



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Evaluación experimental del comportamiento hidráulico de un tanque de detención tipo SUDS, construido con elementos celulares**

**Jaime Eduardo Parra Ochoa**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola  
Bogotá, Colombia  
2022



# **Evaluación experimental del comportamiento hidráulico de un tanque de detención tipo SUDS, construido con elementos celulares**

**Jaime Eduardo Parra Ochoa**

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos**

Director:

Carlos Eduardo Cubillos Peña IC, MSc

Línea de Investigación:

Ingeniería hidráulica

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2022



*A Carolina por su constante apoyo, a mi familia, y a la Universidad Nacional por guiarme en el camino del conocimiento.*

*Nunca dejes de avanzar*

# Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la Universidad.

Jaime Eduardo Parra Ochoa

Nombre

Fecha 26/08/2022

# Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias al apoyo de algunas personas e instituciones y quiero resaltar el apoyo que he recibido por parte de mi familia, en especial de Carolina y mi hermano Andrés.

Agradezco a mis amigos ingenieros interesados en la hidráulica y en las mejoras que me sugirieron en esta investigación, por eso quiero mencionar al Ing. Guillermo Herrera, al Ing. Ricardo Vargas y al Ing. Carlos Ayala.

El Profesor Edgar Villarreal, en un principio fue el guía que hizo replantear mi posición y óptica frente al manejo del agua, y por su labor como director de esta investigación le agradezco mucho el tiempo y conocimiento que compartió conmigo. Al Profesor Carlos Cubillos, quien dirigió esta investigación en su etapa final, le agradezco por mostrarme el camino de la investigación con rigor.

El apoyo que recibí de ACO Soluciones de Drenaje, en especial de Miguel Zárate fue fundamental, puesto que fue él quien gestionó gran parte de los materiales. Su ayuda fue oportuna, desinteresada y muy apreciada por mí.

Agradezco inmensamente a la Universidad Nacional de Colombia por ser la institución que me formó como profesional y como persona crítica frente a la sociedad. También por brindarme el espacio y los medios necesarios para realizar esta investigación.

## Resumen

### **Evaluación experimental del comportamiento hidráulico de un tanque de detención tipo SUDS, construido con elementos celulares.**

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) se hacen cada vez más necesarios en Colombia, debido al aumento de personas viviendo en las ciudades y a los drásticos y rápidos cambios que son generados en la naturaleza por la urbanización acelerada. La normativa colombiana ha avanzado en la regulación y exigencia de los SUDS como característica importante para los proyectos de desarrollo, y estos sistemas son cada vez más utilizados en nuestro medio.

En esta investigación se realizó la evaluación hidráulica de un tipo de SUDS conocido como tanque de detención, el cual fue construido con elementos celulares en el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia (LEH-UN), Sede Bogotá. Los métodos existentes de dimensionamiento de tanques de detención con elementos celulares, asumen que el agua tiene una superficie horizontal, y esto fue evaluado experimentalmente variando el caudal de entrada al tanque, para medir las variables de nivel y caudal de salida.

Se compararon los datos medidos con los resultados de una simulación matemática bajo condición de piscina nivelada y por medio de un análisis estadístico se evaluó el desempeño hidráulico del tanque. Este documento busca aportar conocimiento acerca del comportamiento hidráulico de los tanques de detención con elementos celulares.

**Palabras clave:** SUDS, tanque de detención, elementos celulares, escorrentía, hidrograma, hietograma.



## Abstract

### **Experimental assessment of the hydraulic performance of a SUDS-type detention tank, built with cellular elements**

Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS) are becoming increasingly necessary in Colombia, due to the increase of people living in cities and the drastic and rapid changes that are generated in nature by accelerated urbanization. Colombian regulations have progressed in the regulation and requirement of SUDS as an important characteristic for new development projects and these systems are increasingly used in our context.

In this research, the hydraulic assessment of a type of SUDS known as a detention tank was carried out, which was built with cellular elements in the Laboratorio de Ensayos Hidráulicos of the National University of Colombia (LEH-UN), Bogotá. Existing methods for sizing detention tanks built with cellular elements assume that the water has a horizontal surface, and this was experimentally assessed varying the inlet flow to the tank, to measure the level and outlet flow variables.

Measured data was compared with results of a mathematical simulation under a leveled pool condition and through a statistical analysis, the hydraulic performance was evaluated. This document seeks to provide knowledge about the hydraulic behavior of detention tanks with cellular elements.

**Keywords:** SUDS, detention tank, geo-cellular crates, runoff, hydrograph, hyetograph.



# Contenido

	<u>Pág.</u>
<b>Resumen .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de gráficas.....</b>	<b>XIV</b>
<b>Lista de fotografías.....</b>	<b>XVI</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas .....</b>	<b>XX</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Estado del arte.....</b>	<b>9</b>
1.1    Sistemas de drenaje urbano .....	9
1.2    ¿Qué son los SUDS? .....	10
1.3    Tipos de SUDS.....	14
1.4    SUDS a nivel internacional .....	15
1.5    SUDS en Colombia .....	20
1.6    Tanques de detención y retención de agua lluvia .....	23
1.7    Métodos de cálculo de tanques de detención .....	29
<b>2. Metodología.....</b>	<b>35</b>
2.1    Localización.....	36
2.2    Dimensionamiento.....	39
2.3    Instalación del tanque .....	43
2.4    Experimentación.....	49
2.5    Simulación matemática .....	57
2.6    Análisis estadístico.....	62
<b>3. Resultados .....</b>	<b>65</b>
3.1    Resultados de experimentación y simulación matemática .....	65
3.2    Resultados análisis estadístico.....	96
<b>4. Análisis de resultados .....</b>	<b>101</b>
<b>5. Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>105</b>
<b>A. Anexo: Tablas de calibración .....</b>	<b>109</b>

<b>B. Anexo: Tablas de toma de datos experimentos .....</b>	<b>113</b>
<b>C. Anexo: Dimensionamiento método racional modificado.....</b>	<b>125</b>
<b>D. Anexo: Ecuación de Bernoulli estructura de salida.....</b>	<b>139</b>
<b>E. Anexo: Reporte de simulación matemática. ....</b>	<b>145</b>
<b>F. Anexo: Tablas de resultados ANOVA.....</b>	<b>149</b>
<b>G. Anexo: Plano de instalación del tanque de detención. ....</b>	<b>161</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>163</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 0-1:</b> Esquema del cambio del suelo en el proceso de urbanización en una cuenca. Fuente: (CIRIA, 2015).....	2
<b>Figura 1-1:</b> Ejemplo del cambio de un hidrograma de escorrentía debido al cambio del suelo. Fuente: (CIRIA, 2015).....	12
<b>Figura 1-2:</b> Esquema de un tanque de detención con elementos celulares. Fuente: (ACO DRAIN, 2015).....	24
<b>Figura 1-3:</b> Recubrimiento con geomembrana y geotextil de un tanque de detención con elementos celulares. Fuente: (CIRIA, 2016).....	25
<b>Figura 1-4:</b> Dimensiones de un módulo ACO <i>StormBrixx</i> HD. Fuente: (ACO DRAIN, 2015).....	26
<b>Figura 1-5:</b> Celda ACO <i>StormBrixx</i> conformada por dos módulos. Fuente: (ACO DRAIN, 2015).....	27
<b>Figura 1-6:</b> Recubrimiento de los elementos celulares con geotextil. Fuente: (ACO DRAIN, 2015).....	27
<b>Figura 2-1:</b> Metodología de investigación. ....	36
<b>Figura 2-2:</b> Esquema de conexión de la tubería de salida del tanque de detención. ....	42
<b>Figura 2-3:</b> Esquema de instalación en planta de tanque de detención con elementos celulares.....	45
<b>Figura 2-4:</b> Perfil de instalación de tanque de detención con elementos celulares. ....	46
<b>Figura 2-5:</b> Tanque de detención con elementos celulares, vista en planta. ....	58
<b>Figura 5-1:</b> Orificio sumergido tubo adicional cilíndrico. Fuente: (Fernández, 2000). ...	141
<b>Figura 5-2:</b> Regresión polinómica del coeficiente de gasto $\varphi$ en función de $l/d$ . ....	143

## Lista de gráficas

	<b>Pág.</b>
<b>Gráfica 1-1:</b> Porcentaje de personas viviendo en zonas urbanas en el mundo desde 1950 y proyectadas al 2030. Fuente: (Vanegas & Flórez, 2012) .....	16
<b>Gráfica 1-2:</b> Hidrogramas de entrada y salida resultado de la simulación realizada en el laboratorio de Pruebas y Ensayos de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Fuente: (Álvarez & Celedón, 2012). .....	28
<b>Gráfica 1-3:</b> Cambio de almacenamiento durante un periodo de tránsito, $\Delta t$ . Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1949) .....	32
<b>Gráfica 2-1:</b> Curva IDF de la estación climatológica UNIV NACIONAL - IDEAM del IDEAM. Fuente: (INGETEC, 2015) .....	40
<b>Gráfica 2-2:</b> Ejemplo de curva de vertedero triangular de pared delgada, ángulo $90^\circ$ . Ubicación modelo hidráulico LEH-UN .....	54
<b>Gráfica 2-3 y Gráfica 2-4:</b> Ejemplo de hidrograma creado en el laboratorio y hietograma equivalente.....	61
<b>Gráfica 2-5:</b> Hietograma acumulado para ingresar al programa de cómputo. ....	61
<b>Gráfica 3-1:</b> Relación de caudal y nivel sobre el vertedero triangular de pared delgada en la caja de entrada al tanque. ....	65
<b>Gráfica 3-2:</b> Calibración orificio sumergido conectado con tubo horizontal .....	66
<b>Gráfica 3-3:</b> Medición del nivel en la salida del tanque de detención a través del tiempo, mientras se desocupa.....	67
<b>Gráfica 3-4 y Gráfica 3-5:</b> Comparación entre hidrograma medido en laboratorio, y el resultado de la simulación matemática. ....	68
<b>Gráfica 3-6:</b> Curvas de caudal experimento 1.....	70
<b>Gráfica 3-7</b> Curvas de nivel experimento 1 .....	70
<b>Gráfica 3-8:</b> Curvas de nivel ajustadas experimento 1 .....	71
<b>Gráfica 3-9:</b> Curvas de caudal experimento 2.....	72
<b>Gráfica 3-10:</b> Curvas de nivel experimento 2.....	72
<b>Gráfica 3-11:</b> Curvas de nivel ajustadas experimento 2.....	73
<b>Gráfica 3-12</b> Curvas de caudal experimento 3.....	74
<b>Gráfica 3-13</b> Curvas de nivel experimento 3.....	74
<b>Gráfica 3-14:</b> Curvas de nivel ajustadas experimento 3 .....	75
<b>Gráfica 3-15</b> Curvas de caudal experimento 4.....	76
<b>Gráfica 3-16:</b> Curvas de nivel experimento 4.....	76
<b>Gráfica 3-17:</b> Curvas de nivel ajustadas experimento 4 .....	77
<b>Gráfica 3-18:</b> Curvas de caudal experimento 5.....	78

<b>Gráfica 3-19:</b> Curvas de nivel experimento 5.....	78
<b>Gráfica 3-20:</b> Curvas de nivel ajustadas experimento 5.....	79
<b>Gráfica 3-21</b> Curvas de caudal experimento 6.....	80
<b>Gráfica 3-22:</b> Curvas de nivel experimento 6.....	80
<b>Gráfica 3-23:</b> Curvas de nivel ajustadas experimento 6.....	81
<b>Gráfica 3-24:</b> Curvas de caudal experimento 7.....	82
<b>Gráfica 3-25:</b> Curvas de nivel experimento 7.....	82
<b>Gráfica 3-26:</b> Curvas de nivel ajustadas experimento 7.....	83
<b>Gráfica 3-27:</b> Curvas de caudal experimento 8.....	84
<b>Gráfica 3-28:</b> Curvas de nivel experimento 8.....	84
<b>Gráfica 3-29:</b> Curvas de nivel ajustadas experimento 8.....	85
<b>Gráfica 3-30:</b> Curvas de caudal experimento 9.....	86
<b>Gráfica 3-31:</b> Curvas de nivel experimento 9.....	86
<b>Gráfica 3-32:</b> Curvas de caudal experimento 10.....	87
<b>Gráfica 3-33:</b> Curvas de nivel experimento 10.....	88
<b>Gráfica 3-34:</b> Curvas de nivel ajustadas experimento 10.....	88
<b>Gráfica 3-35:</b> Diferencia entre el nivel de agua a la entrada ( $H1$ ) y la salida ( $H2$ ) medidos experimentalmente en función del caudal de entrada.....	89
<b>Gráfica 3-36:</b> Diferencia entre el nivel experimental y el simulado en función del caudal de entrada.....	90
<b>Gráfica 3-37:</b> Variación de $\Delta H_{EXP}$ ( $H1 - H2$ ) en función de $\Delta Q_{EXP}$ (entrada menos salida).....	91
<b>Gráfica 3-38:</b> Caudales experimentales normalizados comparados con las diferencias de nivel $H1$ y $H2$ .....	92
<b>Gráfica 3-39:</b> Caudales experimentales normalizados comparados con las diferencias de nivel $H1$ y $H2$ normalizadas.....	93
<b>Gráfica 3-40:</b> Variación del tiempo de desfase entre hidrogramas de entrada y salida caudal máximo de entrada experimental.....	94
<b>Gráfica 3-41:</b> Gráfica cuantil - cuantil de nivel dentro del tanque.....	96
<b>Gráfica 5-1:</b> Representación del método racional modificado. Fuente: (Butler & Davies, 2011).....	129
<b>Gráfica 5-2:</b> Resultado del volumen de detención. Periodo de retorno 2 años.....	135
<b>Gráfica 5-3:</b> Variación del volumen de detención con respecto al tiempo de duración de la tormenta, periodo de retorno 2 años.....	136
<b>Gráfica 5-4:</b> Cálculo del método racional modificado. Periodo de retorno 5 años.....	137
<b>Gráfica 5-5:</b> Cálculo del método racional modificado. Periodo de retorno 10 años.....	137

