Escenario-1-3</b>	<b>Escenario-1-4</b>
	<b>G3S3Q1-C1</b>	<b>G3S3Q1-C2</b>	<b>G3S3Q1-C3</b>	<b>G3S3Q1-C4</b>
<b>Qnc-Mo</b>	1.641	1.484	1.421	1.435
<b>Q-CaEc-O1</b>	0.030	0.152	0.173	0.167
<b>Q-CaEc-O2</b>	0.030	0.145	0.164	0.158
<b>Q-CaEc-O3</b>	0.030	0.138	0.155	0.150
<b>Q-CaEc-O4</b>	0.030	0.132	0.146	0.142
<b>Qnc-Ec</b>	1.877	1.430	1.359	1.380
<b>Err-O1</b>	69.70	0.66	2.37	1.21
<b>Err-O2</b>	67.74	0.68	0.00	0.63
<b>Err-O3</b>	63.41	7.81	7.64	6.38
<b>Err-O4</b>	63.41	50.00	47.47	46.39

Fuente: Elaboración Propia

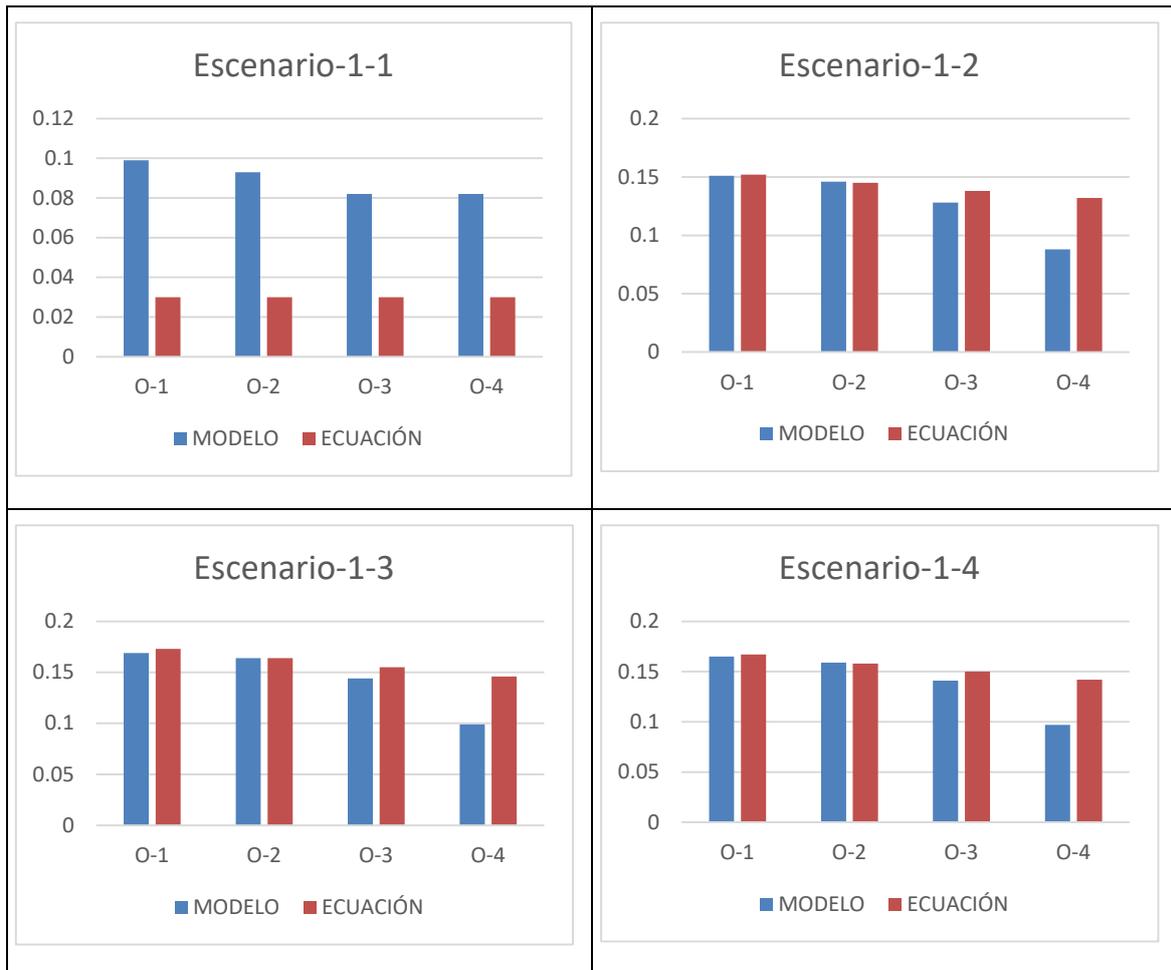
De la anterior tabla Qd hace referencia al caudal de diseño o caudal de entrada de la plataforma, Q-CaMo es caudal captado en el modelo CFD para los distintos orificios y QcaEc caudal captado calculado por la ecuación de sumidero de ventana tomando como largo de ventana la longitud de contacto, Err es el error absoluto entre los resultados del modelo numérico y los de la ecuación y Qnc es caudal no captado.

