

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**



**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL**

**TEMA:**

---

“MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE  
LOS SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIA TIPO T45 APLICANDO MECÁNICA DE  
FLUIDOS COMPUTACIONALES”

---

**AUTOR:** MELANIE NEYDHI ROMERO VITERI

**TUTOR:** ING. MEng. LENIN MALDONADO

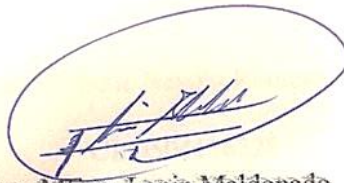
**AMBATO – ECUADOR**

**2019**

## **APROBACIÓN DEL TUTOR**

Certifico que el presente Trabajo Experimental bajo el tema “**MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIA TIPO T45 APLICANDO MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES**”, realizado por la Srta. Melanie Neydhi Romero Viteri, egresada de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, previo a la obtención del título de Ingeniera Civil, se desarrolló bajo mi tutoría, el cual se ha concluido de manera satisfactoria.

Ambato, Julio del 2019



Ing. MEng. Lenin Maldonado

**TUTOR DE TESIS**

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

El contenido del presente Trabajo Experimental bajo el tema “**MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIA TIPO T45 APLICANDO MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES**”, son de exclusiva responsabilidad del autor.

Ambato, Julio 2019



Egda. Melanie Neydhi Romero Viteri

CI: 0504116328

**AUTORA**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este Trabajo Experimental dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autora.



Egda. Melanie Neydhi Romero Viteri

CI: 0504116328

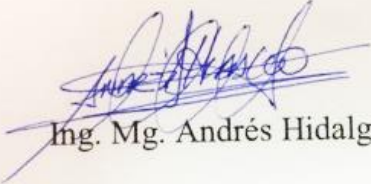
**AUTORA**

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

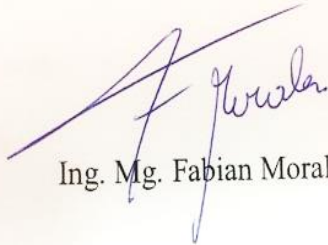
Los miembros del tribunal examinador aprueban el Informe de Investigación, bajo el tema: **“MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIA TIPO T45 APLICANDO MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES”**, de Melanie Neydhi Romero Viteri, egresada de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Ambato, Julio 2019

Para constancia firman:



Ing. Mg. Andrés Hidalgo



Ing. Mg. Fabian Morales

## DEDICATORIA

*A mi padre Ney, por ser una de las primeras personas en inspirarme a seguir mi carrera, porque desde niña has estado a mi lado para aconsejarme y hacer de mí la persona que soy, confiar en cada paso que doy, dejarme volar para crecer como profesional y persona, por enseñarme que en la vida siempre debo luchar para alcanzar mis sueños. Eres un gran ejemplo de superación.*

*Con la misma admiración, a mi madre Jimena, la mujer que día a día ha cuidado de mí, desde mis primeros pasos hasta hoy, inculcaste en mí los mejores valores. A ti por toda tu entrega y dedicación, porque cada aurora mía, la hacías también tuya, por siempre permanecer al pendiente de mi vida y jamás dejar que me falte nada. Sin tu presencia nada de esto hubiese sido posible.*

*A mi amada hermana Lesly, una de las personas más importantes en mi vida, mi compañera, mi cómplice y mi amiga, a ti por ser como eres, apoyarme, y celebrar cada uno de mis triunfos conmigo.*

*A mi novio Michel, la persona que ha sido mi guía desde el inicio de mi carrera, siempre me apoyas ante una derrota y no dejas que decaiga, gracias por el amor inmenso que me tienes y por expresarlo a diario, por ser tolerante, paciente y caminar siempre de mi mano.*

*A mí querida Dulce, mi compañera incondicional de cuatro patitas, mi juguetito y mi alegría siempre.*

*Melanie*

## AGRADECIMIENTO

*Estas líneas van dirigidas principalmente a Dios, por siempre cuidarme y guiar mi camino, por permitirme superar cada uno de los obstáculos a lo largo de la carrera y con su bendición poder culminarla.*

*A mis padres quienes han sido los promotores de mis sueños y anhelos, y los pilares en mi vida. Dios les pague por tanto.*

*A mis docentes, por todos los conocimientos y experiencias impartidas, a mis amigos por hacer de esta etapa universitaria la más bonita para mí.*

*En fin, a todas las personas quienes con sus buenos deseos y energías estuvieron conmigo en el desarrollo de este proyecto aportando con su granito de arena.*

*Melanie*

# ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

## A. PÁGINAS PRELIMINARES

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	v
DEDICATORIA .....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO .....	xviii
ABSTRACT SUMMARY .....	xix

## B. CONTENIDOS

CAPÍTULO I.....	1
1.1 Antecedentes Investigativos.....	1
1.1.1 Antecedentes.....	1
1.1.2 Justificación .....	3
1.1.3 Fundamentación Teórica.....	5
1.1.3.1 Análisis de Normativa para el Diseño Vial.....	5
1.1.3.2 Elementos Generales del Diseño Geométrico Vial.....	5
1.1.3.3 Análisis Hidrológico .....	10
1.1.3.4 Análisis Hidráulico.....	20
1.1.3.5 Introducción a Momentos Hidráulicos.....	29



1.1.4	Hipótesis .....	32
1.1.4.1	Hipótesis alternativa.....	32
1.1.4.2	Hipótesis Nula.....	32
1.2	Objetivos .....	33
1.2.1	Objetivo General:.....	33
1.2.2	Objetivos Específicos: .....	33
CAPÍTULO II .....		34
2.1	Materiales.....	34
2.2	Métodos.....	35
2.2.1	Nivel o tipo de investigación .....	35
2.2.2	Población y muestra.....	36
2.2.3	Plan de recolección de información.....	39
2.2.4	Plan procesamiento y análisis .....	40
2.2.4.1	Plan de procesamiento y análisis.....	40
CAPÍTULO III.....		41
3.1	Análisis y discusión de los resultados.....	41
3.1.1	Análisis de resultados .....	41
3.1.1.1	Representación gráfica de investigaciones previas .....	41
3.1.1.2	Descripción general del modelo numérico.....	44
3.1.1.2.1	Datos generales.....	44
3.1.1.2.2	Condiciones del fluido.....	49
3.1.1.2.3	Condiciones de flujo.....	52
3.1.1.2.4	Condiciones de borde y mallado .....	53
3.1.1.2.5	Tiempo de simulación .....	56
3.1.1.3	Calibración del modelo físico y el modelo numérico .....	61

3.1.1.4	Curva de eficiencia de modelo numérico.....	66
3.1.1.5	Curvas del caudal en vía vs caudal de sumidero.....	71
3.1.1.6	Ecuaciones de tendencia y eficiencia.....	77
3.1.2	Discusión de resultados .....	83
3.2	Verificación de la hipótesis.....	87
CAPITULO IV .....		90
4.1	Conclusiones .....	90
4.2	Recomendaciones.....	92
<b>C. MATERIAL BIBLIOGRÁFICO</b>		
Referencias bibliográficas.....		93
Anexos.....		96
Resultados de simulación y estabilidad del flujo de las 32 combinaciones.....		96
Escenario 1. Un solo sumidero.....		96
Escenario 2. Dos sumideros en serie .....		104

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Anchos de Calzada.....	7
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de Pendientes Transversales.....	8
<b>Tabla 3.</b> Pendientes Longitudinales .....	9
<b>Tabla 4.</b> Intensidad máxima en 24 horas determinada con información pluviométrica .	12
<b>Tabla 5.</b> Intensidad máxima, ecuaciones representativas de estaciones pluviográficas..	13
<b>Tabla 6.</b> Cálculo de Intensidades – Duración 5min < 34min – Estación Ambato .....	13
<b>Tabla 7.</b> Cálculo de Intensidades – Duración 34min < 1440min – Estación Ambato ....	15
<b>Tabla 8.</b> Periodo de Retorno.....	18
<b>Tabla 9.</b> Combinaciones de pendientes de estudio.....	36
<b>Tabla 10.</b> Combinaciones de pendientes de estudio seleccionadas.....	37
<b>Tabla 11.</b> Plan de recolección de datos .....	39
<b>Tabla 12.</b> Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas.....	49
<b>Tabla 13.</b> Transformación de caudal. Escenario S1 y S2. Bombeo 2% .....	51
<b>Tabla 14.</b> Transformación de caudal. Escenario S1 y S2. Bombeo 4% .....	51
<b>Tabla 15.</b> Combinaciones de pendientes y Caudales. ....	52
<b>Tabla 16.</b> Ejemplo, Resultado de Simulación. Escenario 1 .....	57
<b>Tabla 17.</b> Ejemplo, Resultado de Simulación, Escenario 2 .....	59
<b>Tabla 18.</b> Parámetros y para el sumidero S1 .....	62
<b>Tabla 19.</b> Parámetros y para el sumidero <i>en serie</i> S2 .....	62
<b>Tabla 20.</b> Datos y resultados de Modelo Físico vs Modelo Numérico .....	63
<b>Tabla 21.</b> Datos y resultados de Modelo Físico vs Modelo Numérico .....	65
<b>Tabla 22.</b> Eficiencia de Sumidero T45 en el Modelo Numérico. Bombeo 2% .....	66
<b>Tabla 23.</b> Eficiencia de Sumidero T45 en el Modelo Numérico. Bombeo 4% .....	67
<b>Tabla 24.</b> Eficiencia de Sumidero T45 en el Modelo Numérico. Bombeo 2% .....	69
<b>Tabla 25.</b> Eficiencia de Sumidero T45 en el Modelo Numérico. Bombeo 4% .....	70
<b>Tabla 26.</b> Resultados de caudal de ingreso en vía y caudal captado en sumidero. Escala real.....	72
<b>Tabla 27.</b> Resultados de caudal ingresado en vía y caudal captado en sumidero. Escala real.....	73

<b>Tabla 28.</b> Resultados de caudal ingresado en vía y caudal captado en sumidero. Escala real.....	74
<b>Tabla 29.</b> Resultados de caudal ingresado en vía y caudal captado en sumidero. Escala real.....	76
<b>Tabla 30.</b> Coeficientes de ajuste del escenario 1. Bombeo 2% .....	78
<b>Tabla 31.</b> Coeficientes de ajuste del escenario 1. Bombeo 4% .....	80
<b>Tabla 32.</b> Coeficientes de ajuste del escenario 2. Bombeo 2% .....	81
<b>Tabla 33.</b> Coeficientes de ajuste del escenario 2. Bombeo 4% .....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Curva Intensidad – Duración 5min < 34min – Estación Ambato.....	15
<b>Figura 2.</b> Curva Intensidad – Duración 34min < 1440min – Estación Ambato.....	17
<b>Figura 3.</b> Flujo Permanente.....	21
<b>Figura 4.</b> Flujo no Permanente.....	21
<b>Figura 5.</b> Flujo uniforme .....	22
<b>Figura 6.</b> Flujo uniforme .....	22
<b>Figura 7.</b> Flujo gradualmente variado.....	23
<b>Figura 8.</b> Flujo rápidamente variado.....	23
<b>Figura 9.</b> Flujo laminar y turbulento .....	25
<b>Figura 10.</b> Modelo Hidráulico unidimensional (x) .....	30
<b>Figura 11.</b> Modelo Hidráulico bidimensional (x;y) .....	31
<b>Figura 12.</b> Modelo Hidráulico tridimensional (x;y;z) .....	31
<b>Figura 13.</b> Escenarios de sumideros tipo T45 .....	41
<b>Figura 14.</b> Eficiencia de captación vs caudal. Modelo S1. Bombeo 2% .....	42
<b>Figura 15.</b> Eficiencia de captación vs caudal. Modelo S1. Bombeo 4% .....	43
<b>Figura 16.</b> Eficiencia de captación vs caudal. Modelo S2. Bombeo 2% .....	43
<b>Figura 17.</b> Eficiencia de captación vs caudal. Modelo S2. Bombeo 4% .....	44
<b>Figura 18.</b> Dimensiones de la vía.....	45
<b>Figura 19.</b> Vista 3D, pendiente transversal .....	46
<b>Figura 20.</b> Vista 3D, pendiente longitudinal .....	46
<b>Figura 21.</b> Dimensiones <i>en metros (m)</i> de sumidero tipo T45.....	47
<b>Figura 22.</b> Vista 3D de sumidero tipo T45.....	47
<b>Figura 23.</b> Modelo tridimensional en software. Escenario 1 .....	48
<b>Figura 24.</b> Modelo tridimensional en Software. Escenario 2.....	48
<b>Figura 25.</b> Identificación de los bloques de malla en el modelo. <i>Escenario 1</i> .....	54
<b>Figura 26.</b> Identificación del mallado del modelo. <i>Escenario 1</i> .....	54
<b>Figura 27.</b> Identificación de los bloques de malla en el modelo. Escenario 2 .....	55
<b>Figura 28.</b> Identificación del mallado del modelo. Escenario 2.....	55

<b>Figura 29.</b> Vista del fluido en el modelo. <i>Escenario 1</i> .....	56
<b>Figura 30.</b> Vista del fluido en el modelo. <i>Escenario 2</i> .....	56
<b>Figura 31.</b> Estabilización de flujo. <i>Escenario 1</i> .....	59
<b>Figura 32.</b> Estabilización de flujo. <i>Escenario 2</i> .....	61
<b>Figura 33.</b> Eficiencia de Sumidero T45 para 2% de bombeo y 4.0% de pendiente longitudinal .....	64
<b>Figura 34.</b> Eficiencia de Sumidero T45 para 4% de bombeo y 4% de pendiente longitudinal .....	65
<b>Figura 35.</b> Curvas de eficiencia de sumidero T45 del Modelo Numérico para 2% de bombeo y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0% .....	67
<b>Figura 36.</b> Curvas de eficiencia de sumidero T45 del Modelo Numérico para 4% de bombeo y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0% .....	68
<b>Figura 37.</b> Curvas de eficiencia de sumidero T45 en el Modelo Numérico para 2% de bombeo y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0% .....	69
<b>Figura 38.</b> Curvas de eficiencia de sumidero T45 en el Modelo Numérico para 4% de bombeo y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0% .....	71
<b>Figura 39.</b> Caudal captado por el sumidero T45. Bombeo 2% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0 % .....	72
<b>Figura 40.</b> Caudal captado por el sumidero T45. Bombeo 4% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0 % .....	74
<b>Figura 41.</b> Caudal captado por el sumidero T45. Bombeo 4% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0 % .....	75
<b>Figura 42.</b> Caudal captado por el sumidero T45. Bombeo 4% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0 % .....	76
<b>Figura 43.</b> Eficiencia de captación y curvas de la función potencial de S1. Bombeo 2% .....	78
<b>Figura 44.</b> Eficiencia de captación y curvas de la función potencial de S1. Bombeo 4% .....	79
<b>Figura 45.</b> Eficiencia de captación y curvas de la función potencial de S2. Bombeo 2% .....	81

<b>Figura 46.</b> Eficiencia de captación y curvas de la función potencial de S2. Bombeo 4% .....	82
<b>Figura 47.</b> Comparación de Eficiencia entre S1 y S2 con bombeo del 2% .....	84
<b>Figura 48.</b> Comparación de Eficiencia entre S1 y S2 con bombeo del 4% .....	85
<b>Figura 49.</b> Diferencia de Eficiencia entre S1 y S2 con bombeo 2% .....	86
<b>Figura 50.</b> Diferencia de Eficiencia entre S1 y S2 con bombeo 4% .....	86
<b>Figura 51.</b> Eficiencia del Escenario 1 - Un sumidero "S1" .....	88
<b>Figura 52.</b> Eficiencia del Escenario 2 - Dos sumideros en serie "S2" .....	88
<b>Figura 53.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 16.91 lt/s.....	96
<b>Figura 54.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 47.85 lt/s.....	97
<b>Figura 55.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 79.75 lt/s.....	97
<b>Figura 56.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 111.65 lt/s.....	98
<b>Figura 57.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 16.91 lt/s.....	98
<b>Figura 58.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 47.85 lt/s.....	99
<b>Figura 59.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 79.75 lt/s.....	99
<b>Figura 60.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 111.65 lt/s.....	100
<b>Figura 61.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 20.74 lt/s.....	100
<b>Figura 62.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 47.85 lt/s.....	101
<b>Figura 63.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 79.11 lt/s.....	101

<b>Figura 64.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 111.65 lt/s.....	102
<b>Figura 65.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4%. Caudal 20.74 lt/s.....	102
<b>Figura 66.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 48.17 lt/s.....	103
<b>Figura 67.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 79.11 lt/s.....	103
<b>Figura 68.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 111.65 lt/s.....	104
<b>Figura 69.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 16.91 lt/s.....	104
<b>Figura 70.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 47.85 lt/s.....	105
<b>Figura 71.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 79.75 lt/s.....	105
<b>Figura 72.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 111.65 lt/s.....	106
<b>Figura 73.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 16.91 lt/s.....	106
<b>Figura 74.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 47.85 lt/s.....	107
<b>Figura 75.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 79.75 lt/s.....	107
<b>Figura 76.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 111.65 lt/s.....	108
<b>Figura 77.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 20.74 lt/s.....	108
<b>Figura 78.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 48.17 lt/s.....	109



<b>Figura 79.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 79.11 lt/s.....	109
<b>Figura 80.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 111.65 lt/s.....	110
<b>Figura 81.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 20.74 lt/s.....	110
<b>Figura 82.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 48.17 lt/s.....	111
<b>Figura 83.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 79.11 lt/s.....	111
<b>Figura 84.</b> Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 111.65 lt/s.....	112

## RESUMEN EJECUTIVO

**TEMA:** “MODELACIÓN NUMÉRICA PARA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LOS SUMIDEROS DE AGUAS LLUVIA TIPO T45 APLICANDO MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES”

**AUTOR:** Melanie Neydhi Romero Viteri

**TUTOR:** Ing. MEng. Lenin Rafael Maldonado Narváez

El presente trabajo experimental tiene por objetivo determinar la eficiencia hidráulica en la captación de agua en sumideros implantados en vías urbanas. Para la elaboración del modelo numérico, se basó en los resultados de un modelo hidráulico físico a escala 1:4 realizado y ensayado previamente en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato. A partir de esta investigación se creó un modelo numérico tridimensional a escala real con un software de aplicación de mecánica de fluidos computacionales (CFD), el mismo que permitió la simulación y análisis de resultados. La investigación se enfoca a modelos de sumideros tipo T45 basándose en la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12.

Las condiciones para la simulación del modelo tridimensional fueron las mismas de la investigación a escala 1:4, se replicó la pendiente transversal (bombeo) de 2% y 4%, las pendientes longitudinales de 0.5% y 4%, los caudales de ingreso a escala real para un sumidero (Escenario 1): 16.91, 47.85, 79.75 y 111.65 lt/s; para dos sumideros en serie (Escenario 2): 20.74, 48.17, 79.11 y 111.65 lt/s.

Mediante la composición de pendientes transversales, longitudinales y los caudales de ingreso, se crearon 32 combinaciones para ser simuladas, las mismas que demostraron la eficiencia de los sumideros T45.

Se determinó que, al aumentar un sumidero en serie, aumenta la eficiencia del mismo, pero en un análisis de sistema de drenaje no garantiza que la eficiencia se duplique por lo que depende mucho de la geometría de la rejilla y el diseño vial.

## ABSTRACT SUMMARY

**SUBJECT:** "NUMERICAL MODELING FOR DETERMINING THE EFFICIENCY OF RAINWATER TANK TYPE T45 APPLYING COMPUTATIONAL FLUID MECHANICS"

**AUTHOR:** Melanie Neydhi Romero Viteri

**TUTOR:** Ing. MEng. Lenin Rafael Maldonado Narváez

The objective of this experimental work is to determine the hydraulic efficiency in the collection of water in sumps implanted in urban roads. For the elaboration of the numerical model, it was based on the results of a 1: 4 physical hydraulic model carried out and previously tested in the Faculty of Civil and Mechanical Engineering of the Technical University of Ambato. Based on this research, a real-scale three-dimensional numerical model was created with software for the application of computational fluid mechanics (CFD), which allowed the simulation and analysis of results. The research focuses on T45 type sink models based on the Ecuadorian Vial Standard NEVI-12.

The conditions for the simulation of the three-dimensional model were the same as those of the investigation at the 1: 4 scale, the transversal slope (pumping) of 2% and 4%, the longitudinal slopes of 0.5% and 4%, the inflow flows to real scale for a sink (Scenario 1): 16.91, 47.85, 79.75 and 111.65 lt / s; for two series sinks (Scenario 2): 20.74, 48.17, 79.11 and 111.65 lt / s.

By means of the composition of transversal, longitudinal slopes and the admission flows, 32 combinations were created to be simulated, the same ones that demonstrated the efficiency of the T45 sinks.

It was determined that increasing a series sink increases the efficiency of the same, but in a drainage system analysis it does not guarantee that the efficiency is doubled, so it depends a lot on the geometry of the grid and the road design.

# **CAPÍTULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

### **1.1 Antecedentes Investigativos**

#### **1.1.1 Antecedentes**

El primer elemento de un sistema de alcantarillado pluvial son los sumideros, los mismos que son estructuras encargadas de recoger el agua que fluye por las cunetas de las vías con el mínimo de interferencia para el tráfico vehicular y peatonal, evitando la introducción de material de arrastre a los colectores, por esta razón es fundamental el análisis de su comportamiento para optimizarlos y hacer de los sistemas de drenaje una obra que brinde eficiencia y seguridad a la población [1].

En algunos países en temporadas de intensas lluvias se puede apreciar el aumento de caudales que recorren obras viales, los cuales no pueden ser captados en su gran mayoría por los sumideros, debido a cambios de patrones de intensidades de lluvia, la baja capacidad de diseño de las rejillas, falta de mantenimiento, obstrucciones de material de arrastre y basura.

En 2011 en la ciudad de México se hizo un estudio sobre el impacto de la crecida de precipitaciones, el cual afecta al comportamiento de las obras de drenaje, en especial de las rejillas colectoras del agua de lluvia, provocando daños a la población y haciendo

poco eficientes las obras que en un inicio fueron diseñadas para protección de la ciudadanía [2]

En los últimos años se ha verificado que en muchos casos uno de los problemas de aguas lluvia es la insuficiente capacidad de captación o mal funcionamiento de los sumideros implantados en la vía.

En varias investigaciones realizadas en Chile, concluyen que los sumideros ubicados en las calles eran más eficientes, de igual manera se ha ideado mejoras en la eficiencia incorporando embaulados que conduzcan el flujo hacia el sumidero, permitiendo un mayor contacto [3].

En Argentina se ha demostrado que la eficacia de los sumideros no llega al 100% debido a varios factores, tales como las combinaciones de pendientes transversal y longitudinal, el caudal de ingreso y el material de arrastre que puede existir en una vía.

En el Ecuador los estudios hidráulicos suponen que el agua que fluye en la superficie es captada en su totalidad por las tuberías de conducción, pero en la realidad este fenómeno es diferente, ya que la alcantarilla solo capta cierto porcentaje del caudal total, por lo tanto, se corre el riesgo de accidentes e inundaciones.

Debido a lo mencionado anteriormente y las hipótesis generadas, la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, realizó un “Cálculo Experimental de la Eficiencia Hidráulica en Sumideros de Aguas Pluviales” el cual propone el aumento de un sumidero en serie y demuestra que la eficiencia hidráulica debe evaluarse según el caso de intervención en la calle, especialmente el impacto del tránsito vehicular en la vía. Adicionalmente se llevó a cabo la “Modelación Hidráulica

para la Determinación de la Eficiencia de los Sumideros de Aguas Lluvia”, la misma que demuestra el aumento de la eficiencia de captación de los sumideros debido a la ubicación, pendientes y número de rejillas implantadas.

Los sumideros son los elementos principales de un sistema de drenaje, encargados de introducir y conducir el agua de escorrentía producida por la lluvia. Es por esto que el diseño, la elección del modelo apropiado y la ubicación de la rejilla son aspectos fundamentales [4].

Para ello, el presente proyecto tiene como finalidad la modelación numérica para el análisis computacional de los sumideros de agua lluvia, en base a investigaciones anteriores, y así evaluar y validar las condiciones geométricas y geográficas que deben tener para hacer del sistema de alcantarillado pluvial una obra más eficiente.

### **1.1.2 Justificación**

En base a lo mencionado anteriormente, pocos estudios son los que han realizado simulaciones computacionales con el objetivo de conocer el comportamiento de los sumideros ante una tormenta, sin la necesidad de una experimentación física.

Con los avances en ingeniería en estructuras viales, es importante el control de la demanda de agua proveniente de cualquier origen, para mantener y garantizar el funcionamiento óptimo de la obra y preservar sus materiales, garantizando su seguridad y evitando pérdidas económicas. De esta manera es fundamental un sistema de drenaje pluvial diseñado para conducir adecuadamente el agua proveniente de la escorrentía superficial lo más rápido posible [5].

La solución a los problemas de inundación tanto en zonas urbanas como rurales es una correcta gestión de las infraestructuras para mejorar su eficacia. La capacidad de un colector está dada por sus dimensiones y la velocidad con que capta el agua, cabe recalcar que la velocidad está vinculada con la topografía del sitio, por ello es necesario innovar la funcionalidad de los sumideros, permitiendo así el incremento de la capacidad de recolección [6].

La modelación numérica ha llevado a la ingeniería a un importante desarrollo de simuladores de flujo superficial, proporcionando características como dimensionalidad en 2D y 3D, capacidad de regímenes de flujo, entre otros. La dinámica de fluidos computacional (CFD) consiste en la aplicación de técnicas numéricas para la resolución de fenómenos físicos que intervienen en el proceso del movimiento del fluido. Los programas creados para resolver las ecuaciones matemáticas, que expresan las leyes por las que se rigen los fluidos, son capaces de ejecutar un gran número de cálculos por unidad de tiempo [7]. De la gran variedad de software que existe en el mercado se ha seleccionado el CFD. Este tipo de programas permiten simular el recorrido del agua desde el momento que cae a la superficie hasta la descarga, sin limitaciones por la extensión del proyecto, lo que ayuda a revisar cada tramo del diseño y a verificar entre varias alternativas cual sería la más conveniente [8]. Con la utilización de softwares computacionales existe la factibilidad de realizar cambios inmediatos en la simulación de un modelo numérico para la obtención de resultados. Las ventajas de estas simulaciones son también la manera de recrear modelos con diferentes geometrías de manera automática con la introducción de datos de pendientes, caudal y condiciones según sea el caso. Es por esto que el presente trabajo experimental se enfoca en dicha simulación para corroborar investigaciones anteriores.

Con los resultados obtenidos de la modelación, basados y justificados mediante normas vigentes de vías urbanas; se pondrá en práctica y se validaran según corresponda.

Además, en investigaciones futuras se puede conseguir y descifrar a gran escala el mejoramiento de la captación de aguas lluvias de las ciudades.

Por tal motivo, es permitente que el presente proyecto servirá para saber la determinación de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas lluvias. Este proyecto es un alcance para el Proyecto de Investigación “Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas de lluvias”, aprobado por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Técnica de Ambato, coordinado por el Lic. Rodney Hechavarría.

### **1.1.3 Fundamentación Teórica**

#### **1.1.3.1 Análisis de Normativa para el Diseño Vial**

El Ministerio de Transporte de Obras y Públicas, junto con la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI), establecen parámetros, políticas, criterios y métodos para el correcto desarrollo de estudios previos a obras viales, tomando en cuenta riesgo sísmico local, estabilidad de taludes, tipología de la ruta, entre otros; que garanticen facilidad de movilidad y seguridad vial [9].

#### **1.1.3.2 Elementos Generales del Diseño Geométrico Vial**

Para el correcto dimensionamiento de una vía se debe tomar en cuenta la principal función que va a desempeñar, como es la movilidad.



- **Velocidad de diseño**

Llamada también velocidad de proyecto. Se considera la velocidad máxima a la cual un vehículo puede llegar con seguridad y en condiciones ambientales favorables. De acuerdo a la función de la vía, la velocidad de diseño debe reflejar el deseo de brindar seguridad de operación, por tal motivo no debe ser excedida de los límites de construcción para la cual fue diseñada [10].

### **Ancho típico de vías.**

El ancho de una vía lo constituyen el tipo de pavimento, espaldones, taludes interiores y exteriores, y las cunetas. Dependen del volumen de tráfico y la clase de carretera que se explican a continuación.

#### **1. Autopistas**

Vías diseñadas para altas velocidades. Se las identifica como (RI) y (RII).

#### **2. Carreteras Arteriales**

Vías de dos carriles destinados a la circulación de vehículos en ambos sentidos. Generalmente la mayoría de carreteras son de este tipo. Se las identifica como (I) y (II).

#### **3. Vías colectoras**

Son vías que acogen el tráfico vehicular de caminos vecinales. Son del tipo (I, II, III y IV).

#### 4. Caminos vecinales

Caminos rurales no clasificados en el detalle anterior. Su identificación es tipo (IV) y (V).

El volumen de tráfico constituye la cantidad de vehículos que circulan en una vía. Está identificado como “TPDA” (Tráfico Promedio Diario Anual). En base a la explicación anterior, los anchos de vía para el Ecuador se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Anchos de Calzada

<b>ANCHOS DE LA CALZADA</b>		
<b>Clase de Carretera</b>	<b>Ancho de Calzada (m)</b>	
	<b>Recomendable</b>	<b>Absoluto</b>
R-I o R-II > 8000 TPDA	7.30	7.30
I 3000 a 8000 TPDA	7.30	7.30
II 1000 a 3000 TPDA	7.30	6.50
III 300 a 1000 TPDA	6.70	6.00
IV 100 a 300 TPDA	6.00	6.00
V < de 100 TPDA	4.00	4.00

Fuente: Normas de Diseño Geométrico de Carreteras [10].

- **Pendiente Transversal**

La relación entre la superficie de rodadura y el diseño geométrico de una vía son de vital importancia debido a la facilidad que ofrecen para el escurrimiento de las aguas que

llegan a su superficie, permitiendo la fluidez del tránsito vehicular y brindar seguridad. El porcentaje de gradiente transversal para una vía está entre el 1.5% y 4%.

El Ministerio de Obras Publicas recomienda seguir los siguientes criterios, nombrados en la tabla 2, mostrada a continuación.

**Tabla 2.** Clasificación de Pendientes Transversales

<b>CLASIFICACIÓN DE PENDIENTES TRANSVERSALES</b>	
<b>Clase de carretera</b>	<b>Gradiente Transversal (%)</b>
R-I o R-II > 8000 TPDA	1.5 – 2
I 3000 a 8000 TPDA	1.5 – 2
II 1000 a 3000 TPDA	2
III 300 a 1000 TPDA	2
IV 100 a 300 TPDA	2.5 – 4
V < de 100 TPDA	4

**Fuente:** Normas de Diseño Geométrico de Carreteras [10]

- **Pendiente Longitudinal**

Los porcentajes de una pendiente longitudinal dependen de la topografía del terreno, es recomendable que dichos valores sean bajos con el objetivo de permitir velocidades de circulación admisibles para facilitar la movilización vehicular. A continuación, se presenta un cuadro resumen de pendientes promedio máximas según las velocidades de diseño, señalados en la tabla 3.

Tabla 3. Pendientes Longitudinales

<b>VALORES DE DISEÑO DE PENDIENTES LONGITUDINALES MÁXIMAS</b>						
<b>Clase de Carretera</b>	<b>Valor Recomendado %</b>			<b>Valor absoluto %</b>		
	<b>L</b>	<b>O</b>	<b>M</b>	<b>L</b>	<b>O</b>	<b>M</b>
R-I o R-II > 8000 TPDA	2	3	4	3	4	6
I 3000 a 8000 TPDA	3	4	6	3	5	7
II 1000 a 3000 TPDA	3	4	7	4	6	8
III 300 a 1000 TPDA	4	6	7	6	7	9
IV 100 a 300 TPDA	5	6	8	6	8	12
V < de 100 TPDA	5	6	8	6	8	14

Fuente: Normas de Diseño Geométrico de Carreteras [10]

Donde:

- L = Terreno Plano
- O = Terreno Ondulado
- M = Terreno Montañoso

- **Pendiente Longitudinal Mínima**

Cuando existe una pendiente transversal adecuada para el drenaje de aguas lluvias y superficiales en vías, la pendiente longitudinal puede tener valores del 0%, siendo la pendiente longitudinal mínima usual de 0.5% [10].

El diseño de una estructura vial, dependen directamente de la topografía del lugar, clase de carretera, y velocidad vehicular para la cual tendrá uso; cabe recalcar que el sistema de drenaje pluvial no interfiere en la estructuración de la obra vial.

### **1.1.3.3 Análisis Hidrológico**

El análisis hidrológico sirve para determinar caudales máximos en cuencas hidrográficas, dependiendo de los periodos de retorno. Es importante conocer el tipo de superficie, pendiente y longitud, el coeficiente de escorrentía y tiempo de concentración. Para un diseño hidrológico se consideran los siguientes aspectos:

- **Área de drenaje**

Constituye el espacio territorial por el cual recorre el agua superficial y de lluvia hasta su desfogue. Se la determinará por cualquier método y se expresará en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>) o hectáreas (Ha) [11].