## Lista de fotografías

	Pág.
<b>Fotografía 0-1:</b> Representación de la variación del nivel de agua, en el interior de un tanque de detención con elementos celulares instalado en un canal horizontal del LEH-UN. ....	5
<b>Fotografía 1-1:</b> Vista de la ciudad de Fukuoka Japón, desde edificio ACROS 2010. Fuente: (Gravater, 2010) .....	13
<b>Fotografía 1-2 y Fotografía 1-3:</b> Vista lateral de configuración de cilindros sobre superficie rugosa y configuración de canal con estructuras cilíndricas. Fuente: (Dupuis, Proust, Berni, & Paquier, 2018).....	33
<b>Fotografía 2-1:</b> Localización Laboratorio Ensayos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. Fuente: (GOOGLE EARTH, 2015) .....	37
<b>Fotografía 2-2:</b> Localización de instalación de tanque de detención de agua lluvia al costado nororiental del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos. Fuente: (GOOGLE EARTH, 2015) .....	37
<b>Fotografía 2-3:</b> Sitio de instalación enterrada del tanque de detención de agua lluvia. Fuente: (GOOGLE EARTH, 2015) .....	38
<b>Fotografía 2-4:</b> Localización estación climatológica UNIV NACIONAL - IDEAM. Fuente: (GOOGLE EARTH, 2015).....	40
<b>Fotografía 2-5:</b> Apiques disponibles según estudio de suelos realizado alrededor del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos. Fuente: (Ingenieros Consultores de Proyectos Civiles G&V, 2017).....	44
<b>Fotografía 2-6:</b> Inicio de instalación del tanque en el costado nororiental del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos. ....	46
<b>Fotografía 2-7:</b> Colocación del geotextil NT2500. ....	47
<b>Fotografía 2-8:</b> Conexión de la caja de inspección nueva con colector Ø8". ....	47
<b>Fotografía 2-9 y Fotografía 2-10:</b> Colocación de los elementos celulares. ....	48
<b>Fotografía 2-11:</b> Ducto de inspección con tapa en hierro dúctil. ....	48
<b>Fotografía 2-12 y Fotografía 2-13:</b> Sistema de bombeo utilizado para las pruebas .....	50
<b>Fotografía 2-14, Fotografía 2-15 y Fotografía 2-16:</b> Válvula de mariposa (VALV 1) en la descarga del sistema de bombeo.....	51
<b>Fotografía 2-17:</b> Tubería de conducción de fluido hacia el tanque de detención.....	51
<b>Fotografía 2-18 y Fotografía 2-19</b> Válvula de mariposa (VALV 2) en la tubería que entrega el agua al tanque de detención.....	52



---

<b>Fotografía 2-20 y Fotografía 2-21:</b> Caja de inspección y caja de medición de caudal con vertedero triangular de pared delgada. ....	52
<b>Fotografía 2-22 y Fotografía 2-23:</b> Limnómetro para medición de niveles dentro del tanque construido con varas metálicas. ....	57

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1:</b> Medidas estructurales de SUDS .....	14
<b>Tabla 1-2:</b> Medidas no estructurales de SUDS .....	15
<b>Tabla 1-3:</b> Documentos relacionados con la implementación de SUDS en Colombia.....	21
<b>Tabla 2-1:</b> Resumen de resultados del dimensionamiento del tanque.....	41
<b>Tabla 2-2:</b> Nivel freático detectado en las perforaciones realizadas para el LEH-UN en enero de 2016. Fuente: (Ingenieros Consultores de Proyectos Civiles G&V, 2017) .....	44
<b>Tabla 2-3:</b> Tabla ANOVA para el modelo lineal simple .....	63
<b>Tabla 3-1:</b> Tabla resumen de resultados de todos los experimentos realizados .....	95
<b>Tabla 3-2:</b> Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 1 .....	96
<b>Tabla 3-3:</b> Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 2 .....	97
<b>Tabla 3-4:</b> Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 3 .....	98
<b>Tabla 3-5:</b> Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 4 .....	98
<b>Tabla 3-6:</b> Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 5 .....	98
<b>Tabla 3-7:</b> Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 6 .....	98
<b>Tabla 3-8:</b> Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 7 .....	99
<b>Tabla 3-9:</b> Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 8 .....	99
<b>Tabla 3-10:</b> Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 9.....	99
<b>Tabla 3-11:</b> Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 10 .....	99
<b>Tabla 5-1:</b> Calibración vertedero triangular .....	110
<b>Tabla 5-2:</b> Calibración orificio sumergido .....	111
<b>Tabla 5-3:</b> Datos de descarga tanque de detención .....	112
<b>Tabla 5-4:</b> Registro de datos EXP 1 .....	115
<b>Tabla 5-5:</b> Registro de datos EXP 2 .....	116
<b>Tabla 5-6:</b> Registro de datos EXP 3 .....	117
<b>Tabla 5-7:</b> Registro de datos EXP 4 .....	118
<b>Tabla 5-8:</b> Registro de datos EXP 5 .....	119
<b>Tabla 5-9:</b> Registro de datos EXP 6 .....	120
<b>Tabla 5-10:</b> Registro de datos EXP 7 .....	121
<b>Tabla 5-11:</b> Registro de datos EXP 8 .....	122
<b>Tabla 5-12:</b> Registro de datos EXP 9 .....	123
<b>Tabla 5-13:</b> Registro de datos EXP 10 .....	124
<b>Tabla 5-14:</b> Coeficiente de gasto $\varphi$ en función de la relación l/d.....	143

---

<b>Tabla 5-15:</b> Reporte simulación matemática programa de cómputo <i>Storm and Sanitary Analysis</i> .....	147
<b>Tabla 5-16:</b> Tabla análisis ANOVA EXP 1.....	151
<b>Tabla 5-17:</b> Tabla análisis ANOVA EXP 2.....	152
<b>Tabla 5-18:</b> Tabla análisis ANOVA EXP 3.....	153
<b>Tabla 5-19:</b> Tabla análisis ANOVA EXP 4.....	154
<b>Tabla 5-20:</b> Tabla análisis ANOVA EXP 5.....	155
<b>Tabla 5-21:</b> Tabla análisis ANOVA EXP 6.....	156
<b>Tabla 5-22:</b> Tabla análisis ANOVA EXP 7.....	157
<b>Tabla 5-23:</b> Tabla análisis ANOVA EXP 8.....	158
<b>Tabla 5-24:</b> Tabla análisis ANOVA EXP 9.....	159
<b>Tabla 5-25:</b> Tabla análisis ANOVA EXP 10.....	160

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos

Símbolo	Término	Unidad SI
$A$	Área	$m^2$
$C$	Coefficiente de esorrentía	adimensional
$C_d$	Coefficiente de descarga orificio sumergido	adimensional
$H$	Nivel sobre el orificio sumergido	m
$t_D, T_d$	Tiempo de duración de lluvia	min
$t_c$	Tiempo de concentración de la cuenca	min
$i$	Intensidad de lluvia	mm/h
$T_r$	Periodo de retorno	año
$Q_A$	Caudal máximo permitido, Caudal antes del desarrollo	$m^3/s, l/s$
$Q_p$	Caudal pico	$m^3/s, l/s$
$V_i$	Volumen de ingreso	$m^3, l$
$V_o$	Volumen de salida	$m^3, l$
$V_s$	Volumen de almacenamiento	$m^3, l$

### Siglas

Sigla	Término
BMP	Best Management Practices
EAAB	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá
GIREH	Grupo de Investigación en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá
IDF	Intensidad Duración y Frecuencia

LEH-UN	Laboratorio de Ensayos Hidráulicos Universidad Nacional de Colombia
LID	Low Impact Development
LIUDD	Low Impact Urban Design and Development
SUDS	Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, Sustainable Urban Drainage Systems
SuDS	Sistemas de Drenaje Sostenible. Sustainable Drainage Systems
WSUD	Water Sensitive Urban Design



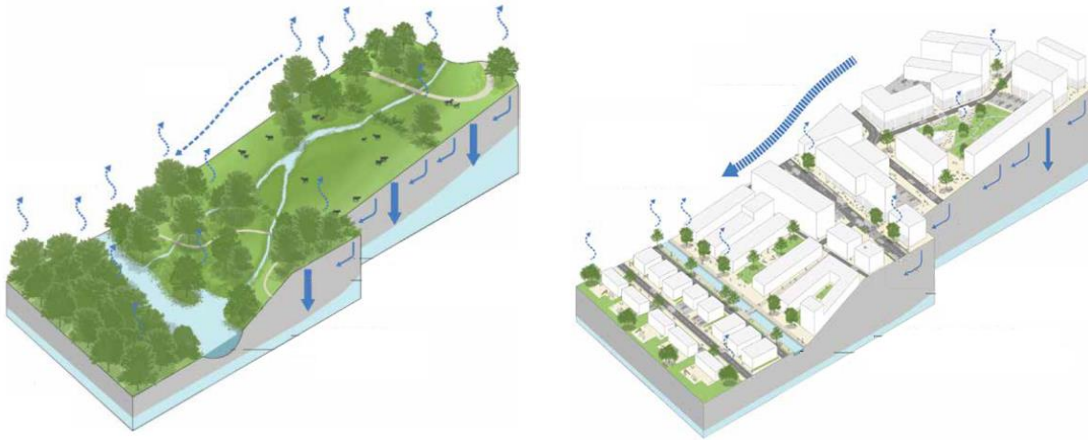
## Introducción

Los sistemas de drenaje de agua lluvia en Colombia resultan ser un reto cada vez más complejo por diferentes razones, entre las cuales se puede mencionar el rápido crecimiento urbano, la contaminación de la escorrentía, y el deterioro de las redes de alcantarillado existentes. Es por esto que la ingeniería colombiana ha venido realizando un avance en la implementación de un sistema del drenaje urbano más integral, denominado: Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible -SUDS-.

Los SUDS han surgido como una respuesta a los problemas de inundación y contaminación, entre otros, asociados el desarrollo urbano presentado en el mundo en las últimas décadas. Este concepto nació en Europa debido al acelerado desarrollo presentado en la segunda mitad del siglo XX (CIRIA, 2015), y ahora en Colombia es utilizado cada vez con más frecuencia.

En los últimos años, se ha aumentado el número de inundaciones en las ciudades colombianas, lo cual se debe en gran parte a la urbanización acelerada (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2016), es decir, a un cambio del uso del suelo, lo cual impacta el ciclo hidrológico. Estas inundaciones generan riesgos para la salud y calidad de vida de la población, además de pérdidas sociales y económicas (Poletto & Tass, 2004).

Los SUDS se basan en el principio de emular las condiciones naturales de la escorrentía antes de algún desarrollo urbano, en el cual se haya cambiado el uso del suelo y consecuentemente, su interacción con el agua (CIRIA, 2007). Un esquema de este cambio de la cobertura del suelo se puede ver en la **Figura 0-1**.



**Figura 0-1:** Esquema del cambio del suelo en el proceso de urbanización en una cuenca.

Fuente: (CIRIA, 2015)

Estos sistemas se han implementado con éxito en países desarrollados, en donde han sido útiles para mitigar problemas de inundación y contaminación de los cuerpos de agua, y en donde el desarrollo urbano ha presentado un elevado crecimiento a lo largo del siglo XX (Abellán, SuD Sostenible, 2016). Se cuenta con una amplia documentación proveniente de Inglaterra, Estados Unidos, Australia, Suecia, entre otros, en donde estos sistemas se han desarrollado para obtener el más valioso beneficio de un drenaje urbano, el cual es mejorar la salud pública (Butler & Davies, 2011).

En la última década se ha realizado un avance en el ámbito normativo de los SUDS en Colombia, en donde ya se puede encontrar requerimientos explícitos de su uso, como por ejemplo en la norma NS-085 de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, en la cual, en el caso de sistemas de recolección de aguas pluviales, se menciona que dentro de las alternativas generadas se debe incluir por lo menos una solución que incluya SUDS (EAAB, 2020). También existe la norma NS-166 “Criterios para diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible”, de la empresa EAAB.

A nivel nacional, los SUDS son mencionados en la resolución 0330 del 2017, mediante el cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS, la cual fue modificada por la resolución 0799 del 2021, donde se señala que se debe evaluar la necesidad de utilizar Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible con el objeto de reducir mínimo en un 30% el caudal pico del hidrograma de creciente de diseño (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2021).



Actualmente existen varios tipos de SUDS, como por ejemplo techos verdes, zanjas de infiltración o tanques de detención, entre otros, los cuales buscan detener temporalmente la escorrentía para reducir los caudales pico producidos, con el propósito de emular las condiciones de escorrentía que existían antes del desarrollo (CIRIA, 2015). Esta investigación se enfoca en la experimentación con un tanque de detención construido con elementos celulares en la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.

Los tanques de detención de aguas lluvias hacen parte de las llamadas medidas estructurales, las cuales buscan controlar la escorrentía mediante alguna obra adoptada según criterios urbanísticos (Abellán, 2016). Entre las medidas estructurales se encuentran las cunetas verdes, humedales artificiales, techos verdes, entre otras. Estas deben ser complementadas con lo que se conoce como medidas no estructurales, las cuales son aquellas que no precisan actuación física directa sobre la red, ni la construcción de infraestructura alguna, como por ejemplo la cultura ciudadana, el mantenimiento de las redes o la reutilización de las aguas pluviales.

En Colombia los tanques de detención (también llamados tanques de amortiguación de aguas lluvias) se han construido frecuentemente en concreto reforzado, como por ejemplo en el proyecto residencial Colinas del Bosque en Chía - Cundinamarca, en donde, debido a la inexistencia de alcantarillado pluvial en el sector, fue necesario implementar un sistema de amortiguamiento y reciclaje de las aguas lluvias generadas en el predio (Hydros Chía, 2011).

Estos tanques se pueden construir con elementos celulares plásticos interconectados en forma de celdas, que proporcionan volumen para almacenamiento de agua lluvia. Las celdas tienen una resistencia estructural adecuada para la mayoría de aplicaciones (CIRIA, 2008) y son fabricadas en plástico, muy frecuentemente en polipropileno. Los elementos celulares generan muy pocos desperdicios en las construcciones.