Se identificó que entre mayor es la longitud de contacto mayor es la captación y la ecuación genera resultados con un error mínimo para los dos primeros orificios y el tercero y cuarto orificio los resultados no son confiables, de los anteriores resultados se generaron unas graficas de barras donde se comparan los caudales captados por la modelación numérica y por la ecuación para cada uno de los orificios.

Debido a que la condición de frontera a la salida de la plataforma es de presión y esto va a representar un perfil de flujo M2 (La profundidad normal va a tender a la profundidad critica), se presenta la discrepancia de los resultados obtenidos para los

orificios 3 y 4, y para los orificios 1 y 2, se presenta un comportamiento de perfil tipo M1 (Se mantiene la pendiente de fricción), simulando más acertadamente el posible comportamiento en una vía.

*Ilustración 4-21 Grafica de barras comparativas caudales captados modelo vs ecuación para el escenario 1*



Fuente: Elaboración Propia

De las anteriores graficas se puede concluir que para que los resultados obtenidos con la ecuación sean similares a los obtenidos en la realidad es necesario que la longitud de contacto sea medible.

Ahora bien, con el fin de identificar cómo es el comportamiento de la ecuación de sumidero de ventana cuando se presenta una pendiente alta se realiza el mismo análisis

para el escenario 2 (G3S6Q1) dejando las mismas caídas en los orificios. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

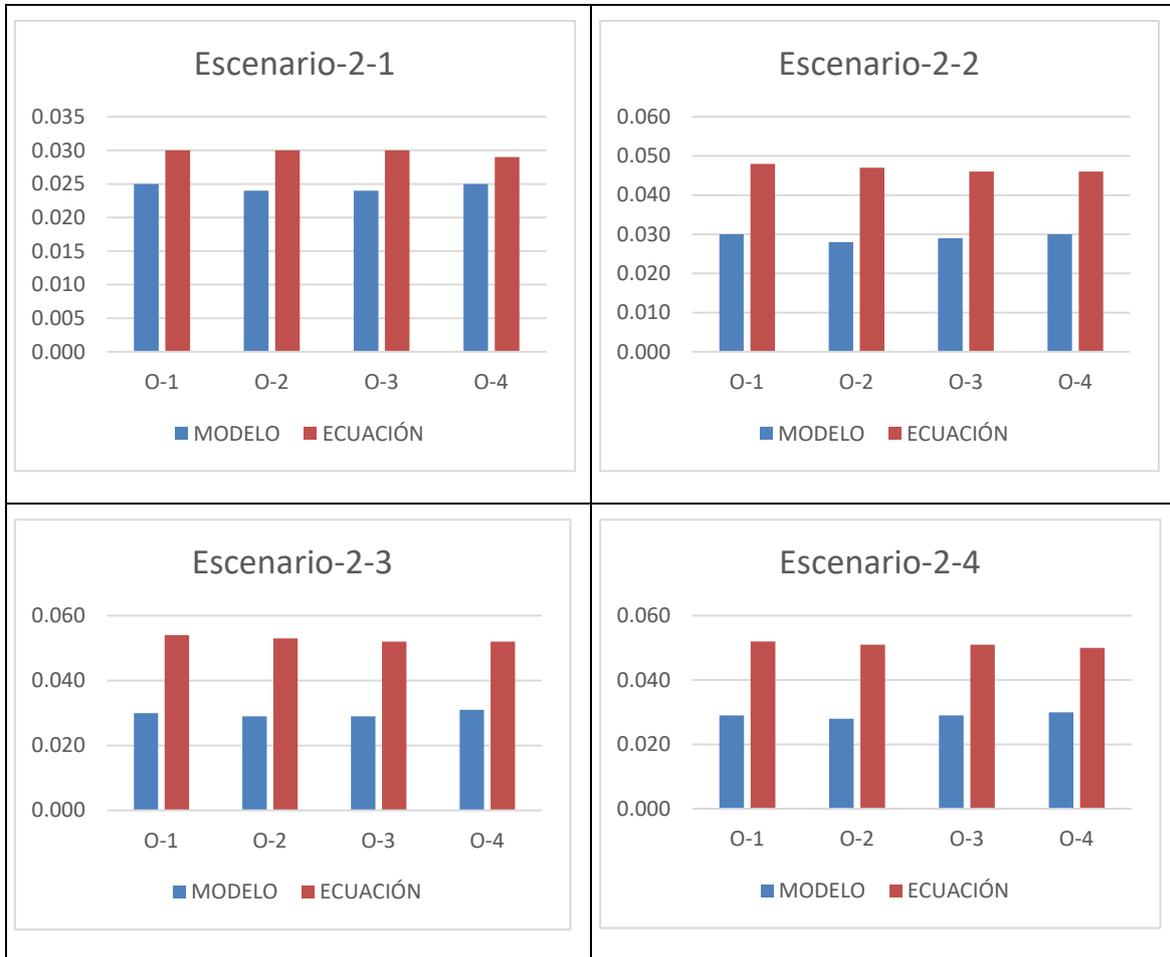
*Tabla 4-11 Caudales captados para los diferentes escenarios 2*