- **Intensidad de lluvia**

La intensidad de lluvia se la determina en función de la relación del volumen de agua y el tiempo que tarda en caer y llegar a la superficie en un determinado espacio geométrico. El análisis de intensidad se lo hace en tiempo de lluvias ordinarias, no extraordinarias ni tampoco en tormentas máximas [12]. Este valor es obtenido a través de un estudio hidrológico de la zona, del cual se obtienen las curvas de intensidad, duración y frecuencia.

En el método racional para determinar el valor de intensidad de lluvia, se debe esclarecer la frecuencia y duración de las lluvias.

- **Relación Intensidad, Duración y Frecuencia**

La Curva Intensidad Duración Frecuencia, representa la intensidad (I) o magnitud de una lluvia fuerte expresada en milímetros por hora, para una duración (D) determinada que usualmente puede ser 5, 10, 15, 20, 30, 60, 120, 360 y 1440 minutos que tiene una probabilidad de ocurrencia, o frecuencia (F) expresada en años, lo que también se conoce como periodo de retorno [13].

Para la obtención de las curvas IDF se analizan los registros pluviográficos, tomando en cuenta los valores extremos de precipitación en tiempos determinados. Una vez obtenidas las intensidades máximas y sus gráficas, las cuales representan un tipo diferente de ecuación, se deriva la ecuación general para la determinación de intensidad máxima representada en la ecuación 1 [14].

$$I = \frac{K * T^m}{t^n} \quad Ec. 1$$

Donde:

- $I$  = Intensidad de precipitación (mm/h)
- $T$  = Periodo de retorno (años)
- $t$  = Tiempo de duración (horas)
- $\begin{pmatrix} K \\ m \\ n \end{pmatrix}$  = Constantes de ajuste propias de cada estación

Ecuación en función de la intensidad diaria

$$I_{TR} = \frac{K * Id_{TR}}{t^n} \quad Ec. 2$$

Donde:

- $I_{TR}$  = Intensidad de precipitación para cualquier periodo de retorno (mm/h)
- $I_{d_{TR}}$  = Intensidad diaria para un periodo de retorno (mm/h)
- $t$  = Tiempo de duración de la lluvia (minutos)
- $\begin{Bmatrix} K \\ m \\ n \end{Bmatrix}$  = Constantes de ajuste propias de cada estación.

### Cálculo de intensidades máximas

El presente trabajo experimental se lo aplicará para la ciudad de Ambato, por lo tanto, el estudio se lo realizará a partir de los datos de dicha estación. En la Tabla 4, se indica las coordenadas del lugar y el tiempo de retorno.

**Tabla 4.** Intensidad máxima en 24 horas determinada con información pluviométrica

<b>INTENSIDAD MÁXIMA – AMBATO</b>									
<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Coordenadas</b>		<b>Altitud</b>	<b>Tr (años)</b>				
		<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>		<b>5</b>	<b>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
M0066	Ambato Aeropuerto	01°12'00" S	78°34'00" W	2515	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6

**Fuente:** Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI [14]

A continuación, se indican las ecuaciones que permitirán determinar las curvas IDF según la estación escogida. Se visualiza en la tabla 5 para la ciudad de Ambato.

**Tabla 5.** Intensidad máxima, ecuaciones representativas de estaciones pluviográficas.

<b>ECUACIONES – AMBATO</b>			
<b>Código</b>	<b>Estación</b>	<b>Duración</b>	<b>Ecuación</b>
M0066	Ambato	5min < 34min	$I_{TR} = 197.86 * t^{-0.5556} Id_{TR}$
	Aeropuerto	34min < 1440min	$I_{TR} = 616.96 * t^{-0.885} Id_{TR}$

**Fuente:** Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – INAMHI [14]

En la tabla 6 se encuentran los resultados de la aplicación de las ecuaciones para la gráfica de las curvas IDF, para una duración de 5 a 34 minutos.

**Tabla 6.** Cálculo de Intensidades – Duración 5min < 34min – Estación Ambato

<b>M0066 – AMBATO AEROPUERTO</b>			
<b>Tiempo (min)</b>	$I_{TR-5 \text{ años}}$	$I_{TR-10 \text{ años}}$	$I_{TR-25 \text{ años}}$
5	67.61	61.82	56.53
6	59.87	54.19	49.05
7	54.01	48.48	43.50
8	49.41	44.02	39.21
9	45.68	40.42	35.77
10	42.58	37.46	32.96
11	39.95	34.97	30.60
12	37.70	32.83	28.60
13	35.74	30.99	26.87
14	34.01	29.37	25.36
15	32.48	27.94	24.04
16	31.11	26.67	22.86
17	29.88	25.53	21.81

continúa

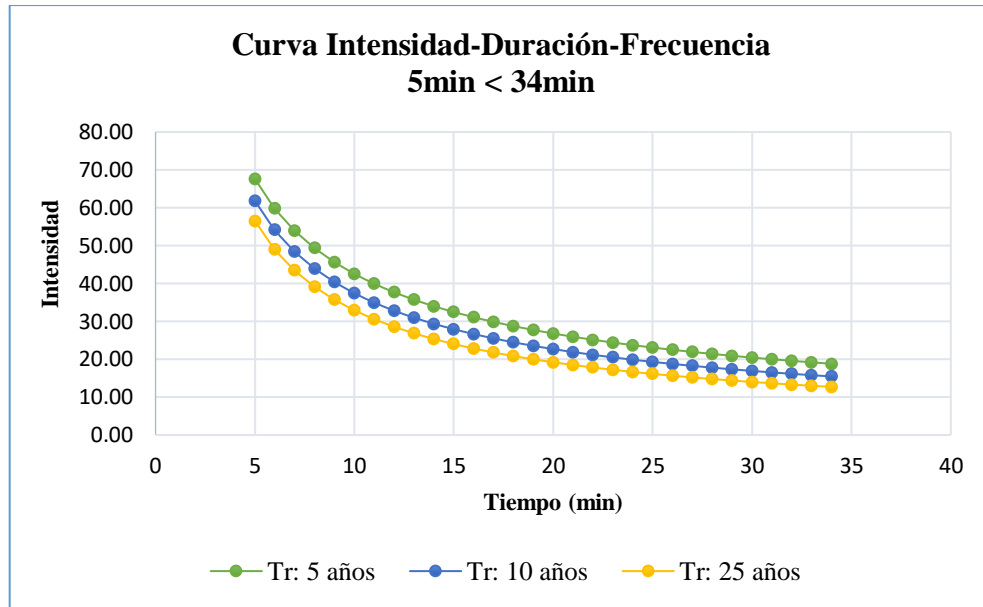


<b>Tiempo (min)</b>	<b><math>I_{TR-5 \text{ años}}</math></b>	<b><math>I_{TR-10 \text{ años}}</math></b>	<b><math>I_{TR-25 \text{ años}}</math></b>
18	28.76	24.49	20.86
19	27.74	23.55	20.00
20	26.81	22.70	19.21
21	25.95	21.91	18.50
22	25.16	21.19	17.84
23	24.42	20.52	17.23
24	23.74	19.89	16.67
25	23.10	19.32	16.15
26	22.51	18.78	15.67
27	21.95	18.27	15.21
28	21.42	17.80	14.79
29	20.92	17.35	14.39
30	20.46	16.93	14.01
31	20.01	16.53	13.66
32	19.59	16.16	13.33
33	19.20	15.80	13.01
34	18.82	15.47	12.71

**Realizado por:** Melanie Romero

La figura 1 a continuación, se presenta la curva de Intensidad-Duración-Frecuencia en la ciudad de Ambato, con tiempos de retorno de 5,10 y 25 años, para una duración de 5 a 34 minutos.

**Figura 1.** Curva Intensidad – Duración 5min < 34min – Estación Ambato



**Realizado por:** Melanie Romero

En la tabla 7 se encuentran los resultados de la aplicación de las ecuaciones para la gráfica de las curvas IDF, para una duración de 34 a 1440 minutos.

**Tabla 7.** Cálculo de Intensidades – Duración 34min < 1440min – Estación Ambato

<b>M0066 – AMBATO AEROPUERTO</b>			
<b>Tiempo (min)</b>	$I_{TR-5 \text{ años}}$	$I_{TR-10 \text{ años}}$	$I_{TR-25 \text{ años}}$
34	14.58	10.67	7.81
50	9.68	6.85	4.84
100	4.64	3.09	2.05
150	3.01	1.93	1.24
200	2.22	1.39	0.87
250	1.75	1.08	0.66

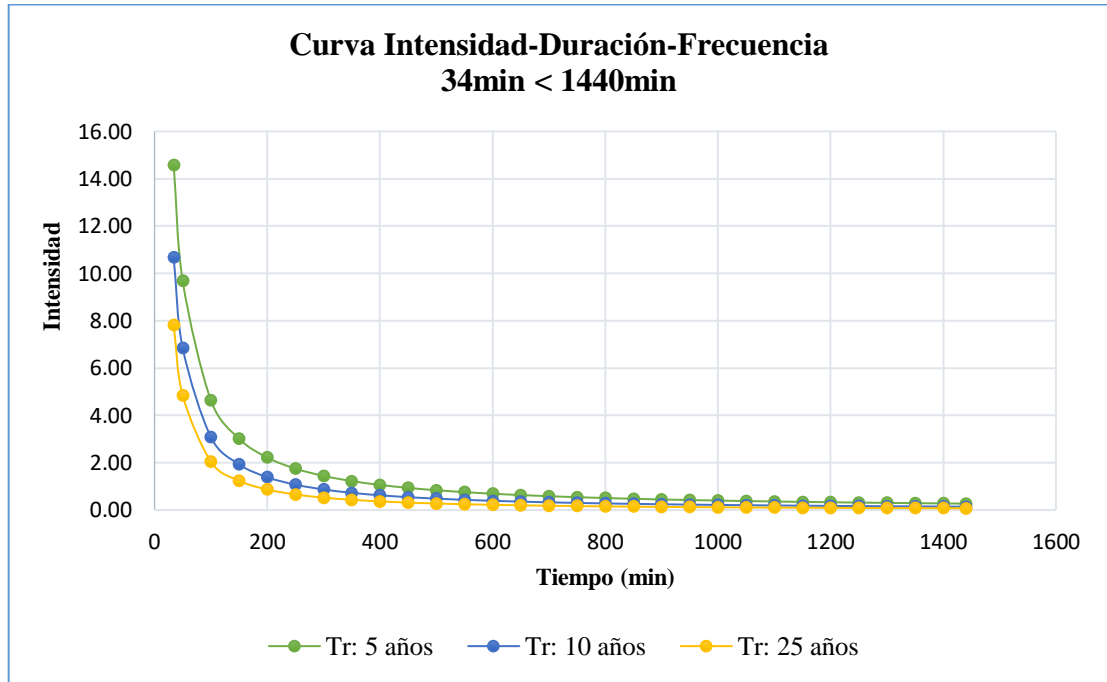
continúa

<b>Tiempo (min)</b>	<b><math>I_{TR-5 \text{ años}}</math></b>	<b><math>I_{TR-10 \text{ años}}</math></b>	<b><math>I_{TR-25 \text{ años}}</math></b>
300	1.44	0.87	0.53
350	1.23	0.73	0.43
400	1.06	0.63	0.37
450	0.94	0.55	0.32
500	0.84	0.48	0.28
550	0.76	0.43	0.25
600	0.69	0.39	0.22
650	0.64	0.36	0.20
700	0.59	0.33	0.18
750	0.55	0.30	0.17
800	0.51	0.28	0.16
850	0.48	0.26	0.14
900	0.45	0.25	0.13
950	0.42	0.23	0.13
1000	0.40	0.22	0.12
1050	0.38	0.21	0.11
1100	0.36	0.20	0.11
1150	0.35	0.19	0.10
1200	0.33	0.18	0.09
1250	0.32	0.17	0.09
1300	0.30	0.16	0.09
1350	0.29	0.15	0.08
1400	0.28	0.15	0.08
1440	0.27	0.14	0.08

**Realizado por:** Melanie Romero

La figura 2 a continuación, se representa la curva de Intensidad-Duración-Frecuencia en la ciudad de Ambato con tiempos de retorno de 5,10 y 25 años, para una duración de 34 a 1440 minutos.

Figura 2. Curva Intensidad – Duración 34min < 1440min – Estación Ambato



Realizado por: Melanie Romero

- **Periodo de retorno**

Es el tiempo promedio en años en el cual un evento de intensidad menor, igual o mayor, se repite; también conocido como frecuencia. Se debe considerar este parámetro al momento de diseñar una obra civil [14]. Los valores están expuestos en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Periodo de Retorno

<b>PERIODO DE RETORNO MÍNIMO DE DISEÑO</b>	
<b>Tipo de Estructura</b>	<b>Periodo de Retorno (años)</b>
Zanja de Drenaje	5-50
Drenaje de Carreteras	50
Vías Locales	1.5
Aguas Pluviales	2-10
Áreas recreativas	1.0

**Fuente:** UAM. Formula Racional

- **Coefficiente de escorrentía**

El agua de lluvia circulante por las vías no llega en su totalidad a ser evacuada por métodos de drenaje, debido a circunstancias atmosféricas como la evaporación, infiltración, estancamiento, etc., es por ello que, con la finalidad de apreciar dichas perdidas en la superficie, se toma en cuenta un valor de escorrentía estimado en tablas que depende del tipo de suelo, permeabilidad, topografía de la cuenca y de sus pendientes, además de la cobertura vegetal [11].

- **Tiempo de concentración**

Es el tiempo estimado en el cual una gota de agua recorre desde lo más alto de una cuenca hasta su llegada a la alcantarilla, se lo puede considerar de 10 a 20 minutos dependiendo de la topografía del suelo, tipo de superficie y pendientes. Se estima que el

tiempo de concentración es igual al tiempo de duración de la lluvia debido a que el caudal será el máximo esperado [11].

- **Caudal de diseño**

Se lo considera como el caudal estimado para el posterior diseño de redes de alcantarillado, equipos y más estructuras correspondientes a un sistema de drenaje. Para el cálculo de este caudal se pueden utilizar varios métodos de cálculo, uno de ellos es el Método Racional, el cual permite la estimación del escurrimiento en cuencas con una superficie menor a 100 Ha [15].

#### **1.1.3.3.1 Método Racional**

El método racional es un método simplificado que permite su aplicación para cuencas regulares con un área límite de 200 km<sup>2</sup>, su aplicación está dada principalmente para drenajes de carreteras, patios y áreas rurales.

Este método se maneja con la hipótesis que satisface que cierta cantidad de agua de lluvia cae uniformemente distribuida en cierto tiempo en un área determinada de la cuenca, generando un máximo caudal [16]. Su aplicación se lo hace con la ecuación 3.

$$Q = 0.278 * CiA \quad Ec. 3$$

Donde:

- $Q$  = Caudal superficial (m<sup>3</sup>/s)
- $C$  = Coeficiente de escorrentía (adimensional)
- $i$  = Intensidad de lluvia (mm/h)
- $A$  = Área de drenaje (km<sup>2</sup>)

El valor del coeficiente de escorrentía se lo escoge en base al tipo de suelo, topografía, zona geográfica, etc. Además, requiere de experiencia del Hidrólogo.

#### **1.1.3.4 Análisis Hidráulico**

El análisis hidráulico considera todas las condiciones en las cuales se va a llevar a cabo una obra, se debe conocer parámetros tales como caudales, duración de prestaciones, crecidas de ríos, zonas de inundaciones, etc.

##### **1.1.3.4.1 Hidráulica de canales**

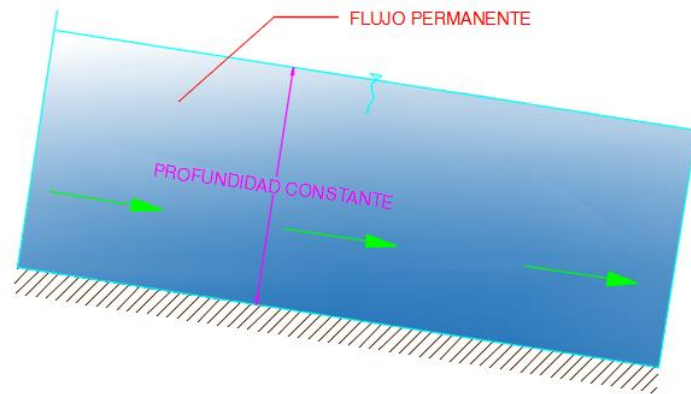
El agua es el elemento vital para la vida, y desde el inicio de los tiempos el hombre ha ido creando obras para su aprovechamiento, uno de ellos son los canales, los cuales permiten trasladar el agua de un lugar a otro. La hidráulica de canales se enfoca en el estudio del comportamiento del flujo del agua en un determinado perímetro, considerando factores atmosféricos y topográficos, entre otros.

##### **1.1.3.4.2 Tipos de flujo**

###### **Flujo permanente**

Cuando la profundidad de flujo no cambia o puede suponerse constante durante cierto periodo de tiempo. Se observa en la figura 3.

**Figura 3.** Flujo Permanente

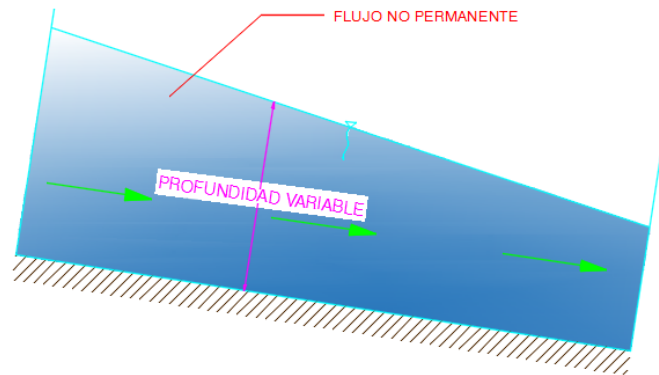


**Realizado por:** Melanie Romero

### Flujo no permanente

Cuando la profundidad de flujo cambia durante cierto periodo de tiempo. Figura 4.

**Figura 4.** Flujo no Permanente



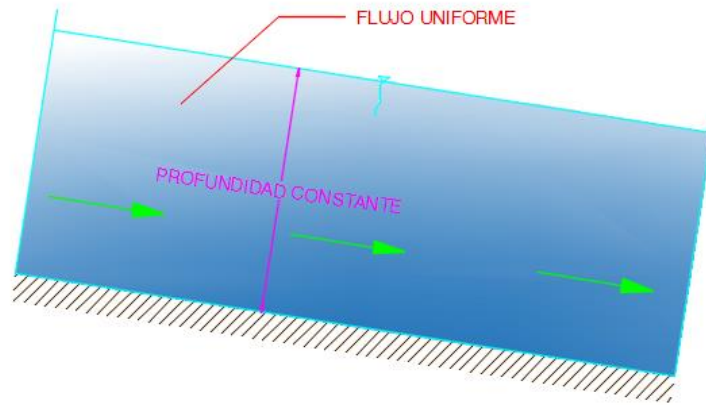
**Realizado por:** Melanie Romero



## Flujo uniforme

La profundidad del flujo es la misma en cada sección del canal. Puede ser permanente y no permanente dependiendo el cambio de profundidad. Figura 5.

Figura 5. Flujo uniforme

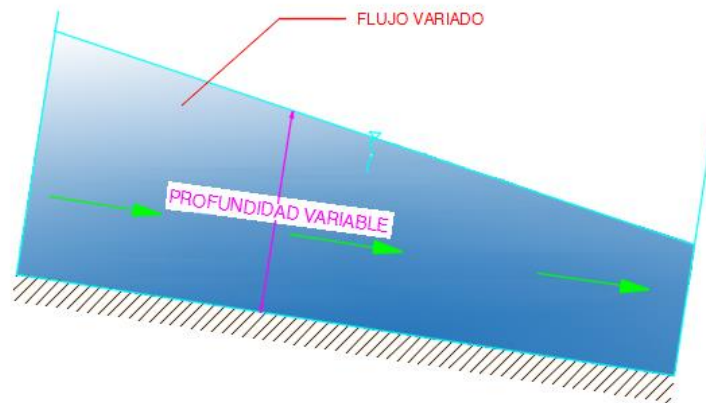


Realizado por: Melanie Romero

## Flujo variado

La profundidad de flujo cambia a lo largo del canal. Puede ser permanente y no permanente. Figura 6.

Figura 6. Flujo uniforme

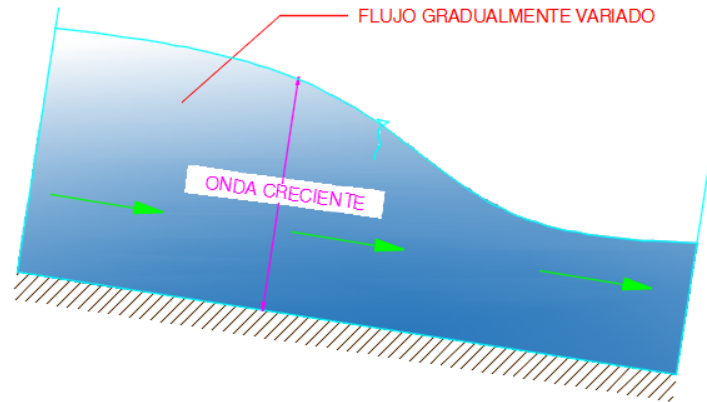


Realizado por: Melanie Romero

## Flujo gradualmente variado

La profundidad de flujo no cambia abruptamente en tramos largos. Figura 7.

Figura 7. Flujo gradualmente variado

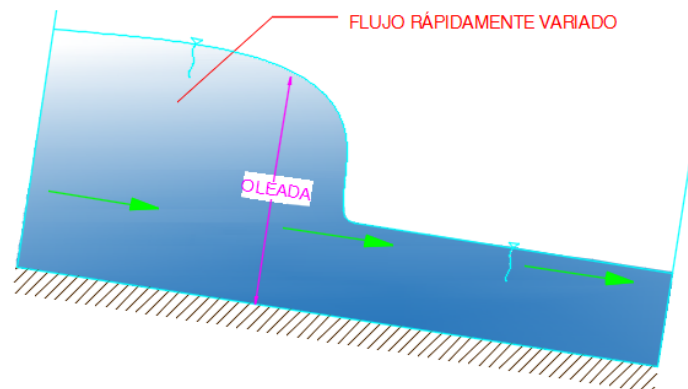


Realizado por: Melanie Romero

## Flujo rápidamente variado

La profundidad de flujo cambia en distancias cortas. Figura 8.

Figura 8. Flujo rápidamente variado



Realizado por: Melanie Romero

### 1.1.3.4.3 Número de Reynolds

Representa el comportamiento del flujo dictado por efectos de viscosidad y gravedad en relación con la inercia, clasificándolo en laminar, turbulento y de transición [17]. Está definido por:

$$Re = \frac{V * Rh}{\nu} \quad Ec. 4$$

Donde:

- $Re$  = Número de Reynolds
- $V$  = Velocidad de flujo
- $Rh$  = Radio Hidráulico
- $\nu$  = Viscosidad cinemática del agua.

#### **Flujo Laminar**

El comportamiento de las partículas de agua es de forma suave y definida. Figura 9.

$$Re < 500 \quad Ec. 5$$

#### **Flujo en transición**

Cambio de comportamiento del flujo, de laminar a turbulento o viceversa

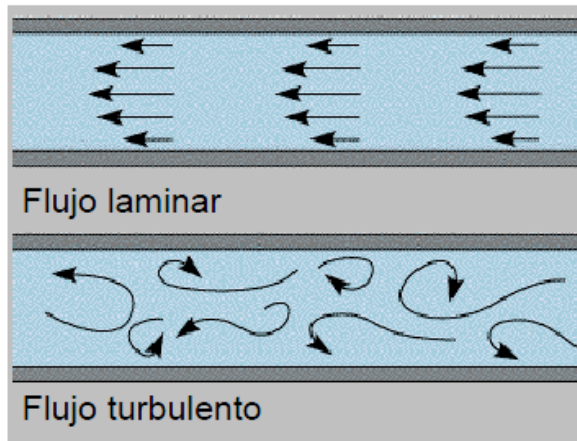
$$500 < Re < 2000 \quad Ec. 6$$

#### **Flujo turbulento**

El comportamiento de las partículas de agua no es fija ni suave, es de forma irregular, manteniendo el movimiento de la corriente. Figura 9 [17].

$$Re > 2000 \quad Ec. 7$$

**Figura 9.** Flujo laminar y turbulento



**Fuente:** Chow, Ven Te. Hidráulica de Canales Abiertos.

#### 1.1.3.4.4 Regímenes de flujo

Al relacionarse las fuerzas de inercia con las fuerzas gravitacionales, se obtiene un valor adimensional denominado Número de Froude, el cual permite clasificar los regímenes de flujo según su valor calculado con la ecuación 8:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * D}} \quad Ec. 8$$

Donde:

- $V$  = Velocidad media de flujo (m/s)
- $g$  = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
- $D$  = Profundidad hidráulica (m)

En un canal abierto la combinación de la viscosidad y la gravedad pueden generar cualquiera de estos fenómenos:

### **Flujo subcrítico**

Este régimen de flujo indica cuando las fuerzas inerciales superan a las gravitacionales, las velocidades y pendientes del flujo son bajas [18]. El número de Froude es menor a 1.

### **Flujo crítico**

Este régimen de flujo indica cuando las fuerzas inerciales y gravitaciones están inestables, haciéndolo un estado intermedio y cambiante [18]. El número de Froude es igual a 1.

### **Flujo supercrítico**

Este régimen de flujo indica cuando las fuerzas inerciales exceden mucho a las gravitacionales, las velocidades y pendientes del flujo son altas [18]. El número de Froude es mayor a 1.

#### **1.1.3.4.5 Ecuación de conservación de energía**

El principio de conservación de la energía indica que no se crea ni se destruye, solo se transforma, considera la energía cinética, potencial, elástica y en algunos casos el incremento de la temperatura. La ecuación 9 está dada por la igualdad entre las energías en un tiempo inicial y un tiempo final, se presenta a continuación [19].

$$Ec_i + Ep_i + Es_i = Ec_f + Ep_f + Es_f + E_{HF} \quad Ec.9$$

Donde:

- $Ec_i$  = Energía cinética
- $Ep_i$  = Energía potencial
- $Es_i$  = Energía elástica
- $E_{HF}$  = Energía térmica
- $i, f$  = Subíndices indicando el tiempo inicial y final.

#### 1.1.3.4.6 Ecuación de cantidad de movimiento

La cantidad de movimiento es el producto entre la masa y la velocidad. Sirve para diferenciar entre dos cuerpos con igual velocidad y diferentes masas [20].

$$p = m * v \quad Ec. 10$$

Donde:

- $p$  = Cantidad de movimiento (kg.m/s)
- $m$  = masa (kg)
- $a$  = velocidad (m/s)

#### 1.1.3.4.7 Ecuaciones de Saint Venant

Son un conjunto de ecuaciones diferenciales que permiten considerar las características y propiedades del caudal con respecto al espacio y el tiempo, ya sea en tuberías o canales abiertos. Se toman en cuenta las ecuaciones de Continuidad y Momentum. [21].

- **Ecuación de continuidad**

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

- $A$  = Área transversal del canal ( $\text{m}^2$ )
- $Q$  = Flujo que circula en el área del canal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $q$  = Flujo entrante/saliente ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

- **Ecuación de Momentum**

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \frac{Q^2}{A}}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(S_f + S_o) = qV \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

- $A$  = Área transversal del canal ( $\text{m}^2$ )
- $Q$  = Flujo que circula en el área del canal ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
- $V$  = Velocidad del flujo ( $\text{m}/\text{s}$ )
- $q$  = Flujo entrante/saliente ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $y$  = Caída hidráulica ( $\text{m}$ )
- $S_f$  = Pendiente de fricción
- $S_o$  = Pendiente de fondo de canal
- $g$  = Aceleración de la gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

### **1.1.3.5 Introducción a Momentos Hidráulicos**

- **Dimensionalidad de modelos**

El análisis dimensional es una herramienta que permite reducir el tiempo en investigaciones y proyectos experimentales para interpretar resultados y llegar a posibles soluciones.

La mecánica de fluidos computacional (CFD), permite el análisis dimensional de modelos hidráulicos mediante la aplicación y resolución de ecuaciones diferenciales de conservación de la masa y movimiento. Los resultados de flujo modelados por software tipo CFD, muestran un ajuste en comparación a los resultados de modelos hidráulicos, haciendo posible el análisis de perfiles de velocidades y distribución de presiones de una manera más directa.

El presente proyecto se llevará a cabo en uno de los programas más avanzados para el modelo de flujos con superficie libre en 3D.

- **Modelos físicos vs Modelos numéricos**

En ingeniería tanto los modelos físicos como numéricos son importantes, ya que son complementarios entre sí, permitiendo estimar resultados costo-beneficio de los proyectos analizados. La combinación de modelos es lo más adecuado para ciertos problemas, disminuyendo el tiempo y costo de investigación [22].



El análisis numérico computacional permite corroborar los resultados empíricos de un modelo físico, además el cálculo de proyectos con extensiones grandes siendo este el único método para su análisis; a diferencia del modelo físico que limita su escala.

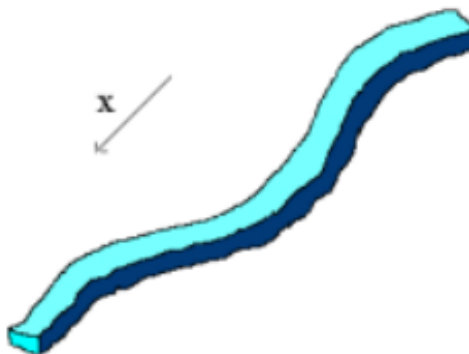
- **Tipos de modelos**

Se pueden diferenciar análisis en una (1D), dos (2D) y tres dimensiones (3D).

En modelos unidimensionales (1D), en donde se considera la longitud del eje del canal, toma en cuenta la topografía e hidráulica para el cálculo del tirante y la velocidad del agua en toda la sección transversal, es decir, se asume un único dato promedio para su análisis.

Este modelo se lo aplica en tramos de ríos y canales de extensa longitud, generalmente mayores a veinte veces el ancho de este y para determinar el máximo nivel de agua [22].

**Figura 10.** Modelo Hidráulico unidimensional (x)



**Fuente:** Modelación Numérica en Hidráulica

En modelos bidimensionales (2D), se promedian dos magnitudes, dependiendo de su análisis, asumiendo el valor calculado. Este modelo se lo aplica en flujos extensos como lagos, etc., donde la variación de velocidad es pequeña [22].

**Figura 11.** Modelo Hidráulico bidimensional (x;y)



**Fuente:** Modelación Numérica en Hidráulica

En modelos tridimensionales (3D), se representa el estado más avanzado de la modelación, permitiendo el cálculo de las tres componentes espaciales y así poder aplicarlo en cualquier caso práctico [22].

**Figura 12.** Modelo Hidráulico tridimensional (x;y;z)



**Fuente:** Modelación Numérica en Hidráulica

- **Método de diferencias finitas**

Dentro de la mecánica de fluidos computacional, el método de diferencias finitas consiste en aproximar las derivadas de las ecuaciones diferenciales de inicio y convertirla en una ecuación discreta, mediante la discretización de elementos que permite tener una misma ecuación en todos los nodos discretizados [23].

- **Método de volúmenes finitos**

Es el método más empleado dentro de la mecánica de fluidos computacional (CFD) debido a su simplicidad y facilidad para ser implementado en cualquier tipo de mallado. La discretización de un dominio se lo hace en un número finito de celdas, garantizando una discretización conservativa [23].

#### **1.1.4 Hipótesis**

##### **1.1.4.1 Hipótesis alternativa**

La pendiente transversal y longitudinal de la vía, el caudal pluvial y la geometría del sumidero representados por un modelo numérico influyen en la eficiencia de captación de aguas lluvias.

##### **1.1.4.2 Hipótesis Nula**

La pendiente transversal y longitudinal de la vía, el caudal pluvial y la geometría del sumidero representados por un modelo numérico no influyen en la eficiencia de captación de aguas lluvias.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General:**

Determinar la eficiencia hidráulica en la captación de agua en sumideros implantados en vías urbanas mediante la aplicación de un modelo numérico.

### **1.2.2 Objetivos Específicos:**

Comparar diferentes configuraciones de sumideros en cuanto a su eficiencia hidráulica basándose en investigaciones previas.

Seleccionar uno o varios modelos de sumideros en base a la eficiencia hidráulica comparando con el prototipo actual.

Validar la investigación insertando nuevos parámetros geométricos de la configuración de los sumideros sugeridos por la normativa actual.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA

#### 2.1 Materiales

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos se utilizará un software con aplicación de mecánica de fluidos computacional (CFD); es considerado como una herramienta de cálculo, que permite el empleo de la tecnología para la simulación y resolución de problemas relacionados con el movimiento de fluidos, generalmente en lamina libre; permite también la aplicación no solo en el campo hidráulico, sino que además la simulación en el área marítima y energética [23]. El software hace posible un análisis tridimensional mediante la aplicación de técnicas de mallado, así como métodos de cálculo por medio de diferencias, elementos y volúmenes finitos.