En Europa, desde mediados de la década de 1980, se ha venido implementando este tipo de SUDS conocido como tanques de detención construidos con elementos celulares plásticos (CIRIA, 2008), como por ejemplo en Escocia, en donde los sistemas de atenuación con celdas han probado ser satisfactorios (Schlüter, Spitzer, & Jefferies, 2002).

De igual manera, en otros países del mundo, como en Japón, se han desarrollado sistemas de tanques de infiltración plásticos (Nakanishi, 2002).

En Colombia el uso de este tipo de tanques ha sido implementado en varios proyectos, como por ejemplo en la Universidad Nacional de Colombia en donde se implementó un tanque de atenuación de caudales con elementos celulares en el edificio de Bellas Artes en el 2020. Se han realizado diferentes investigaciones en donde se ha demostrado la capacidad de atenuar caudales de este tipo de tanques, como por ejemplo en la Universidad Javeriana, en el año 2012, en donde se demostró la atenuación del caudal pico, por medio de celdas plásticas (Álvarez & Celedón, 2012).

Un método frecuentemente utilizado para describir hidráulicamente los tanques de detención, es el tránsito de piscina nivelada, el cual asume una superficie de agua horizontal. Los programas de cómputo utilizados para simular el desempeño hidráulico de los tanques de detención, como por ejemplo HEC-HMS, *PondPack* de Bentley, *Storm and Sanitary Analysis* de Autodesk, entre otros, asumen que el nivel del agua es horizontal dentro de una estructura de almacenamiento.

Para dimensionar el volumen de un tanque de detención de aguas lluvias, se utilizan métodos que suponen que el tanque no tiene ninguna interferencia interna y que la superficie del agua es horizontal en todo momento. En pruebas realizadas en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional a un tanque de detención con elementos celulares y pendiente cero (**Fotografía 0-1**), en donde se hizo fluir un caudal de aproximadamente 95 l/s, se evidenció que el nivel del agua podría no ser horizontal en su interior y, por lo tanto, podría no ser adecuado representar las condiciones de flujo mediante el método de piscina nivelada, que, como se dijo, es lo usual en estos casos.

El comportamiento hidráulico de este tipo de tanques es definido en esta investigación, como la variación del nivel de agua, y la atenuación del caudal de salida con respecto al caudal de entrada. La estructura celular supone variaciones en el comportamiento hidráulico y, por lo tanto, resulta interesante evaluar sus posibles implicaciones en el dimensionamiento de este tipo de tanques.



**Fotografía 0-1:** Representación de la variación del nivel de agua, en el interior de un tanque de detención con elementos celulares instalado en un canal horizontal del LEH-UN.

Surge así una hipótesis acerca del desempeño hidráulico de los tanques de detención de aguas lluvias con elementos celulares: La configuración celular en un tanque de detención genera pérdidas de energía que hace que la superficie del agua no sea horizontal como supone el método de la piscina nivelada, sino inclinada hacia aguas abajo, lo cual implicaría una afectación del comportamiento hidráulico supuesto. La pregunta que responde esta investigación es: ¿Cuál es el comportamiento hidráulico en el interior de un tanque de detención con elementos celulares en su estructura interna, en comparación con el desempeño bajo la suposición de piscina nivelada?

La hipótesis nula, indicaría que la estructura interna de este tipo de tanques no afecta su comportamiento hidráulico, o que esta afectación es tan pequeña, que puede ser despreciable. Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo y busca aportar conocimiento acerca de los SUDS, experimentando en un tanque de detención con elementos celulares, instalado por el autor del presente documento en el LEH-UN, del campus de la Ciudad Universitaria de Bogotá.

### **Objetivo general**

- Determinar la diferencia entre el comportamiento hidráulico (cotas de la superficie de agua y descarga) a lo largo de un tanque de detención construido con elementos celulares interiores, con respecto al comportamiento hidráulico simulado que se

tendría bajo la suposición de piscina nivelada, para iguales condiciones de caudal a la entrada.

### **Objetivos específicos**

- Realizar mediciones de nivel y caudal en los extremos aguas arriba y aguas abajo en un tanque de detención con elementos celulares instalado en el campus de la Universidad Nacional de Bogotá, para diferentes condiciones de caudal permanente a la entrada.
- Simular matemáticamente el funcionamiento hidráulico del flujo en el tanque de experimentación por el método de la piscina nivelada, usualmente utilizado para evaluar el desempeño de este tipo de tanques, para idénticas condiciones de caudal de entrada en la experimentación.
- Comparar los valores de nivel y caudal obtenidos experimentalmente, con aquellos obtenidos en la simulación bajo condiciones de piscina nivelada.
- Proponer recomendaciones prácticas para el análisis hidráulico de este tipo de elementos de control de escorrentía.

A pesar de que se han realizado varios trabajos con tanques de detención de celdas plásticas (Álvarez & Celedón, 2012), no se ha evaluado comparativamente la afectación del comportamiento hidráulico generado por la estructura interna en un tanque construido con elementos celulares, con una simulación matemática basada en la suposición de piscina nivelada. Esta afectación, usualmente no es tenida en cuenta al momento de diseñar este tipo de tanques y esta podría representar diferencias importantes en su desempeño hidráulico.

Como se ha dicho, la estructura celular puede afectar el comportamiento hidráulico y, por lo tanto, resulta interesante evaluar sus posibles implicaciones en la práctica usual de dimensionamiento de este tipo de tanques. Esta investigación basada en mediciones experimentales en un tanque de detención con elementos celulares, permitirá aportar conocimiento para la gestión del drenaje urbano, y resultará útil para el sector de la consultoría, la construcción y actividades relacionadas.

La simulación matemática fue realizada con el programa de cómputo *Storm and Sanitary Analysis* de *Autodesk*, en el cual se ingresaron hietogramas acumulados construidos a partir de hidrogramas creados en el laboratorio variando el caudal de entrada al tanque.

Estos análisis fueron realizados para describir el desempeño hidráulico del tanque de detención. A pesar de que es posible encontrar bastante información alrededor de los sistemas de detención de agua lluvia con tanques celulares plásticos, no se conoce con detalle cuál es su comportamiento hidráulico.

No obstante, se han realizado algunos significativos avances en el manejo del agua lluvia en Colombia (Hernández, 2011), es necesario continuar la investigación en el país en torno a su gestión sostenible. Es importante que en Colombia se desarrollen manuales y normas que contengan recomendaciones de diseño de los SUDS y esta investigación es un aporte para ampliar su conocimiento por medio de la experimentación, puesto que presenta los resultados de una evaluación hidráulica a un tanque construido con elementos celulares.



# 1. Estado del arte

## 1.1 Sistemas de drenaje urbano

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, el concepto de higiene y sanidad en las principales ciudades del mundo, era evacuar rápidamente el agua ya fuera pluvial o residual (Abellán, iAgua Magazine, 2017), dando la sensación de resolver un problema. Sin embargo, el efecto ocasionado fue el aumento de inundaciones aguas abajo, erosión, contaminación de los cuerpos naturales de agua por químicos arrastrados por la escorrentía superficial y descarga acelerada de los acuíferos. El concepto de drenar rápidamente el agua pluvial con el propósito de mejorar la salud de los habitantes de las ciudades, no tenía en cuenta los efectos secundarios en los cuerpos naturales de agua y en el balance hidrológico. Era así, una manera de trasladar el problema de un lugar a otro.

Esto resultó siendo una de las principales causas de inundación en las ciudades, debido a que drenar rápidamente el agua lluvia tuvo como consecuencia una sobrecarga en los sistemas de drenaje y alcantarillado, los cuales no eran diseñados ni construidos para los altos caudales - producto del desarrollo urbano - a los que eran expuestos. Una solución que surge a simple vista es aumentar el tamaño de las tuberías de alcantarillado pluvial o combinado, pero esto generalmente implica elevados costos e intervenciones en las vías, y no todas las ciudades cuentan con los recursos económicos suficientes para esto. Por ejemplo, en la ciudad de Chiclayo en el Norte de Perú, en pleno siglo XXI, no existe un adecuado sistema de drenaje urbano en la región e implementar uno nuevo podría tomar varias décadas (Casavonne, 2012).

En la actualidad los sistemas de drenaje de agua lluvia en las principales ciudades del mundo, son conformados por redes de alcantarillado pluvial o combinado (Giraldo, 2000), los cuales están formadas en su mayoría por una serie de estructuras de concreto conectadas con tuberías. Se puede evidenciar un creciente deterioro en estas redes de

alcantarillado que impacta negativamente los cuerpos naturales de agua, y genera inundaciones, lo que lleva a la ingeniería a adoptar nuevas estrategias para una gestión del agua lluvia más eficiente.

En el siglo XXI el cambio climático plantea nuevos desafíos, puesto que está provocando un exceso de lluvias en algunas partes del planeta y escasez de precipitaciones en otras, y ambas situaciones pueden afectar tanto a las zonas urbanas como a las rurales (Abellán, iAgua Magazine, 2017). Estas alteraciones en los regímenes de lluvia afectan gravemente el rendimiento de las redes de saneamiento que tendrán que funcionar con caudales para los que no fueron diseñadas, lo cual puede hacerlas no operativas, ocasionando inconvenientes cada vez más frecuentes dentro de las ciudades.

Actualmente se pueden identificar falencias en la gestión del agua lluvia principalmente en tres aspectos fundamentales. El primero es la cantidad, debido a que el cambio de la superficie por la urbanización acelerada del suelo genera altos volúmenes de escorrentía, los cuales sobrepasan la capacidad de evacuación de los alcantarillados existentes provocando inundaciones. El segundo es la calidad del agua, puesto que la escorrentía superficial arrastra contaminantes de las vías, techos, plazoletas, entre otros, que terminan en los cuerpos naturales de agua, en la mayor parte de los casos sin el tratamiento adecuado. Y el tercero es la cultura ciudadana, la cual no tiene el agua lluvia como una prioridad y no la utiliza como un bien que puede brindar servicios tales como paisajísticos y recreativos. La respuesta a este tipo de falencias se ha dado desde la ingeniería, con una perspectiva diferente conocida como SUDS.

## 1.2 ¿Qué son los SUDS?

Los SUDS son una colección de prácticas de manejo sostenible del agua lluvia y escorrentía superficial, que busca emular las condiciones hidrológicas que había antes de un desarrollo urbano. SUDS es una sigla que proviene del inglés *Sustainable Urban Drainage Systems*, la cual es traducida al español como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible. El concepto de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible ha sido utilizado desde hace poco, puesto que a pesar de que fue desarrollado desde la década de 1960 (Poletto & Tass, 2004), el término se empezó a utilizar internacionalmente desde principios de la década de 1990 (Fletcher, y otros, 2014). Este concepto surgió cuando comenzó a



darse importancia a la relación entre el manejo de aguas pluviales y el medio ambiente en las grandes ciudades (CIRIA, 2015). Esta relación representa el impacto directo entre el manejo de la escorrentía superficial y los efectos secundarios en las ciudades, como las inundaciones o la contaminación de los cuerpos de agua.

De esta manera se dio inicio a una nueva óptica del drenaje urbano, siendo una evolución de la filosofía tradicional del drenaje del agua lluvia. Con los SUDS se pasó del “drenaje” al “manejo sostenible” del agua lluvia, lo cual involucra no solo la cantidad (volumen) sino también la calidad del agua lluvia.

El manejo del agua lluvia se ha vuelto cada vez más complejo en las cuatro últimas décadas, y consecuentemente la terminología que describe los principios y prácticas del drenaje urbano se ha vuelto muy diversa (Fletcher, y otros, 2014). Se puede mencionar los siguientes términos en torno a los sistemas de drenaje sostenible, como los más importantes a nivel internacional:

- Best Management Practices, BMP (EEUU y Canada)
- Low Impact Development, LID (EEUU y Nueva Zelanda)
- Low Impact Urban Design and Development, LIUDD (EEUU y Nueva Zelanda)
- Sustainable Urban Drainage Systems, SUDS (Reino Unido)
- Water Sensitive Urban Design, WSUD (Australia)

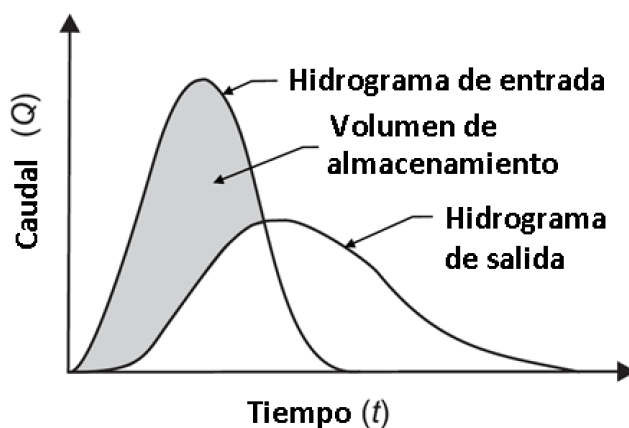
A pesar de que el nombre varía, todos tienen en común el manejo sostenible del agua lluvia, en el cual se hace un balance entre las variables del ciclo hidrológico y su efecto en las cuencas hidrográficas (Fletcher, y otros, 2014). Básicamente los objetivos de estos nuevos sistemas, son mejorar la calidad del recurso hídrico, disminuir la cantidad de escorrentía superficial, proteger la biodiversidad, optimizar el aprovechamiento del agua urbana como elemento paisajístico y de uso para actividades humanas, entre otros.

Existen cuatro aspectos, los cuales son los pilares fundamentales en el diseño de un SUDS (CIRIA, 2015):

1. Cantidad. Hace referencia al volumen que es retenido o detenido y que llega a los sistemas de alcantarillado de manera controlada.

2. Calidad. Hace referencia a la remoción de contaminantes del agua lluvia de cada proyecto y que son dispuestos de manera responsable ambientalmente.
3. Servicios. Hace referencia a los servicios que prestan los recursos hídricos, como paisajísticos, deportivos, control de temperaturas, entre otros.
4. Biodiversidad. Crea y mantiene mejores lugares para la naturaleza, preservando los ecosistemas.