<b>Variables</b>	<b>Escenario-2-1</b>	<b>Escenario-2-2</b>	<b>Escenario-2-3</b>	<b>Escenario-2-4</b>
	<b>G3S6Q1-C1</b>	<b>G3S6Q1-C2</b>	<b>G3S6Q1-C3</b>	<b>G3S6Q1-C4</b>
<b>Q-Entrada</b>	<b>1.997</b>	<b>1.997</b>	<b>1.997</b>	<b>1.997</b>
<b>Q-CaMo-O1</b>	0.025	0.030	0.030	0.029
<b>Q-CaMo-O2</b>	0.024	0.028	0.029	0.028
<b>Q-CaMo-O3</b>	0.024	0.029	0.029	0.029
<b>Q-CaMo-O4</b>	0.025	0.030	0.031	0.030
<b>Q-CaEc-O1</b>	0.030	0.048	0.054	0.052
<b>Q-CaEc-O2</b>	0.030	0.047	0.053	0.051
<b>Q-CaEc-O3</b>	0.030	0.046	0.052	0.051
<b>Q-CaEc-O4</b>	0.029	0.046	0.052	0.050
<b>Err-O1</b>	21.00	58.80	80.40	80.30
<b>Err-O2</b>	25.00	67.70	83.70	83.80
<b>Err-O3</b>	18.90	59.70	80.70	74.70
<b>Err-O4</b>	22.80	52.20	66.30	66.30

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se presentan los anteriores resultados a manera de graficas de barra.

Ilustración 4-22 Grafica de barras comparativas caudales captados modelo vs ecuación para el escenario 2



Fuente: Elaboración Propia

Una vez que se realizaron los ensayos para una condición de flujo subcrítico (escenario-1) y supercrítico (escenario-2), se encontró que la ecuación de sumidero de ventana presenta resultados con un error entre 0% y 8%, cuando el tipo de flujo es subcrítico también se identificó que los valores de la ecuación son más altos a los generados por el modelo, pero la diferencia no es significativa.

Para la condición de flujo supercrítico se encontró que la ecuación de sumidero de ventana presenta resultados con un error entre 20% y 80%, también se reconoció que los valores de la ecuación son más altos.

De lo anterior se concluye que la ecuación de sumidero de ventana aplica cuando se tienen pendientes que presentan un flujo subcrítico, cuando se presenta flujo supercrítico se debe tener en cuenta que la ecuación va a presentar valores más altos de los captados realmente, por lo que se debe afectar la ecuación por un coeficiente.

#### **4.2.2 Capacidad de Captación al Variar la Pendiente Transversal.**

En la geometría de la carretera se tiene la pendiente de la carretera longitudinal y transversal. Invías (INVIAS, 2009), para la pendiente transversal o bombeo, de acuerdo con el tipo de superficie, propone valores de pendiente transversal entre 2% y 4%. Con el fin de determinar el comportamiento de los bordillos drenantes, en el presente estudio, se varia la pendiente transversal entre 2%, 3% y 4%; y las pendientes transversales de 0.30%, 2.5 % y 5% y se ubican los orificios con una caída de los bordillos de 2 cm, donde se presenta la mayor longitud de contacto posible.