La resolución se la realizará por medio de aproximaciones numéricas a partir del método de “volúmenes finitos”, es decir diferencias finitas en las tres direcciones del espacio (x, y, z). Este método consiste en la discretización<sup>1</sup> del dominio en un número finito de celdas creando un promedio de valores discretos en cada una, lo que lo diferencia de otros métodos. Al discretizar el modelo se genera una malla que permite la visualización de las divisiones del dominio<sup>2</sup> en pequeños volúmenes. El método de volúmenes finitos asocia un volumen finito local a cada celda para luego aplicar las leyes de integrales de conservación de volumen y obtener los resultados. En general la razón por la cual es más utilizado es debido a su simplicidad y facilidad de implementación en cualquier mallado y su resolución.

---

<sup>1</sup> Discretización: [en programación], División de cada una de las zonas del dominio en intervalos finitos.

<sup>2</sup> Dominio: [en programación], Elemento o modelo matemático que va a ser analizado.

## **2.2 Métodos**

### **2.2.1 Nivel o tipo de investigación**

El presente trabajo experimental se desarrollará bajo los niveles de investigación:

- **Investigación Exploratoria**

La investigación se enfoca a modelos de sumideros tipo T45 basándose en la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12

- **Investigación Correlacional**

Los datos tomados de investigaciones previas de caudales, velocidades y pendientes buscarán la relación con el modelo matemático ejecutado con el software de aplicación de mecánica de fluidos CFD, que permitirá el análisis de las propiedades hidráulicas del modelo.

- **Investigación Descriptiva**

Permitirá determinar la eficiencia del sumidero mediante un análisis computacional basándose en investigaciones previas y en el marco teórico del presente trabajo, el mismo que establece ecuaciones y fórmulas con el fin de estudiar el comportamiento del modelo hidráulico.

- **Explicativa**

La importancia de conocer las características del canal tanto físicas como la pendiente longitudinal y las características hidráulicas como la velocidad, el caudal y elementos geométricos.

### 2.2.2 Población y muestra

- **Población**

La población la conforma el conjunto de combinaciones propuestas mediante la unión de las pendientes longitudinales y transversales de tal manera que cada porcentaje transversal se asocie con el longitudinal, dando como resultado 36 combos. En la tabla 9 se indica la unión de dichos porcentajes de la siguiente manera: [1.5-2.0-2.5-4.0] : [3], en donde el primer corchete señala cada una de las pendientes transversales, que se combinarán con el segundo, perteneciente a la pendiente longitudinal.

**Tabla 9.** Combinaciones de pendientes de estudio.

<b>COMBINACIONES</b>		
<b>Pendiente Transversal</b>	<b>Pendiente Longitudinal</b>	<b>Combos</b>
1.5 %	3 %	[1.5-2.0-2.5-4.0] : [3]
	4 %	[1.5-2.0-2.5-4.0] : [4]
2.0 %	5 %	[1.5-2.0-2.5-4.0] : [5]
	6 %	[1.5-2.0-2.5-4.0] : [6]
2.5 %	7 %	[1.5-2.0-2.5-4.0] : [7]
	8 %	[1.5-2.0-2.5-4.0] : [8]
4.0 %	9 %	[1.5-2.0-2.5-4.0] : [9]
	10 %	[1.5-2.0-2.5-4.0] : [10]
	12 %	[1.5-2.0-2.5-4.0] : [12]

**Fuente:** Modelación Hidráulica para la Determinación de la Eficiencia de los Sumideros de Aguas Lluvia. [24]

- **Muestra**

Para el presente trabajo experimental se analizará y estudiará 8 combinaciones escogidas por criterio, debido al tiempo de duración de las simulaciones en el software. Los combos se explican en la Tabla 10, tomados de los 36 descritas en la Tabla 9.

**Tabla 10.** Combinaciones de pendientes de estudio seleccionadas

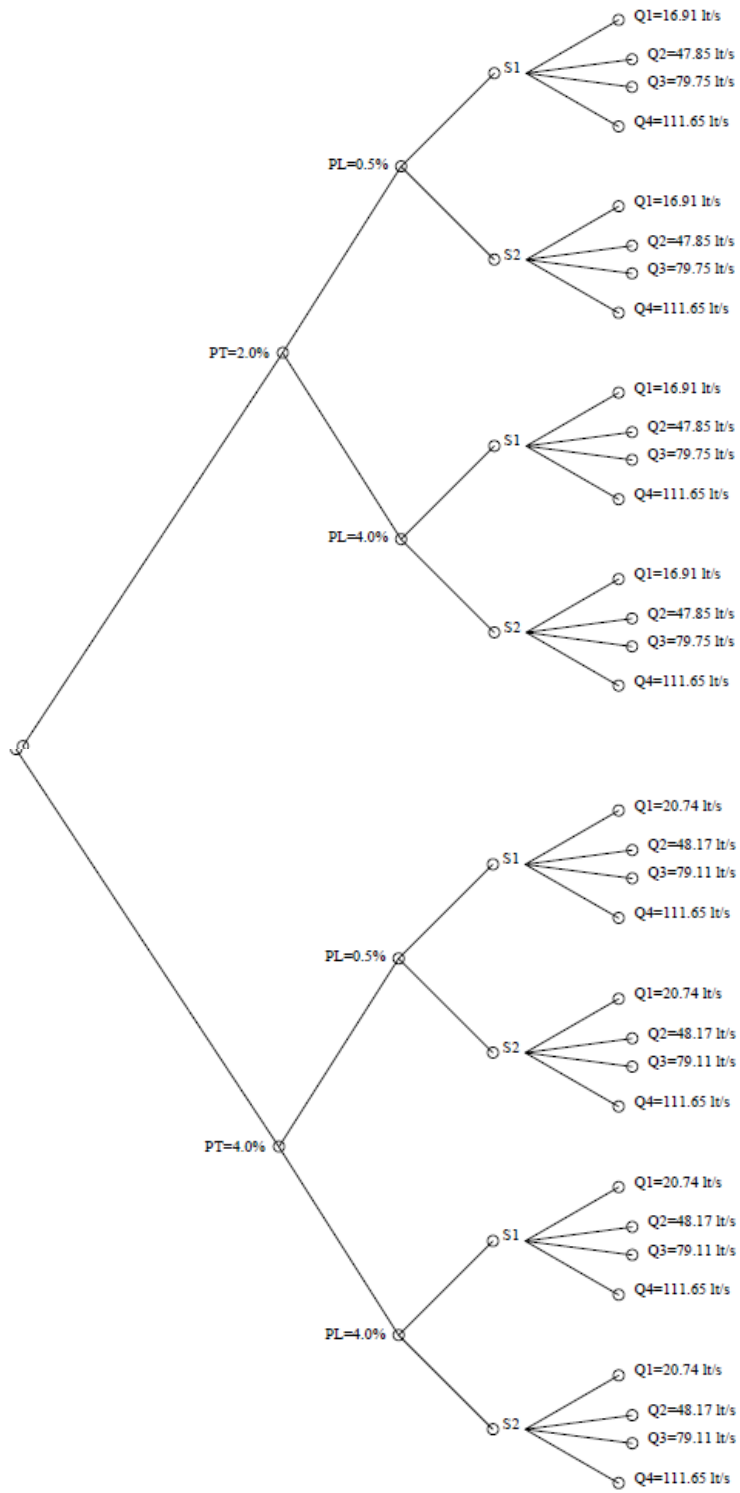
<b>COMBINACIONES SELECCIONADAS</b>		
<b>Pendiente Transversal</b>	<b>Pendiente Longitudinal</b>	<b>Combos</b>
2.0 %	0.5 %	[2.0] : [0.5]
	4 %	[2.0] : [4.0]
4.0 %	0.5 %	[4.0] : [0.5]
	4 %	[4.0] : [4.0]

**Fuente:** Modelación Hidráulica para la Determinación de la Eficiencia de los Sumideros de Aguas Lluvia.

A continuación, se visualiza un diagrama de árbol en donde se indica los 32 modelos que van a ser simulados en el software, con su respectiva pendiente transversal, longitudinal, escenario y caudal. Figura 13



Figura 13. Diagrama de Árbol



Realizado por: Melanie Romero

## Plan de recolección de información

Tabla 11. Plan de recolección de datos

Pregunta	Explicación
1. ¿Para qué?	Para determinar un porcentaje de eficiencia de los sumideros de aguas lluvia en diferentes escenarios en la calzada.
2. ¿De qué objeto?	De un análisis numérico computacional basado en un prototipo a escala con pendiente transversal de 4 y 2%, longitudinal de 0.5, y 4,0 %; utilizando distintos caudales y 2 escenarios cambiando las posiciones de los sumideros.
3. ¿Sobre qué aspectos?	Sobre el porcentaje de eficiencia y comportamientos en diferentes escenarios de los sumideros.
4. ¿Quién?	La Srta. Melanie Neydhi Romero Viteri, autora del presente trabajo experimental junto con el Ing. MEng. Lenin Maldonado
5. ¿Dónde?	Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Universidad Técnica de Ambato.
6. ¿Cómo?	<ul style="list-style-type: none"><li>- Investigación Bibliográfica</li><li>- Análisis computacional CFD</li><li>- Norma Ecuatoriana Vial nevi-12</li></ul>

Realizado por: Melanie Romero

### **2.2.3 Plan procesamiento y análisis**

El plan de procesamiento y análisis se realizará como se indica en el libro “Tutoría de la Investigación Científica”, en donde se encuentra la guía completa para elaborar un trabajo de graduación [25].

#### **2.2.3.1 Plan de procesamiento y análisis**

Para la comparación de diferentes configuraciones de sumideros en cuanto a su eficiencia hidráulica se realizará:

- Cálculo de la eficiencia hidráulica en las configuraciones actuales de sumideros.
- Cálculo de la eficiencia hidráulica de las diferentes configuraciones según la topografía.

Para comparar el prototipo actual estudiado en investigaciones previas, con un análisis numérico, se realizará:

- El cálculo matemático aplicando mecánica de fluidos computacional CFD.
- Modelación numérica de los parámetros geométricos del modelo.
- Calibración del modelo en base a los resultados de investigaciones previas.
- Comparación de diseños obtenidos con los vigentes.

Inserción de parámetros de diseño de sumideros más eficientes comparado en los propuestos por la normativa de diseño de drenaje pluvial en vías urbanas.

## CAPÍTULO III

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

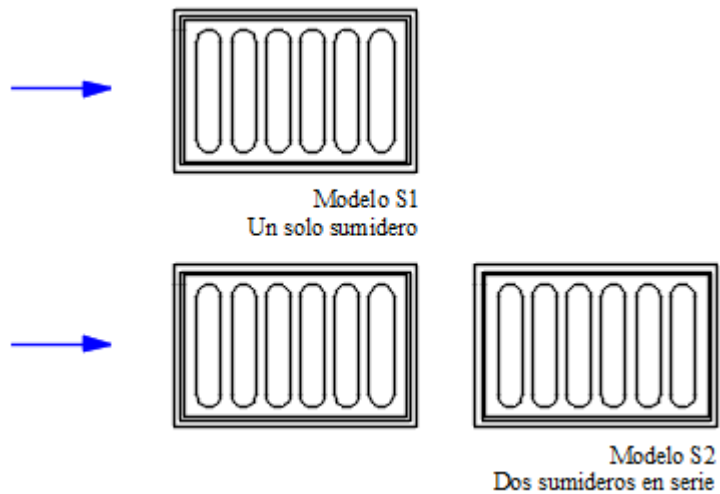
#### 3.1 Análisis y discusión de los resultados

##### 3.1.1 Análisis de resultados

##### 3.1.1.1 Representación gráfica de investigaciones previas

En investigaciones anteriores [5], [24] se ha utilizado dos tipos de escenarios que permiten diferenciar y optimizar la eficiencia de los sumideros. Los escenarios a utilizarse se pueden observar a continuación en la figura 14, los mismos que fueron definidos en base a dichas investigaciones.

**Figura 14.** Escenarios de sumideros tipo T45

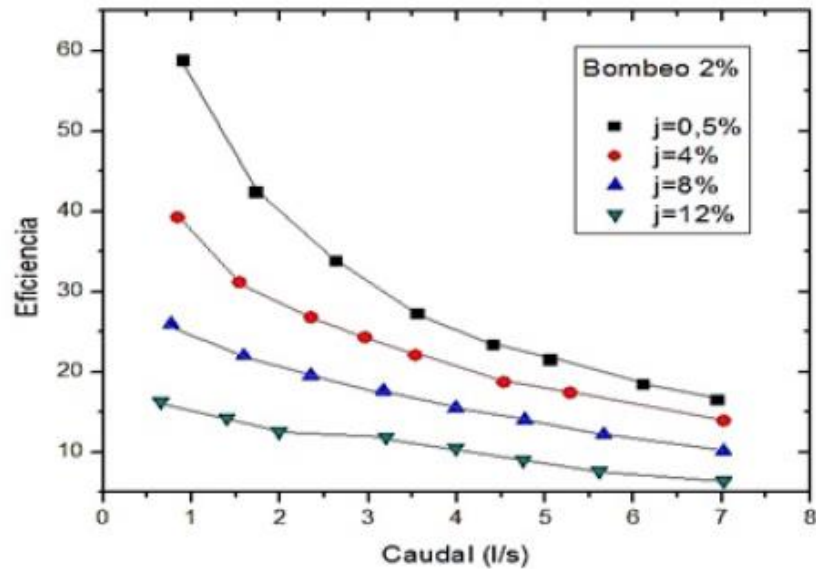


**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales. [5]

Los estudios acerca de la eficiencia de los sumideros de aguas lluvias, en función de las pendientes transversal y longitudinal se demuestran en las figuras siguientes.

En la figura 15 se observan cuatro curvas que representan cada una de las pendientes longitudinales (0.5, 4.0, 8.0, y 12.0 %), con un solo porcentaje de bombeo, en este caso 2%. La gráfica indica la tendencia que tiene el comportamiento de un solo sumidero ante la eficiencia de captación del agua de lluvia.

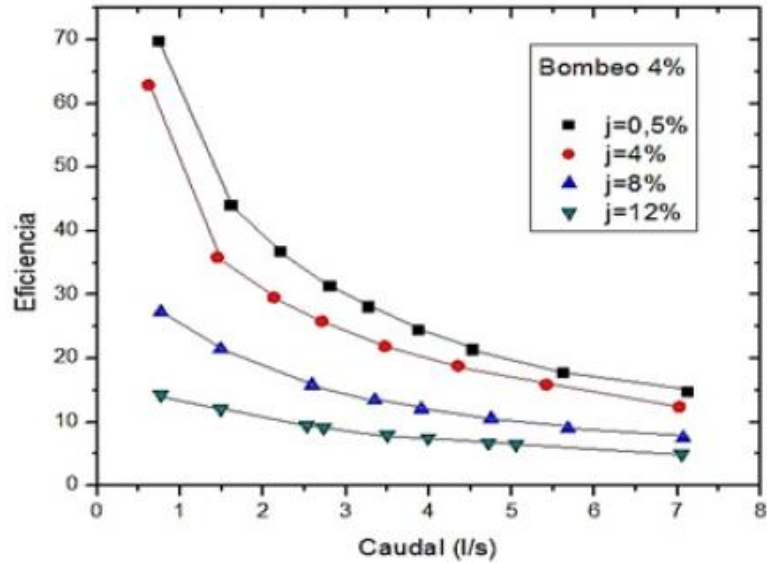
**Figura 15.** Eficiencia de captación vs caudal. Modelo S1. Bombeo 2%



**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales [5].

En la figura 16, de la misma manera se observan cuatro curvas que representan cada una de las pendientes longitudinales (0.5, 4.0, 8.0, y 12.0 %), con el porcentaje de bombeo del 4%. La gráfica indica la tendencia que tiene el comportamiento de un solo sumidero ante la captación del agua de lluvia.

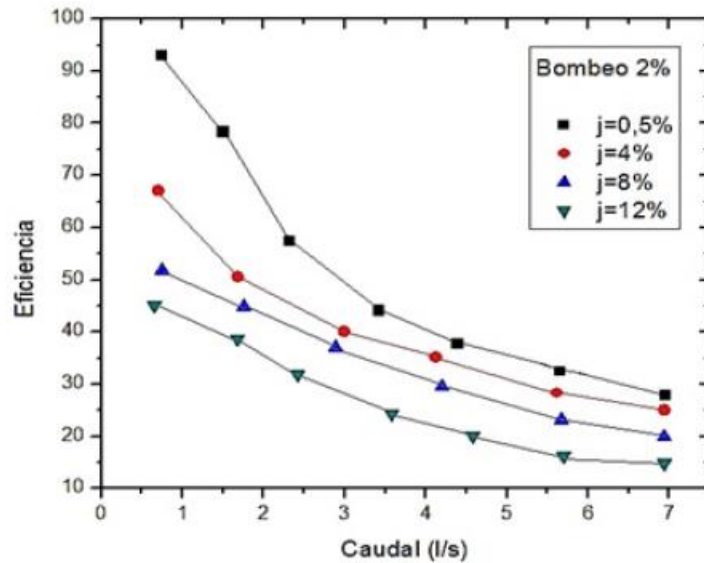
**Figura 16.** Eficiencia de captación vs caudal. Modelo S1. Bombeo 4%



**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales [5].

En la figura 17 se observan cuatro curvas que representan cada una de las pendientes longitudinales (0.5, 4.0, 8.0, y 12.0 %), con un solo porcentaje de bombeo, en este caso 2%. La gráfica indica la tendencia que tiene el comportamiento de dos sumideros en serie, ante la captación del agua de lluvia.

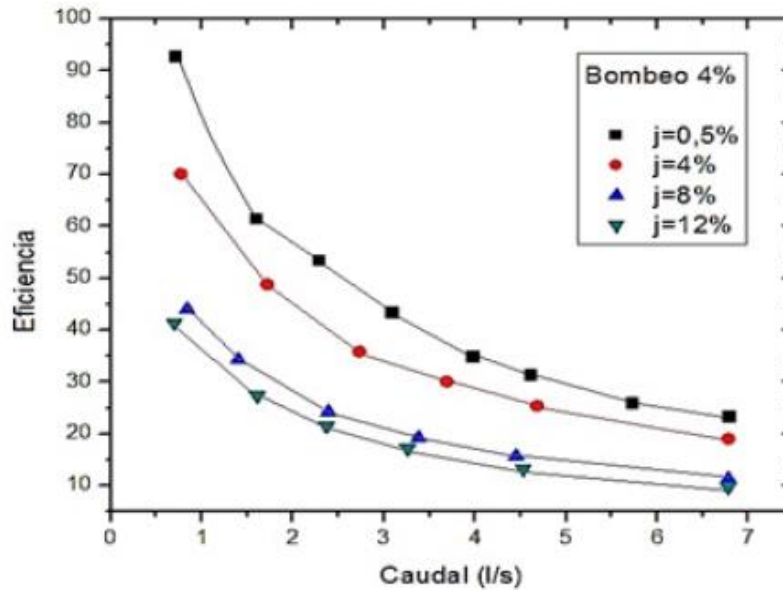
**Figura 17.** Eficiencia de captación vs caudal. Modelo S2. Bombeo 2%



**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales [5].

En la figura 18, de la misma manera se observan cuatro curvas que representan cada una de las pendientes longitudinales (0.5, 4.0, 8.0, y 12.0 %), con el porcentaje de bombeo del 4%. La gráfica indica la tendencia que tiene el comportamiento de dos sumideros en serie, ante la captación del agua de lluvia.

**Figura 18.** Eficiencia de captación vs caudal. Modelo S2. Bombeo 4%



Fuente: Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales [5].

### 3.1.1.2 Descripción general del modelo numérico

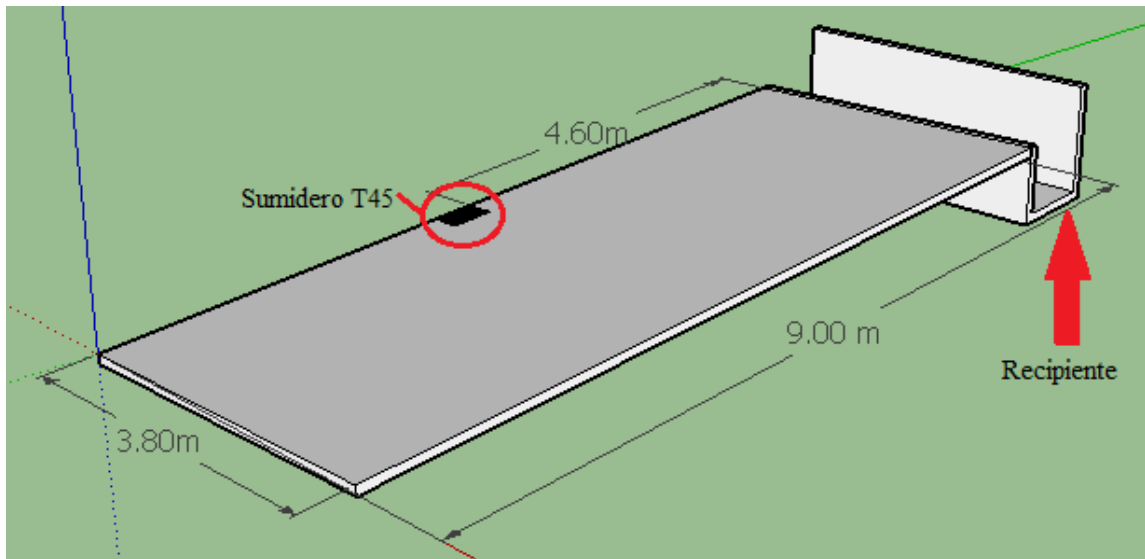
#### 3.1.1.2.1 Datos generales

Para realizar el análisis numérico y demostrar la eficiencia de los sumideros se empezó por un modelo realizado a escala real, basado en el prototipo físico experimental de escala 1:4 de la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, y ensayado en la tesis “Modelación Hidráulica para la Determinación de la Eficiencia de los Sumideros de Aguas Lluvia” [24].

Para el presente trabajo únicamente se evaluarán dos escenarios (S1 y S2), detallados en la figura 13; los mismos que están constituidos por la mitad de una vía, con un ancho de 3.80 m, 9.00 m de longitud, y uno o dos sumideros tipo T45 dependiendo del caso, situados a 4.60 m del inicio de la vía, como se observa en la figura 18.

En la parte inicial encaja un pequeño recipiente en el cual reposará el agua lluvia para evitar cálculos de llenado del recipiente en el programa. El caudal exacto se lo ingresará directamente en el programa que permitirá la simulación; figura 19.

**Figura 19.** Dimensiones de la vía.



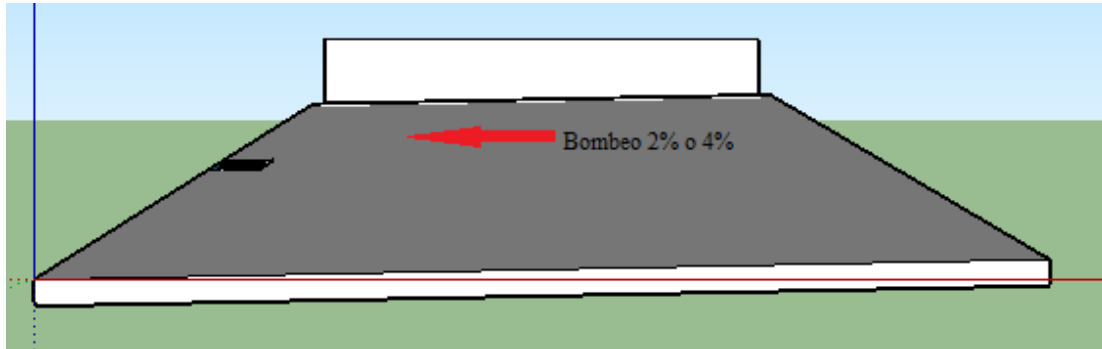
**Realizado por:** Melanie Romero

Se crearon 32 combinaciones tridimensionales, conformados por las variaciones de pendientes, y el cambio de escenario a uno o dos sumideros tipo T45 dependiendo del modelo a simular. Se indica en la tabla 10.

Se puede observar en la figura 20 y 21 el grado de inclinación de las pendientes transversal y longitudinal, respectivamente.

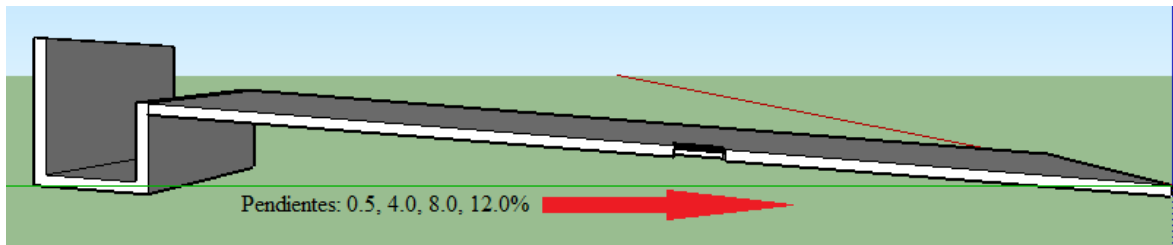


**Figura 20.** Vista 3D, pendiente transversal



**Realizado por:** Melanie Romero

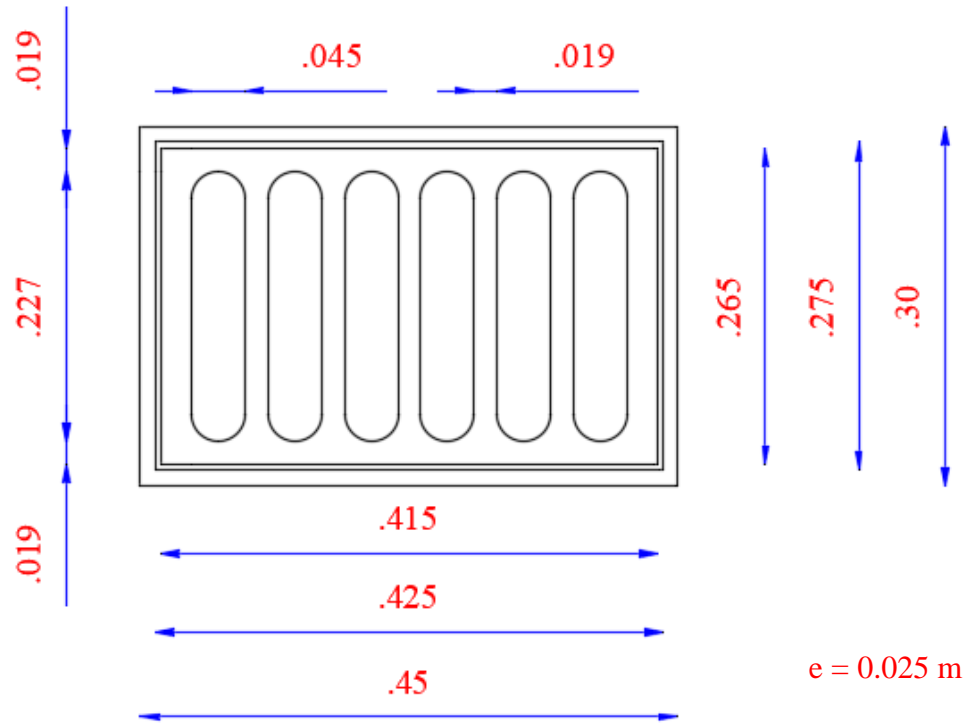
**Figura 21.** Vista 3D, pendiente longitudinal



**Realizado por:** Melanie Romero

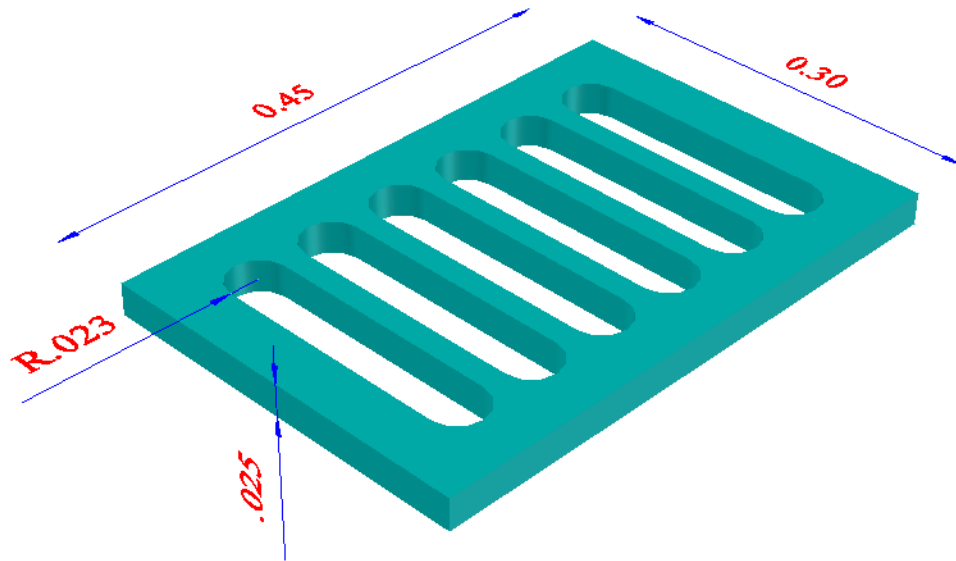
Las dimensiones del sumidero tipo T45 se muestran claramente en la figura 22, seguido de la vista tridimensional en la figura 23.

**Figura 22.** Dimensiones en metros (m) de sumidero tipo T45



Realizado por: Melanie Romero

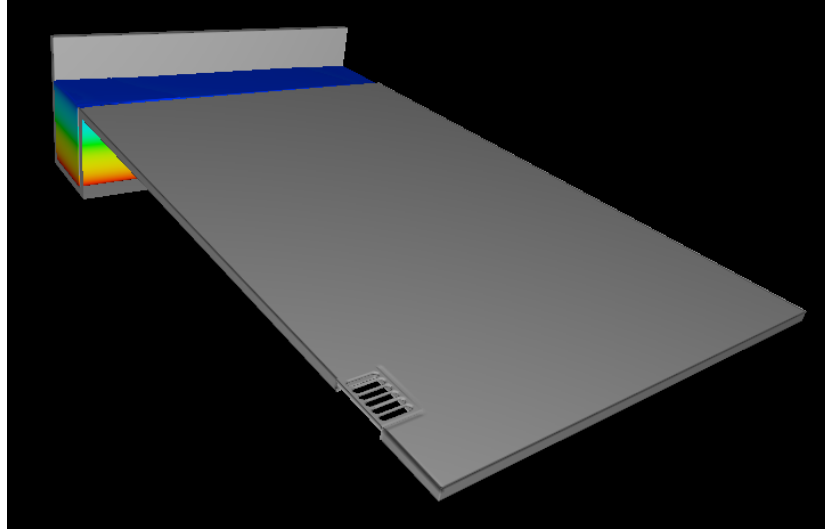
**Figura 23.** Vista 3D de sumidero tipo T45



Realizado por: Melanie Romero

A continuación, se presenta el escenario 1, es decir un sumidero en una vista tridimensional en el software. Figura 24

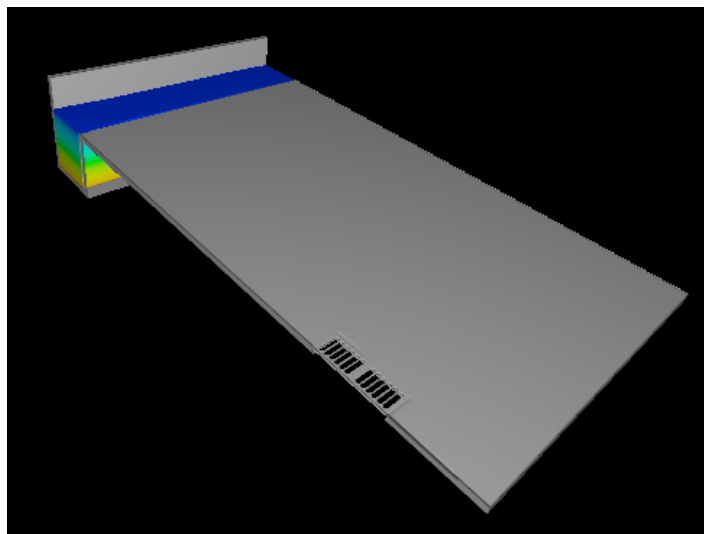
**Figura 24.** Modelo tridimensional en software. Escenario 1



**Realizado por:** Melanie Romero

En la figura 25 se presenta el escenario 2, es decir dos sumideros en serie en una vista tridimensional en el software.

**Figura 25.** Modelo tridimensional en Software. Escenario 2



**Realizado por:** Melanie Romero

### 3.1.1.2.2 Condiciones del fluido

El fluido a ocuparse en la simulación es agua, tomando en cuenta únicamente la temperatura de 20°C y su respectiva viscosidad para su representación. Se observa en la tabla 12.