El principal objetivo de los SUDS es emular las condiciones que había antes de cualquier desarrollo urbano, es decir, estimular la infiltración, detención, retención, evaporación y demás fenómenos que existen naturalmente. En la **Figura 1-1** se muestra un hidrograma antes de un desarrollo urbano supuesto (hidrograma de salida) y otro hidrograma después del desarrollo (hidrograma de entrada). En esta gráfica se puede observar como el caudal pico es aumentado y el tiempo de concentración es reducido debido a una urbanización, o, en otras palabras, un cambio de la cobertura del suelo a una superficie menos permeable. La reducción del tiempo al pico se le conoce como desfase.



**Figura 1-1:** Ejemplo del cambio de un hidrograma de escorrentía debido al cambio del suelo. Fuente: (CIRIA, 2015)

La contaminación de los cuerpos naturales de agua tales como ríos, lagos, quebradas, acuíferos entre otros, es originada principalmente por el accionar del hombre. Es por esto que reducirla es el segundo objetivo de los SUDS, lo cual se puede lograr implementando sistemas de tratamiento en las fuentes de contaminación. Esta contaminación se puede encontrar de diferentes maneras, como por ejemplo: químicos o hidrocarburos derramados en el suelo, pesticidas en el sector agrícola, o polución que se acumula en los techos de las viviendas y edificaciones, y es arrastrada por el agua lluvia, para ser finalmente

conducida por los sistemas de alcantarillado público hasta los cuerpos de agua (Abellán, SuD Sostenible, 2016).

Los servicios y biodiversidad son el componente que integra la naturaleza con la urbanización creando espacios de recreación. Alamedas, jardines de infiltración y zonas verdes son aprovechadas por la ciudadanía, como por ejemplo, en la ciudad de Fukuoka en Japón en donde se pueden encontrar varios ejemplos de esta integración, como se puede observar en la **Fotografía 1-1**, un espacio en donde la escorrentía superficial tiene un manejo similar al que existía antes del desarrollo urbano (Gravater, 2010).



**Fotografía 1-1:** Vista de la ciudad de Fukuoka Japón, desde edificio ACROS 2010. Fuente: (Gravater, 2010)

La filosofía de los SUDS es maximizar los beneficios y minimizar los impactos negativos del agua de escorrentía superficial en las áreas desarrolladas (CIRIA, 2015). Esto involucra una reducción de la cantidad de escorrentía superficial de un área desarrollada para una gestión del riesgo de inundaciones, y una reducción de la contaminación generada. Esto se logra mediante estructuras que imitan procesos naturales como infiltración, detención, almacenamiento, conducción y tratamiento de la escorrentía en el sitio de generación. El agua entonces se convierte en una parte mucho más visible y tangible del ambiente, la cual puede ser disfrutada por todos (CIRIA, 2015).

Los SUDS también fueron desarrollados para aprovechar sosteniblemente los servicios que brinda el agua, creando lugares atractivos, placenteros y útiles para la comunidad que los habita. El desarrollo urbanístico, al utilizar el agua como elemento principal, puede enriquecer su estética y valor recreacional, además de que puede ayudar a reducir el calentamiento global, proveer hábitat para la flora y la fauna, y ser un recurso para programas educativos que pueden influir en la comunidad hacia la preservación del medio ambiente.

### 1.3 Tipos de SUDS

Los tipos de SUDS se pueden dividir en dos grupos principalmente, conocidos como medidas estructurales y medidas no estructurales (Villarreal, 2005).

Las medidas estructurales son aquellas que gestionan la escorrentía mediante actuaciones que contengan algún elemento constructivo, o suponen la adopción de criterios urbanísticos. Estos criterios hacen referencia a la manera en la que se construyen los espacios públicos, las viviendas y en general los proyectos de desarrollo humano en torno al agua y a su interacción con la misma. Entre otras se encuentran las medidas estructurales mencionadas en la **Tabla 1-1** (Abellán, SuD Sostenible, 2016).

**Tabla 1-1:** Medidas estructurales de SUDS

Áreas de biorretención	Tanques de detención y retención de agua lluvia
Techos verdes	Estanques de retención
Pondajes	Estructuras de detención multifacéticas
Depósitos subterráneos de detención	Humedales
Depósitos superficiales de detención	Pavimentos permeables
Drenes filtrantes o franceses	

Estas medidas deben ser complementadas con medidas no estructurales las cuales son aquellas que no precisan actuación directa sobre la red, ni la construcción de infraestructura alguna, como, por ejemplo: la educación ciudadana, el mantenimiento de las redes, entre otras. Estas medidas suelen ser de un costo menor que las medidas estructurales y tienen como finalidad concienciar a la población acerca de su papel en la

administración del agua, como parte del proceso del mantenimiento de la infraestructura urbana (Martínez, 2015) y son llamadas a menudo controles en la fuente o prevención de contaminación, porque buscan reducir el ingreso de contaminantes en el agua lluvia. Algunas de las medidas no estructurales se mencionan en la **Tabla 1-2**.

**Tabla 1-2:** Medidas no estructurales de SUDS

Educación y programas de participación ciudadana	Uso de procedimientos de actuación y equipamiento adecuado en caso de emergencias
Limpieza y mantenimiento de los sistemas de drenaje urbano	Ahorro de agua
Prevención para que la escorrentía no entre en contacto con contaminantes	

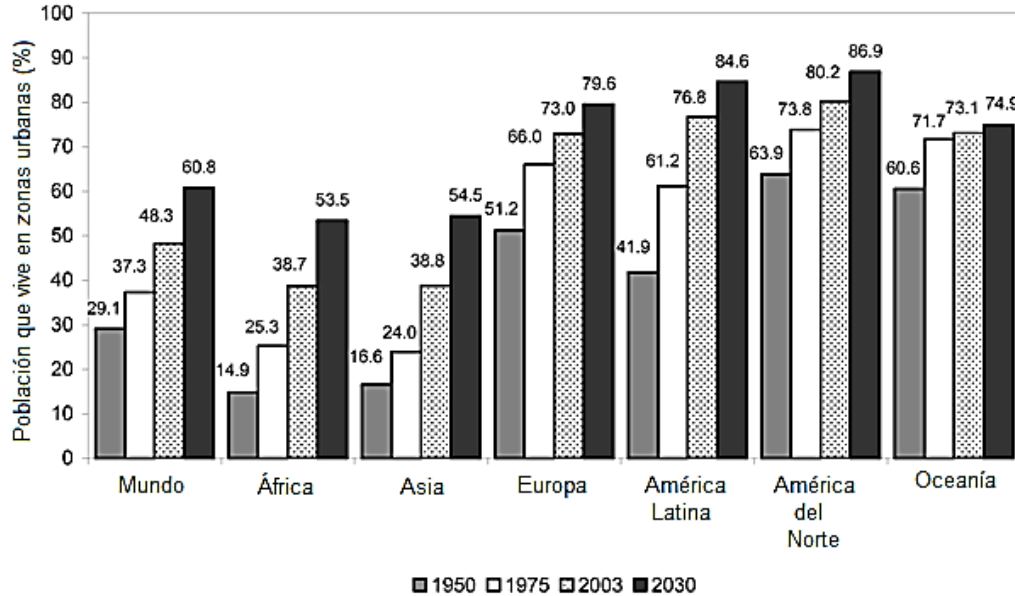
Los dos tipos de SUDS deben ser implementados en conjunto para optimizar su funcionamiento.

## 1.4 SUDS a nivel internacional

En varios países se han presentado cambios en la filosofía de drenaje desde mediados del siglo XX que resultan importantes alrededor del mundo. Antiguamente, se tenía la concepción de evacuar el agua lluvia rápidamente de los ambientes urbanos en general, y ahora se ha evidenciado que los alcantarillados pluviales en la mayoría de ciudades no tienen la capacidad para evacuar toda el agua generada por el cambio de la superficie.

En algunos lugares del mundo, existe un gran avance en la regulación y estudio de la calidad del agua que se entrega a los ríos y mares, como por ejemplo en Europa y Norteamérica (Fletcher, y otros, 2014). Varias tecnologías se están implementando para reducir el impacto ambiental como tanques de detención con elementos celulares, plantas de tratamiento de aguas residuales e industriales, entre otras.

Con el transcurrir de los años se puede ver un claro aumento en la población urbana en la mayoría de países del mundo (Vanegas & Flórez, 2012) como se puede observar en la **Gráfica 1-1** en donde se muestran datos históricos y una proyección al año 2030.



**Gráfica 1-1:** Porcentaje de personas viviendo en zonas urbanas en el mundo desde 1950 y proyectadas al 2030. Fuente: (Vanegas & Flórez, 2012)

Si esta tendencia continúa, para el 2030 más de la mitad de la población mundial vivirá en zonas urbanas (Vanegas & Flórez, 2012). Una evaluación de todas las grandes ciudades con limitación geográfica, muestra que la mayoría de ellas se encuentran en zonas en vía de desarrollo, especialmente en China, Asia Central, y América Latina (Martínez, 2015) y estas ciudades están ejerciendo una gran presión sobre los recursos naturales, especialmente sobre los recursos hídricos.

Uno de los pioneros de los SUDS, es el Reino Unido debido a la localización de sus poblaciones y a sus condiciones topográficas, puesto que se presentan pocas zonas de ladera habitadas, y ciudades con baja diferencia de altura con respecto a los cauces naturales de agua, lo que representa bajas pendientes en los sistemas de alcantarillado (Butler & Davies, 2011). En la década de 1990, en el Reino Unido se experimentaron dos cambios importantes. El primero es que la industria se reorganizó, y las empresas de suministro de agua potable y alcantarillado, mejoraron sustancialmente la gestión del

recurso hídrico (Butler & Davies, 2011). El segundo gran cambio fue el aumento de las regulaciones impuestas al sector industrial en el Reino Unido y otros países de la Unión Europea, protegiendo el medio ambiente, lo cual implicó fuertes restricciones y penalidades a quien no cumpliera con las exigencias mínimas ambientales (Butler & Davies, 2011).

Esto llevó a que se realizaran grandes inversiones en el Reino Unido en el campo de los alcantarillados y consecuentemente se redujera la carga contaminante que se vertía en el mar. Se construyeron grandes y numerosos túneles de almacenamiento para satisfacer los estrictos límites en las descargas de aguas pluviales y residuales en el mar (Butler & Davies, 2011).

Desde 1960 en el Reino Unido existe una asociación llamada CIRIA, cuyas siglas significan *Construction Industry Research and Information Association* (Asociación de Investigación e Información en la Industria de la Construcción). Esta es una asociación neutral, independiente y sin ánimo de lucro con base principal en Londres (CIRIA, 2015), cuya función es reunir organizaciones en torno a la construcción e industria con ideas en común para incentivar la investigación y los procesos constructivos buscando la sostenibilidad ambiental.

En el año 2007 fue lanzado en el Reino Unido el Manual de SuDS de CIRIA C697, el cual es un documento que brinda lineamientos para la planeación de proyectos en torno al manejo de aguas pluviales y residuales teniendo como objetivo su manejo sostenible. Este manual de SuDS fue publicado en conjunto con el Manual de Construcción de SuDS C698. El documento CIRIA C697 fue actualizado en el año 2015 con el nombre de "*The SuDS Manual C753*".

En Inglaterra y Gales en el 2010 se dio legislación a los SUDS y al manejo del agua lluvia en general (Duarte, 2014), y se creó el documento SAB (*SUDS Approbing Bodies*) el cual ha sido un instrumento de veeduría para el cumplimiento de las directrices del nuevo enfoque de drenaje del Reino Unido.

En otros países se ha investigado los SUDS, como por ejemplo en Escocia donde por medio de programas gubernamentales se han desarrollado tres tipos de SUDS: pavimentos permeables, filtros drenantes a lo largo de vías y pondajes regionales, observando un buen desempeño tanto en cantidad como en calidad del agua producto de la escorrentía superficial (Schlüter, Spitzer, & Jefferies, 2002). Estos tres tipos de SUDS fueron analizados cuantitativamente en la Expansión Oriental en *Dunfermline* (al norte de Edimburgo, Escocia), el cual fue un proyecto de urbanización residencial, comercial e industrial de 5.5 km<sup>2</sup> proyectado para 20 años (Susdrain, 2012), obteniendo resultados como una reducción en la producción de escorrentía superficial del 50%, una ampliación en los tiempos de respuesta de las cuencas urbanas de 45 a 145 minutos, y una absorción inicial de lluvia del orden de 2.27 mm (Schlüter, Spitzer, & Jefferies, 2002).

Con respecto a la calidad del agua producto de la escorrentía superficial, en *Dunfermline*, se observó que el pH tuvo pequeñas variaciones, mientras que parámetros como SST estuvieron entre 0 y 68 mg/l, presentando una mejora del 30% con respecto a las condiciones antes de implementar los SUDS. Los datos de DBO estuvieron por debajo de niveles mínimos medibles. Un punto a resaltar, es que la concentración de metales pesados estuvo por debajo de los niveles permitidos de acuerdo a los estándares de calidad ambiental (*Environmental Quality Standards*) para el agua superficial en Escocia (Schlüter, Spitzer, & Jefferies, 2002).

Otro ejemplo de aplicación de SUDS se puede encontrar en China, debido a que, de sus 557 ciudades, 400 están expuestas a inundaciones, y aunque son poco frecuentes, son una amenaza para la población civil (Geiger, 2000). En el año 2000 se desarrolló un estudio de SUDS en Beijing para determinar una medida que pudiera controlar las inundaciones en las ciudades, y al mismo tiempo maximizar la recarga de los acuíferos (Geiger, 2000). El estudio tuvo una duración de 4 años, en el cual se realizó una implementación de SUDS en dos lugares representativos de Beijing. El primero de estos sitios fue el Instituto de Ingeniería Geológica en *Bali Zhuang* junto con una zona residencial, y el segundo fue un nuevo desarrollo en *Tianxiu Garden* junto con la existente Fundación de Ingeniería Hidráulica, la cual tenía proyectada una renovación y futura expansión. El estudio arrojó resultados satisfactorios en la disminución de probabilidad de inundaciones, puesto que se logró una reducción en la producción de escorrentía superficial del 55% en el lugar de la implementación (Geiger, 2000).