*Tabla 4-12 Condiciones de entrada de los modelos reales*

<b>Variables</b>	<b>Plataforma 1</b>	<b>Plataforma 2</b>	<b>Plataforma 3</b>
Caudales	2 l/s	2 l/s	2 l/s
Área	0.04	0.035	0.03
Velocidades	0.05	0.0571	0.0667
TKE	1.22E-5	1.59E-5	2.17E-4
TDR	3.22E-7	3.85E-7	4.73E-7

Fuente: Elaboración Propia

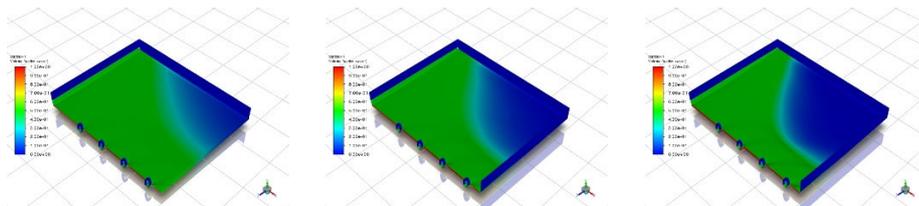
En la anterior tabla EKT hace referencia a *Turbulent Kinetic Energy* y TDR *Turbulent Dissipation Rate*

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos cuando se tiene una pendiente longitudinal del 0.30% y se varia la pendiente transversal, se encontró que efectivamente se tiene un aumento de la capacidad hidráulica.

*Tabla 4-13 Resultados para los modelos con pendiente longitudinal S3 y variación de la pendiente transversal*

Orificio	Qc-Pendiente Transversal	Qc-Pendiente Transversal	Qc-Pendiente Transversal
	2% (359.83)	3%	4%
	G3S3Q1C3ST1	G3S3Q1C3ST2	G3S3Q1C3ST3
Orificio-1	0.143	0.201	0.258
Orificio-2	0.142	0.191	0.221
Orificio-3	0.123	0.149	0.147
Orificio-4	0.092	0.107	0.105

Ilustración

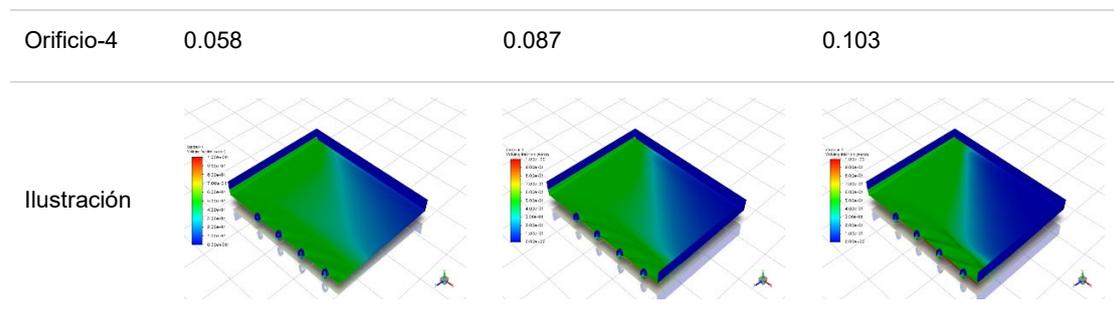


Fuente: Elaboración Propia

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos cuando se tiene una pendiente longitudinal del 2.50% y se varia la pendiente transversal. Se encontró un aumento de la capacidad hidráulica.

*Tabla 4-14 Resultados para los modelos con pendiente longitudinal S5 y variación de la pendiente transversal*

Orificio	Qc-Pendiente Transversal	Qc-Pendiente Transversal	Qc-Pendiente Transversal
	2%	3%	4%
	G3S5Q1C3ST1	G3S5Q1C3ST2	G3S5Q1C3ST3
Orificio-1	0.047	0.062	0.083
Orificio-2	0.051	0.073	0.109
Orificio-3	0.055	0.085	0.125

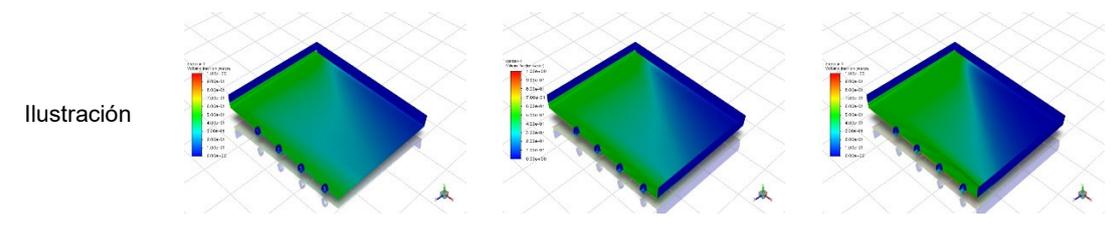


Fuente: Elaboración Propia

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos cuando se tiene una pendiente longitudinal del 5.00% y se varia la pendiente transversal, se encontró que efectivamente se tiene un aumento de la capacidad hidráulica.