**Tabla 12.** Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas

Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)
0	0,001792
1	0,001731
2	0,001674
3	0,001620
4	0,001569
5	0,001520
6	0,001473
7	0,001429
8	0,001386
9	0,001346
10	0,001308
11	0,001271
12	0,001236
13	0,001202
14	0,001170
15	0,001139
16	0,001109
17	0,001081
18	0,001054
19	0,001028
20	0,001003
21	0,000979
22	0,000955
23	0,000933
24	0,000911
25	0,000891

**Fuente:** Hidráulica General y Aplicada. UTN-FRBA [25]

Los caudales estimados para la simulación son en base a la tesis antes mencionada y al artículo “Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales”, realizado por la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica [5].

Los caudales que se observan en la tabla 13, se determinaron y se transformaron mediante el siguiente factor experimental, obtenido del artículo y de las ecuaciones 13 y 14.

$$Q_e = \frac{Q_{VIA}}{Q_{LAB}} = L_e^{5/2} \quad Ec. 13$$

$$Q_e = \frac{Q_{VIA}}{Q_{LAB}} = \frac{230}{7.21} = L_e^{5/2} = 31.90 \quad Ec. 14$$

**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales. [5]

Donde:

- $Q_e$  = Factor de transformación de caudal (adimensional)
- $Q_{VIA}$  = Caudal medido en vía (lt/s)
- $Q_{LAB}$  = Caudal medido en el laboratorio (lt/s)
- $L_e$  = Valor de escala (Adimensional)

Dicho factor se lo multiplicará por los valores de caudal de escala reducida de la tesis “Modelación Hidráulica para la Determinación de la Eficiencia de los Sumideros de Aguas Lluvia”, para poderlos emplear en la simulación a escala real. Entonces, se aplica de la siguiente manera, tablas 13 y 14. [24]

**Tabla 13.** Transformación de caudal. Escenario S1 y S2. Bombeo 2%

<b>Pendiente Longitudinal (%)</b>	<b>Caudal a escala reducida (lt/s)</b>	<b>Trasformación mediante el factor “31.9”</b>	<b>Caudal a escala real (lt/s)</b>
0.5, 4.0, 8.0, 12.0	0.53	0.53*31.9	16.91
	1.50	1.50*31.9	47.85
	2.50	2.50*31.9	79.75
	3.50	3.50*31.9	111.65

**Realizado por:** Melanie Romero

**Tabla 14.** Transformación de caudal. Escenario S1 y S2. Bombeo 4%

<b>Pendiente Longitudinal (%)</b>	<b>Caudal a escala reducida (lt/s)</b>	<b>Trasformación mediante el factor “31.9”</b>	<b>Caudal a escala real (lt/s)</b>
0.5, 4.0, 8.0, 12.0	0.65	0.65*31.9	20.74
	1.51	1.51*31.9	48.17
	2.48	2.48*31.9	79.11
	3.50	3.50*31.9	111.65

**Realizado por:** Melanie Romero

Para cada combinación de pendientes se establecieron 4 caudales, observados en la tabla 15, los mismos que permitieron determinar y diferenciar la eficiencia de los sumideros en cada uno de los escenarios.

A continuación, se muestran el resumen de los caudales con cada una de las combinaciones. Tabla 15

**Tabla 15.** Combinaciones de pendientes y Caudales.

<b>Pendiente Transversal</b>	<b>Pendiente Longitudinal</b>	<b>Combos</b>	<b>Escenarios</b>	<b>Caudales (lt/s)</b>
2.0 %	0.5 %	[2.0] : [0.5]	S1 y S2	16.91
				47.85
	4 %	[2.0] : [4.0]		79.75
				111.65
4.0 %	0.5 %	[4.0] : [0.5]	S1 y S2	20.74
				48.17
	4 %	[4.0] : [4.0]		79.11
				111.65

**Realizado por:** Melanie Romero

En conclusión, se procede al análisis y simulación de 32 modelos, todos con las mismas dimensiones y características, variando solo la pendiente longitudinal y transversal, así como también el caudal y el número de sumideros tipo T45, implementados según el escenario correspondiente.

### **3.1.1.2.3 Condiciones de flujo**

Las condiciones que se dieron al flujo del fluido están dadas por la gravedad, el número de Froude y el número de Reynolds.

En la aplicación de mecánica de fluidos computacional CFD, se establece un escenario de turbulencia que el mismo software proporciona, en este caso se escogió propiedades para un modelo supercrítico y turbulento ya que se quiere realizar un modelo semejante a una vía en la vida real.

#### **3.1.1.2.4 Condiciones de borde y mallado**

El mallado de un modelo sea éste tridimensional o no, consiste en la división de este en partes iguales y muy pequeñas dependiendo del valor que se le dé, para su fácil resolución.

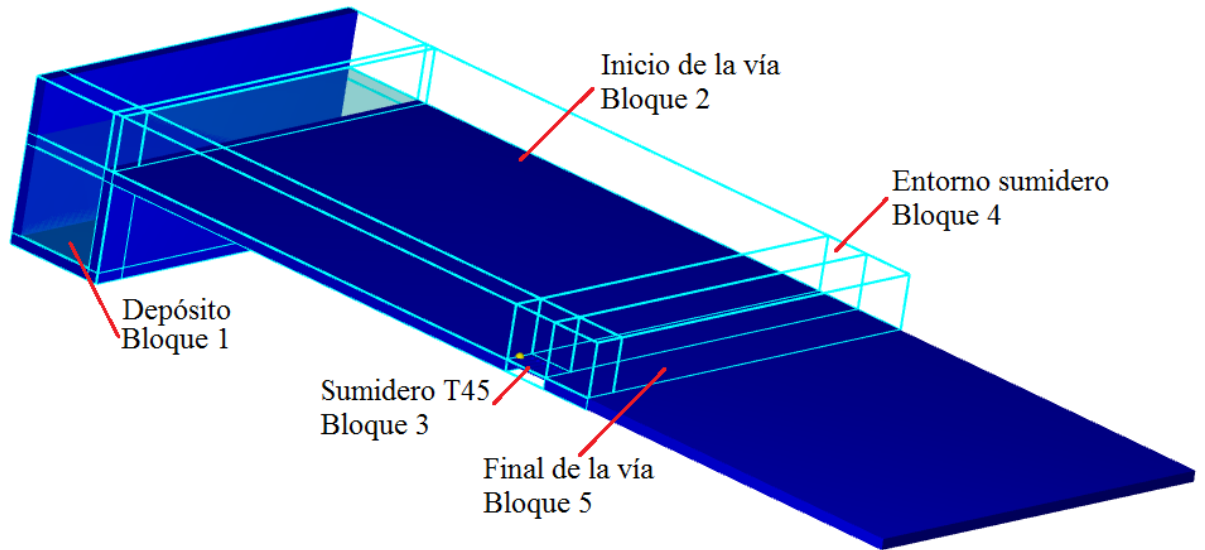
La manera de mallar el modelo realizado es fundamental para la resolución de las ecuaciones de volúmenes finitos que aplica el software. Cabe recalcar que mientras más minucioso es el mallado, más exactos son los resultados, sin embargo, el tiempo de resolución se prolonga más.

Para la simulación del modelo de este proyecto se dio distintos valores debido a la geometría de los elementos, es decir que a la sección del sumidero T45 se dio un mallado más pequeño en comparación al resto de componentes debido a su pequeña y compleja geometría.

Se dispondrá de un bloque de mallado de 1 cm para el sumidero tipo T45, adicionalmente se crearán 3 bloques más de malla con una medida de 2 cm cada uno, los cuales definirán el inicio de la vía, el entorno del sumidero, y el final de la vía después del mismo. Por último, un bloque de malla que defina el depósito del inicio de la vía que contiene el agua de lluvia, también con una medida de 2 cm. Se repitió el mismo procedimiento para cada escenario. Figuras 26, 27, 28 29.

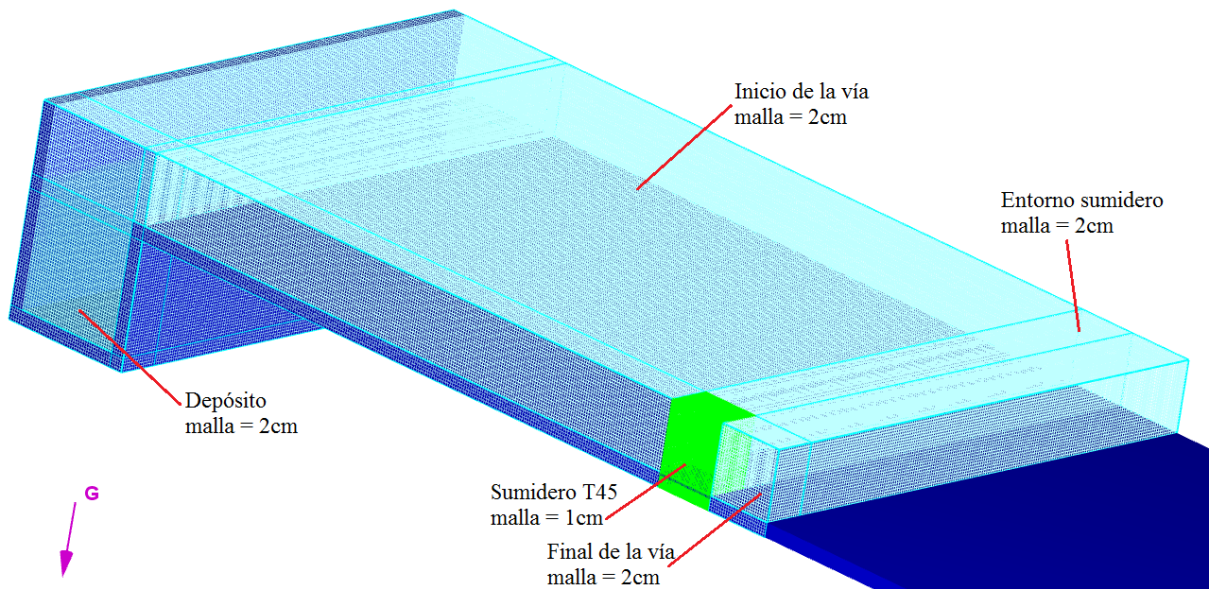


**Figura 26.** Identificación de los bloques de malla en el modelo. *Escenario 1*



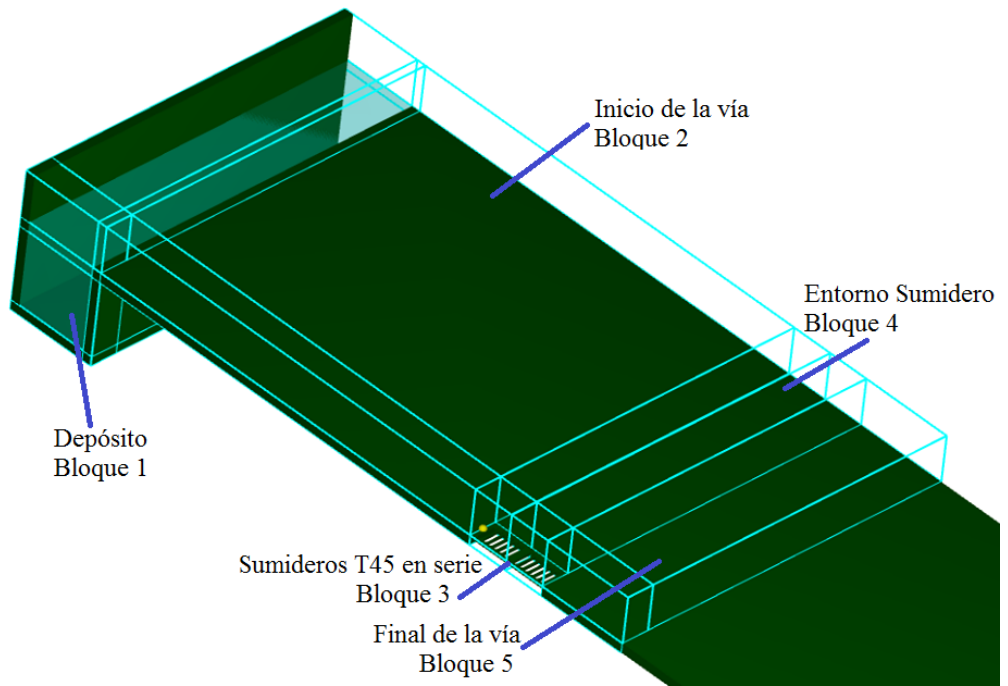
**Realizado por:** Melanie Romero

**Figura 27.** Identificación del mallado del modelo. *Escenario 1*



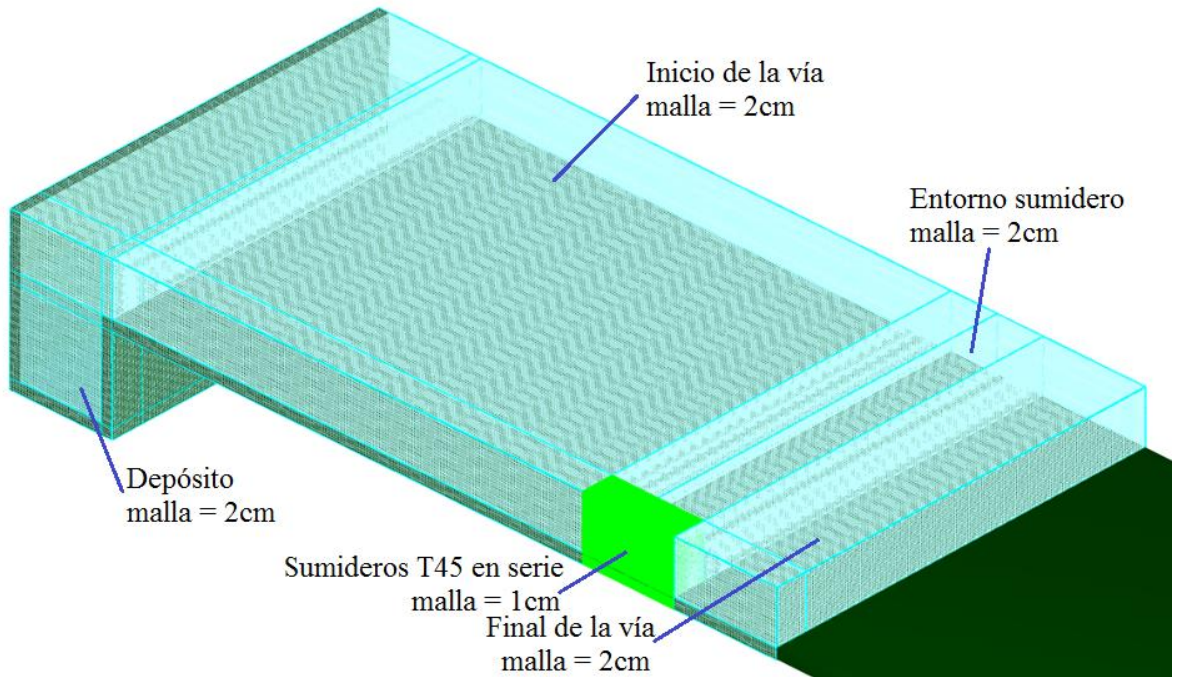
**Realizado por:** Melanie Romero

**Figura 28.** Identificación de los bloques de malla en el modelo. Escenario 2



**Realizado por:** Melanie Romero

**Figura 29.** Identificación del mallado del modelo. Escenario 2



**Realizado por:** Melanie Romero

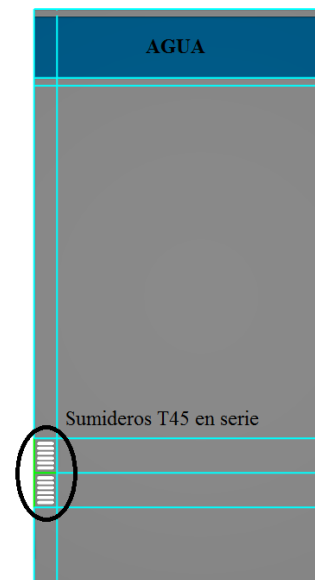
En las condiciones de borde se estableció una sola, la misma que permite indicar que existe una salida de fluido en ciertos puntos, en este caso, dicha condición se la asignó al sumidero para ver la cantidad de caudal captado durante la simulación, y también al final de la vía para la verificación de pérdidas de agua.

Finalmente, las condiciones iniciales del depósito permiten ya la presencia de agua, y debe estar totalmente lleno para que la simulación no calcule el llenado del depósito, sino solo del transporte del fluido. En las figuras 30 y 31 se observa el flujo para cada escenario.

**Figura 30.** Vista del fluido en el modelo. Escenario 1



**Figura 31.** Vista del fluido en el modelo. Escenario 2



**Realizado por:** Melanie Romero

### 3.1.1.2.5 Tiempo de simulación

Para cada caso la duración de las simulaciones fue distinta, ya que el tiempo varía debido a la modificación de varias variables en cada uno; tomando en cuenta estos



<b>P. Transversal 2%</b>	
<b>P. Longitudinal 4%</b>	
<b>Tiempo (seg)</b>	<b>Caudal (lt/s)</b>
8.25	-16.37
8.50	-17.26
8.75	-17.63
9.00	-18.18
9.25	-18.46
9.50	-18.41
9.75	-18.38
10.00	-18.40
10.25	-18.21
10.50	-17.76
10.75	-17.50
11.00	-17.68
11.25	-17.99
11.50	-18.15
11.75	-18.40
12.00	-18.54
12.25	-18.59
12.50	-18.51
12.75	-18.60
13.00	-18.57
13.25	-18.41
13.50	-18.40
13.75	-18.48

continúa

sigue

<b>P. Transversal 2%</b>	
<b>P. Longitudinal 4%</b>	
<b>Tiempo (seg)</b>	<b>Caudal (lt/s)</b>
14.00	-18.60
14.25	-18.73
14.50	-18.84
14.75	-19.04
15.00	-19.11
15.25	-19.03
15.50	-18.98
15.75	-18.90
16.00	-18.94
16.25	-19.04
16.50	-19.09
16.75	-19.12
17.00	-19.15
17.25	-19.11
17.50	-19.01
17.75	-18.95
18.00	-18.93
18.25	-18.89
18.50	-18.93
18.75	-18.98
19.00	-19.00
19.25	-19.07

continúa

sigue

<b>P. Transversal 2%</b>	
<b>P. Longitudinal 4%</b>	
<b>Tiempo (seg)</b>	<b>Caudal (lt/s)</b>
19.50	-19.14
19.75	-19.11
20.00	-19.00
20.25	-18.91
20.50	-18.92
20.75	-18.92
21.00	-18.99
21.25	-19.07
21.50	-19.14
21.75	-19.10
22.00	-19.01
22.25	-18.89
22.50	-18.76
22.75	-18.81
23.00	-18.94
23.25	-19.00
23.50	-19.00
23.75	-19.01
24.00	-19.07
24.25	-19.13
24.50	-19.12
24.75	-19.01
25.00	-18.90

**Realizado por:** Melanie Romero

En la figura 32 se observa el comportamiento del flujo y su estabilización con un caudal de 79.75 lt/s, para el bombeo del 2%, pendiente longitudinal del 4% con un sumidero.



<b>P. Transversal 2%</b>	
<b>P. Longitudinal 4%</b>	
<b>Tiempo (seg)</b>	<b>Caudal (lt/s)</b>
4.00	-8.27
4.25	-12.73
4.50	-15.02
4.75	-16.17
5.00	-16.96
5.25	-18.07
5.50	-18.95
5.75	-20.55
6.00	-25.82
6.25	-32.02
6.50	-30.19
6.75	-29.95
7.00	-28.81
7.25	-27.82
7.50	-26.77
7.75	-26.24
8.00	-26.08
8.25	-25.97
8.50	-26.46
8.75	-27.78
9.00	-28.86
9.25	-28.72
9.50	-28.37
9.75	-28.38
10.00	-28.33
10.25	-28.10
10.50	-27.55
10.75	-27.08
11.00	-27.21

continúa

sigue

<b>P. Transversal 2%</b>	
<b>P. Longitudinal 4%</b>	
<b>Tiempo (seg)</b>	<b>Caudal (lt/s)</b>
11.25	-27.73
11.50	-28.30
11.75	-28.62
12.00	-28.70
12.25	-28.74
12.50	-28.79
12.75	-28.87
13.00	-29.06
13.25	-28.89
13.50	-28.51
13.75	-28.39
14.00	-28.62
14.25	-29.09
14.50	-29.16
14.75	-29.26
15.00	-29.43
15.25	-29.43
15.50	-29.27
15.75	-29.51
16.00	-29.60
16.25	-29.69
16.50	-29.67
16.75	-29.67
17.00	-29.82
17.25	-29.55
17.50	-29.55
17.75	-29.63
18.00	-29.62

continúa

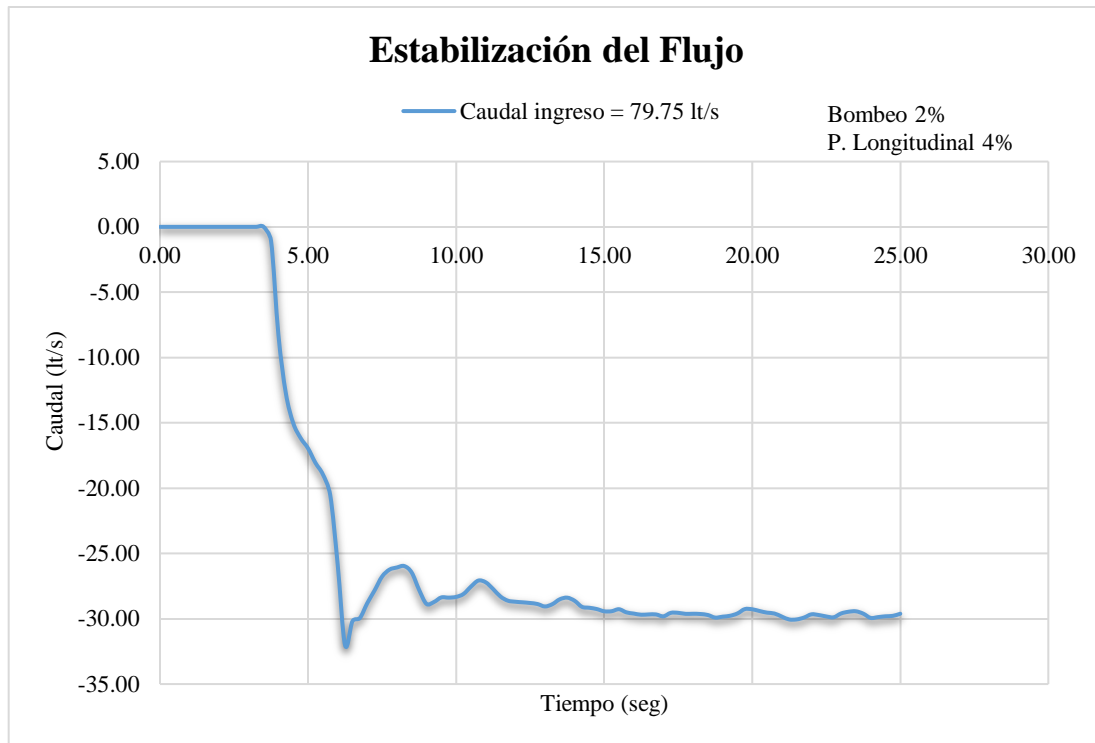
sigue

<b>P. Transversal 2%</b>	
<b>P. Longitudinal 4%</b>	
<b>Tiempo (seg)</b>	<b>Caudal (lt/s)</b>
18.25	-29.64
18.50	-29.71
18.75	-29.91
19.00	-29.84
19.25	-29.77
19.50	-29.60
19.75	-29.26
20.00	-29.28
20.25	-29.41
20.50	-29.53
20.75	-29.60
21.00	-29.84
21.25	-30.06
21.50	-30.05
21.75	-29.91
22.00	-29.66
22.25	-29.72
22.50	-29.83
22.75	-29.89
23.00	-29.60
23.25	-29.47
23.50	-29.43
23.75	-29.61
24.00	-29.94
24.25	-29.87
24.50	-29.81
24.75	-29.78
25.00	-29.62

Realizado por: Melanie Romero

En la figura 33 se observa el comportamiento del flujo y su estabilización con un caudal de 79.75 lt/s, para el bombeo del 2%, pendiente longitudinal del 4% y dos sumideros en serie.

**Figura 33.** Estabilización de flujo. Escenario 2



**Realizado por:** Melanie Romero

### 3.1.1.3 Calibración del modelo físico y el modelo numérico

Las tablas y gráficas a continuación representan la comparación de resultados entre la eficiencia del sumidero T45 del modelo físico, con el modelo numérico simulado en el software. Cabe recalcar que se muestran sólo dos combinaciones de pendientes, las mismas que demuestran el comportamiento similar entre dichos modelos (físico y numérico); el resto de las gráficas se omitieron debido a los sistemas de medición utilizados en el aforo del modelo físico a escala reducida, ya que la capacidad de



medición del equipo utilizado fue inexacta en los caudales inferiores a un litro por segundo.

La eficiencia del modelo físico se determinó con el caudal de ingreso y los factores de alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ) y mediante la siguiente fórmula:

$$E = \beta * Q_{ingreso}^{-\alpha} \quad Ec - 15$$

En donde los factores  $\alpha$  y  $\beta$  se tomaron del artículo de investigación “Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales”, que se indican a continuación en la tabla 18 para un sumidero y la tabla 19 para dos sumideros en serie.

**Tabla 18.** Parámetros y para el sumidero S1

	$j=0,5\%$	$j=4\%$
$i=2\%$	$\alpha = 0,68$ $\beta = 60,31$ $R^2_{adj} = 0,999$	$\alpha = 0,65$ $\beta = 47,19$ $R^2_{adj} = 0,998$
$i=4\%$	$\alpha = 0,56$ $\beta = 56,30$ $R^2_{adj} = 0,997$	$\alpha = 0,38$ $\beta = 31,55$ $R^2_{adj} = 0,998$

**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales

**Tabla 19.** Parámetros y para el sumidero *en serie* S2

	$j= 0,5\%$	$j= 4\%$
$i= 2\%$	$\alpha = 0,55$ $\beta = 77,32$ $R^2_{adj} = 0,987$	$\alpha = 0,60$ $\beta = 63,61$ $R^2_{adj} = 0,996$
$i= 4\%$	$\alpha = 0,55$ $\beta = 86,94$ $R^2_{adj} = 0,998$	$\alpha = 0,42$ $\beta = 60,69$ $R^2_{adj} = 0,989$

**Fuente:** Cálculo experimental de la eficiencia hidráulica en sumideros de aguas pluviales

Los datos de caudal de ingreso y los resultados de eficiencia del modelo numérico, han sido transformados a escala reducida 1:4 para su comparación.

Para la eficiencia del modelo numérico se procedió a dividir los valores arrojados por el software de caudal captado por el sumidero, para el caudal de ingreso y expresado en porcentaje.

En la tabla 20, se indica una de las combinaciones de pendientes con los valores de sus cuatro caudales de ingreso; además, la eficiencia en porcentaje del modelo físico, obtenida con la ecuación 15 explicada anteriormente; y los resultados arrojados de la simulación del programa del caudal captado por el sumidero del modelo numérico. Se visualiza la combinación: bombeo 2.0%, pendiente longitudinal 4.0%.

- **Escenario 1 – Un sumidero**

**Tabla 20.** Datos y resultados de Modelo Físico vs Modelo Numérico

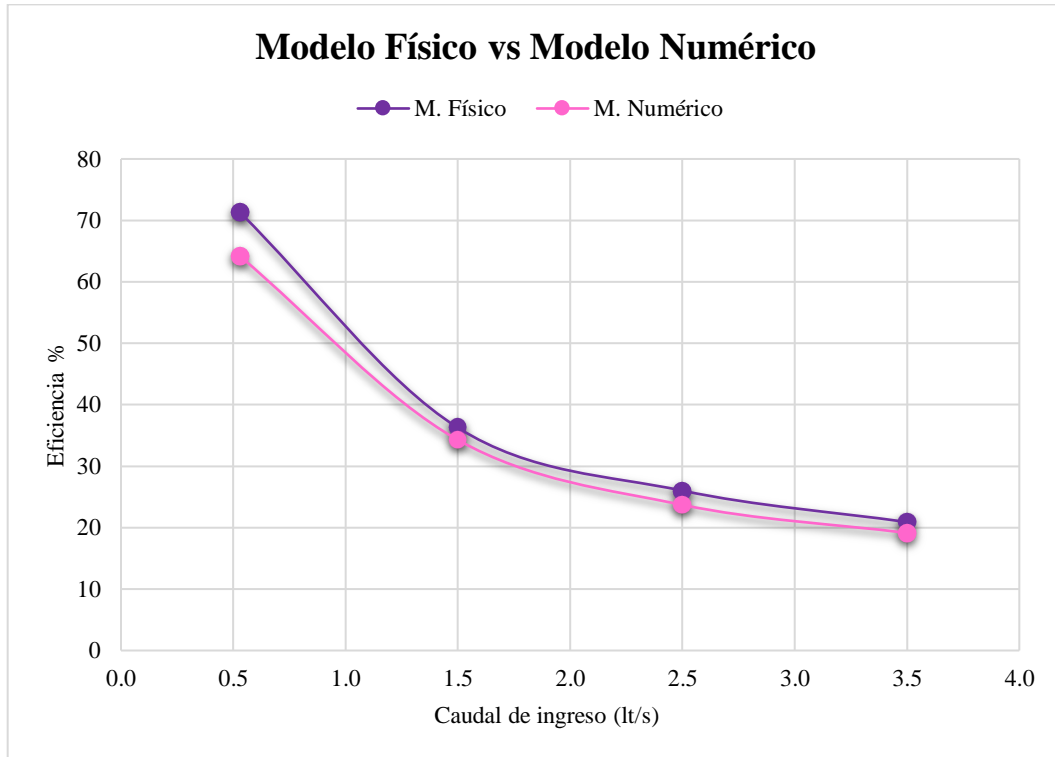
Pendiente		Q ingreso (lt/s)	Q captado (lt/s)	Eficiencia (%)	
Transversal	Longitudinal			Modelo Físico	Modelo Numérico
2.00%	4.00%	0.53	0.34	71.29	64.16
		1.50	0.51	36.26	34.27
		2.50	0.59	26.01	23.70
		3.50	0.67	20.90	19.13

**Realizado por:** Melanie Romero

La demostración gráfica de la tabla 20 se observa en la figura 34, en donde se compara los resultados de la eficiencia hidráulica del modelo físico vs el modelo numérico, en el

cual se observa una tendencia similar entre ambas curvas, por lo que se puede concluir que los resultados tanto del estudio físico como del numérico son confiables.

**Figura 34.** Eficiencia de Sumidero T45 para 2% de bombeo y 4.0% de pendiente longitudinal



**Realizado por:** Melanie Romero

En la tabla 21, se indica la combinación: bombeo 4.0%, pendiente longitudinal 4.0%, con los valores de sus cuatro caudales de ingreso, la eficiencia en porcentaje del modelo físico, y los resultados arrojados de la simulación del programa del caudal captado por el sumidero del modelo numérico.

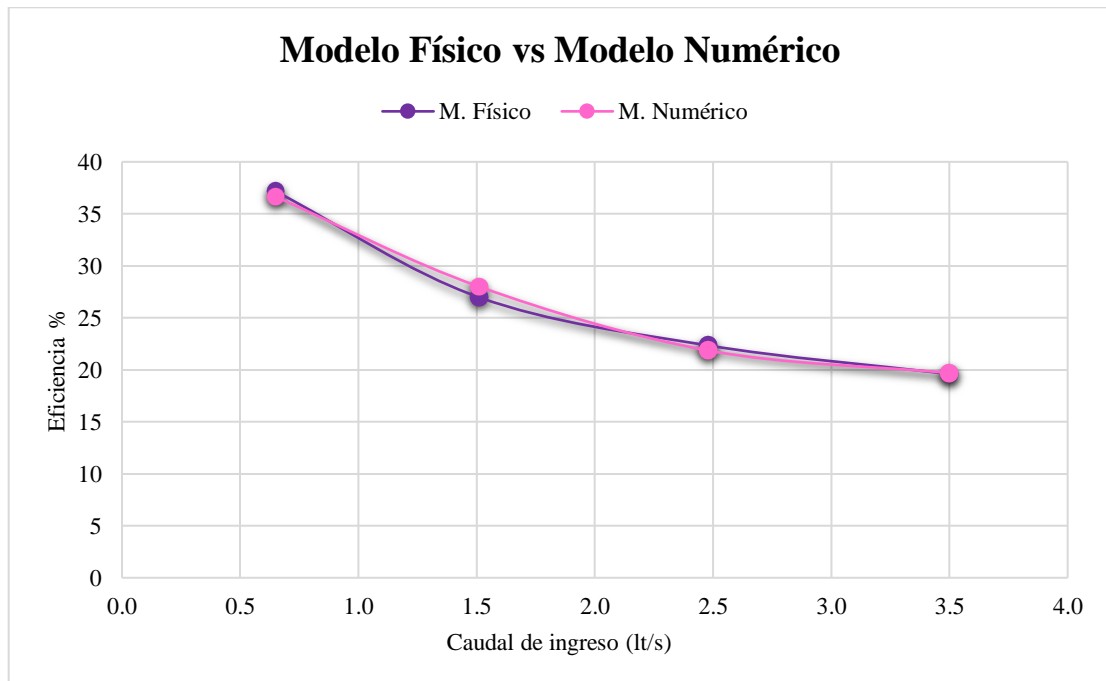
**Tabla 21.** Datos y resultados de Modelo Físico vs Modelo Numérico

Pendiente		Q ingreso (lt/s)	Q ingreso (lt/s)	Eficiencia (%)	
Transversal	Longitudinal			Modelo Físico	Modelo Numérico
4.00%	4.00%	0.65	0.24	37.16	36.64
		1.51	0.42	26.98	28.00
		2.48	0.54	22.34	21.86
		3.50	0.69	19.60	19.69

**Realizado por:** Melanie Romero

La demostración gráfica de la tabla 21 se observa en la figura 35, en donde se compara la eficiencia hidráulica del modelo físico vs el modelo numérico, en el cual también se concluye que los resultados son confiables debido a la tendencia similar de las curvas.