En Australia el concepto WSUD (*Water Sensitive Urban Design*) fue propuesto como un enfoque alternativo de captación de agua lluvia, el cual implementa los SUDS como una parte fundamental en el desarrollo urbano. Este enfoque alternativo se refiere a una ingeniería destinada a integrar de forma sostenible el manejo del agua lluvia en el paisaje de la ciudad, reducir al mínimo el impacto ambiental y lograr armonía entre el agua y el ambiente urbano (Zhou, 2014). WSUD es una aproximación a la planeación y diseño urbano, que integra la gestión del ciclo del agua en su totalidad dentro del uso del suelo y los procesos de desarrollo (Department of Environment, Water and Natural Resources , 2015).

Uno de los casos más notables de implementación de WSUD en Australia en los últimos años, fue el proyecto *Homebush Bay* (Department of Environment, Water and Natural Resources , 2015) el cual consistió en la transformación de un área donde existía un sitio de sacrificio de ganado bovino y un depósito abandonado de armamento de la marina, en una sede para los juegos olímpicos del año 2000, utilizando innovadoras medidas para el tratamiento del agua y su conservación (Department of Environment, Water and Natural Resources , 2015). El agua lluvia fue tratada utilizando sedimentadores, cunetas verdes y humedales, siendo reutilizada en irrigación, sanitarios, y protección contra incendios. La reutilización del agua lluvia, junto con medidas de ahorro, redujeron en un 50% el uso de agua potable anualmente, y se logró una reducción en la escorrentía superficial del 30% aproximadamente (Department of Environment, Water and Natural Resources , 2015).

En los Estados Unidos y Nueva Zelanda, el termino LID (*Low Impact Development*) describe un enfoque que fomenta la interacción de los procesos naturales con el entorno urbano para preservar y recrear los ecosistemas. El desarrollo de bajo impacto LID pone énfasis en la conservación y el uso de elementos naturales, en combinación con controles hidrológicos a pequeña escala para mitigar los impactos adversos de la urbanización (Martínez, 2015). LID es una aproximación al desarrollo del suelo que trabaja con la naturaleza para manejar la escorrentía tan cerca de su generación como sea posible. Un caso de implementación de LID se realizó en el 2002 en la ciudad de *Stockton* en California, para lograr una reducción en el volumen de escorrentía superficial. La escorrentía después del desarrollo urbano, fue igualada a las condiciones antes del desarrollo para 85% de los casos, para una profundidad de lluvia de 24 horas (Winer-Skonovd, 2010).

En los Estados Unidos un LID efectivo incluye el uso de medidas en la gestión del agua lluvia, tanto estructurales como no estructurales que son un subgrupo de un conjunto de prácticas y estructuras conocidas como BMP (New Jersey Department of Environmental Protection, 2004). Estos BMP (*Best Management Practices*) que traduce Mejores Prácticas de Gestión, son usados para describir tipos de práctica o aproximación estructurada para prevenir la polución (Fletcher, y otros, 2014). El término BMP está enmarcado dentro del CWA (*Clean Water Act*) el cual fue implementado en Norteamérica en 1972. Hoy en día los BMP son vistos como una combinación de prácticas que son determinadas por medio de una evaluación de condiciones, examen de alternativas y apropiada participación pública para ser más efectivas (Villarreal, 2005). El uso del término BMP comenzó en el campo de la agricultura, y fue desarrollándose hacia las medidas que se deben tomar para prevenir la polución que puede ser transportada por el agua lluvia, tanto en las ciudades como en las zonas rurales.

En la gestión del drenaje urbano, el desarrollo se ha dado en su mayoría de manera informal, conducida por perspectivas locales y regionales, con entendimientos diferentes. El resultado de este tipo de aproximaciones, es que diferentes términos se han usado para llamar conceptos similares en diferentes partes del mundo, llevando a traslajos, contradicciones y confusión (Fletcher, y otros, 2014). Este documento se centra en los SUDS, aunque es importante conocer los demás conceptos y aproximaciones para tener una mirada integral en torno a la gestión del agua lluvia urbana.

## **1.5 SUDS en Colombia**

En Colombia la implementación de los SUDS aún se encuentra en una etapa inicial y se han realizado esfuerzos por parte de diversas entidades para fomentar el uso de estas técnicas. Normativamente hay algunos avances, y se han publicado documentos que han llevado a los profesionales encargados del desarrollo de las ciudades a pensar en el tema de SUDS y a replantearse la manera de desarrollar los proyectos en torno al agua, como por ejemplo las normas de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, o las cartillas de la Secretaría Distrital de Ambiente. A nivel nacional existen diferentes leyes, decretos, resoluciones y estudios que hacen énfasis en la importancia de la protección del medio ambiente, el aprovechamiento de los recursos de manera sostenible y la necesidad de implementar medidas que contribuyan al mejoramiento ambiental (Duarte, 2014).

En el año 2016 se implementó en la normativa de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, el uso de estos sistemas como un elemento obligatorio. En la norma NS-085 “Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado”, actualizada en el año 2020, se menciona la obligatoriedad de implementación de estos sistemas, ya que, para Bogotá en el caso de sistemas de recolección de aguas pluviales, dentro de las alternativas generadas se debe incluir por lo menos una solución que incluya SUDS (EAAB, 2020). En el año 2018 fue lanzada la norma NS-166, llamada “Criterios para diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)” por la EAAB. Este documento es un acercamiento más detallado a estos sistemas.

Existen diversas publicaciones como el Documento Técnico de Soporte SUDS emitido por la Secretaria Distrital de Ambiente en el año 2011, y la Cartilla de Andenes de la Secretaria Distrital de Planeación que tuvo la última actualización en el año 2016 en la cual se sugiere el uso de elementos SUDS como los tanques con elementos celulares. Esto ha incentivado el uso de estos sistemas, y actualmente se está generando un cambio gradual en los sistemas de drenaje. Cronológicamente, se pueden mencionar los documentos de la **Tabla 1-3** en Colombia relacionados con los SUDS (Duarte, 2014).

**Tabla 1-3:** Documentos relacionados con la implementación de SUDS en Colombia

Acuerdo Distrital 391 de 2009. “Por medio del cual se dictan lineamientos para la formulación del Plan Distrital de Mitigación y Adaptación al cambio climático y se dictan otras disposiciones” Concejo de Bogotá, D. C.
Acuerdo Distrital 418 de 2009 "Por el cual se promueve la implementación de tecnologías arquitectónicas sustentables, como techos o terrazas verdes, entre otras en el D. C. y se dictan otras disposiciones" Concejo de Bogotá, D. C.
Resolución 6619 de 2011. "Por la cual se establecen las características y condiciones para el diseño e implementación de jardines verticales en el Distrito Capital y se toman otras determinaciones" Secretaría distrital de ambiente
Resolución 3654 de 2014. “Por la cual se establece el programa de reconocimiento Bogotá construcción sostenible”, y se deroga la resolución 5926 de 2011. "Por la cual se crea y regula el programa de reconocimiento ambiental a Edificaciones Ecoeficientes – PRECO-". Secretaría distrital de ambiente

Resolución 6423 de 2011. "Por medio de la cual se adopta la Guía Técnica de Techos Verdes" Secretaría distrital de ambiente
Resolución 6523 de 2011. "Por la cual se reglamentan y adoptan los sistemas urbanos de drenaje sostenibles SUDS para el plan de ordenamiento zonal norte POZN". Secretaría distrital de ambiente
Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible 2011. Secretaría Distrital de Planeación
Decreto 561 de 2015. Cartilla de Andenes. IDU 2015 en donde se sugiere el uso de tanques geocelulares para detención de agua lluvia.
Norma NS-085 Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado Acueducto de Bogotá, en donde se menciona que se debe implementar al menos una solución SUDS en el diseño y construcción de una red pluvial 2017. EAAB 2020
Resolución 0330 de 2017. "Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Ministerio de ambiente, ciudad y territorio.
Norma NS-166 Criterios para diseño y construcción de sistemas urbanos de drenaje sostenible, EAAB, 2018.
Resolución 0799 de 2021. "Por la cual se modifica la Resolución 330 de 2017". Ministerio de ambiente, ciudad y territorio.

En Colombia se han realizado investigaciones por varias universidades, como por ejemplo la Universidad de los Andes que publicó el documento "Criterios para una planeación estratégica de SUDS en Bogotá" (Hernández, 2011), o la Universidad Nacional de Colombia con publicaciones como la "Evaluación de una cubierta verde como sistema de drenaje urbano" (León, 2014), que han contribuido al conocimiento de los SUDS acorde con las necesidades de nuestro medio.

Los países en vía de desarrollo tienen la gestión del agua lluvia en un estado incipiente y la calidad del agua de drenaje urbano está lejos de cumplir con características adecuadas, lo cual es una oportunidad para desarrollar investigaciones en torno a los SUDS. El concepto de desarrollo sostenible que, en su definición más aceptada, establece que es aquel desarrollo humano que atiende las necesidades de las generaciones presentes, sin poner en peligro la capacidad para atender las necesidades de las generaciones futuras (Cuéllar, 1995), son el eje fundamental de los SUDS.

## 1.6 Tanques de detención y retención de agua lluvia

Una manera eficiente de reducir los caudales pico minimizando el impacto ambiental de la urbanización, es por medio de tanques de detención o retención. La detención se refiere a mantener la escorrentía por un corto periodo de tiempo y después entregarla de manera controlada al alcantarillado o a los cauces naturales de agua, donde esta regresa al ciclo hidrológico, esto es, básicamente almacenar el agua lluvia para una entrega posterior controlada. La detención no reduce el volumen total de escorrentía, sino que lo redistribuye reduciendo el caudal pico de salida (Butler & Davies, 2011). Por otra parte, la retención se basa en mantener el agua en un sistema por un considerable tiempo. El agua puede nunca ser descargada a un colector de agua lluvia y en cambio puede ser consumida por plantas, evaporada, o infiltrada en el terreno (Butler & Davies, 2011).

En Colombia el uso de los tanques de detención como elemento de un SUDS, no es masivo aún. Esto se debe en parte, a la falta de regulación y exigencia por parte de las autoridades ambientales o las entidades que brindan los servicios públicos. Es importante mencionar que hay excepciones, como por ejemplo en Chía, Cundinamarca, en donde la entidad prestadora de servicios domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo Emserchia, después de evaluar una serie de variables hidrológicas e hidráulicas, determina si exige o no un control en el caudal que cada proyecto entrega a los alcantarillados pluviales, ya sea mediante tanques de detención u otra estructura diseñada para tal fin (EMSERCHÍA, 2010).

Estos tanques de detención a menudo se realizan en concreto reforzado, como por ejemplo en el proyecto residencial Colinas del Bosque localizado en Chía, en donde debido a la inexistencia de alcantarillado pluvial en el sector se debió implementar un sistema de amortiguamiento y reciclaje de la escorrentía superficial generada en el predio (Hydros Chía, 2011).

Para la construcción de un sistema de detención de agua lluvia se puede usar un pondaje o un tanque en concreto como tradicionalmente se ha realizado, sin embargo, existe desde mediados de la década de 1980 una tecnología alternativa que reemplaza estas estructuras de concreto por elementos celulares plásticos en forma de celdas. Son

fabricadas en su mayoría en polipropileno y son resistentes a las condiciones típicas de aguas pluviales y a los esfuerzos verticales y horizontales que se pueden presentar en una instalación enterrada. Una ilustración de un tanque de detención con elementos celulares se puede observar en la **Figura 1-2**.



**Figura 1-2:** Esquema de un tanque de detención con elementos celulares. Fuente: (ACO DRAIN, 2015)

A mediados de la década de 1980, tanques construidos con celdas plásticas fueron instalados por primera vez en Europa, junto con los pavimentos permeables. Su uso se masificó a principios de la década de 1990 y a finales de esta misma década estas estructuras fueron introducidas al Reino Unido (CIRIA, 2016). Durante las últimas dos décadas, ha habido un rápido crecimiento en la oferta de diferentes tipos de celdas geocelulares y ahora son usadas ampliamente para detención, retención, y almacenamiento de aguas pluviales. Estas celdas también son usadas para la conducción de agua lluvia (CIRIA, 2015).

Generalmente, cuando se construyen sistemas de detención de aguas lluvias, se piensa en tanques en concreto o pondajes, sin embargo, algunas de las ventajas que tienen los tanques con elementos celulares son:

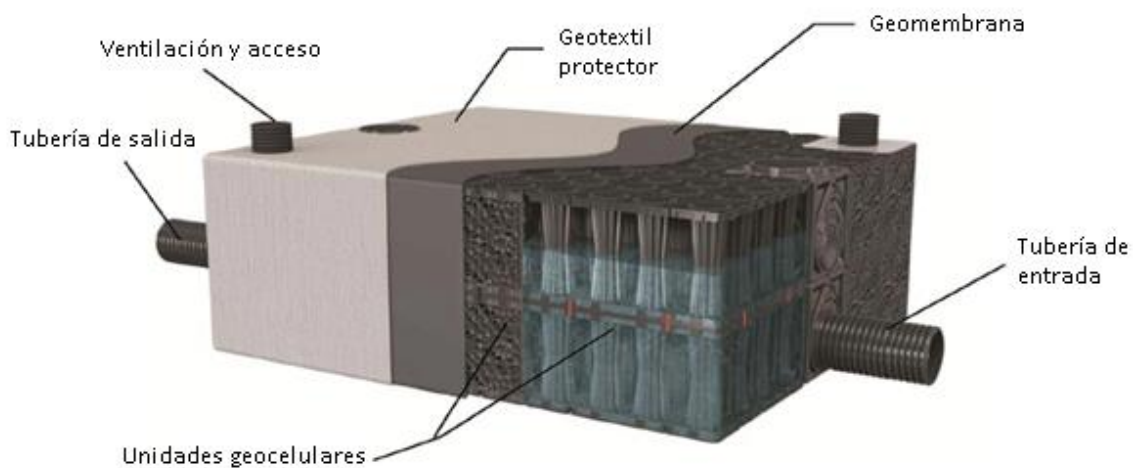
- Alta velocidad de construcción
- Menores costos en mano de obra

- Bajos o nulos desperdicios de material
- Posibilidad de infiltración de agua en el suelo (cuando las condiciones del suelo lo permiten, y cuando esta infiltración no afecta ninguna estructura adyacente)

En términos de costos, se ha evidenciado que los tanques con elementos celulares pueden tener ventajas frente a las estructuras tradicionales por algunos de los factores mencionados anteriormente. La alta velocidad de construcción, la menor mano de obra requerida y los bajos desperdicios, han demostrado que estos sistemas pueden tener un costo competitivo con respecto al costo de los sistemas tradicionales (ACO DRAIN, 2015).