*Tabla 4-15 Resultados para los modelos con pendiente longitudinal S6 y variación de la pendiente transversal*

Orificio	Qc-Pendiente Transversal	Qc-Pendiente Transversal	Qc-Pendiente Transversal
	2%	3%	4%
	G3S6Q1C3ST1	G3S6Q1C3ST2	G3S6Q1C3ST3
Orificio-1	0.030	0.041	0.055
Orificio-2	0.029	0.042	0.060
Orificio-3	0.028	0.042	0.067
Orificio-4	0.028	0.045	0.072



Fuente: Elaboración Propia

## Conclusiones

En cuanto al estado de arte del uso de la modelación de dinámica de fluidos computacionales se encontraron investigaciones desde el año 2010 al 2017, donde se buscaba identificar la eficiencia hidráulica de diferentes estructuras de captación de aguas lluvias (sumideros en rejilla y sumideros en ventana) variando la pendiente longitudinal y transversal de la plataforma. Para realizar las modelaciones se emplearon los softwares Flow 3D, Ansys Fluent, Kratos y Ansys CFX y en general se concluyó que los modelos numéricos presentan valores cercanos a los modelos físicos, con un error menor al 10%, por lo que es una buena alternativa evaluar el comportamiento hidráulico de las estructuras hidráulicas mediante la dinámica de fluidos computacional.

Para definir la configuración a emplear en el software Ansys Fluent, se realizó la etapa de validación de resultados, en la cual se revisa que los resultados obtenidos mediante la modelación CFD sean cercanos a los resultados del modelo físico. Para ello se replica el ensayo en laboratorio realizado por la empresa ACO, se hizo un análisis de sensibilidad de los diferentes parámetros que componen la modelación CFD, con el fin de identificar la configuración que presente el menor error. Se obtuvo un error del 27.35% de la modelación en CFD respecto al valor de lámina medido en el ensayo de laboratorio.

El ensayo de laboratorio de ACO consistió en evaluar un bordillo drenante mediante una plataforma, para el ingreso del caudal simulaba un vertedero lateral, ubicado a 1 m del bordillo drenante. En este ensayo se ubicó la estructura de tal manera que la parte baja del orificio diera continuidad la plataforma y se registraron los datos cuando la plataforma presentaba una pendiente transversal del 5% y una pendiente longitudinal del 0.10%. De esta forma se generó una tabla con el caudal de diseño y la profundidad alcanzada en el orificio, sin embargo, no se especifica cual es el orificio donde se realizó la medida.

Al analizar la información del informe se determinó que en el ensayo físico no se define la rugosidad absoluta del material que conforma la plataforma, variable fundamental para generar el modelo numérico, tampoco se establece en que orificio se realizaron las medidas y no es claro cuál es el caudal que se evaluó en la plataforma. Es de mencionar que el tener incertidumbre sobre la medición de los datos del ensayo de laboratorio es una posible causa de que se presente un error significativo.

Como se describió en el presente documento se realizó un análisis de sensibilización de varios parámetros con el fin de determinar la configuración que presentaba el menor error. Al comparar las profundidades de láminas de agua se encontró que el error respecto a los datos experimentales es de 27.35 %. Si bien este resultado podría concluir que las metodologías CFD pueden generar valores muy distintos a los experimentales, al comparar los resultados de la modelación numérica con los resultados matemáticos para el modelo en condiciones reales, (cuando es medible la longitud de contacto), se concluyó que el error se encuentra entre el 0% y 8%, valores aceptables para la modelación numérica en CFD.

A partir del estudio de la física del modelo experimental y estudiar visualmente el comportamiento de las obras de captación de aguas lluvias se identificó que el modelo experimental no considera en su evaluación hecho de que generalmente en el diseño vial se varia la pendiente longitudinal, por lo que en el ensayo experimental al no evaluar este criterio no puede definir cómo es el comportamiento cuando se tiene una pendiente longitudinal baja o alta; puesto que en el modelo el caudal ingresa lateralmente condición que no representa la realidad ya que usualmente el caudal ingresa frontalmente. Por último, generalmente las vías presentan continuidad, lo que no se demuestra en el ensayo experimental dado que la condición de salida solamente se presenta en los orificios lo demás funciona con una condición de pared.

Por lo anterior es necesario realizar el ensayo simulando las condiciones reales de operación, tener un ingreso del caudal de diseño frontal o paralelo a la ubicación de los orificios, tener dos condiciones de salida una al final de la plataforma, dando continuidad a la vía, y la otra en cada uno de los orificios, simulando la captación de cada uno de estos, Adicionalmente como es necesario identificar en qué condiciones funciona mejor el bordillo drenante se varia la pendiente longitudinal.