**Figura 35.** Eficiencia de Sumidero T45 para 4% de bombeo y 4% de pendiente longitudinal



**Realizado por:** Melanie Romero

### 3.1.1.4 Curva de eficiencia de modelo numérico

Las tablas y gráficas a continuación representan la eficiencia de la simulación del modelo numérico con sumideros tipo T45, para el conjunto de combinaciones escogidas en cada escenario respectivo.

- **Escenario 1 – Un sumidero**

En la tabla 22, se indica el caudal de ingreso a escala reducida 1:4 con su respectiva eficiencia hidráulica para cada combinación de pendientes del modelo numérico con bombeo 2% del primer escenario.

**Tabla 22.** Eficiencia de Sumidero T45 en el Modelo Numérico. Bombeo 2%

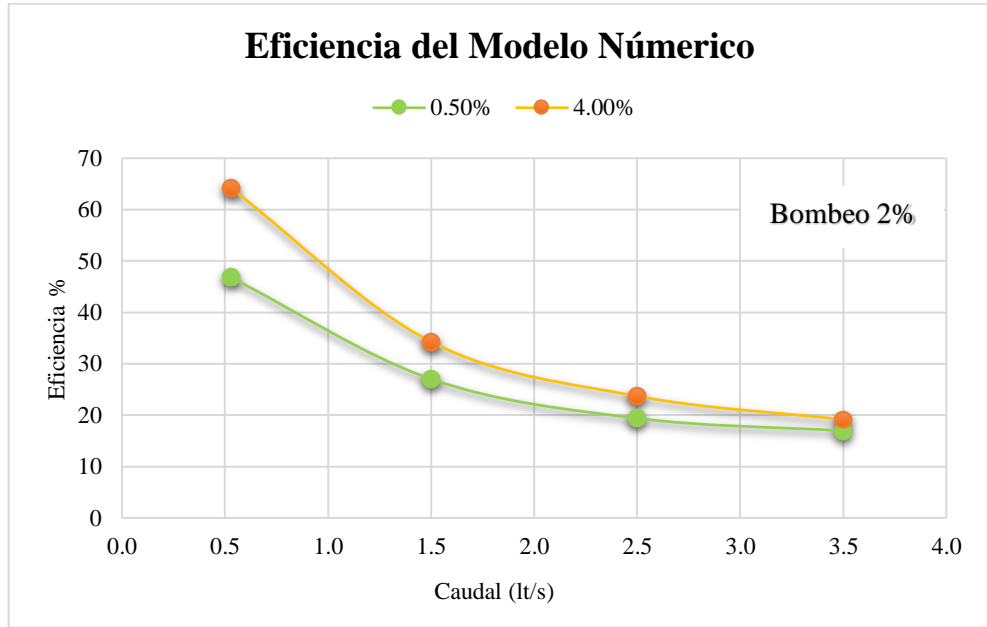
Q ingreso (lt/s)	Eficiencia Modelo Numérico (%)		
	Pendiente Transversal	Pendiente Longitudinal	
		0.50%	4.00%
0.53	2.00%	46.78	64.16
1.50		27.02	34.27
2.50		19.39	23.70
3.50		16.95	19.13

Realizado por: Melanie Romero

La figura 36 representa dos curvas de eficiencia hidráulica que pertenecen al primer par de combinaciones en el escenario 1 (un sumidero), con una pendiente transversal del 2% en ambos casos y pendientes longitudinales de 0.5% y 4.0% respectivamente. La gráfica demuestra que el combo “2%T y 4%L”<sup>3</sup> supera la eficiencia hidráulica de la segunda combinación “2%T y 0.5%L”.

<sup>3</sup> “2%T y 4%L”: Simbología que representa una combinación con pendiente transversal del 2% y pendiente longitudinal del 4%.

**Figura 36.** Curvas de eficiencia de sumidero T45 del Modelo Numérico para 2% de bombeo y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0%



**Realizado por:** Melanie Romero

En la tabla 23, se indica el caudal de ingreso a escala reducida 1:4 con su respectiva eficiencia hidráulica para cada combinación de pendientes del modelo numérico con bombeo 4% del primer escenario.

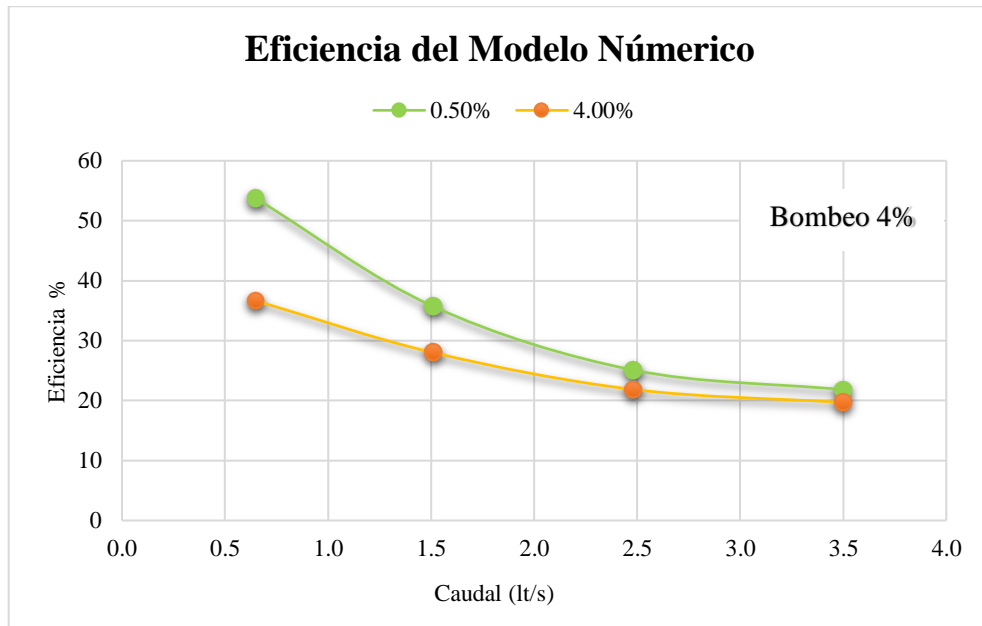
**Tabla 23.** Eficiencia de Sumidero T45 en el Modelo Numérico. Bombeo 4%

Q ingreso (lt/s)	Eficiencia Modelo Numérico (%)		
	Pendiente Transversal	Pendiente Longitudinal	
		0.50%	4.00%
0.65	4.00%	53.71	36.64
1.51		35.71	28.00
2.48		25.10	21.86
3.50		21.83	19.69

**Realizado por:** Melanie Romero

La figura 37 representa la eficiencia hidráulica del segundo par de combos del escenario 1 (un sumidero), con una pendiente transversal del 4% en ambos casos y pendientes longitudinales de 0.5% y 4.0% respectivamente. La gráfica demuestra lo contrario al caso anterior, el combo “4%T y 4%L” es inferior a la eficiencia hidráulica de la segunda combinación “4%T y 0.5%L”.

**Figura 37.** Curvas de eficiencia de sumidero T45 del Modelo Numérico para 4% de bombeo y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0%



**Realizado por:** Melanie Romero

- **Escenario 2 – Dos sumideros en serie**

En la tabla 24, se indica el caudal de ingreso a escala reducida 1:4 con su respectiva eficiencia hidráulica para cada combinación de pendientes del modelo numérico con bombeo 2% del segundo escenario.

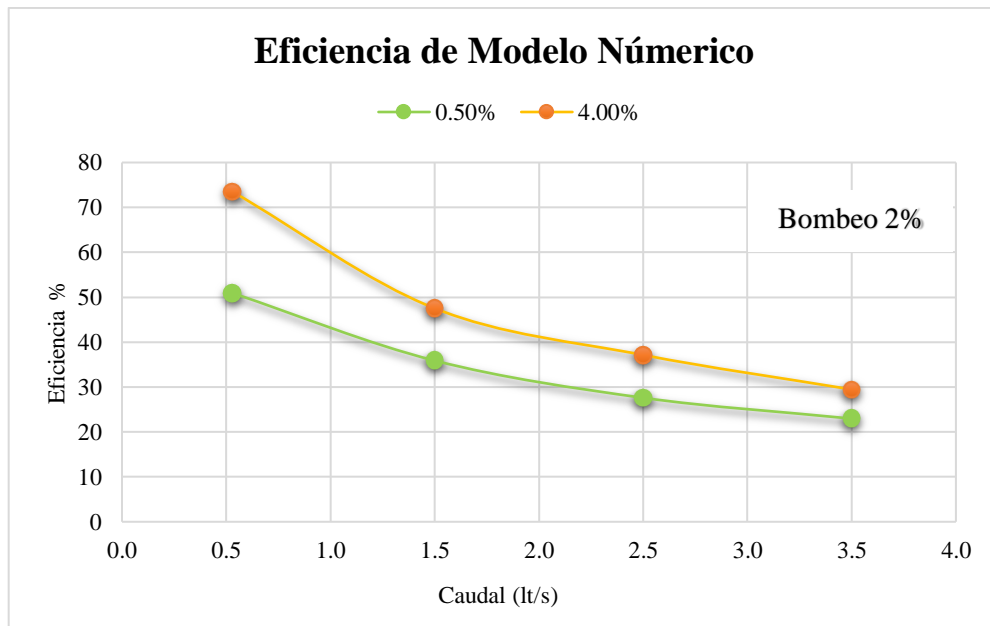
**Tabla 24.** Eficiencia de Sumidero T45 en el Modelo Numérico. Bombeo 2%

Q ingreso (lt/s)	Modelo. Numérico		
	Pendiente Transversal	Pendiente Longitudinal	
		0.50%	4.00%
0.53	2.00%	50.92	73.51
1.50		35.88	47.52
2.50		27.60	37.14
3.50		22.96	29.46

Realizado por: Melanie Romero

La figura 38 representa dos curvas de eficiencia hidráulica que pertenecen al primer par de combinaciones en el escenario 2 (dos sumideros en serie), con una pendiente transversal del 2% en ambos casos y pendientes longitudinales de 0.5% y 4.0% respectivamente. La gráfica demuestra que el combo “2%T y 4%L” supera la eficiencia hidráulica de la segunda combinación “2%T y 0.5%L”.

**Figura 38.** Curvas de eficiencia de sumidero T45 en el Modelo Numérico para 2% de bombeo y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0%



Realizado por: Melanie Romero



En la tabla 25, se indica el caudal de ingreso a escala reducida 1:4 con su respectiva eficiencia hidráulica para cada combinación de pendientes del modelo numérico con bombeo 4% del segundo escenario.

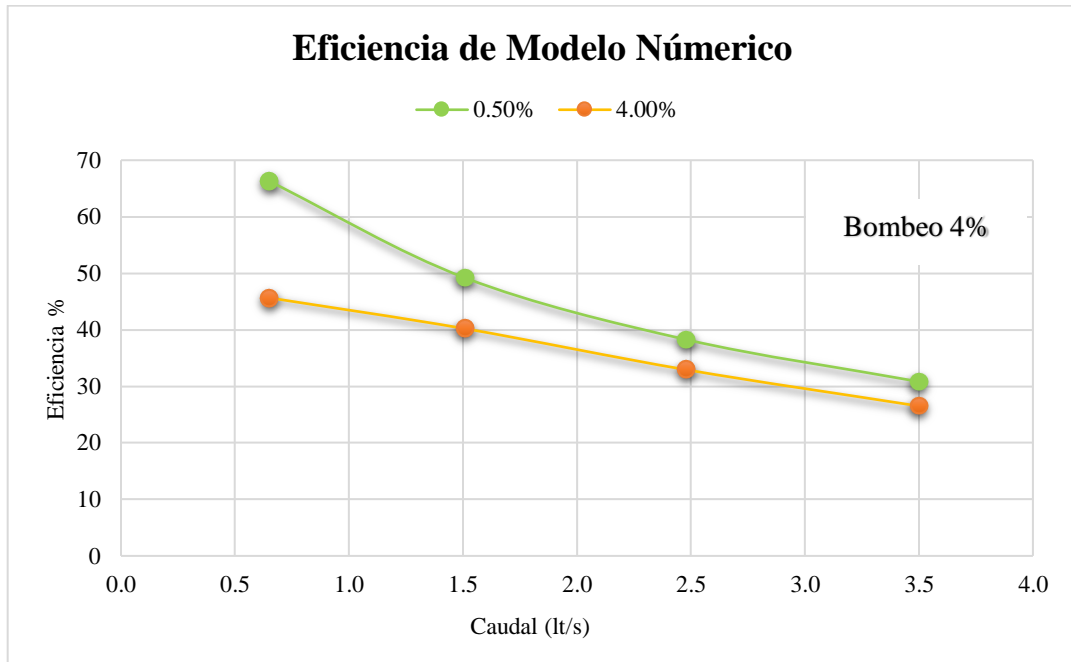
**Tabla 25.** Eficiencia de Sumidero T45 en el Modelo Numérico. Bombeo 4%

Q ingreso (lt/s)	Modelo Numérico		
	Pendiente Transversal	Pendiente Longitudinal	
		0.50%	4.00%
0.65	4.00%	66.30	45.66
1.51		49.18	40.19
2.48		38.26	32.93
3.50		30.83	26.51

**Realizado por:** Melanie Romero

La figura 39 representa la eficiencia hidráulica del segundo par de combos del escenario 2 (dos sumideros en serie), con una pendiente transversal del 4% en ambos casos y pendientes longitudinales de 0.5% y 4.0% respectivamente. La gráfica demuestra lo contrario al caso anterior, el combo “4%T y 4%L” es inferior a la eficiencia hidráulica de la segunda combinación “4%T y 0.5%L”.

**Figura 39.** Curvas de eficiencia de sumidero T45 en el Modelo Numérico para 4% de bombeo y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0%



**Realizado por:** Melanie Romero

### 3.1.1.5 Curvas del caudal en vía vs caudal de sumidero

Los datos de caudal de ingreso en la vía y los resultados de caudal captado por el sumidero T45 del modelo numérico, se graficaron a escala real tal y como se ingresaron en el software para su simulación.

- **Escenario 1 – Un sumidero**

En la tabla 26 se presentan los datos de caudal a escala real ingresados al software y los resultados de captación del sumidero T45 para el modelo numérico, de las combinaciones “2%T – 0.5%” y “2%T – 4%”.

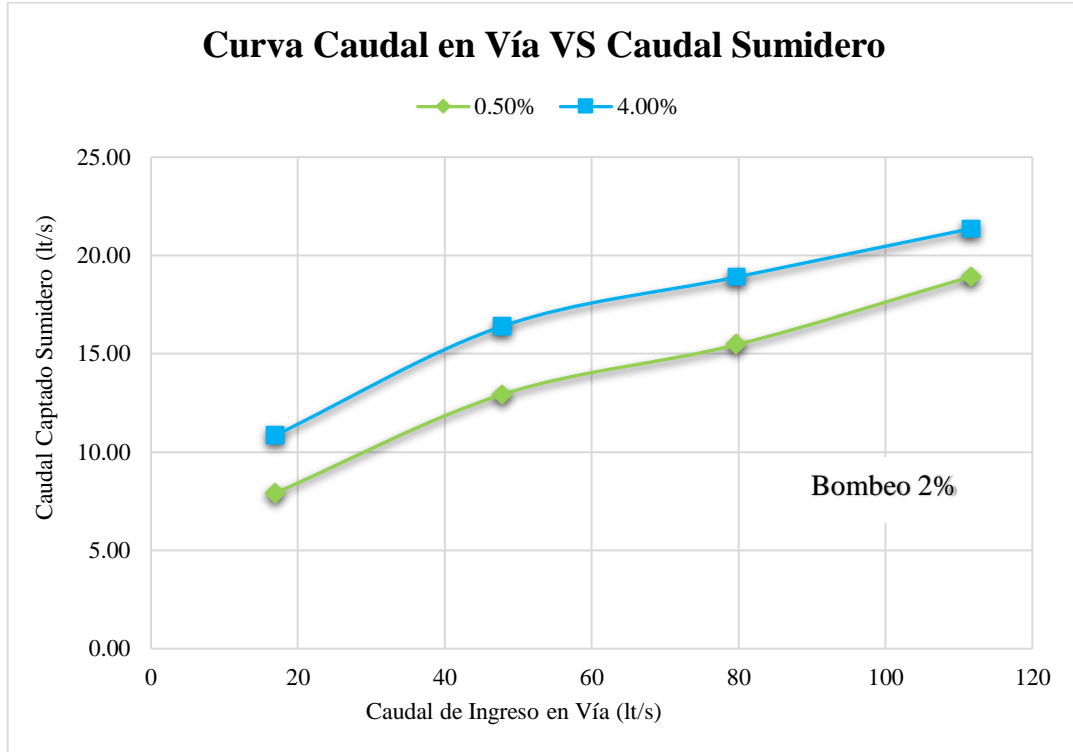
**Tabla 26.** Resultados de caudal de ingreso en vía y caudal captado en sumidero. Escala real

Q ingreso (lt/s)	Caudal Captado Sumidero T45 (lt/s)		
	Pendiente Transversal	Pendiente Longitudinal	
		0.50%	4.00%
16.91	2.00%	7.91	10.85
47.85		12.93	16.40
79.75		15.46	18.90
111.65		18.92	21.36

**Realizado por:** Melanie Romero

En la figura 40 se observan las gráficas de las curvas del caudal de entrada y el caudal captado por el sumidero T45 en el modelo numérico de las combinaciones “2%T – 0.5%” y “2%T – 4%”.

**Figura 40.** Caudal captado por el sumidero T45. Bombeo 2% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0 %



**Realizado por:** Melanie Romero

En la tabla 27 se presentan los datos de caudal a escala real ingresados al software y los resultados de captación del sumidero T45 para el modelo numérico, de las combinaciones “4%T – 0.5%” y “4%T – 4%”.

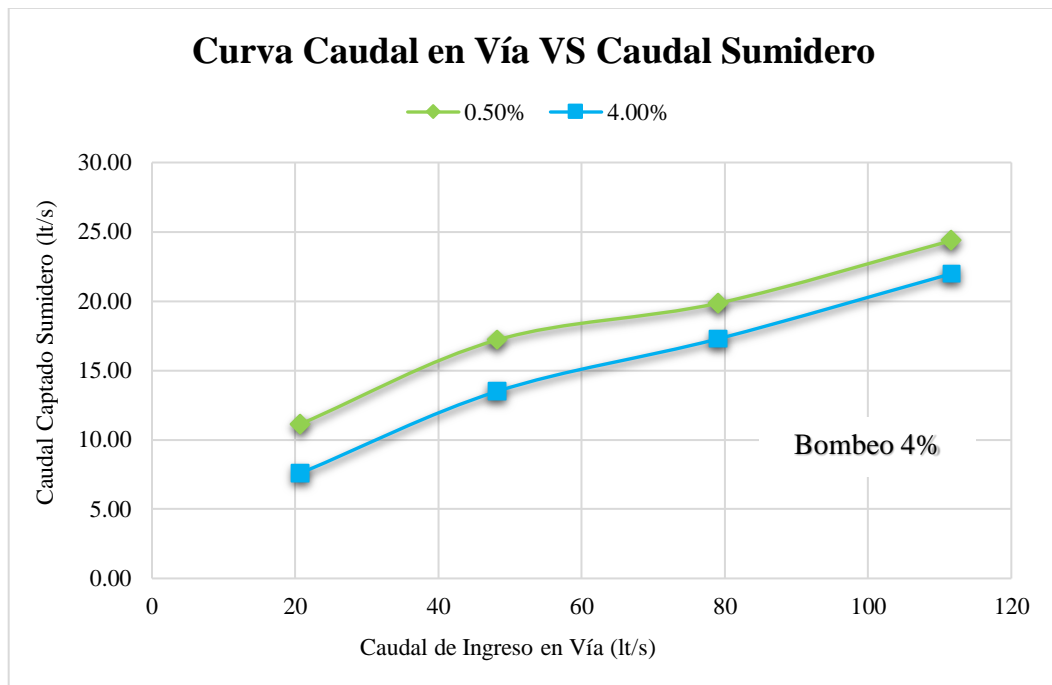
**Tabla 27.** Resultados de caudal ingresado en vía y caudal captado en sumidero. Escala real

Q ingreso (lt/s)	Caudal Captado Sumidero T45 (lt/s)		
	Pendiente Transversal	Pendiente Longitudinal	
		0.50%	4.00%
20.74	4.00%	11.14	7.60
48.17		17.20	13.49
79.11		19.86	17.29
111.65		24.37	21.98

**Realizado por:** Melanie Romero

En la figura 41 se observan las gráficas de las curvas del caudal de entrada y el caudal captado por el sumidero T45 en el modelo numérico de las combinaciones “4%T – 0.5%” y “4%T – 4%”.

**Figura 41.** Caudal captado por el sumidero T45. Bombeo 4% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0 %



**Realizado por:** Melanie Romero

- **Escenario 2 – Dos sumideros en serie**

En la tabla 28 se presentan los datos de caudal a escala real ingresados al software y los resultados de captación del sumidero T45 para el modelo numérico, de las combinaciones “2%T – 0.5%” y “2%T – 4%”.

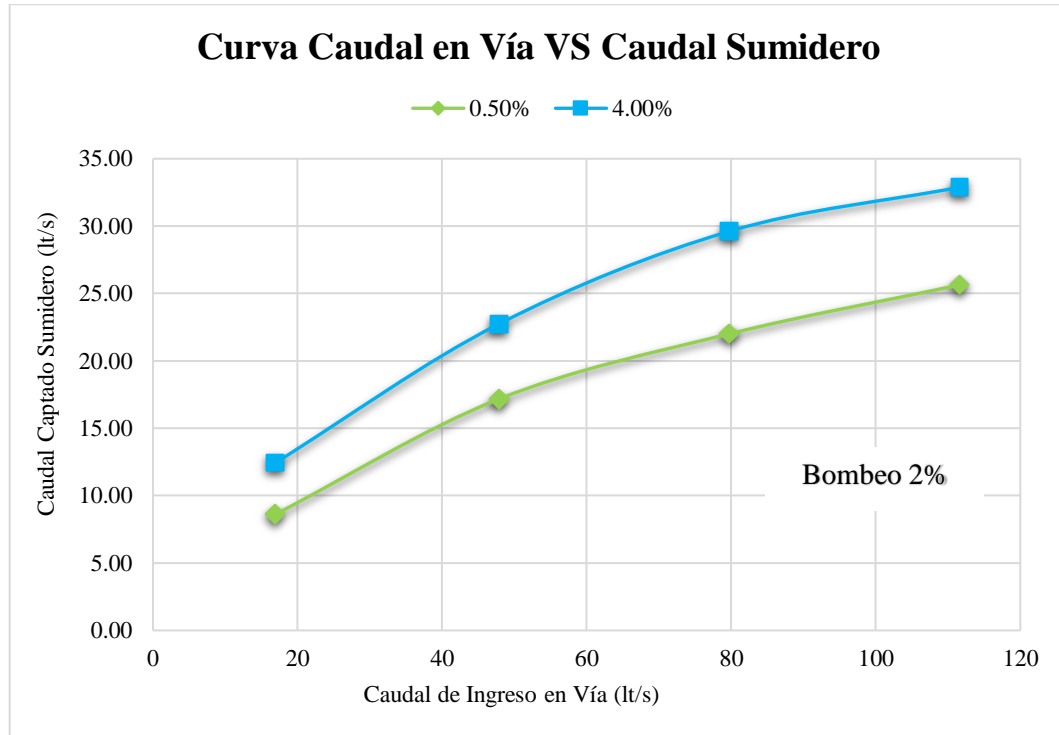
**Tabla 28.** Resultados de caudal ingresado en vía y caudal captado en sumidero. Escala real

Q ingreso (lt/s)	Caudal Captado Sumidero T45 (lt/s)		
	Pendiente Transversal	Pendiente Longitudinal	
		0.50%	4.00%
16.91	2.00%	8.61	12.43
47.85		17.17	22.74
79.75		22.01	29.62
111.65		25.64	32.89

**Realizado por:** Melanie Romero

En la figura 42 se observan las gráficas de las curvas del caudal de entrada y el caudal captado por el sumidero T45 en el modelo numérico de las combinaciones “2%T – 0.5%” y “2%T – 4%”.

**Figura 42.** Caudal captado por el sumidero T45. Bombeo 4% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0 %



**Realizado por:** Melanie Romero

En la tabla 29 se presentan los datos de caudal a escala real ingresados al software y los resultados de captación del sumidero T45 para el modelo numérico, de las combinaciones “4%T – 0.5%” y “4%T – 4%”.

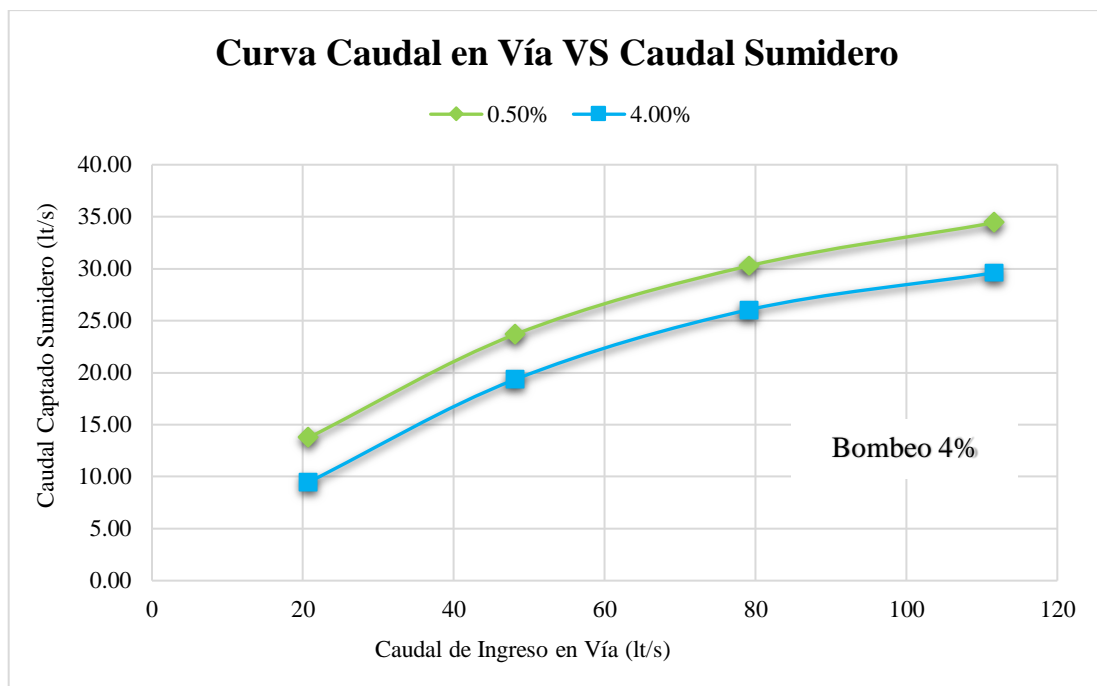
**Tabla 29.** Resultados de caudal ingresado en vía y caudal captado en sumidero. Escala real

Q ingreso (lt/s)	Caudal Captado Sumidero T45 (lt/s)		
	Pendiente Transversal	Pendiente Longitudinal	
		0.50%	4.00%
20.74	4.00%	13.75	9.47
48.17		23.69	19.36
79.11		30.27	26.05
111.65		34.42	29.60

Realizado por: Melanie Romero

En la figura 43 se observan las gráficas de las curvas del caudal de entrada y el caudal captado por el sumidero T45 en el modelo numérico de las combinaciones “4%T – 0.5%” y “4%T – 4%”.

**Figura 43.** Caudal captado por el sumidero T45. Bombeo 4% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0 %



Realizado por: Melanie Romero

### 3.1.1.6 Ecuaciones de tendencia y eficiencia

Después de los resultados obtenidos mediante la simulación en el software de aplicación de mecánica de fluidos computacional (CFD) y su comparación con el modelo físico experimental, con los caudales de ingreso y salida, se determinaron las curvas de eficiencia indicadas anteriormente, mediante la aplicación de la ecuación 15:

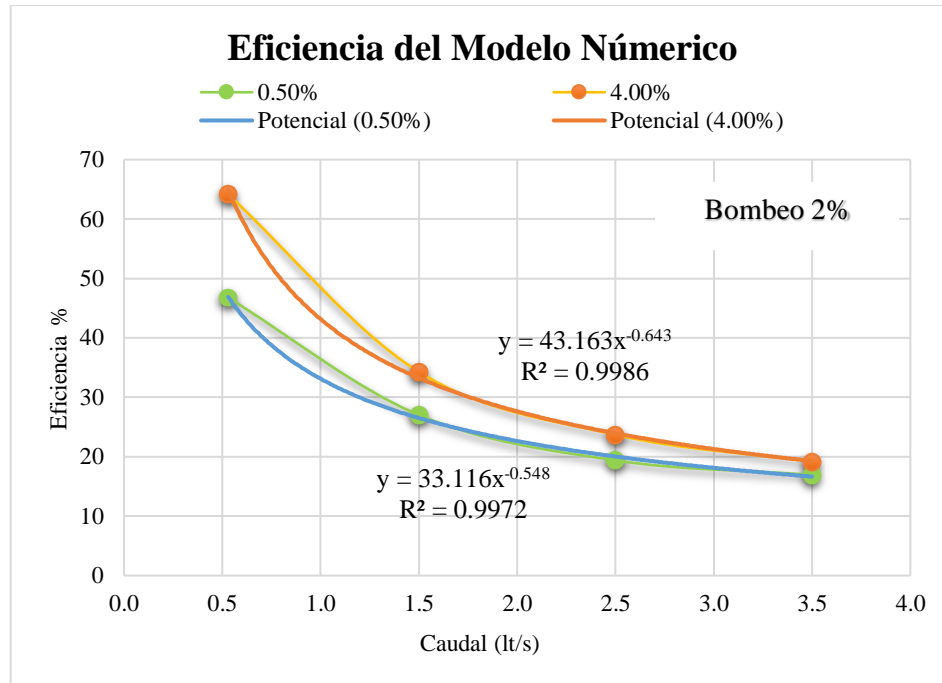
$$E = \beta * Q^{-\alpha} \quad Ec - 15$$

Mediante estas curvas y aplicando la función potencial a cada una, se determinaron los valores de los coeficientes de ajuste: alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ), para cada combinación de pendientes y escenarios, los mismos que facilitarán estimar la eficiencia de los sumideros dependiendo de la topografía de la vía en donde sean aplicados.

En la figura 43 se observan las curvas de eficiencia y su función potencial con cada una de sus ecuaciones y factor  $R^2$ , para el bombeo de 2% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0%. Escenario 1 (un sumidero).



**Figura 44.** Eficiencia de captación y curvas de la función potencial de S1. Bombeo 2%



**Realizado por:** Melanie Romero

En la tabla 30 se indica el resumen de los coeficientes de ajuste alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ), en el escenario 1, con pendiente transversal de 2% y pendientes longitudinales de 0.5% y 4%.