La naturaleza modular de los tanques celulares, hace que se puedan adaptar a las condiciones del terreno y se puedan utilizar, tanto para detención como para retención de agua lluvia. También, estos tanques pueden almacenar agua para ser reutilizada en usos como riego de jardines, o lavado de superficies. Para uso como agua de sanitarios, se recomienda un tratamiento posterior para aumentar su calidad (ACO DRAIN, 2015).

Estos tanques generalmente se construyen en polipropileno y no se recomienda su uso para aguas residuales, o industriales debido a que los químicos presentes en este tipo de aguas pueden deteriorar la estructura de los mismos. Este tipo de tanques debe estar recubierto en una membrana geosintética como se puede observar en la **Figura 1-3**.



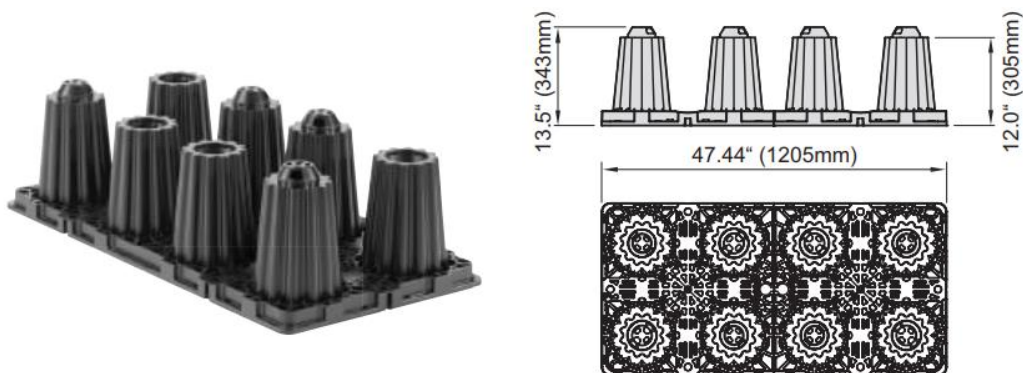
**Figura 1-3:** Recubrimiento con geomembrana y geotextil de un tanque de detención con elementos celulares. Fuente: (CIRIA, 2016)

Los tanques con elementos celulares son usualmente construidos usando celdas en forma cúbica con una alta relación de vacío, típicamente superior al 95%. Estas unidades individuales son dispuestas para formar un tanque, rodeado ya sea de una geomembrana impermeable, o de un geotextil permeable, o en ciertos casos, cuando puede haber punzonamiento por material anguloso, utilizando las dos protecciones.

Se puede decir que este tipo de tanque cumple con dos funciones principalmente. La primera es almacenar agua en todos sus espacios vacíos, y la segunda es generar una resistencia estructural, la cual se estima en el caso de las celdas utilizadas en esta investigación, *ACO StormBrixx* en  $420 \text{ kN/m}^2$  en su parte superior, y  $90 \text{ kN/m}^2$  en sus paredes verticales (ACO DRAIN, 2015).

Se recomienda que estos tanques, cuenten con un control de flujo en su efluente y con un sistema de sedimentación previo al tanque (SUSDRAIN, 2012). Para esto se recomienda instalar un sedimentador aguas arriba del tanque, y un control del caudal de salida como por ejemplo controles de flujo de vórtice, válvulas reguladoras de caudal, vertederos de excesos, u orificios sumergidos. Estas estructuras de salida reducen el caudal para lograr el efecto de atenuación para un determinado periodo de retorno.

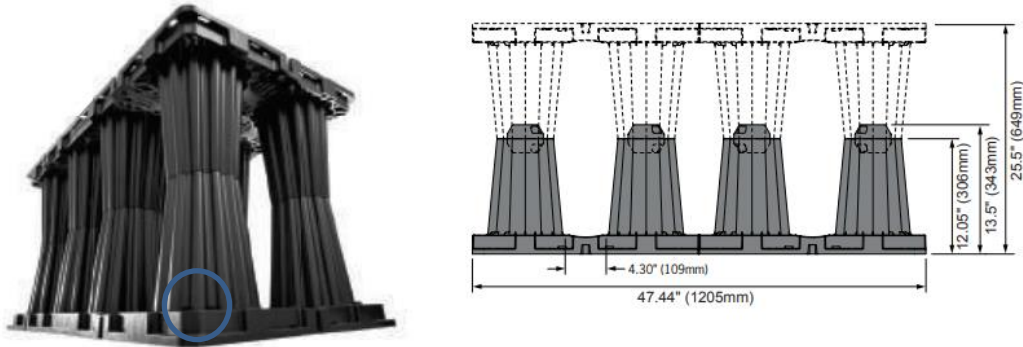
Las celdas seleccionadas para este estudio fueron las llamadas *StormBrixx* de la marca alemana ACO, debido a la posibilidad de realizar inspecciones entre las columnas que se forman por su forma estructural. Estas son celdas fabricadas en polipropileno reciclado y reciclable, las cuales permiten su armado de forma modular para tener flexibilidad de acuerdo a las condiciones geométricas del tanque. Cada celda está conformada por dos módulos cuyas dimensiones se muestran en la **Figura 1-4**.



**Figura 1-4:** Dimensiones de un módulo ACO *StormBrixx* HD. Fuente: (ACO DRAIN, 2015)

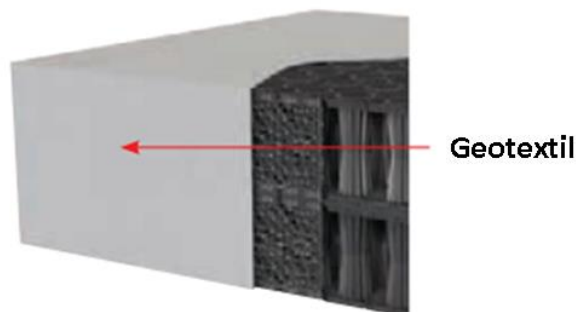


Estos módulos se ensamblan uno encima de otro formando una estructura que tiene capacidad de almacenar agua, y de soportar carga vertical y lateralmente. El ensamble se muestra en la **Figura 1-5**, en donde se puede apreciar la estructura celular en forma de columna, la cual se llena de agua en su interior por medio de intersticios en su parte interior como se muestra en el círculo de la siguiente figura.



**Figura 1-5:** Celda ACO StormBrixx conformada por dos módulos. Fuente: (ACO DRAIN, 2015)

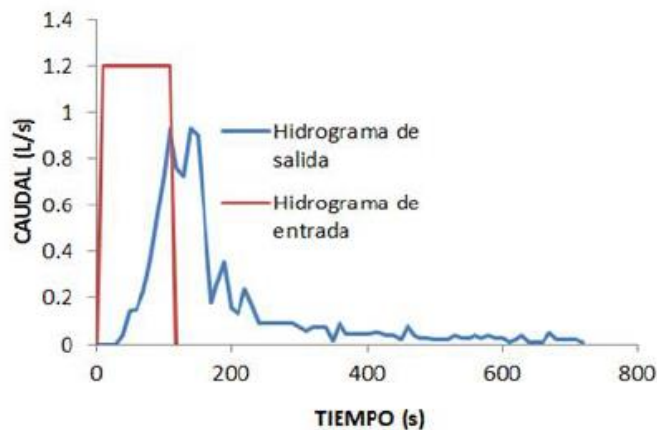
Con estas celdas se arman los tanques de acuerdo a las dimensiones necesarias, instalando en sus paredes exteriores paneles laterales para soportar las cargas horizontales generadas por el suelo. Estas celdas deben estar protegidas con un geotextil para que el material fino no ingrese en ellas como se muestra en la **Figura 1-6**.



**Figura 1-6:** Recubrimiento de los elementos celulares con geotextil. Fuente: (ACO DRAIN, 2015)

Varios experimentos con este tipo de tanques se han realizado en Colombia, como por ejemplo en la Pontificia Universidad Javeriana en donde se midieron los caudales a través de un tanque construido con celdas plásticas (Álvarez & Celedón, 2012). El trabajo consistió en medir los caudales al ingreso y a la salida del tanque con elementos celulares y observar el efecto de atenuación del mismo.

La investigación de la Universidad Javeriana fue realizada con un tanque que se soportó sobre 4 vigas de madera y tenía una longitud de 2 metros con un ancho de 50 cm y una altura de 39 cm. El volumen total fue de  $0.37 \text{ m}^3$  y se instaló recubriéndolo con material filtrante, además de una protección con un geotextil para evitar la entrada de finos. Se dispuso un envase de 36 cm de alto, 60 cm de ancho y un metro de largo para la medición de los caudales (Álvarez & Celedón, 2012). El ensayo consistió en ingresar un caudal conocido en la parte superior del tanque y medir el caudal al final del mismo. En la **Gráfica 1-2** se puede observar uno de los efectos de atenuación del caudal en esa investigación.



**Gráfica 1-2:** Hidrogramas de entrada y salida resultado de la simulación realizada en el laboratorio de Pruebas y Ensayos de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Fuente: (Álvarez & Celedón, 2012).

En la **Gráfica 1-2** se puede ver que el caudal de entrada  $Q_e$  tiene un valor pico de aproximadamente 1,2 l/s y un caudal de salida  $Q_s$  menor a 1 l/s. Esto quiere decir que el sistema redujo el caudal, entregando lentamente el agua a la estructura de salida.

## 1.7 Métodos de cálculo de tanques de detención

En la actualidad los métodos de cálculo de los tanques de detención, se basan en calcular un volumen con las condiciones hidrológicas de la zona de instalación, y se asume que el tanque tiene un comportamiento de piscina nivelada. Se realiza un dimensionamiento, es decir, una aproximación inicial de volumen la cual es ajustada posteriormente a las condiciones geométricas del tipo de tanque a utilizar, y a condiciones particulares de cada sitio de instalación.

Existen diversos métodos para realizar un dimensionamiento de volumen de almacenamiento para un tanque de detención, y en muchos casos solo son aplicables en el sitio que fueron desarrollados. Como por ejemplo el método del *British Standard* que sugiere almacenar el volumen que resulta de multiplicar 12 mm de profundidad de lluvia por el área impermeable (Watkins, 1991), o el método Danés que sugiere 1 m<sup>3</sup> por cada 30 m<sup>2</sup> de área impermeable (Watkins, 1991). Existen algunas recomendaciones locales en Estados Unidos, por ejemplo, en el Condado de *Montgomery - Maryland*, donde se requiere un almacenamiento igual a 12.7 mm (0.5 pulg) de escorrentía generadas por el área aferente (Guo & Urbonas, 1996) y el de la Administración de los Recursos Hídricos de Maryland (*Maryland Water Resources Administration*) que sugiere un volumen igual a 2.5 veces la escorrentía generada por la lluvia promedio (Guo & Urbonas, 1996).

En Nueva York se sugiere que un almacenamiento de agua lluvia tenga un volumen igual a la escorrentía de una lluvia de periodo de retorno de 4 meses homogénea en el área aferente, basado en una revisión de la distribución de la escorrentía (Roesner, Urbonas, & Sonnen, 1989). Todos estos cálculos se utilizan para encontrar un volumen de almacenamiento razonable y óptimo para un tanque de detención, sin embargo, no tienen en cuenta la variabilidad espacial de la lluvia.

A pesar de que se pueden encontrar muchos métodos y guías para calcular el volumen de almacenamiento, ninguno es universalmente aceptado, porque estos dependen de las condiciones del sitio donde se desarrollaron. Existen varias alternativas de cálculo y cada una de estas arrojará un resultado diferente, por lo que se debe usar el criterio y seleccionar el más apropiado. Existen algunos métodos que utilizan variables hidrológicas para realizar

el dimensionamiento del volumen de almacenamiento del tanque y entre los más utilizados se encuentran:

- Método racional modificado
- Método del hidrograma triangular
- Método de la envolvente de lluvias

Estos métodos tienen las siguientes suposiciones:

- El área delimitada no presenta escorrentía superficial adicional aportante de áreas adyacentes
- No hay pérdidas de agua por infiltración, o evaporación
- La precipitación es homogénea en el área aferente
- La superficie del agua dentro de la estructura de almacenamiento es horizontal

Es necesario seleccionar un periodo de retorno para aplicar estos métodos de dimensionamiento. En la normativa internacional se pueden encontrar algunas recomendaciones, por ejemplo, la normativa sueca sugiere dimensionar un tanque de detención utilizando el método de la envolvente de lluvias con un periodo de retorno de 2 años (Watkins, 1991). A pesar de que los ingenieros especialistas en control de inundaciones a menudo consideran pequeño un evento de precipitación con periodo de retorno de 2 años, este produce una escorrentía mayor al 95% de los eventos que pueden ocurrir en una cuenca (Guo & Urbonas, 1996).

En Colombia se recomienda que se transite a través de los SUDS toda la escorrentía que esté asociada con un periodo de retorno de 2 años, o menor (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011). La escorrentía asociada con un periodo de retorno mayor se evacuará a través de tuberías de excesos incorporadas como parte integral del diseño y construcción de éstos nuevos sistemas.

### **Tránsito de piscina nivelada**

El tránsito de piscina nivelada es un procedimiento para calcular el hidrograma de flujo de salida desde un almacenamiento con una superficie de agua horizontal, dado su

hidrograma de entrada y sus características de almacenamiento – caudal de salida (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1949).