Respecto a los modelos en condición de operación real se determina variar el caudal entre 2 y 50 l/s y la pendiente longitudinal entre 0.10 y 10 % y se mantiene una pendiente transversal del 2%, generando un total de 42 modelos. De todos los modelos generados se concluyó que **entre menor es la pendiente longitudinal mayor es la eficiencia de captación y a medida que va aumentando la eficiencia disminuye y para vías con pendiente longitudinal alta la eficiencia es prácticamente 0, por lo que no es recomendable emplear estos elementos cuando las pendientes longitudinales**

**son altas (mayores al 5%) y se contradice lo que se afirma en la norma de sumideros NS-047 V6.0 (EAAB, 2021) “Las estructuras de captación bordillo o sardinel drenante presentan una ventaja cuando se tienen vías de alta pendiente longitudinal, donde las demás estructuras no funcionan adecuadamente”.**

Respecto a la optimización hidráulica la primera variación que se puede realizar es modificar la caída en los orificios, buscando que al momento de funcionar hidráulicamente se presente la mayor longitud de contacto posible entre la plataforma y el orificio, encontrando que al dejar una caída de 2 cm se logra obtener una longitud de contacto de 0.058 m, con la cual se tiene la mayor capacidad de captación, para el orificio evaluado.

Para cada uno de estos escenarios se revisó si las ecuaciones de sumidero de ventana para ubicación en pendiente aplican para determinar la capacidad de captación, encontrando que para los escenarios donde se puede medir aproximadamente la longitud de contacto las ecuaciones presentan resultados similares a los obtenidos en la modelación numérica. Se debe tener en cuenta que la ecuación presenta resultados similares a los modelos, sin embargo, a medida que se aumenta la pendiente los resultados de la ecuación van aumentando la diferencia a los resultados obtenidos en el modelo.

También se generó unos escenarios donde se variaba la pendiente transversal entre 2, 3 y 4 %, evaluando para las pendientes longitudinales de 0.30%, 2.50 y 5.00 %, encontrando que entre mayor es la pendiente transversal y menor la pendiente longitudinal mayor es la eficiencia de captación, por lo que ni aumentando la pendiente transversal es viable utilizar estos elementos en zonas con altas pendientes longitudinales (mayores al 5%).

En conclusión la dinámica de fluidos computacionales permite revisar el comportamiento de elementos cuya simulación es compleja en laboratorio, como es el caso de las líneas de corriente y la medición de caudales, por lo que para identificar el comportamiento de las estructuras hidráulicas y evaluar metodologías de diseño; se recomienda aplicar la ecuación de sumidero de ventana siempre en cuando se pueda identificar la longitud de contacto, ya que con esta ecuación se obtienen resultados cercanos a los obtenidos en los modelos numéricos, así mismo se estableció que la máxima eficiencia hidráulica de los bordillos drenantes se obtiene cuando la longitud de

contacto es la máxima posible. En este orden de ideas, los bordillos drenantes son estructuras adecuadas para instalarse en vías con pendiente longitudinal baja, para lugares con pendientes longitudinales altas no se recomienda el uso de estos elementos ya que la captación va a ser mínima. Vale la pena mencionar que otra manera de aumentar la capacidad de captación consiste en aumentar la pendiente transversal de la vía.

### **Recomendación**

Tomando en cuenta una de las conclusiones de la investigación mediante la cual se determinó que una alternativa adecuada para evaluar las estructuras hidráulicas, consiste en generar una modelación con la dinámica de fluidos computacional, en concordancia con el estado de arte de las investigaciones relacionadas con la evaluación de estructuras hidráulicas, se recomienda que para próximos estudios donde se requiera identificar el comportamiento de estructuras hidráulicas complejas se implemente este tipo de modelación numérica.