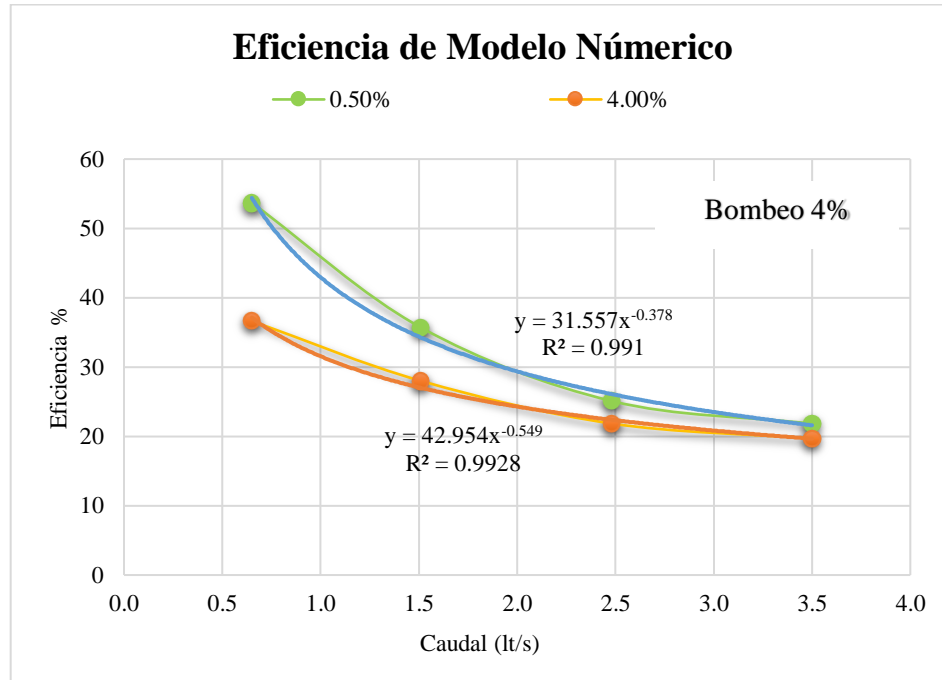
**Tabla 30.** Coeficientes de ajuste del escenario 1. Bombeo 2%

<b>Escenario 1 – Un sumidero</b>			
<b>Pendiente transversal</b>	<b>Pendiente longitudinal</b>	<b>Factores reducción</b>	
2.00%	0.50%	$\alpha$	0.55
		$\beta$	33.12
		$R^2$	0.997
	4.00%	$\alpha$	0.64
		$\beta$	43.16
		$R^2$	0.998

**Realizado por:** Melanie Romero

En la figura 44 se observan las curvas de eficiencia y su función potencial con cada una de sus ecuaciones y factor  $R^2$ , para el bombeo de 4% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0%. Escenario 1 (un sumidero).

**Figura 45.** Eficiencia de captación y curvas de la función potencial de S1. Bombeo 4%



**Realizado por:** Melanie Romero

En la tabla 31 se indica el resumen de los coeficientes de ajuste alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ), del escenario 1 (un sumidero), para la pendiente transversal de 4% y pendientes longitudinales de 0.5% y 4%.

**Tabla 31.** Coeficientes de ajuste del escenario 1. Bombeo 4%

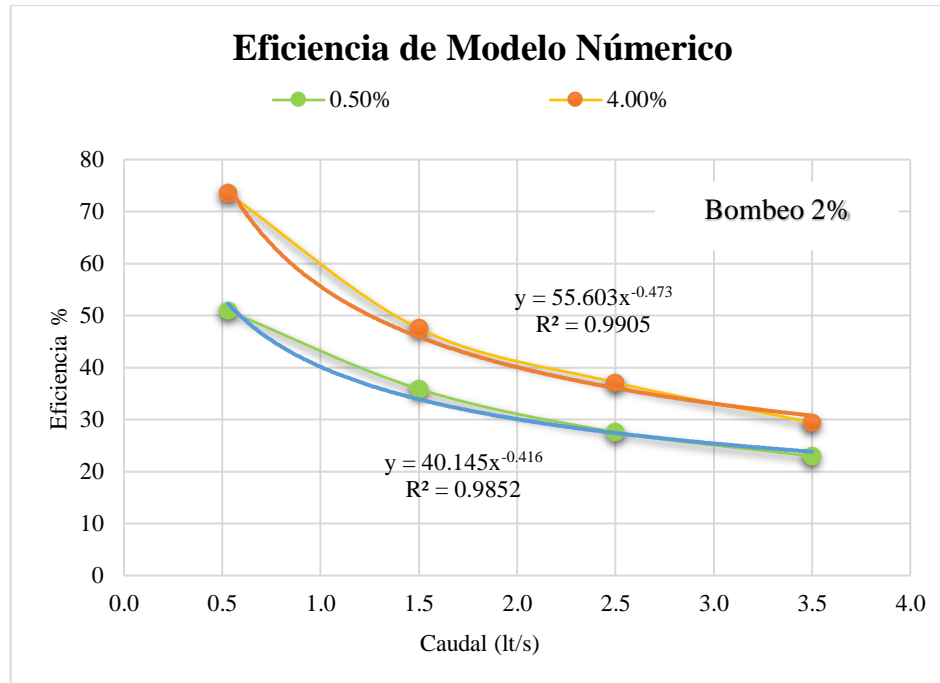
<b>Escenario 1 – Un sumidero</b>			
<b>Pendiente transversal</b>	<b>Pendiente longitudinal</b>	<b>Factores reducción</b>	
4.00%	0.50%	<b><math>\alpha</math></b>	0.38
		<b><math>\beta</math></b>	31.56
		<b><math>R^2</math></b>	0.991
4.00%	4.00%	<b><math>\alpha</math></b>	0.55
		<b><math>\beta</math></b>	42.95
		<b><math>R^2</math></b>	0.993

**Realizado por:** Melanie Romero

A continuación, se describen los factores de ajuste para el escenario 2 (dos sumideros en serie), con su respectiva tabla de resumen.

En la figura 45 se observan las curvas de eficiencia y su función potencial con cada una de sus ecuaciones y factor  $R^2$ , para el bombeo de 2% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0%. Escenario 2.

**Figura 46.** Eficiencia de captación y curvas de la función potencial de S2. Bombeo 2%



**Realizado por:** Melanie Romero

En la tabla 32 se indica el resumen de los coeficientes de ajuste alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ), del escenario 2 (dos sumideros en serie), para la pendiente transversal de 2% y pendientes longitudinales de 0.5% y 4%.

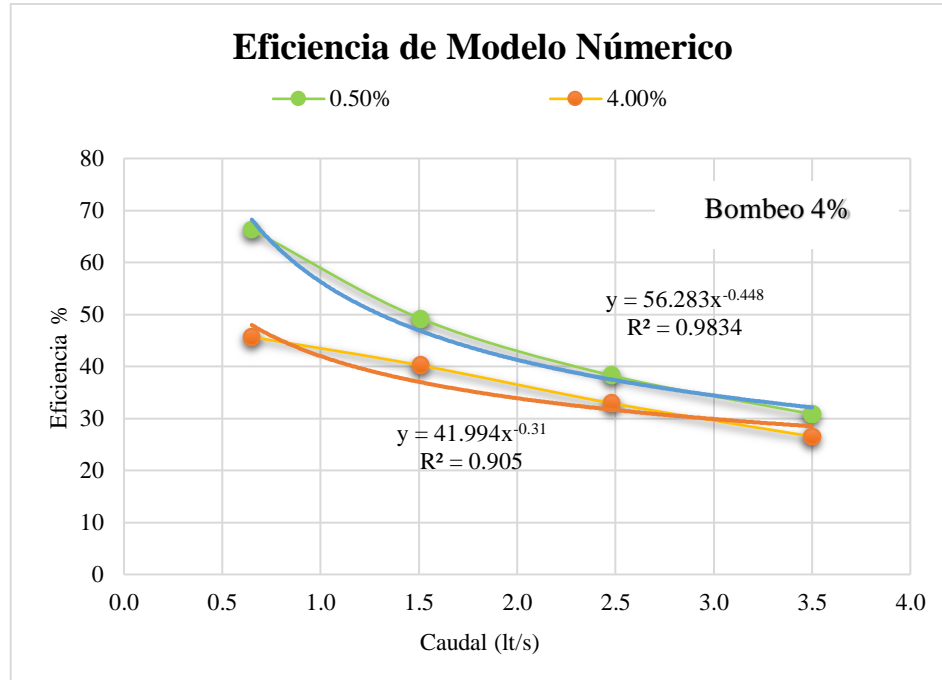
**Tabla 32.** Coeficientes de ajuste del escenario 2. Bombeo 2%

<b>Escenario 2 – Dos sumideros en serie</b>			
<b>Pendiente transversal</b>	<b>Pendiente longitudinal</b>	<b>Factores reducción</b>	
2.00%	0.50%	$\alpha$	0.42
		$\beta$	40.15
		$R^2$	0.985
	4.00%	$\alpha$	0.47
		$\beta$	55.60
		$R^2$	0.991

**Realizado por:** Melanie Romero

En la figura 46 se observan las curvas de eficiencia y su función potencial con cada una de sus ecuaciones y factor  $R^2$ , para el bombeo de 4% y pendientes longitudinales de 0.5 y 4.0%. Escenario 2.

**Figura 47.** Eficiencia de captación y curvas de la función potencial de S2. Bombeo 4%



**Realizado por:** Melanie Romero

En la tabla 33 se indica el resumen de los coeficientes de ajuste alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ), del escenario 2 (dos sumideros en serie), para la pendiente transversal de 4% y pendientes longitudinales de 0.5% y 4%.

**Tabla 33.** Coeficientes de ajuste del escenario 2. Bombeo 4%

<b>Escenario 2</b>			
<b>Pendiente transversal</b>	<b>Pendiente longitudinal</b>	<b>Factores reducción</b>	
4.00%	0.50%	$\alpha$	0.45
		$\beta$	56.28
		$R^2$	0.983
	4.00%	$\alpha$	0.31
		$\beta$	41.99
		$R^2$	0.905

**Realizado por:** Melanie Romero

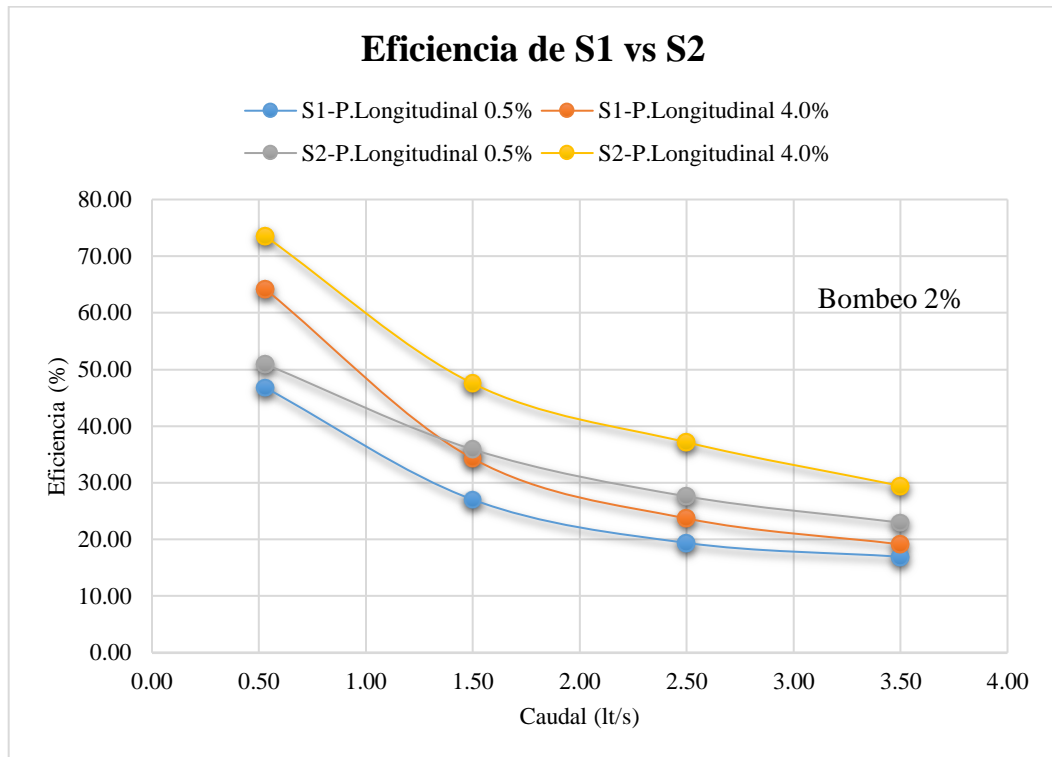
### 3.1.2 Discusión de resultados

En la calibración de resultados del modelo físico vs el modelo numérico, se pudo observar ambos comportamientos, determinando que los datos de caudal de escala reducida inferiores a un litro por segundo, dan un margen de error entre curvas del 7 y 10%, siendo estos valores más elevados que los obtenidos con los caudales que superan el un litro por segundo; este fenómeno se debe a la dificultad de medición en el aforo de la escala 1:4 debido a la insuficiencia del equipo. En función de las pendientes transversal y longitudinal el margen de error disminuye o aumenta.

Se pudo comprobar que la eficiencia de captación de los sumideros T45, es inversamente proporcional a la pendiente transversal, pendiente longitudinal y al caudal de ingreso, es decir, a medida que aumenta el bombeo, disminuye la eficiencia. El comportamiento de las curvas de eficiencia fue el mismo en ambos escenarios.

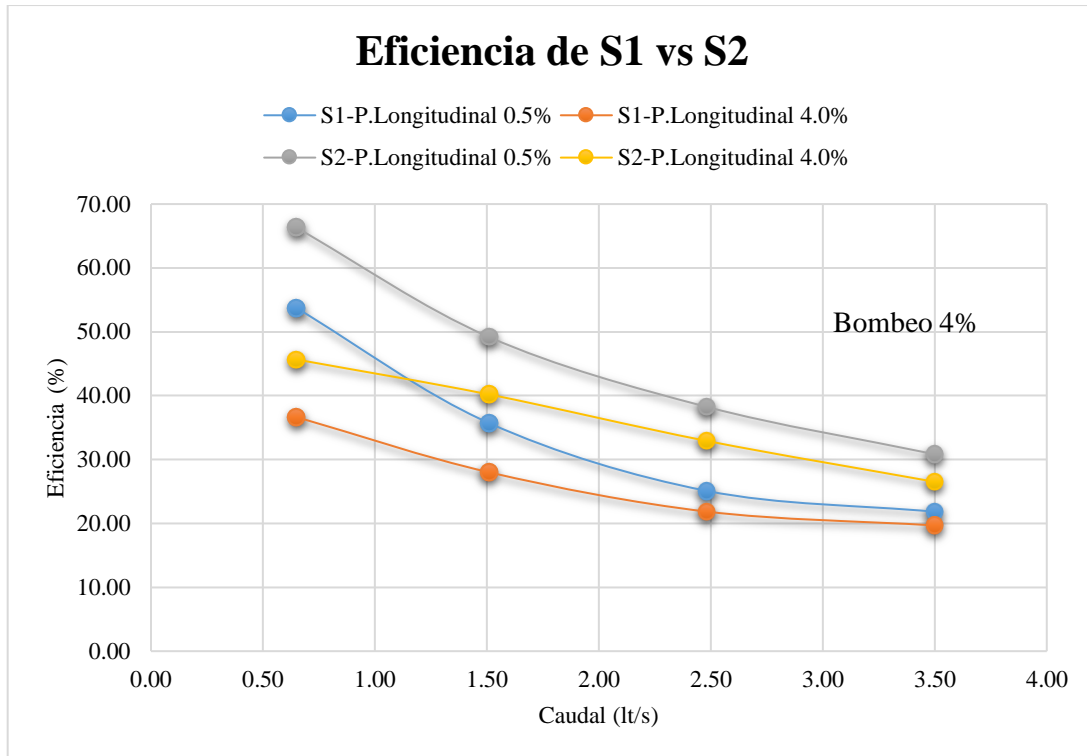
A medida que disminuye el valor de eficiencia de captación, y aumenta el caudal, sin tomar en cuenta la combinación de pendientes que se esté analizando, la disposición de la geometría del sumidero o su escenario (S1 y S2); no existe una variación notable y las curvas tienden a mantenerse en una eficiencia de entre el 20 y el 30%. Se puede verificar este comportamiento en la figura 47 (bombeo 2%) y figura 48 (bombeo 4%).

**Figura 48.** Comparación de Eficiencia entre S1 y S2 con bombeo del 2%



**Realizado por:** Melanie Romero

**Figura 49.** Comparación de Eficiencia entre S1 y S2 con bombeo del 4%



**Realizado por:** Melanie Romero

El valor máximo de eficiencia de captación observada en las dos gráficas anteriores es con pendiente transversal o bombeo del 2% y pendiente longitudinal del 4.0% en el escenario 2 (S2).

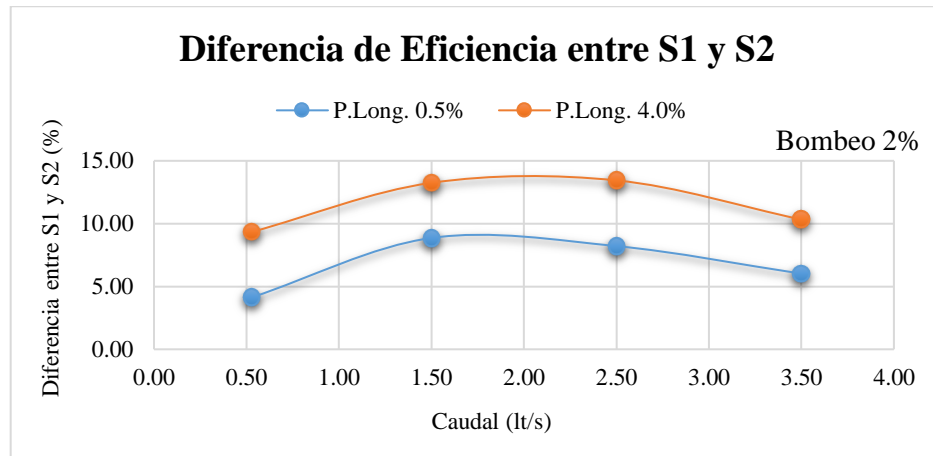
Se observó que efectivamente al aumentar un sumidero en serie en la vía, el escenario 2 (S2) supera la eficiencia de captación en relación al escenario 1 (S1), por lo que se tiene una mejor eficiencia hidráulica.

Se analizó la diferencia de porcentajes de eficiencia de captación entre las mismas combinaciones de pendientes y distintos escenarios, y se comprobó que se tiene un incremento en la eficiencia de los sumideros T45 en el rango de 1.50 a 2.50 lt/s, en ambos bombeos (2% y 4%), es decir que el incremento de sumideros no garantiza que la



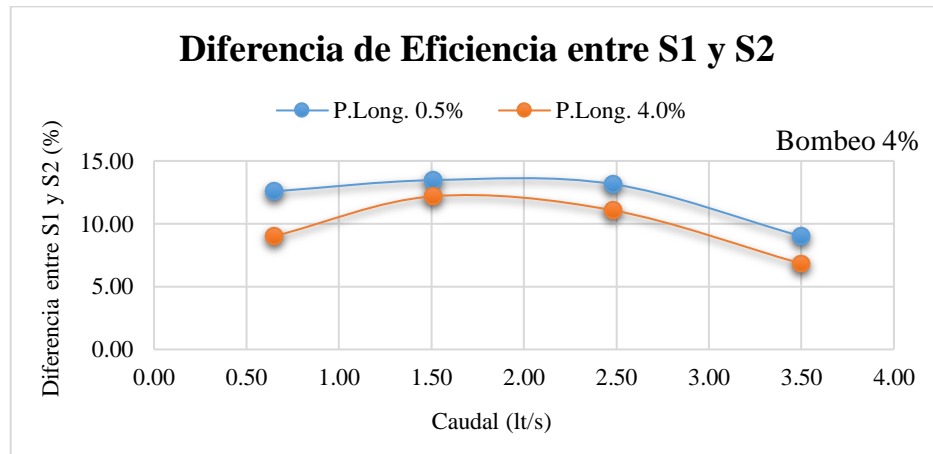
eficiencia de captación se duplique ya que se obtiene un porcentaje de aumento del 4.78% en la figura 49 y del 2.27% en la figura 50. Se aprecia la diferencia hidráulica entre escenarios a continuación.

**Figura 50.** Diferencia de Eficiencia entre S1 y S2 con bombeo 2%



**Realizado por:** Melanie Romero

**Figura 51.** Diferencia de Eficiencia entre S1 y S2 con bombeo 4%



**Realizado por:** Melanie Romero

Se calcularon los coeficientes de ajuste alfa ( $\alpha$ ) y beta ( $\beta$ ), con la finalidad de facilitar y predecir el comportamiento de la eficiencia hidráulica en nuevos escenarios.

### 3.2 Verificación de la hipótesis

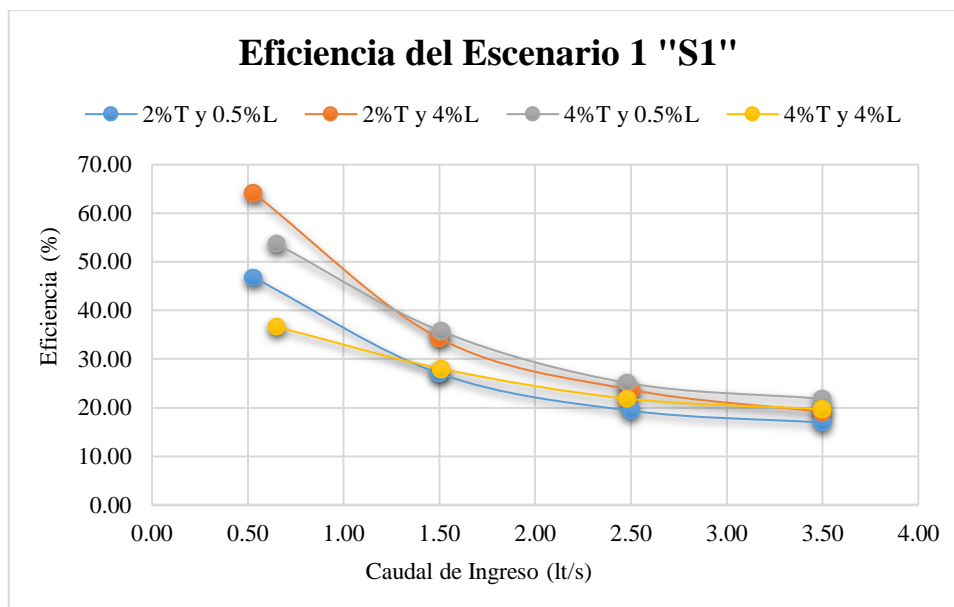
Al inicio de este trabajo experimental la hipótesis alternativa fue:

**“La pendiente transversal y longitudinal de la vía, el caudal pluvial y la geometría del sumidero representados por un modelo numérico influyen en la eficiencia de captación de aguas lluvias.”**

Luego de observar y analizar los resultados obtenidos se verifica la hipótesis planteada en el inicio.

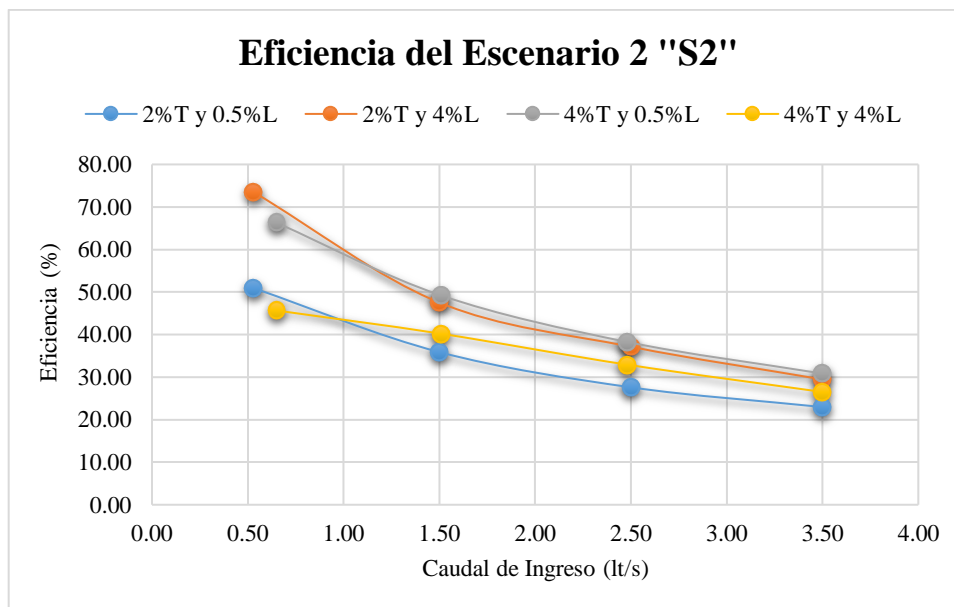
- Se demostró que la pendiente transversal (bombeo 2% y 4%), influye directamente en la eficiencia de los sumideros ya que su valor aumenta a medida que lo hace la pendiente.
- En relación a la pendiente longitudinal, afecta inversamente a la eficiencia ya que depende también del bombeo, esto hace que los porcentajes de eficiencia aumenten o disminuyan según sea el caso. En las figuras 51 y 52 a continuación, se observa la tendencia de la eficiencia de cada combinación según el escenario S1 o S2 respectivamente.

Figura 52. Eficiencia del Escenario 1 - Un sumidero "S1"



Realizado por: Melanie Romero

Figura 53. Eficiencia del Escenario 2 - Dos sumideros en serie "S2"



Realizado por: Melanie Romero

- El caudal de entrada es influido por ambas pendientes ya que alteran la velocidad de recorrido del flujo y el paso de este por la rejilla, disminuyendo la eficiencia de captación del agua de lluvia y demostrando una tendencia negativa como se observa en las gráficas 51 y 52.
- La geometría del sumidero influye directamente en la eficiencia de captación de la rejilla por la forma rectangular de los barrotes y su disposición perpendicular a la longitud de la vía ya que el ángulo de contacto de la caída del agua con los barrotes es mayor que un barrote circular.

Por lo tanto, se acepta la hipótesis ya que la pendiente transversal, longitudinal, el caudal y la geometría influyen en la eficiencia hidráulica.

## CAPITULO IV

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 4.1 Conclusiones

- Se comprobó la eficiencia hidráulica de los sumideros T45 en base a la modificación y combinación de las pendientes transversal y longitudinal para la captación de aguas lluvias, obteniendo un promedio de eficiencia máxima del 50.20% para el escenario 1; y de 58.61% para el escenario 2.
- Al comparar el escenario 1 “S1” (un sumidero) y el escenario 2 “S2” (dos sumideros en serie), se determinó que el aumento de una rejilla no garantiza que se duplique la eficiencia hidráulica, por tal motivo se debe considerar las pendientes y la geometría de la vía que se analiza.
- Se seleccionó como combinación más eficiente, los resultados de bombeo 2% y pendiente longitudinal 4%, en los escenarios S1 y S2, obteniendo los porcentajes de 64.16% y 73.51% respectivamente, entre todos los modelos simulados.
  - Al utilizar un solo sumidero T45, con una pendiente transversal (bombeo) del 2.0% y una pendiente longitudinal del 4.0%, se obtuvo la máxima eficiencia hidráulica del 64.16%; con la pendiente transversal (bombeo) del 4.0% y una pendiente longitudinal del 4.0%, se obtuvo la mínima eficiencia con el valor de 36.64%.

- Al utilizar dos sumideros T45 en serie, con una pendiente transversal (bombeo) del 2.0% y una pendiente longitudinal del 4.0%, se obtuvo la máxima eficiencia hidráulica del 73.51%; con la pendiente transversal (bombeo) del 4.0% y una pendiente longitudinal del 4.0%, se obtuvo la mínima eficiencia con el valor de 45.66%.
- Se comparó la eficiencia hidráulica, con la misma pendiente transversal (2%) y distinto escenario (S1 y S2) y se determinó que la combinación de bombeo 2.0% y la pendiente longitudinal del 4.0% tiene un valor de 73.51%, en el escenario 2. Siendo el máximo valor obtenido.
- Se comparó la eficiencia hidráulica, con la misma pendiente transversal (4%) y distinto escenario (S1 y S2) y se determinó que la combinación de bombeo 4.0% y la pendiente longitudinal del 0.5% tiene un valor de 66.30%, en el escenario 2.
- Se comparó los escenarios planteados y se determinó que el aumento de un sumidero no garantiza que se duplique la eficiencia que tiene la implantación de una sola rejilla, es por esto por lo que se debe considerar las pendientes y la geometría de la vía que sea analizada.
- Se observó que mientras más caudal ingresa a la vía, menor es la eficiencia de captación del sumidero, debido a la velocidad que adquiere el fluido. Este fenómeno fue el mismo en ambos escenarios.

## 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar el análisis numérico insertando un modelo de disipación de energía que permita reducir la velocidad del agua, permitiendo un mayor tiempo de contacto con la rejilla para incrementar su eficiencia.
- Para aumentar la eficiencia de captación de los sumideros, se sugiere cambiar la geometría de los barrotes de la rejilla, de rectangulares a circulares, además modificar la ubicación de los mismos, implantándolos de forma paralela a la vía.
- Se recomienda el manejo de un software con aplicación de mecánica de fluidos computacional, el mismo que permita obtener y apreciar de mejor manera los resultados, y una visualización completa de las simulaciones realizadas.
- Para la comparación exacta de resultados entre un modelo numérico y un modelo físico se recomienda determinar la eficiencia en campo mediante el cálculo de precipitaciones en el sector que se va a analizar, y compararlo con la simulación.

## Referencias bibliográficas

- [1] Apuntes Ingeniería Civil, «Apuntes Ingeniería Civil,» [En línea]. Available: [http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/sumideros-de-aguas-de-lluvia\\_05.html](http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/sumideros-de-aguas-de-lluvia_05.html). [Último acceso: 31 01 2019].
- [2] J. Ochoa, «Acading,» [En línea]. Available: [http://www.acading.org.ve/info/publicaciones/TRABAJOS\\_INCORPORACION/TI\\_JOSE\\_OCHOA.pdf](http://www.acading.org.ve/info/publicaciones/TRABAJOS_INCORPORACION/TI_JOSE_OCHOA.pdf). [Último acceso: 30 01 2019].
- [3] E. Kaliski Kriguer, «Repositorio-U-Chile,» 2008. [En línea]. Available: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/125299>. [Último acceso: 20 07 2019].
- [4] J. VELARDE, «UPC-BARCELONA TEACH,» 2014. [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/23732/Memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 20 07 2019].
- [5] F. Pazmiño, R. Hechavarría, F. Morales y J. Mantilla, «SCIELO,» 2017. [En línea]. Available: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1680-03382017000300002](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382017000300002). [Último acceso: 30 01 2019].
- [6] J. Dolz y M. Gómez, «Polipapers-UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA,» 1994. [En línea]. Available: <https://polipapers.upv.es/index.php/IA/article/view/2631/2614L>. [Último acceso: 01 02 2019].
- [7] J. Vásquez, «Researchgate,» 2003. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/264879979\\_Modelacion\\_Numerica\\_en\\_Hidraulica\\_MODELACION\\_NUMERICA\\_EN\\_HIDRAULICA](https://www.researchgate.net/publication/264879979_Modelacion_Numerica_en_Hidraulica_MODELACION_NUMERICA_EN_HIDRAULICA). [Último acceso: 01 02 2019].
- [8] B. Comport y C. Thornton, «Researchgate,» 2012. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/273747615\\_Hydraulic\\_Efficiency\\_of\\_Grates\\_and\\_Curb\\_Inlets\\_for\\_Urban\\_Storm\\_Drainage](https://www.researchgate.net/publication/273747615_Hydraulic_Efficiency_of_Grates_and_Curb_Inlets_for_Urban_Storm_Drainage). [Último acceso: 01 02 2019].
- [9] MTOP, «Obras Públicas,» 2013. [En línea]. Available:



- [https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013\\_Manual\\_NEVI-12\\_VOLUMEN\\_2A.pdf](https://www.obraspublicas.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/12/01-12-2013_Manual_NEVI-12_VOLUMEN_2A.pdf). [Último acceso: 07 02 2019].
- [10] S. Navarro, «Wordpress,» 2013. [En línea]. Available: [https://sjnavarro.files.wordpress.com/2011/08/manual-dedisec3b1o-de-carretera\\_2003-ecuador.pdf](https://sjnavarro.files.wordpress.com/2011/08/manual-dedisec3b1o-de-carretera_2003-ecuador.pdf). [Último acceso: 07 02 2019].
- [11] J. Alfaro, J. Caranza y I. Gonzales, «UES,» 2012. [En línea]. Available: [http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1698/1/DISE%20DEL%20SISTEMA\\_DE\\_ALCANTARILLADO\\_SANITARIO,\\_AGUAS\\_LLUVIAS\\_Y\\_PLANTA\\_DE\\_TRATAMIENTO\\_DE\\_AGUAS\\_RE.pdf](http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1698/1/DISE%20DEL%20SISTEMA_DE_ALCANTARILLADO_SANITARIO,_AGUAS_LLUVIAS_Y_PLANTA_DE_TRATAMIENTO_DE_AGUAS_RE.pdf). [Último acceso: 02 03 2019].
- [12] J. C. Aldáz, «PUCE,» 2011. [En línea]. Available: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/2650/T-PUCE-3204.pdf;sequence=1>. [Último acceso: 02 03 2019].
- [13] IDEAM, «IDEAM,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>. [Último acceso: 02 03 2019].
- [14] INAMHI, «SERVICIO METEOROLÓGICO,» 2015. [En línea]. Available: [http://www.serviciometeorologico.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/ESTUDIO\\_DE\\_INTENSIDADES\\_V\\_FINAL.pdf](http://www.serviciometeorologico.gob.ec/Publicaciones/Hidrologia/ESTUDIO_DE_INTENSIDADES_V_FINAL.pdf). [Último acceso: 02 03 2019].
- [15] Secretaria Nacional del Agua, «AGUA,» 2012. [En línea]. Available: [https://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/norma\\_urbana\\_para\\_estudios\\_y\\_disenos.pdf](https://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/norma_urbana_para_estudios_y_disenos.pdf). [Último acceso: 05 03 2019].
- [16] Mendoza, «INA,» 2008. [En línea]. Available: <http://www.wasagn.net/private/admin/ficheiros/uploads/47ac6decaf84e70811097da22ddab634.pdf>. [Último acceso: 06 03 2019].
- [17] V. T. Chow, «Hidráulica de Canales Abiertos,» de *Hidráulica de Canales Abiertos*, Bogotá, McGraw-Hill Interamericana S.A, 1994, pp. 7-8.
- [18] A. Albadía, «SCRIBD,» 2011. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/69167170/FLUJO-CRITICO>. [Último acceso: 08 03 2019].