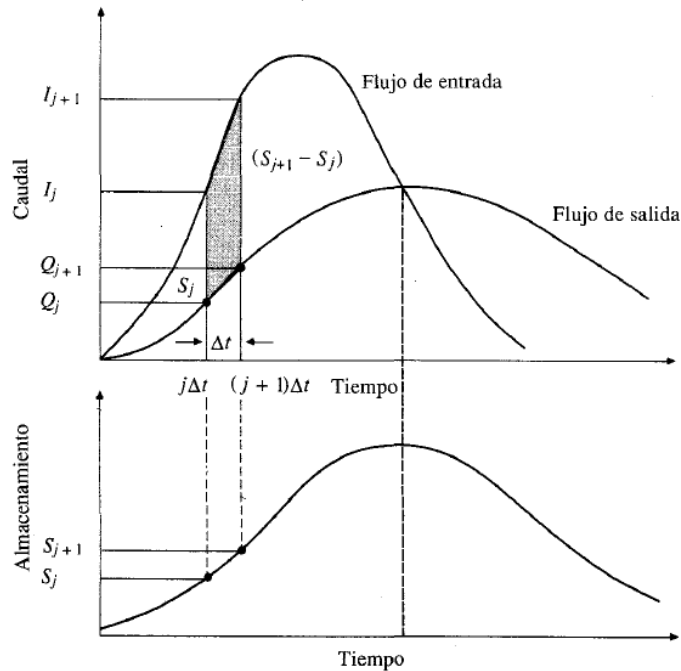
Este es un procedimiento matemático que modela la respuesta de un almacenamiento a un determinado evento de precipitación, transitando un hidrograma a través de una estructura para determinar cómo varía el nivel del agua, el caudal de salida, y los valores de volumen durante y después del evento de interés (BENTLEY, 2017).

El método es aplicado con base en la relación fundamental de continuidad:

$$\Delta S = \Delta t(I - O) \quad (1)$$

Para cada lapso de tiempo del hidrograma de entrada, esta ecuación es resuelta para calcular el cambio en el volumen para ese único lapso de tiempo. Si el caudal de entrada es mayor que el de salida, el cambio en el almacenamiento es positivo y el nivel de agua aumenta. La ecuación de continuidad ( 1 ) se integra sobre cada intervalo de tiempo como se ilustra en la **Gráfica 1-3** y se resuelve la ecuación ( 2 ) para la total duración del evento de precipitación.

$$\int_{S_j}^{S_{j+1}} dS = \int_{j\Delta t}^{(j+1)\Delta t} I(t) dt - \int_{j\Delta t}^{(j+1)\Delta t} O(t) dt \quad (2)$$

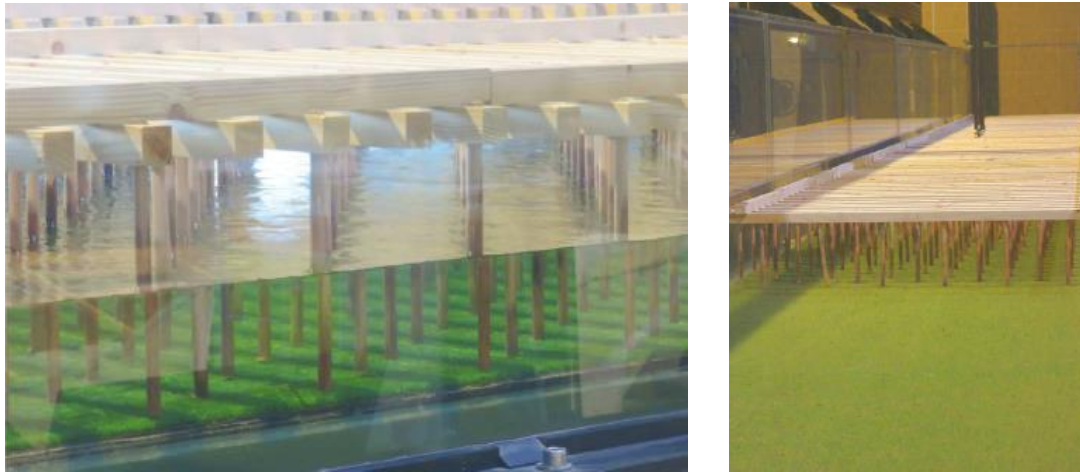


**Gráfica 1-3:** Cambio de almacenamiento durante un periodo de tránsito,  $\Delta t$ . Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1949)

Este método considera las siguientes suposiciones:

- La superficie del agua dentro del almacenamiento es horizontal en todo momento
- Dentro del almacenamiento no hay ninguna interferencia
- La relación almacenamiento – caudal de salida es lineal de primer orden

La diferencia en el tanque construido con elementos celulares es su estructura interna, puesto que esta genera afectaciones al comportamiento hidráulico. El tanque de detención con elementos celulares, tiene una estructura que genera vórtices y pérdidas de energía, que hacen muy poco probable la presencia de flujo uniforme en su interior. El tanque analizado en esta investigación tiene columnas que pueden ser modeladas como cilindros, como por ejemplo en el experimento realizado en la Universidad *Mont Blanc* en la región de Savoy, Francia, en el que en un canal artificial de 18 m de largo y 1 m de ancho se varió la rugosidad del suelo y se instalaron cilindros para observar el comportamiento del perfil de flujo (Dupuis, Proust, Berni, & Paquier, 2018). Un esquema de esta instalación se muestra en la **Fotografía 1-2** y la **Fotografía 1-3**.



**Fotografía 1-2 y Fotografía 1-3:** Vista lateral de configuración de cilindros sobre superficie rugosa y configuración de canal con estructuras cilíndricas. Fuente: (Dupuis, Proust, Berni, & Paquier, 2018)

En la revisión bibliográfica, no se encontró que se haya realizado un estudio a una estructura similar a la del tanque de detención con elementos celulares, que se está investigando en este documento.



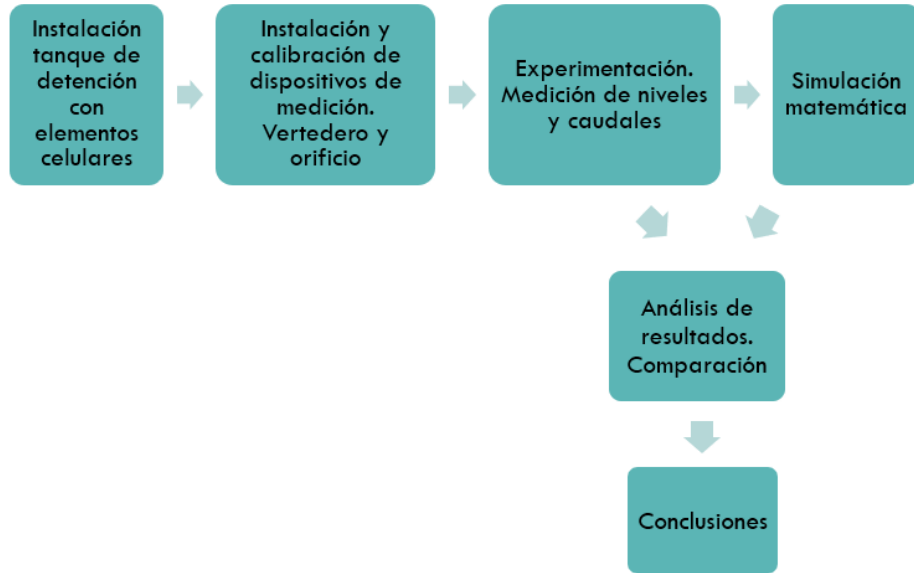


## 2. Metodología

En el presente capítulo se describen los materiales y métodos empleados para determinar la diferencia entre el comportamiento hidráulico en un tanque de detención construido con elementos celulares en el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos (LEH-UN), con respecto al comportamiento hidráulico bajo la suposición de piscina nivelada.

Se hace una descripción de cómo se realizó el dimensionamiento de volumen de almacenamiento y el proceso de instalación. Se explica el diseño experimental y se muestra la instrumentación utilizada para realizar las mediciones del comportamiento hidráulico, es decir, la variación de nivel y el caudal de entrada y salida del tanque. Se muestra en que consistió la simulación matemática realizada con el programa de cómputo *Storm and Sanitary Analysis*.

Finalmente, se expone el método estadístico utilizado para evaluar los resultados, el cual es un análisis de varianzas ANOVA, con el cual se acepta o rechaza la hipótesis nula. Un diagrama de flujo de la metodología se muestra en la **Figura 2-1**.



**Figura 2-1:** Metodología de investigación.

## 2.1 Localización

El tanque se instaló en el costado nororiental del LEH-UN, cuya localización en la ciudad universitaria se puede observar en la **Fotografía 2-1** y en la **Fotografía 2-2**. Este fue conectado por medio de una tubería de Ø8", a la parte norte de la cubierta de este edificio correspondiente a 450 m<sup>2</sup> como área aferente, la cual es drenada actualmente por medio de canaletas longitudinales que conducen el agua a bajantes de agua lluvia de Ø6" en PVC.



**Fotografía 2-1:** Localización Laboratorio Ensayos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá. Fuente: (GOOGLE EARTH, 2015)



**Fotografía 2-2:** Localización de instalación de tanque de detención de agua lluvia al costado nororiental del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos. Fuente: (GOOGLE EARTH, 2015)

Este sitio fue seleccionado puesto que cuenta con la posibilidad de delimitarse un área aferente con precisión, y además cuenta con una caja de inspección a menos de 3 metros en donde se puede descargar el agua lluvia, como se puede observar en la **Fotografía 2-3**. Adicionalmente, después de una revisión de planos de redes existentes, se evidenció que en el lugar de instalación del tanque no se presentan interferencias con otras redes.



**Fotografía 2-3:** Sitio de instalación enterrada del tanque de detención de agua lluvia.  
Fuente: (GOOGLE EARTH, 2015)

La instalación del tanque se realizó bajo césped, se conectaron las tuberías de drenaje de la cubierta por medio de un colector principal a la entrada del tanque, y se conectó a la salida una tubería de menor diámetro, generando una detención de agua lluvia antes de la entrega a la caja de inspección. Esta detención se realizó con el fin de entregar un caudal que se asemeje al caudal existente antes del desarrollo, es decir, antes de la construcción del LEH-UN.

## 2.2 Dimensionamiento

### Volumen de detención

Para determinar el volumen de instalación del tanque, se realizó un dimensionamiento con el método racional modificado, debido a que se dispone de la curva IDF de la estación UNIV NACIONAL – IDEAM cercana al sitio de instalación. El procedimiento de este dimensionamiento se muestra con detalle en el **Anexo C**

El método racional modificado es un método que sirve para construir hidrogramas a partir de una curva IDF, utilizando el método racional para calcular el caudal pico para lluvias con duración mayor que el tiempo de concentración. Es una extensión del método racional, y se utiliza para desarrollar hidrogramas usados en el diseño de almacenamientos, más que solo caudales pico (Mays & Tung, 2002).

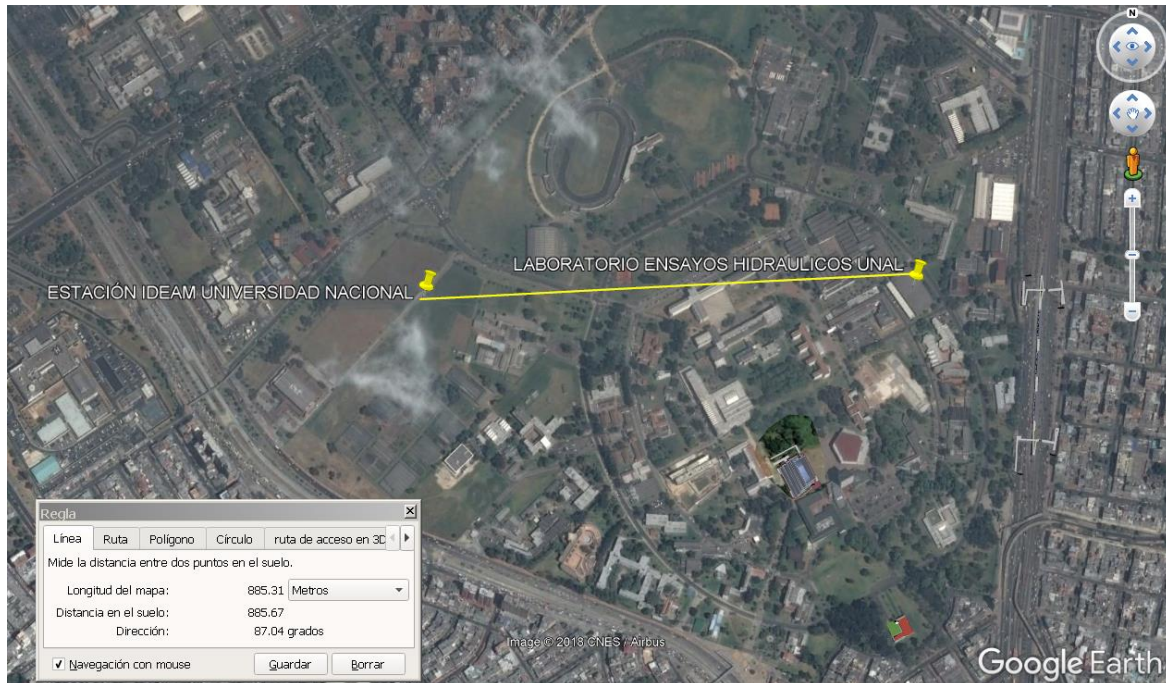
Con este método se calculó un volumen de almacenamiento del tanque de detención dadas unas condiciones antes y después del desarrollo. Este método se recomienda para áreas menores a 12 Ha (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1949). La forma de los hidrogramas generados por este método es trapezoidal y asume que el tiempo de concentración de la cuenca (el tiempo en el que el caudal crece hasta su valor pico), y el tiempo en el que el caudal decrece a su valor inicial son iguales.

Con la información pluviográfica y topológica del lugar de diseño antes y después del desarrollo, se construyó un hidrograma teórico de entrada y de salida, y el área que hay entre estos dos hidrogramas representa el volumen de almacenamiento necesario para emular las condiciones de caudal que había antes del desarrollo.