Ahora bien, en cuanto a los ensayos en laboratorio para evaluar estructuras de captación, se recomienda evaluar y/o simular las condiciones de contorno reales de operación de este tipo de estructuras, especificando claramente la rugosidad del material de la plataforma, el caudal de entrada y si es posible medir los caudales captados por cada uno de los orificios, registrando las láminas en cada uno de los orificios y el error de medición de estos datos, para lo cual se recomienda evaluar por lo menos 4 o 6 orificios. Así mismo, se sugiere emplear la geometría y la física del actual problema de estudio, de forma tal que se refuerce la conclusión del presente trabajo, respecto a la utilidad de la dinámica de fluidos computacional para la predicción del comportamiento de estructuras hidráulicas complejas,

En lo que respecta al uso de los bordillos drenantes, a partir de los resultados obtenidos, se recomienda que se implementen dichos elementos de captación solamente en lugares donde se presenten pendientes longitudinales de medias a bajas, puesto que como se concluyó en la presente investigación, estas estructuras funcionan mejor para esta condición, por lo cual no se aconseja su uso en lugares con pendientes longitudinales altas, ni aun aumentando la pendiente transversal, puesto que su eficiencia

solo aumentar un 30% al aumentar la pendiente transversal y por ende no funcionarán en óptimas condiciones hidráulicas.

En concordancia con lo anterior, se recomienda que los orificios se ubiquen de tal manera que la longitud de contacto con la vía sea la máxima posible. Así mismo si se tiene la posibilidad, se aconseja aumentar la pendiente transversal para aumentar la eficiencia de captación de estos bordillos.

Puesto que tanto en las investigaciones del estado de arte como en el presente estudio se identificó que los sumideros de rejilla y las estructuras de apertura lateral en los bordillos o sardineles no desarrollan una estructura hidráulica que funcione para las condiciones de pendiente longitudinal alta y pendiente transversal mínima aceptado por los manuales de diseño geométrico vial, se sugiere evaluar la pertinencia de la implementación de estas estructuras en dichos casos.

Por último, se aclara que, dado el alcance de la presente investigación, no fue posible abordar algunos temas que son de interés para el funcionamiento de los bordillos drenantes, por lo cual se proponen las siguientes líneas de investigación para futuros proyectos relacionados con la modelación de estructuras de captación:

- Determinar el coeficiente de reducción del caudal captado para la ecuación de sumidero de ventana, de forma tal, que la ecuación sea aplicable para cualquier condición, evaluando que los resultados obtenidos sean similares a los del modelo físico o numérico.
- Comparar los resultados de los caudales captados y el comportamiento de las líneas de corriente de un sumidero de ventana, canal monolítico, sumidero de rejilla y bordillo drenante.
- Realizar un estudio donde se modifique la sección geométrica de los orificios y se evalúe si al cambiar la distancia entre orificios y la geometría se puede mejorar la captación.
- Evaluar el comportamiento de los bordillos drenantes cuando en la plataforma se presentan elementos que obstruyan el ingreso del agua a los orificios o cuando se presenta una alta sedimentación.
- Si bien en esta investigación no se hace mención de las estructuras de transporte que reciben las aguas lluvias de los bordillos drenantes, si es

necesario realizar una investigación que permita identificar cuál debe ser la sección geométrica optima que genere el mayor rendimiento hidráulico respecto a capacidad y esfuerzo cortante cuando se tiene una pendiente longitudinal mínima, además evaluar qué tan viable es emplear caídas internas dentro de estos elementos, respecto al comportamiento de sedimentos, con el fin de aprovechar mejor los espacios.

## Referencias

- 102/00, H. (2000). Design Manual for Roads and Bridge. In The Highways Agency, The Scottish Executive Development Department, & The Department for Regional Development, Vol . Northern Ireland.
- Agustina Reyes, J. (2015). *Modelización numérica de elementos de catación de aguas pluviales urbanas*. Barcelona, España: Escola de Caminns UPC.
- ANSYS. (2013). *Ansys help 16.0*. Canonsburg, Pensilvania Estados Unidos: ANSYS.
- ANSYS Inc. (2013). *ANSYS Flunet Theory Guide*. Estados Unidos de America: ANSYS.
- ANSYS Inc. (2016). *ANSYS Fluent Tutorial Guide*. Estados Unidos de America: ANSYS.
- Aragón Hernández, J. L. (2013). *Modelación Numérica Integrada de los Procesos Hidráulicos en el Drenaje Urbano*. Barcelona, España: Universidad Politecnica de Catalunya.
- Austroroads. (2013). Guide to Road Design Part 5A: Drainage - Road Surface, Networks, Basins and Subsurface. In Austroroads, *Kerbed Drainage* (pp. 67-110). Sydney, Australia: Austroroads.
- Bakker, A. (n.d.). *The Colorful Fluid Mixing Gallery*. Obtenido de Course materials for the *Computational Fluid Dynamics*. Retrieved from Dartmouth College from 2002-2006: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>
- Bengt, A., Ronnie, A., Love, H., Mikael, M., Rahma, S., & Berend van, W. (2011). *Computational Fluid Dynamics For Engineers*. New York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Bengt, A., Ronnie, A., Love, H., Mikael, M., Rahman, S., & Berend Van, W. (2012). *Computational Fluid Dynamic for Engineers*. Cambridge: Cambridge.
- Bridge, Design Manual for Roads and. (2020). CG 501 Design of highway drainage system. Londres: Highway England.
- Cárdenas Quintero, M., Carvajal Serna, L., & Marbello Pérez, R. (2017). Evaluación numérica tridimensional de un sumidero de reja de fondo. *SEREA 2017 Seminario Iberoamericano de Redes de Agua*, 3.