- [19] Khan Academy, «KHANACADEMY,» 2019. [En línea]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/physics/work-and-energy/work-and-energy-tutorial/a/what-is-conservation-of-energy>. [Último acceso: 08 03 2019].
- [20] Fisica Practica , «FISICA PRACTICA,» [En línea]. Available: <https://www.fisicapractica.com/impulso-cantidad-movimiento.php>. [Último acceso: 09 03 2019].
- [21] H. Romero, «ACADEMIA,» Septiembre 2015. [En línea]. Available: [https://www.academia.edu/16144452/ECUACIONES\\_DE\\_SAIN\\_T\\_VENANT](https://www.academia.edu/16144452/ECUACIONES_DE_SAIN_T_VENANT). [Último acceso: 09 Marzo 2019].
- [22] J. Vásquez, «ResearchGate,» 2003. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/264879979\\_Modelacion\\_Numerica\\_en\\_Hidraulica\\_MODELACION\\_NUMERICA\\_EN\\_HIDRAULICA](https://www.researchgate.net/publication/264879979_Modelacion_Numerica_en_Hidraulica_MODELACION_NUMERICA_EN_HIDRAULICA). [Último acceso: 10 Marzo 2019].
- [23] J. Fernández, *Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos*, Barcelona: REVERTÉ S.A, 2012.
- [24] I. Nuñez y E. Sanchez, «Repositorio-UTA,» 2018. [En línea]. Available: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/28989/1/Tesis%201280%20-%20S%C3%A1nchez%20Tenesaca%20Estefan%C3%ADa%20Jacqueline%20y%20N%C3%BA%20B1ez%20Acosta%20Ivonne%20Alexandra.pdf>. [Último acceso: 31 01 2019].
- [25] UTN-FRBA, «Hidráulica General y Aplicada,» 2010. [En línea]. Available: [http://www.civil.frba.utn.edu.ar/Materias/hidraulica/archivos/tablas\\_graficos.pdf](http://www.civil.frba.utn.edu.ar/Materias/hidraulica/archivos/tablas_graficos.pdf). [Último acceso: 15 05 2019].

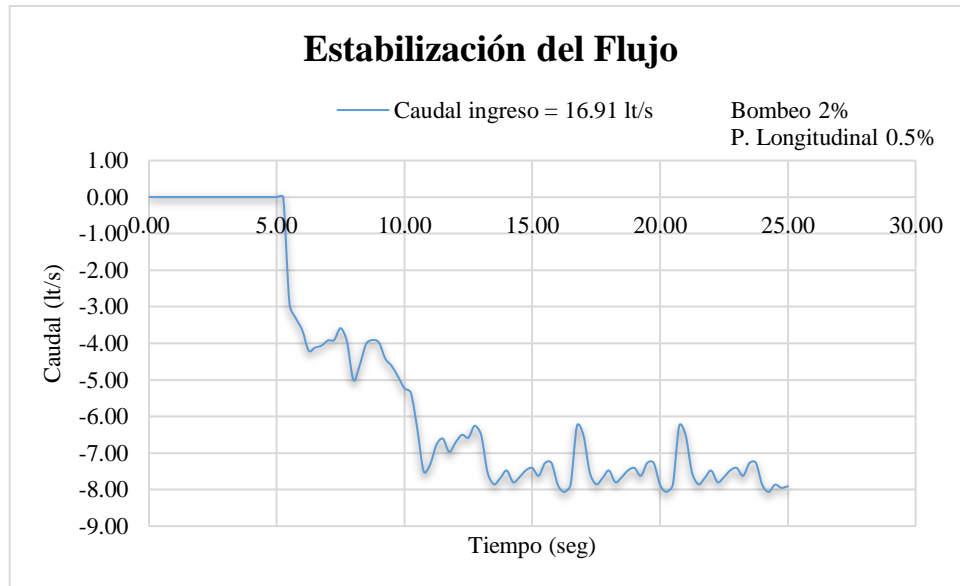
## Anexos

### Resultados de simulación y estabilidad del flujo de las 32 combinaciones.

#### Escenario 1. Un solo sumidero

- 2%T - 0.5%L - Q=16.91 lt/s

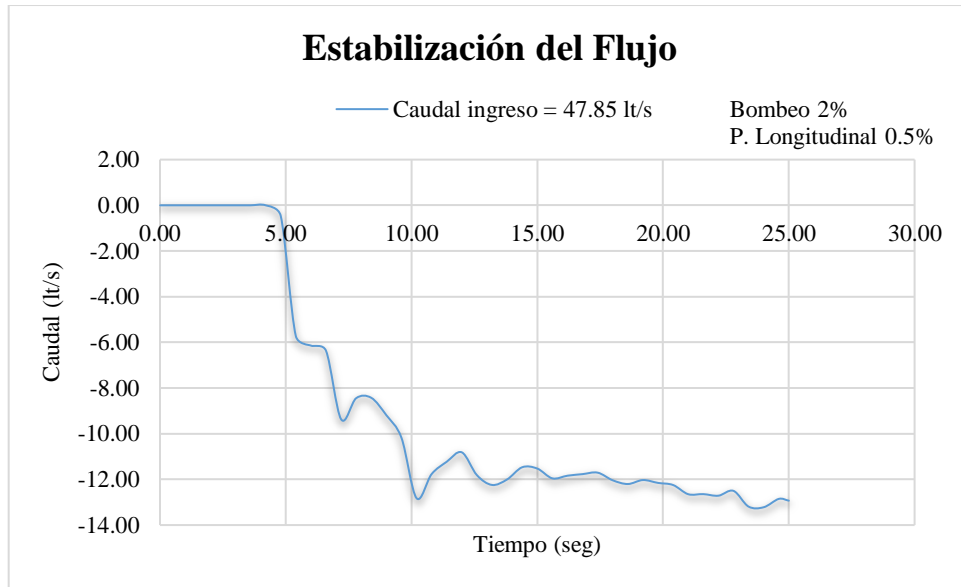
**Figura 54.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 16.91 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 2%T – 0.5%L – Q=47.85 lt/s

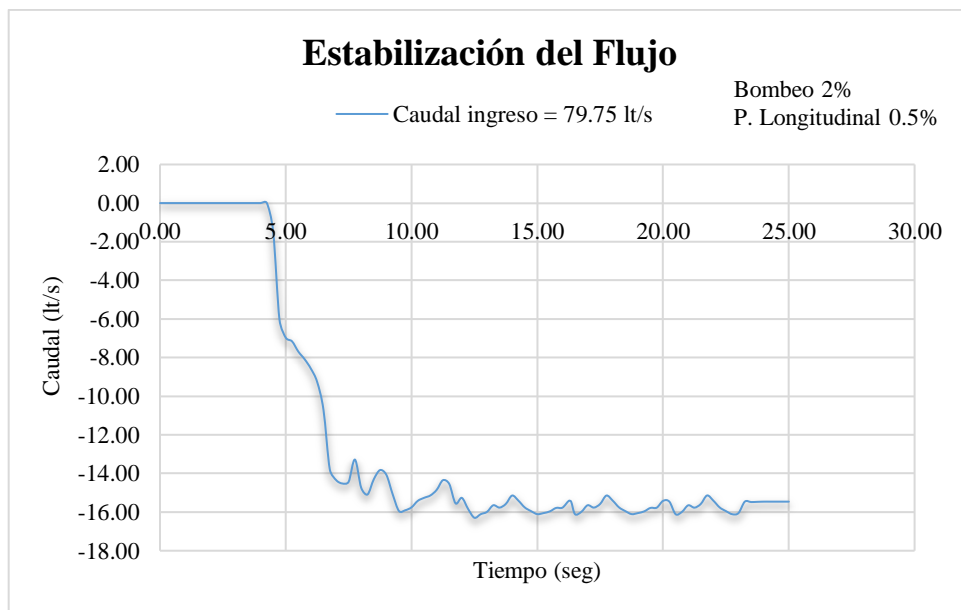
**Figura 55.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 47.85 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 2%T – 0.5%L – Q=79.75 lt/s

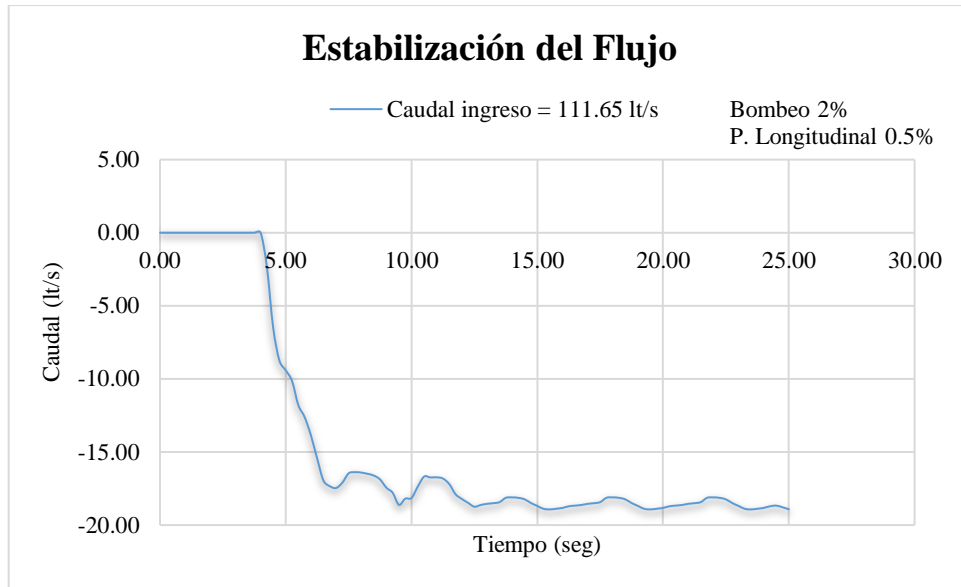
**Figura 56.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 79.75 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 2%T – 0.5%L – Q=111.65 lt/s

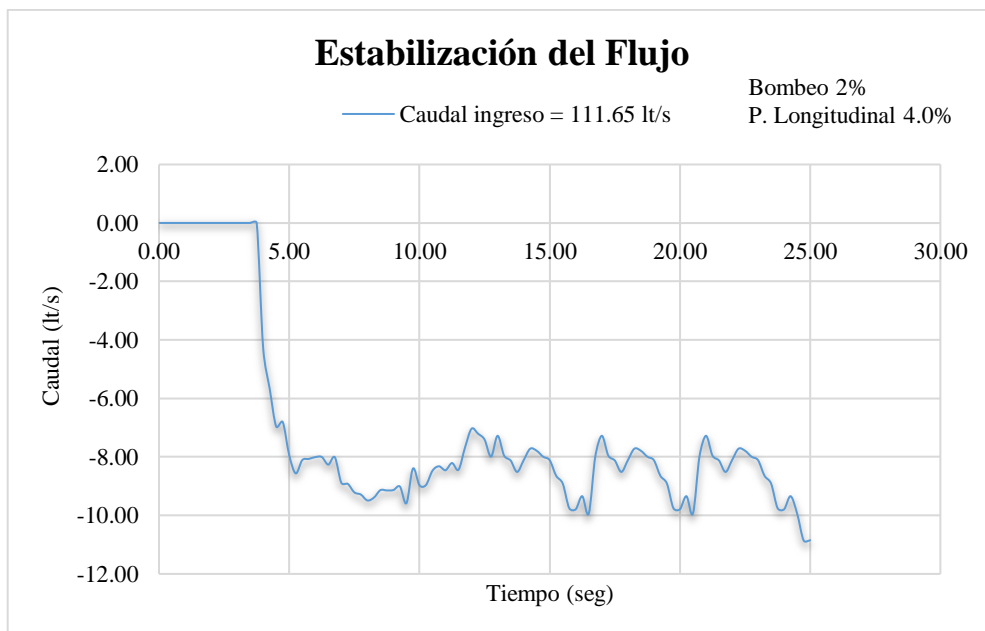
**Figura 57.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 111.65 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 2%T – 4.0%L – Q=16.91lt/s

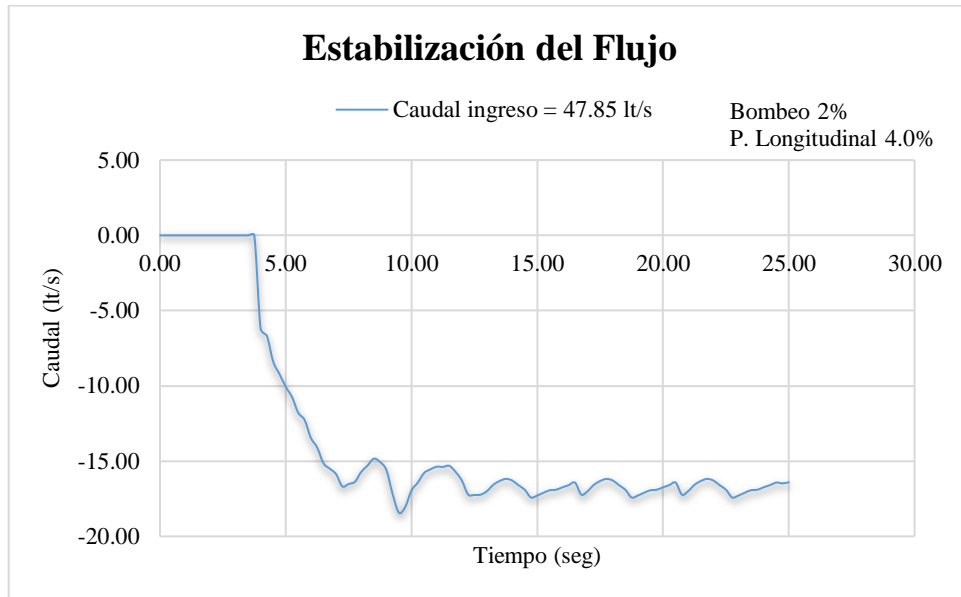
**Figura 58.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 16.91 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 2%T – 4.0%L – Q=47.85lt/s

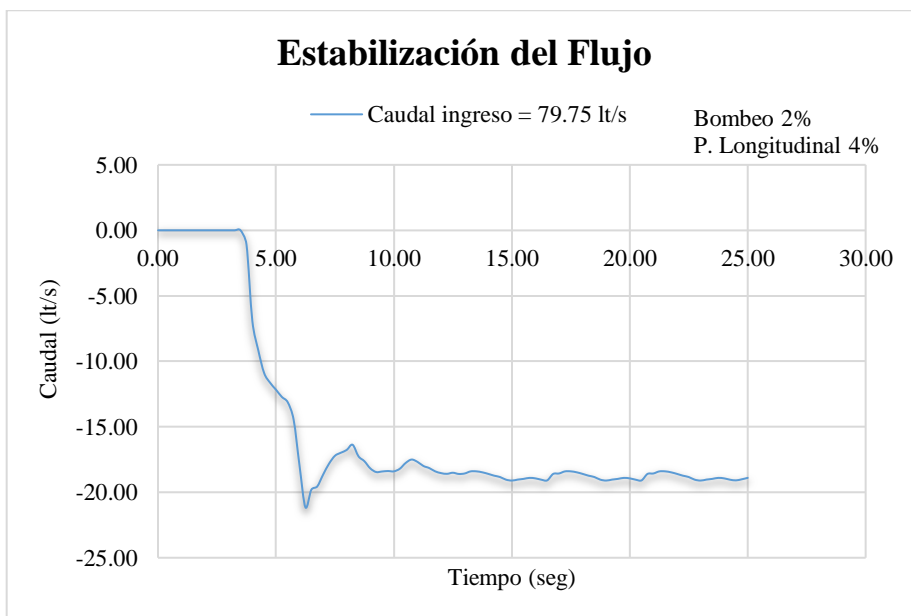
**Figura 59.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 47.85 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 2%T – 4.0%L – Q=79.75lt/s

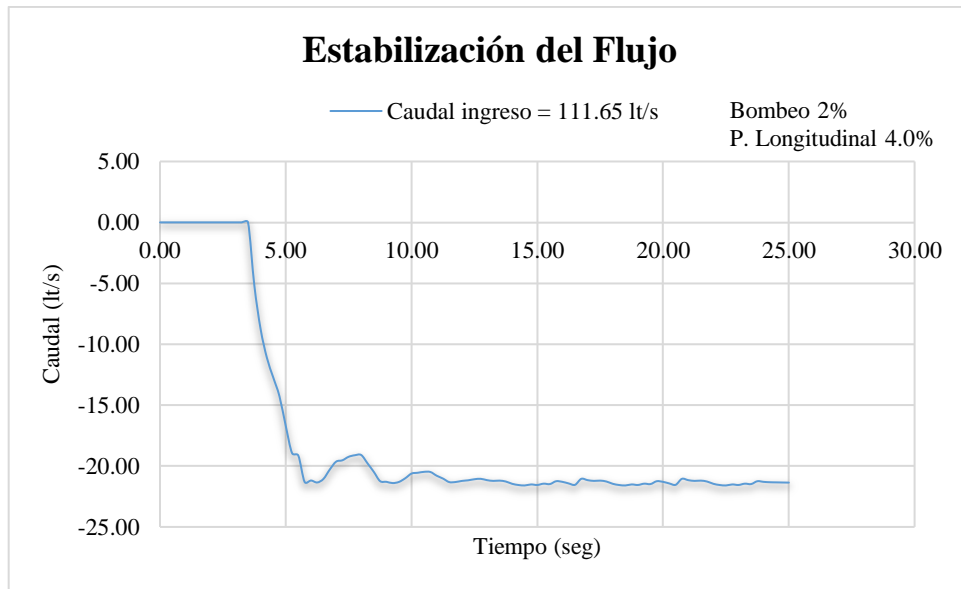
**Figura 60.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 79.75 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 2%T – 4.0%L – Q=111.65lt/s

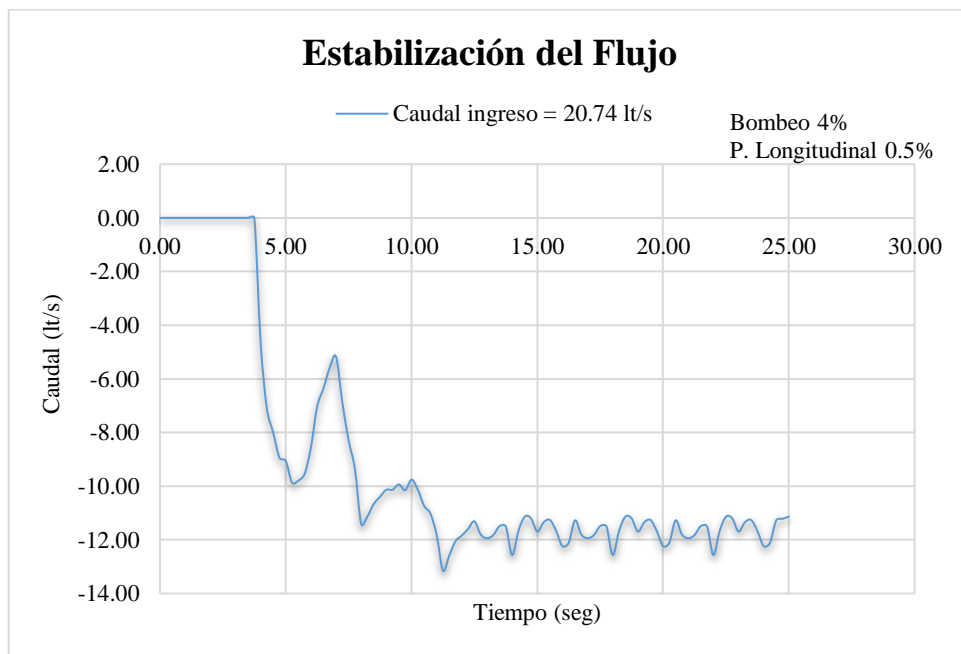
**Figura 61.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 111.65 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 0.5%L – Q=20.74lt/s

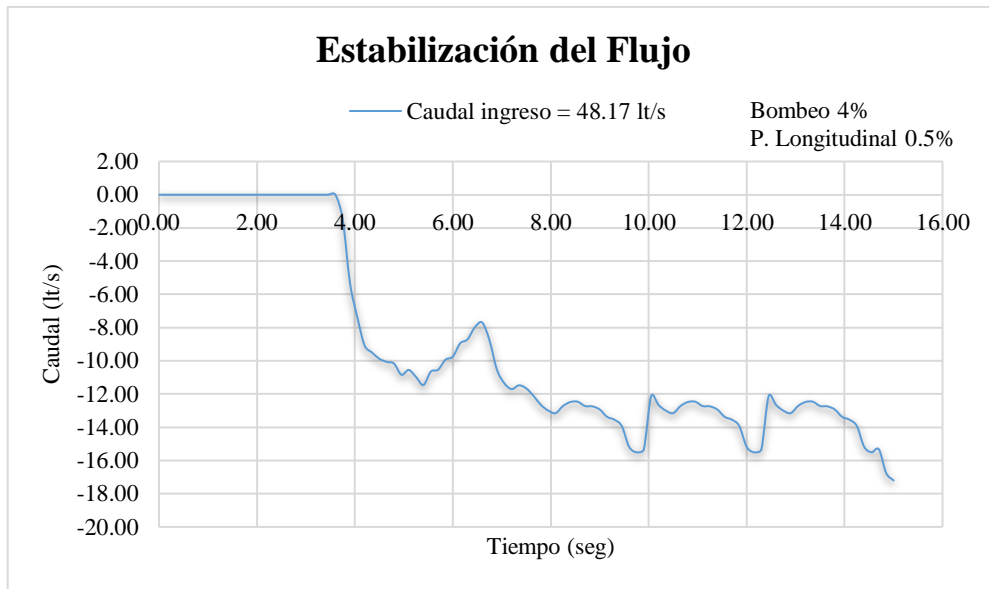
**Figura 62.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 20.74 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 0.5%L – Q=48.17lt/s

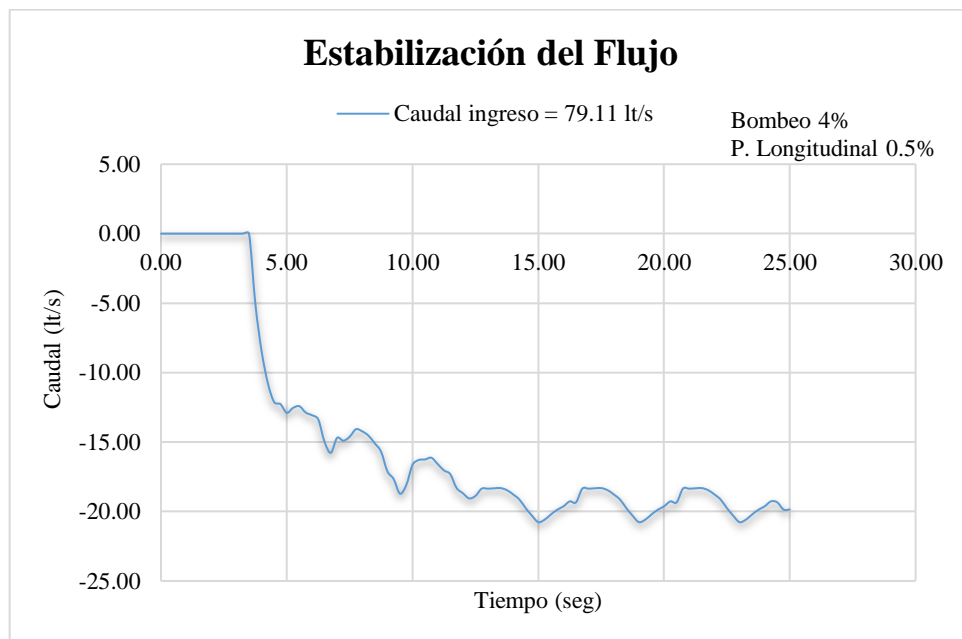
**Figura 63.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 47.85 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 0.5%L – Q=79.11lt/s

**Figura 64.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 79.11 lt/s

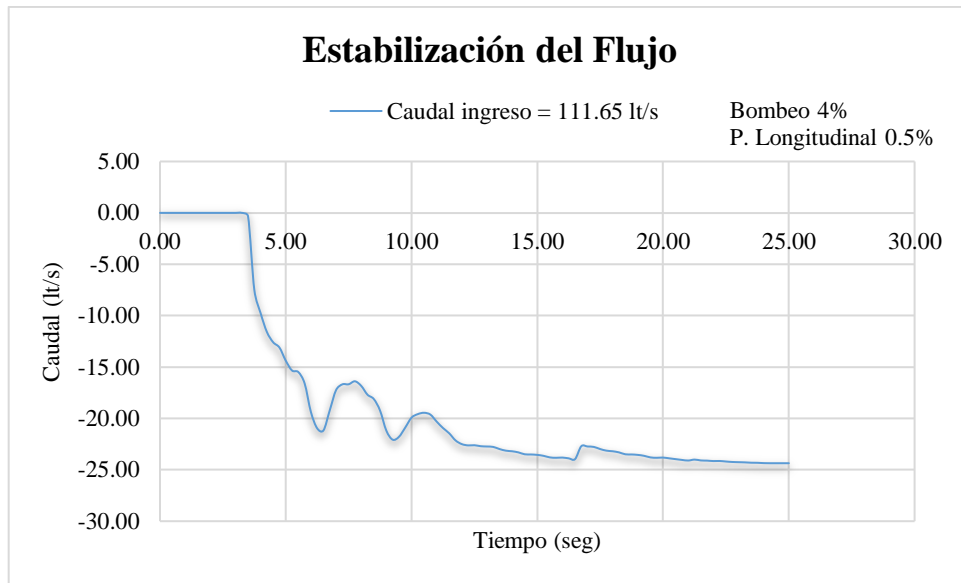


**Realizado por:** Melanie Romero



- 4%T – 0.5%L – Q=111.65 lt/s

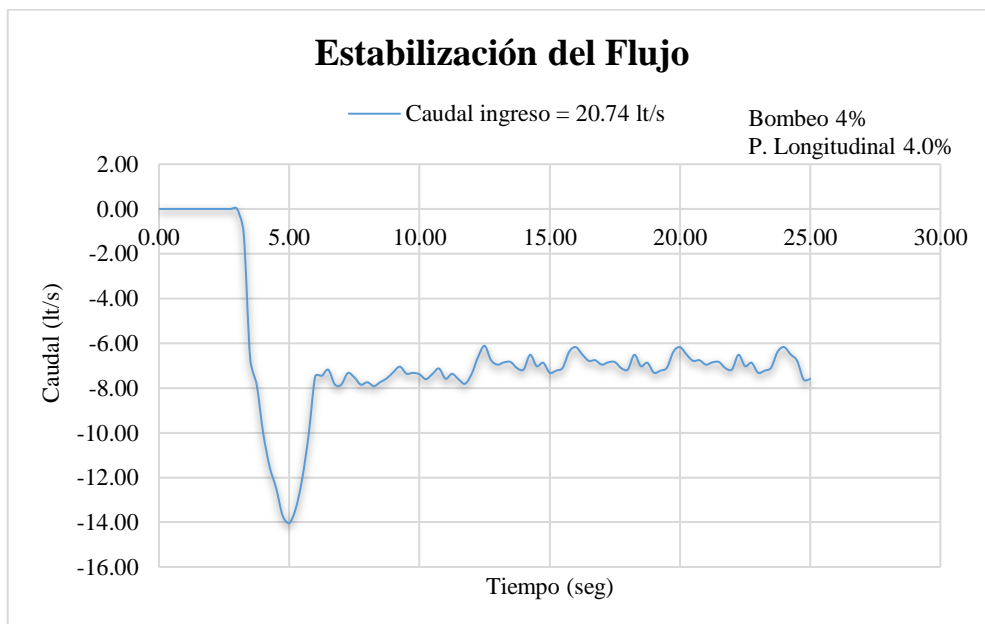
**Figura 65.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 111.65 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 4%L – Q=20.74 lt/s

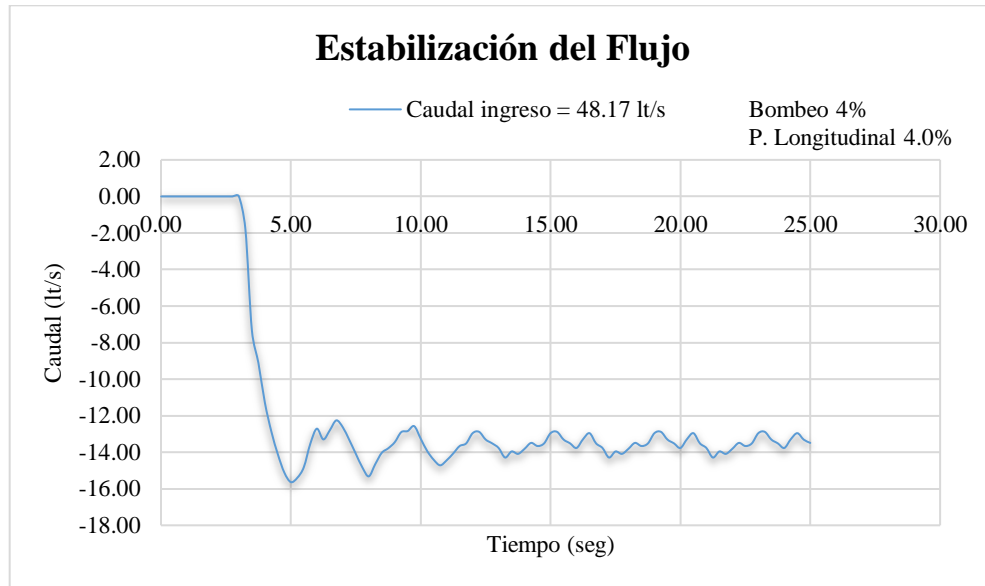
**Figura 66.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4%. Caudal 20.74 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 4%L – Q=48.17 lt/s

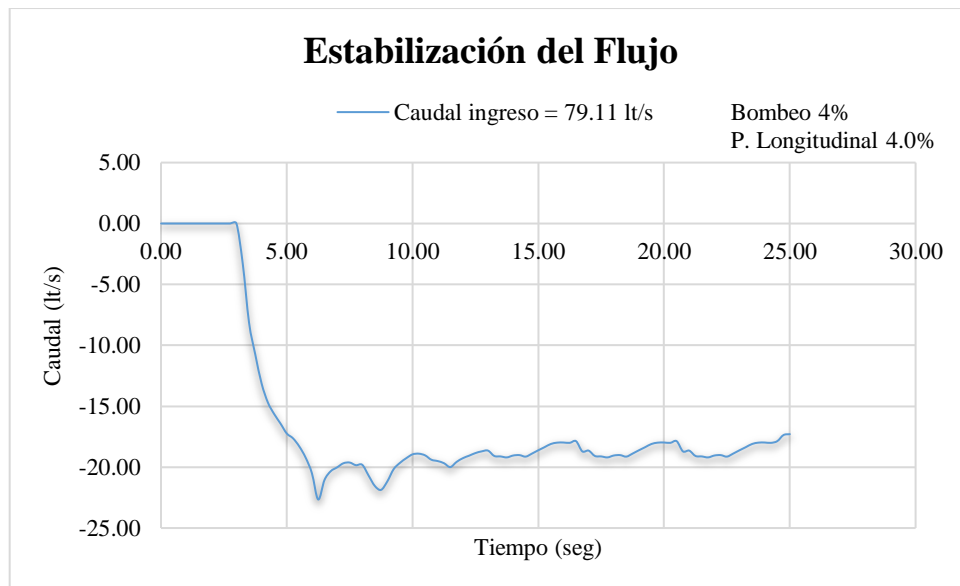
**Figura 67.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 48.17 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 4%L – Q=79.11 lt/s