- Cárdenas-Quintero, M., Carvajal-Serna, L., & Marbello-Pérez, R. (2017). Evaluación numérica tridimensional de un sumidero de reja de fondo. *SEREA 2017 Seminario Iberoamericano de Redes de Agua*.
- CEDEX. (n.d.). Guía Técnica sobre redes de saneamiento y drenaje urbano. In CEDEX, *Características de los componentes de las redes de saneamiento y drenaje urbano* (pp. 285-289). 2007: CEDEX.
- Chung, T. (2002). *Computational Fluid Dynamics*. United Kingdom: CAMBRIDGE University Press.
- Conagua. (2016). *MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCATARILLADO Y SANEAMIENTO; Drenaje Pluvial Urbano*. Mexico: Comisión Nacional del agua.
- Díaz Granados, M., & Vargas, R. (1998). *Curvas Sintéticas regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes.
- Díaz, H. A. (2013). *Drenaje Urbano Elementos de Diseño Drenaje Urbano no convencional*. Colombia, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Durrans, H. M. (2003). *Stormwater Conveyance Modeling and Design*. Watertown, CT USA: Haestad Press.
- EAAB. (2021). *NS-047 Sumideros*. Bogotá Colombia: EAAB.
- Fang, X., Shoudong, J., & Shoeb, A. (2010). Numerical Simulations of Efficiency of Curb-Opening Inlets. *ASCE Library*, 62-66.
- Fernández Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos, Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona: Reverte SAS.
- Fernández Oro, J. M. (2012). *Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos*. Barcelona, España: REVERTE SAS.
- FHWA-NHI-10-009. (2009). *Hydraulic Engineering Circular No 22, Third Edition*. Estados Unidos: National Highway Institute.
- Gijón-Rivera, J. X. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*. EE.UU: Palibrio.

- Gómez, M., Recasens, J., Russo, B., & Martínez-Gomariz, E. (2016). Assessment of inlet efficiency through a 3D simulation: numerical and experimental comparison. *Water Science & Technology*.
- Guo, J. (2006). *Urban Hydrology and Hydraulic Design*. Colorado, United States of America: Water Resources Publications LIC.
- Instituto Nacional de Vías. (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Bogotá, Colombia: INVIAS.
- INVIAS. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Transporte.
- Lopes, P., Carvalho, R., & Leandro, J. (2017). Numerical and experimental study of the fundamental flow characteristics of a 3D gully box under drainage. *Water Science & Technology*.
- Mogollón Mogollón, F. (2018). *Modelación numérica de estructuras hidráulicas 3D en Ansys - Fluent. Caso de estudio Aliviadero el Ejido*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Mora Uscategui, J. A. (2017). *Modelación hidrodinámica Bi y Tridimensional de dos canales con dissipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería utilizando ANSYS FLUENT*. Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Mora Uscategui, J. A. (2017). *Modelación hidrodinámica Bi y Tridimensional de dos canales con dissipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería utilizando ANSYS FLUENT*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Naqvi, M. (2003). Design of Linear Drainage System. In *Design of channels carrying linearly varied flow I: spacing of outlets* (p. 189). London, Reino Unido: Thomas Telford Ltd.
- Otálora Carmona, A. H. (2016). Modelación numérica 3D con Ansys Fluent del vertedero laberinto de central hidroeléctrica "La Naveta", en Apulo - Cundinamarca, a partir de un Modelo físico a escala. *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*.

- Pérez Díaz, J. M. (2014). *Análisis de la eficiencia de rejillas de aguas pluviales mediante técnicas CFD*. Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia.
- Popescu, I. (2014). *Computational Hydraulics Numerical Methods and Modelling*. London, England: IWA Publishing.
- Recasens Vargas, J. (2014). *Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero*. Barcelona, España: Escola de Caminos UPC.
- Vargas, J. R. (2014). *Modelación tridimensional del flujo de entrada en un sumidero 711- TES-CA-6388*. Barcelona, España: Escola de Camins.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. England: Pearson Education.
- Wearing, M. (2015). *Testing of Kerb Drain Drain Inlets*. CMR Rainwater Drainage Consultancy Ltd.