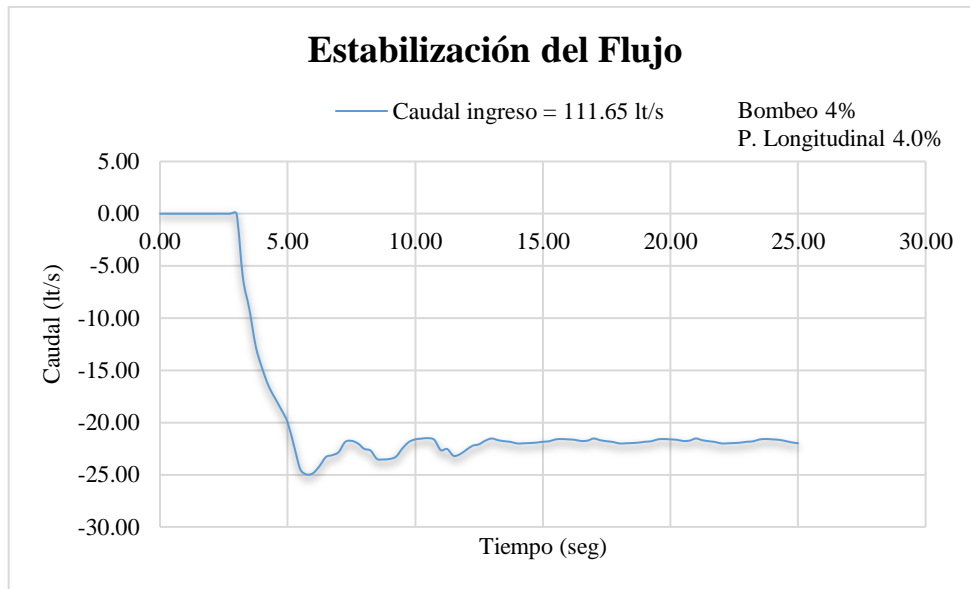
**Figura 68.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 79.11 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 4%L – Q=111.65 lt/s

**Figura 69.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 111.65 lt/s

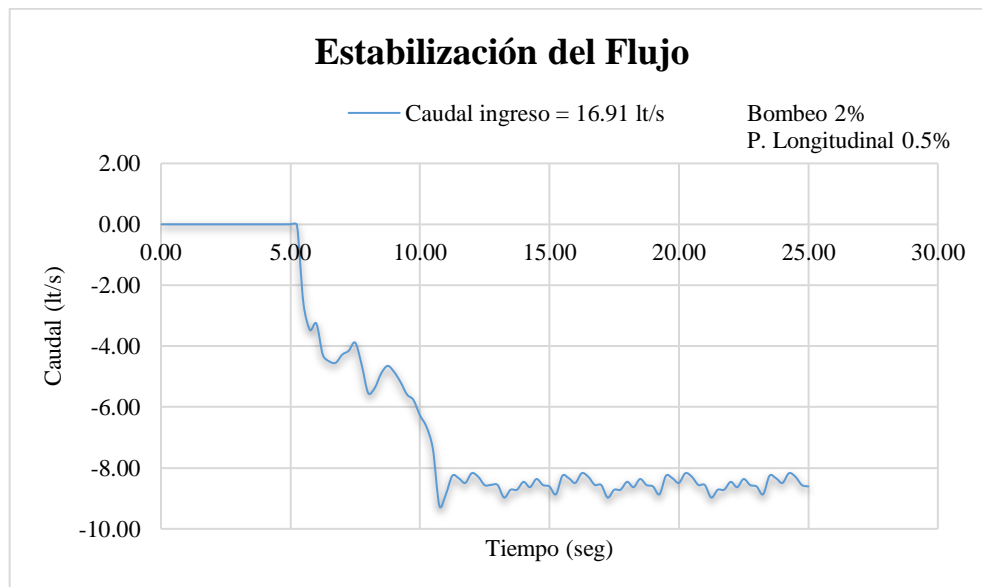


**Realizado por:** Melanie Romero

## Escenario 2. Dos sumideros en serie

- 2%T – 0.5%L – Q=16.91 lt/s

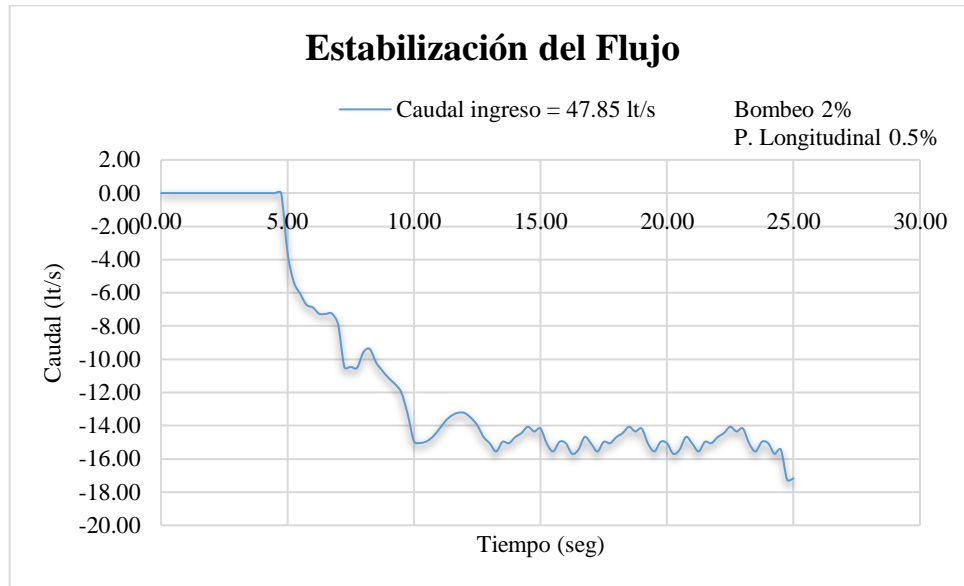
**Figura 70.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 16.91 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- $2\%T - 0.5\%L - Q=47.85 \text{ lt/s}$

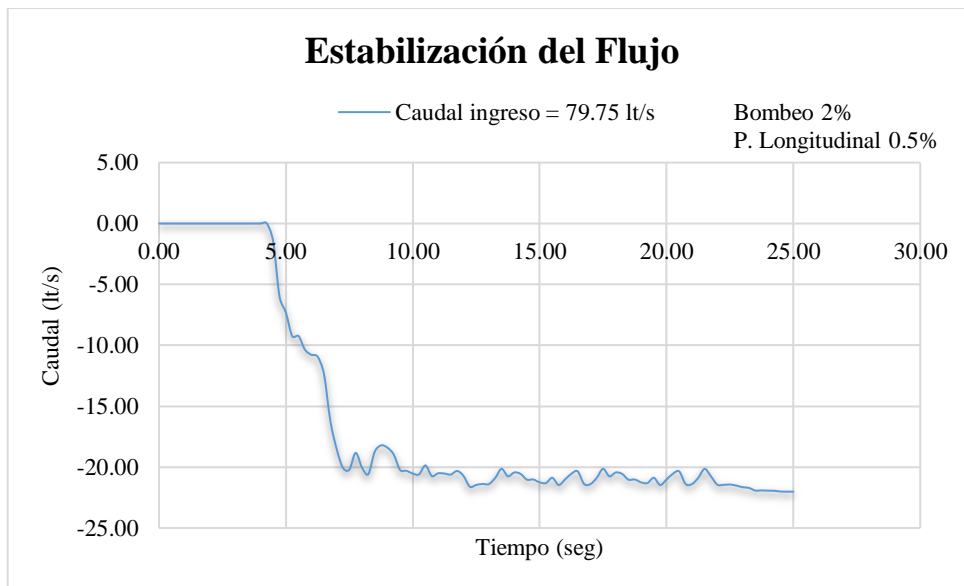
**Figura 71.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 47.85 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- $2\%T - 0.5\%L - Q=79.75 \text{ lt/s}$

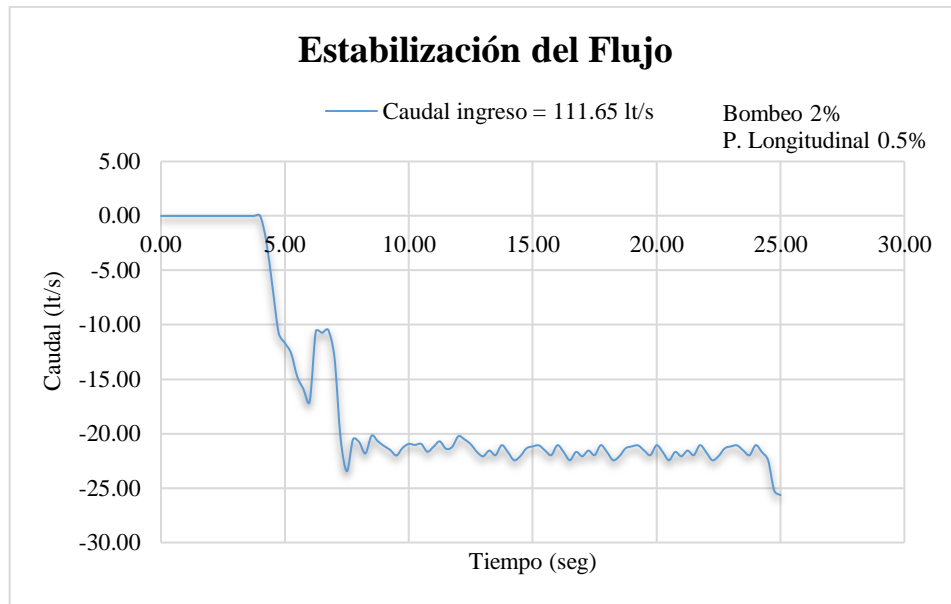
**Figura 72.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 79.75 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- $2\%T - 0.5\%L - Q=111.65 \text{ lt/s}$

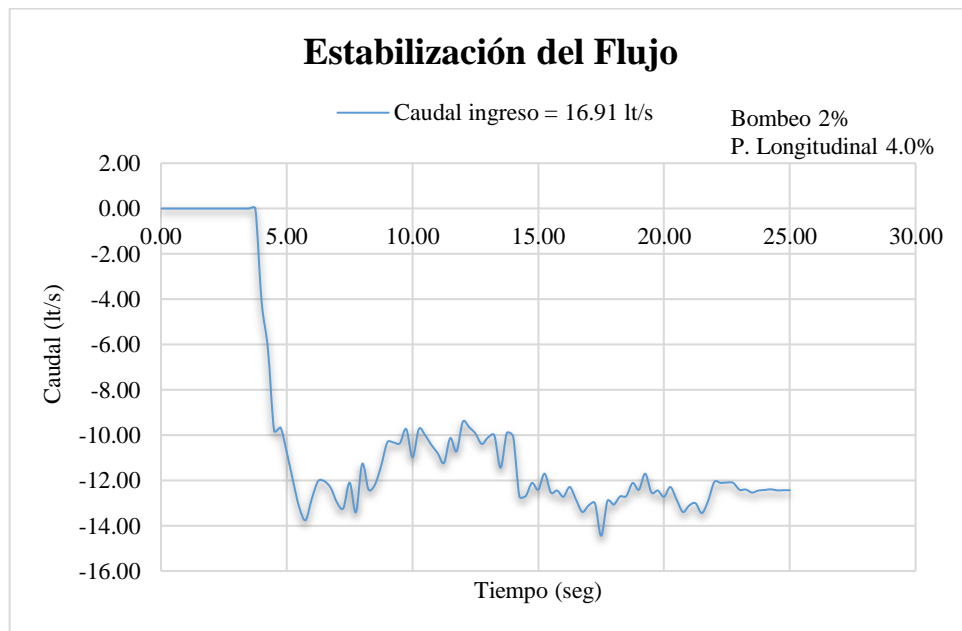
**Figura 73.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 111.65 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- $2\%T - 4\%L - Q=16.91 \text{ lt/s}$

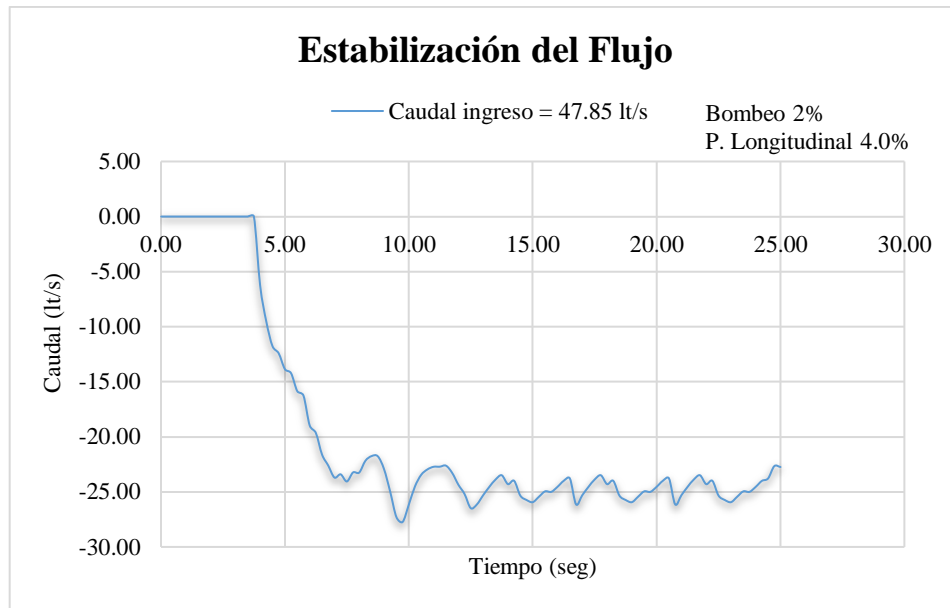
**Figura 74.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 16.91 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 2%T – 4%L – Q=47.85 lt/s

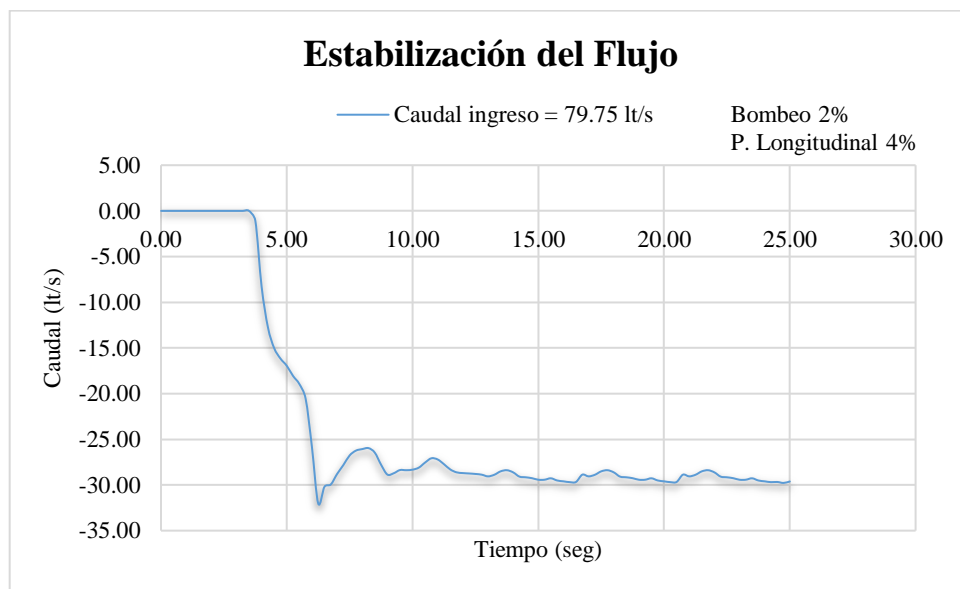
**Figura 75.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 47.85 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 2%T – 4%L – Q=79.75 lt/s

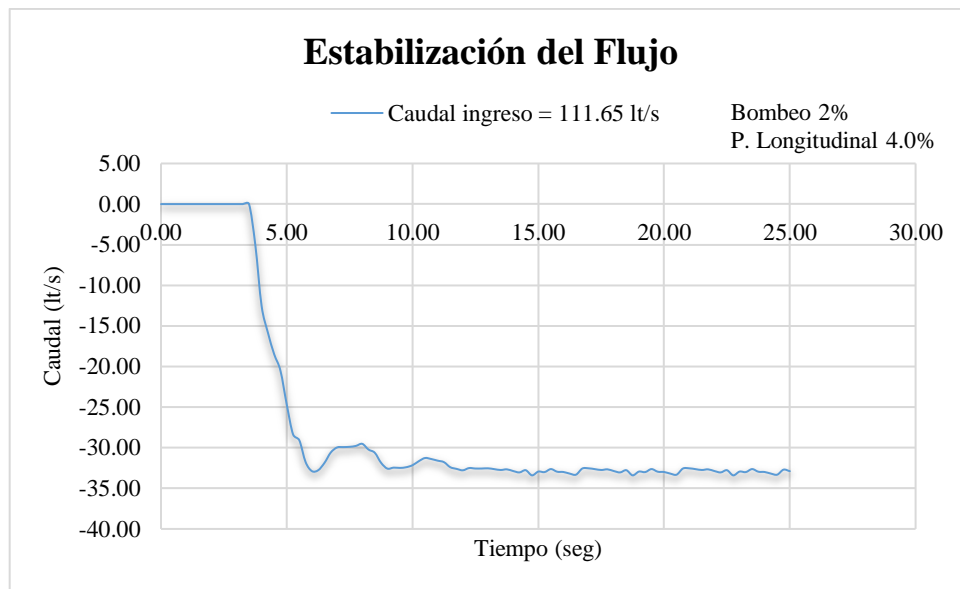
**Figura 76.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 79.75 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 2%T – 4%L – Q=111.65 lt/s

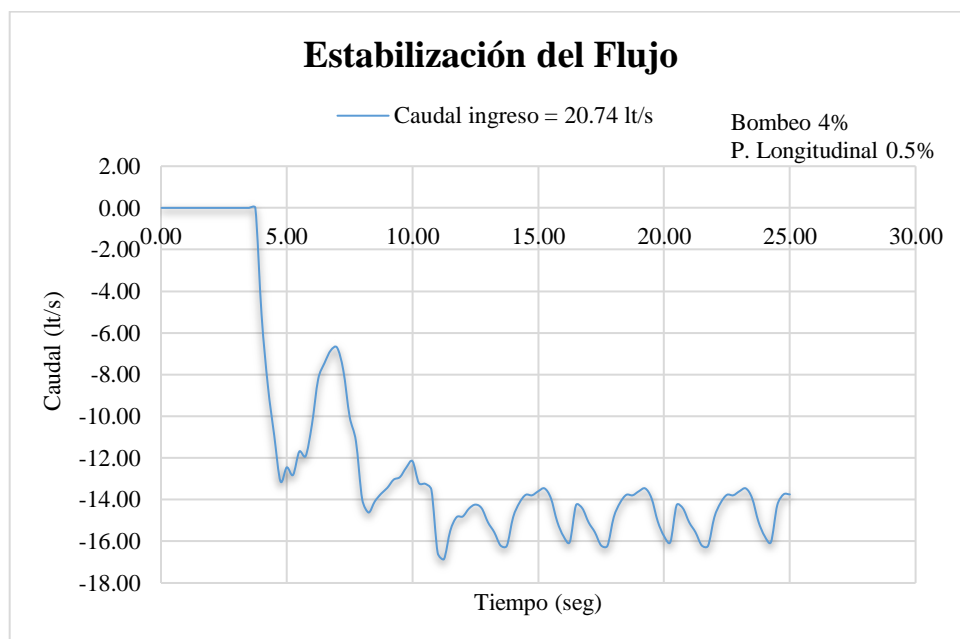
**Figura 77.** Estabilidad de flujo. Bombeo 2%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 111.65 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 0.5%L – Q=20.47 lt/s

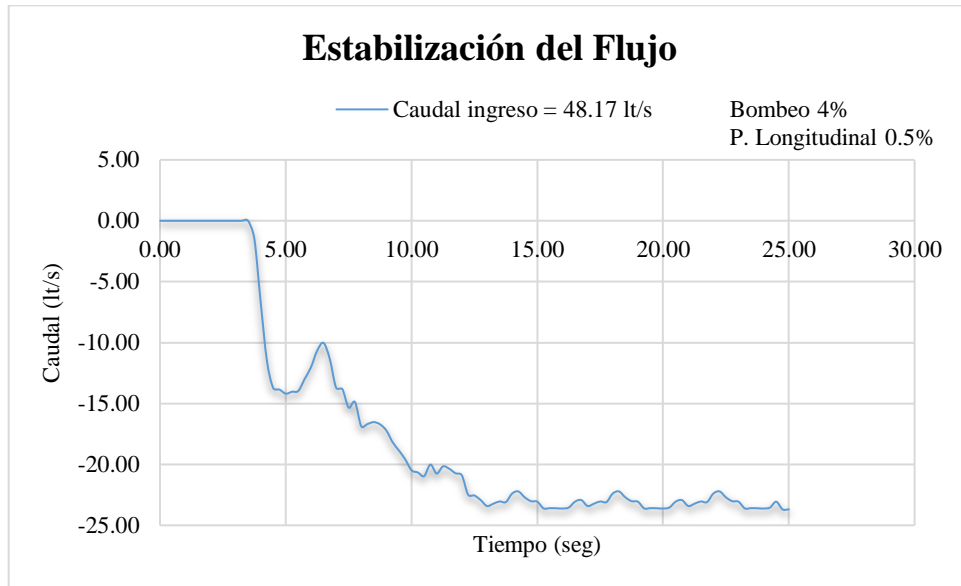
**Figura 78.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 20.74 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 0.5%L – Q=48.17 lt/s

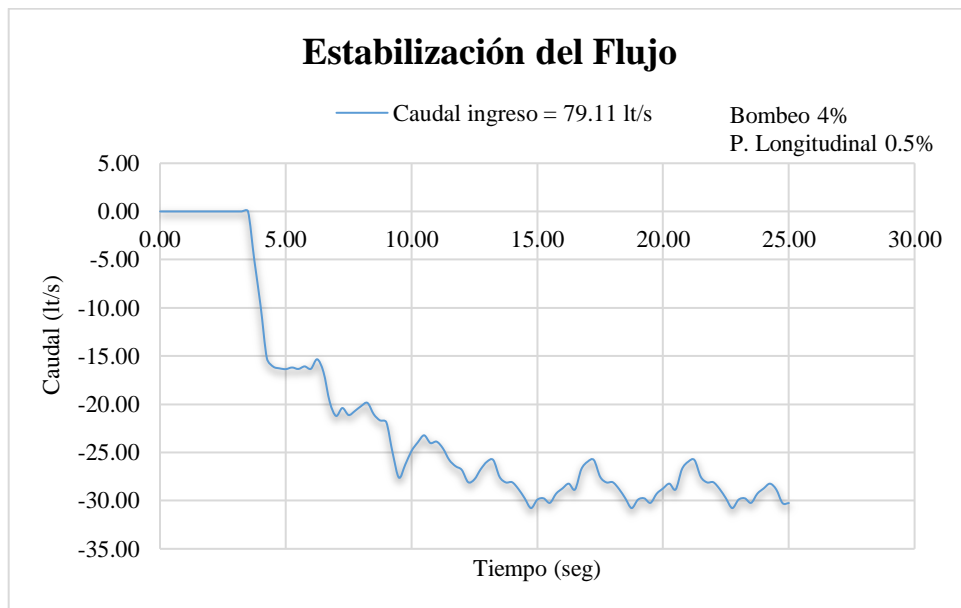
**Figura 79.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 48.17 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 0.5%L – Q=79.11 lt/s

**Figura 80.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 79.11 lt/s

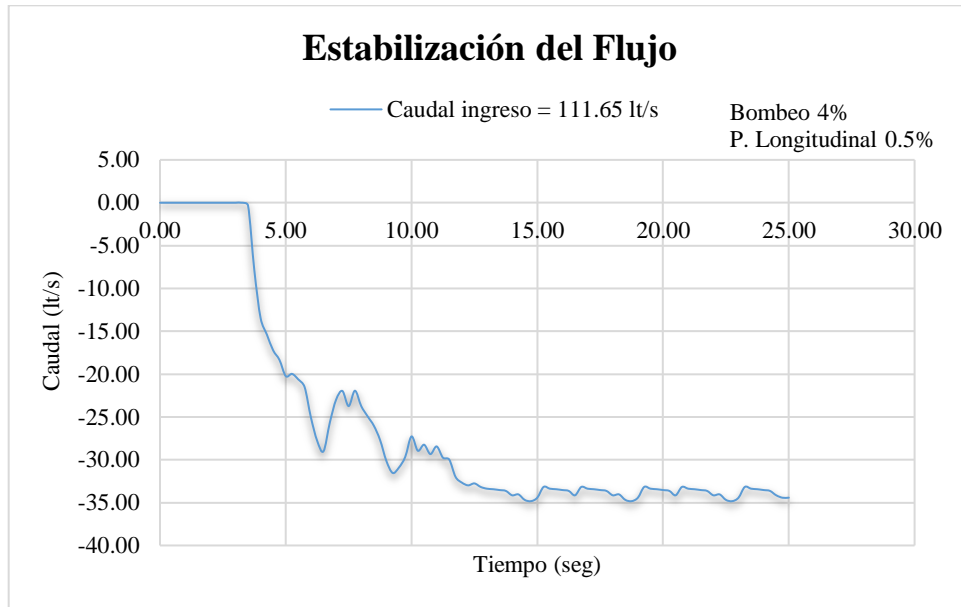


**Realizado por:** Melanie Romero



- 4%T – 0.5%L – Q=111.65 lt/s

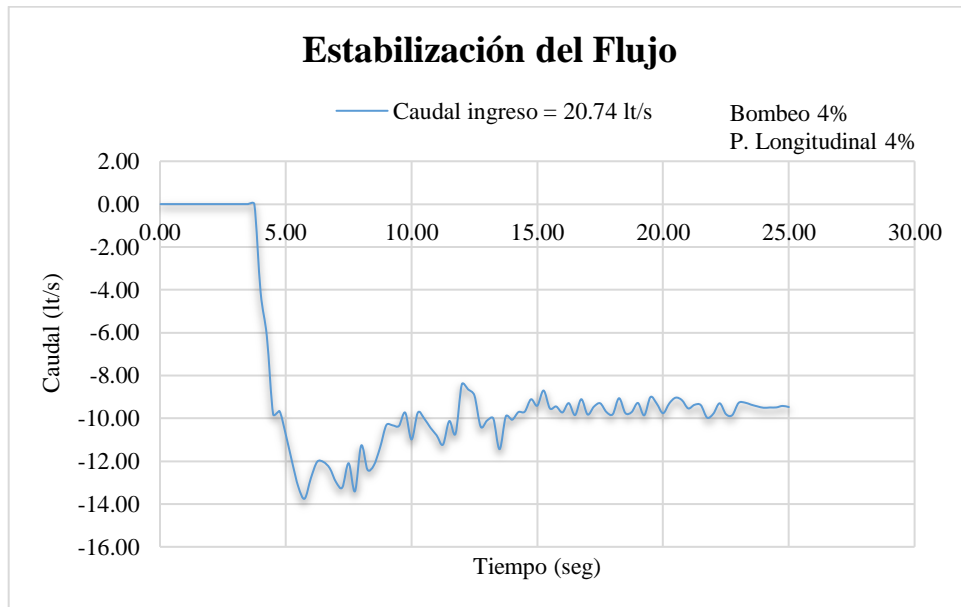
**Figura 81.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 0.5%. Caudal 111.65 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 4%L – Q=20.74 lt/s

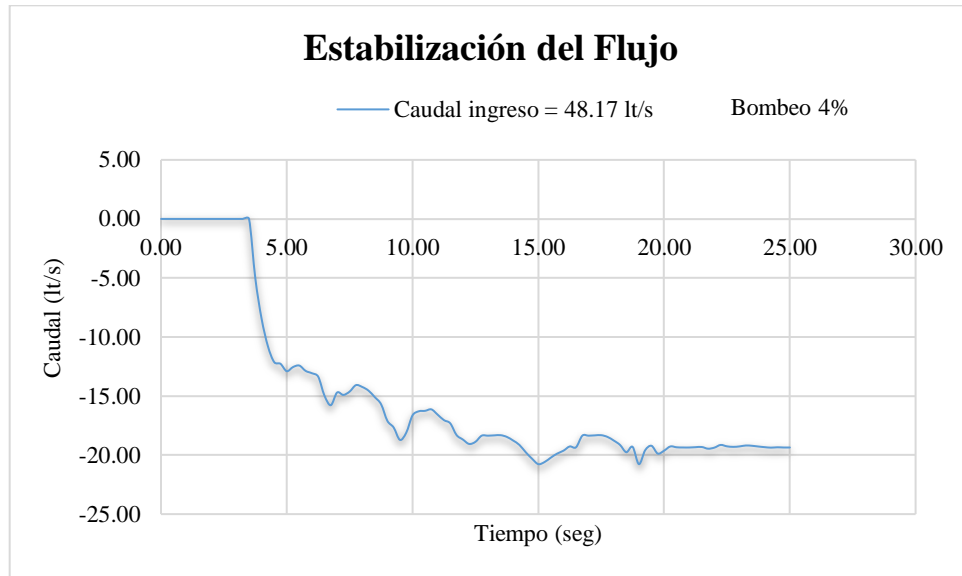
**Figura 82.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 20.74 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 4%L – Q=48.17 lt/s

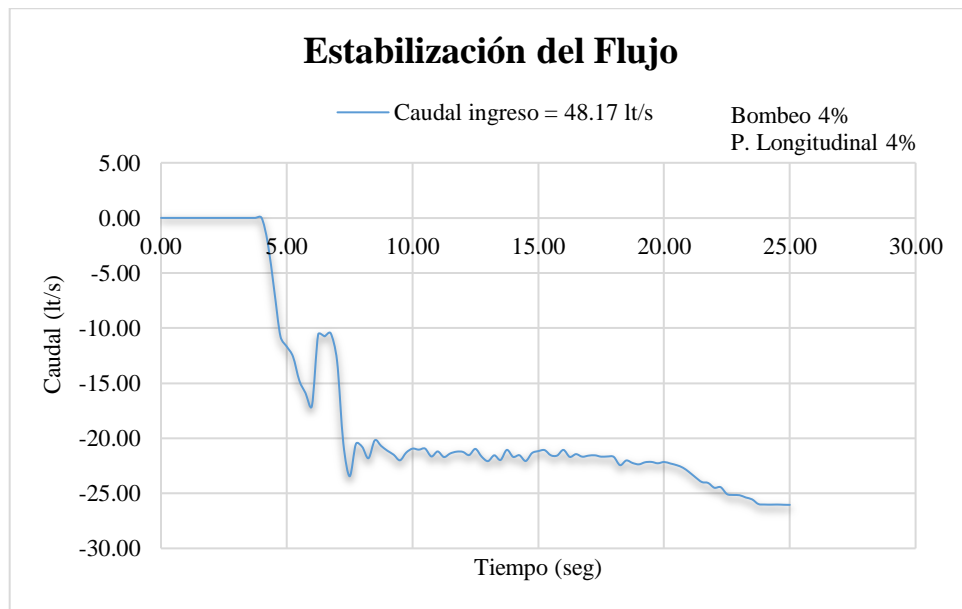
**Figura 83.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 48.17 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 4%L – Q=79.11 lt/s

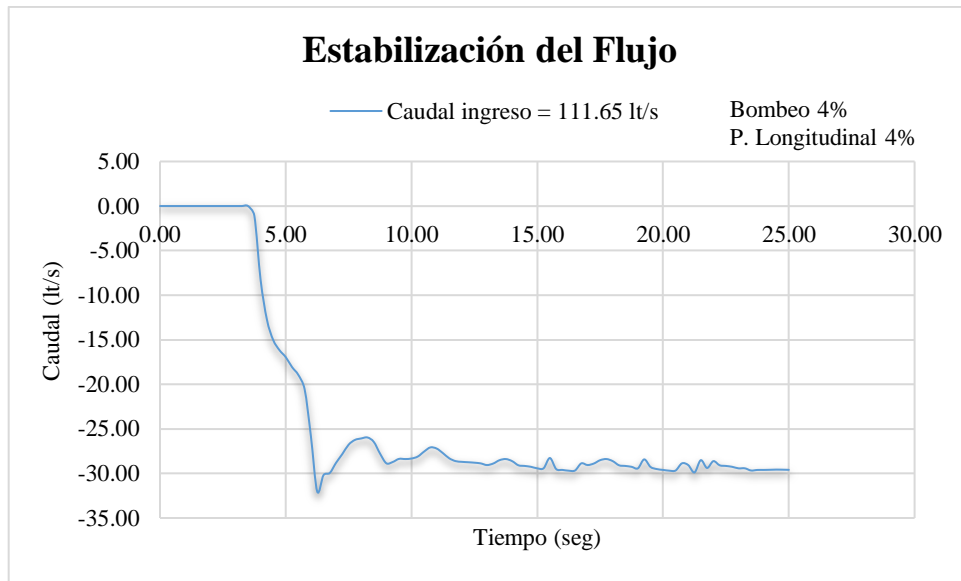
**Figura 84.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 79.11 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero

- 4%T – 4%L – Q=111.65 lt/s

**Figura 85.** Estabilidad de flujo. Bombeo 4%. Pendiente Longitudinal 4.0%. Caudal 111.65 lt/s



**Realizado por:** Melanie Romero