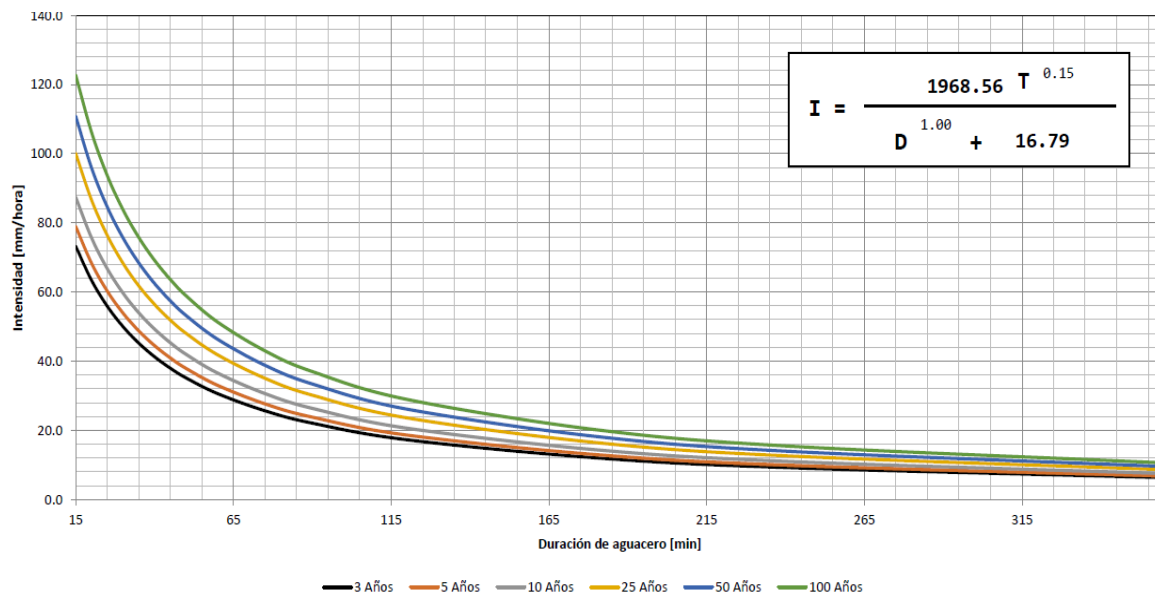
Para aplicar este método se debe definir un periodo de retorno y para el diseño de SUDS, el recomendado es de 2 años (Secretaria Distrial de Ambiente, 2011). En esta investigación se utilizaron los periodos de retorno de 2, 5 y 10 años para observar la variabilidad del volumen.

Para calcular el volumen de detención, se usó la curva IDF de la estación climatológica principal UNIV NACIONAL que está localizada aproximadamente a 886 metros del sitio de

la instalación del tanque, como se puede observar en la **Fotografía 2-4**. Las coordenadas de esta estación son latitud 4.63° y longitud -74.10° (IDEAM, 2012).



**Fotografía 2-4:** Localización estación climatológica UNIV NACIONAL - IDEAM. Fuente: (GOOGLE EARTH, 2015)



**Gráfica 2-1:** Curva IDF de la estación climatológica UNIV NACIONAL – IDEAM. Fuente: (INGETEC, 2015)

La ecuación de la curva IDF que suministra el IDEAM para la estación climatológica UNIV NACIONAL es:

$$i = \frac{1968.56 Tr^{0.15}}{D^{1.00} + 16.79} \quad (3)$$

Donde:

*Tr* es el periodo de retorno, años

*D* es la duración de la tormenta, minutos

*i* es la intensidad de lluvia, mm/h

Los resultados de volumen de los tres periodos de retorno 2, 5 y 10 años, se muestran en la **Tabla 2-1**.

**Tabla 2-1:** Resumen de resultados del dimensionamiento del tanque.

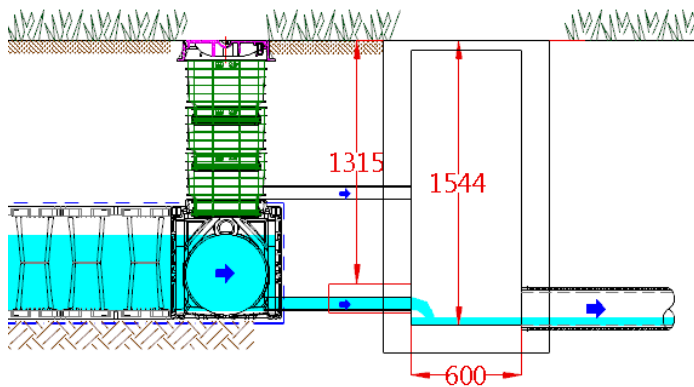
RESULTADOS DIMENSIONAMIENTO	Volumen			Caudal Pico después del desarrollo			Caudal pico antes del desarrollo		
	(m <sup>3</sup> )			(l/s)			(l/s)		
Periodo de retorno	2	5	10	2	5	10	2	5	10
Mét. Racional Modificado	9.49	10.89	12.09	3.25	3.73	4.14	1.37	1.57	1.74

El máximo volumen de almacenamiento fue de 12.09 m<sup>3</sup>, para un periodo de retorno de 10 años, calculado con el método racional modificado. De acuerdo con la disponibilidad de las celdas y su geometría, se instaló el tanque de detención con elementos celulares de 10.22 m<sup>3</sup>, lo cual se aproxima al volumen resultado para un periodo de retorno de 5 años.

De acuerdo con los valores de volumen de la **Tabla 2-1**, teniendo en cuenta que el área aferente es de 450 m<sup>2</sup>, se podría tener un estimado de volumen de almacenamiento de referencia para un periodo de retorno de 5 años, que consiste en que cada 40 m<sup>2</sup> de área impermeable, se recomienda instalar 1 m<sup>3</sup> de almacenamiento. Esto es similar a la recomendación del método danés, el cual sugiere instalar 1 m<sup>3</sup> de almacenamiento por cada 30 m<sup>2</sup> de área impermeable (Watkins, 1991). Estos datos no deben ser usados como una recomendación de diseño, sino como un resultado particular que se obtuvo en esta investigación.

### Estructura de salida

Para que el caudal de salida del tanque de detención sea menor o igual al caudal que teóricamente existía antes del desarrollo, se instaló una estructura de salida que genere esta condición. La descarga del tanque se realizó a través de una tubería instalada en el fondo del mismo, la cual tiene un comportamiento hidráulico que se calculó como un orificio sumergido que entrega a una estructura cilíndrica exterior, como se puede observar en la **Figura 2-2**. La diferencia con un orificio sumergido es que la tubería genera pérdidas por fricción, las cuales fueron tenidas en cuenta en el coeficiente de descarga.



**Figura 2-2:** Esquema de conexión de la tubería de salida del tanque de detención.

La ecuación que relaciona el caudal de descarga con el nivel es:

$$Q = C_d A \sqrt{2gh} \quad (4)$$

Donde:

$Q$  es el caudal,  $m^3/s$

$C_d$  es el coeficiente de descarga, adimensional

$A$  es el área del orificio sumergido

$g$  es la gravedad,  $m/s^2$

$h$  es la altura de lámina de agua sobre el eje central del orificio sumergido, m

El proceso de dimensionamiento del tubo de descarga, se realizó asumiendo un diámetro de manera que el caudal de descarga calculado inicialmente, se asemeje al valor del caudal antes del desarrollo  $Q_A$ . Este proceso se repitió de manera iterativa hasta ajustar el



resultado a un diámetro comercial que aproximara el caudal a condiciones supuestas de antes del desarrollo. Con este resultado de diámetro obtenido, se realizó la instalación y la simulación matemática.

Para observar la variabilidad del coeficiente de descarga se aplicó la ecuación de Bernoulli entre el punto A y el punto C en la **Figura 2-4**. El desarrollo de esta ecuación se puede observar en el **Anexo D**. Una vez instalado el tanque y antes de realizar los experimentos, el coeficiente de descarga fue calibrado.

Esta estructura de salida fue complementada con un rebose para el caso en el que se presente un taponamiento, o un evento de precipitación que supere los periodos de retorno analizados.

## 2.3 Instalación del tanque

La instalación del tanque tuvo una duración de diez días y se realizó en el año 2018 en el mes de mayo. Para ello se contó con maquinaria proporcionada por la Universidad.

### Consideraciones geotécnicas

En el sitio de instalación fue realizado un estudio de suelos por una firma consultora para una remodelación del LEH-UN proyectada (Ingenieros Consultores de Proyectos Civiles G&V, 2017), lo cual permitió prever las condiciones de la excavación y la profundidad del nivel freático.

De acuerdo con el tipo de suelo arcilloso encontrado, la excavación realizada para instalar el tanque presentó una alta estabilidad. El ángulo de fricción del suelo en la capa de profundidad desde los 0.5 m hasta los 2 m de profundidad, es de  $\phi=19^\circ$  (Ingenieros Consultores de Proyectos Civiles G&V, 2017) lo que permitió realizar una excavación auto sostenible, es decir, sin necesidad de utilizar un tablestacado.

El estudio geotécnico realizado en el LEH-UN, reportó la profundidad del nivel freático en cuatro apiques cerca de la zona de instalación con los nombres de P1, P2, P3 y P4, y se

pueden identificar en la **Fotografía 2-5**. El apique más cercano es el P-4, ya que esta exactamente en sitio de instalación del tanque.



**Fotografía 2-5:** Apiques disponibles según estudio de suelos realizado alrededor del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos. Fuente: (Ingenieros Consultores de Proyectos Civiles G&V, 2017)

El nivel freático presenta una profundidad variable en la zona, como se puede observar en la **Tabla 2-2**.

**Tabla 2-2:** Nivel freático detectado en las perforaciones realizadas para el LEH-UN en enero de 2016. Fuente: (Ingenieros Consultores de Proyectos Civiles G&V, 2017)

Perforación	Profundidad del Nivel Freático (m)
P-1	4.1
P-2	3.7
P-3	3.9
P-4	3.8

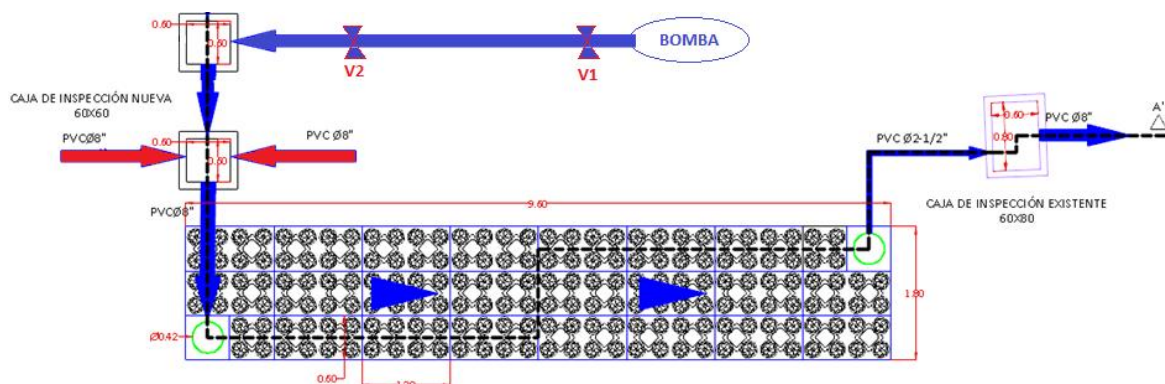
La medición de profundidad del nivel freático más cercana a la superficie fue tomada en noviembre de 2017, un mes altamente lluvioso, la cual fue registrada a 1.69 m (Ingenieros Consultores de Proyectos Civiles G&V, 2017). Debido a que el fondo del tanque se encuentra a una profundidad de 1.50 m, se supone que no hubo aportes hídricos desde el suelo que rodea el tanque.

## Procedimiento de instalación.

El sitio de instalación fue seleccionado frente al Laboratorio de Ensayos Hidráulicos, debido a que es una zona que ofrece la posibilidad de conectar un área impermeable por medio de tuberías al tanque de detención. Un aspecto importante de selección de este lugar, fue que no se presentan redes existentes de alcantarillado, agua potable, cables eléctricos u otras, que pudieran presentar alguna interferencia con el tanque.

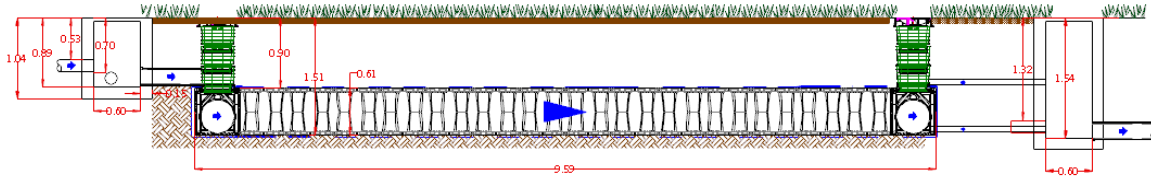
Entre algunas de las limitaciones presentadas en el sitio de instalación, se puede mencionar la baja precisión de los planos disponibles de las redes existentes que fueron intervenidas. Adicionalmente, se evidenció el mal estado de las tuberías existentes las cuales eran en arcilla (Gres), por lo que fueron reemplazadas por tuberías en PVC.

En la **Figura 2-3** se muestra un esquema de instalación en planta en donde los círculos verdes representan los ductos de inspección del tanque de detención. En estos ductos se conectaron las tuberías de entrada y salida.



**Figura 2-3:** Esquema de instalación en planta de tanque de detención con elementos celulares.

La tubería de entrada se conectó por medio de una caja de inspección nueva, y la tubería de salida se conectó a una caja de inspección existente. En la salida del tanque se instaló una tubería de rebose como se observa en la **Figura 2-4**.



**Figura 2-4:** Perfil de instalación de tanque de detención con elementos celulares.

Un plano detallado de la instalación se muestra en el **Anexo G**. La tubería de salida fue instalada en el fondo del tanque, debido a que no se presenta infiltración en el terreno y se quiere evacuar toda el agua en forma controlada. Esta tubería de salida se podría instalar a un nivel superior, sin embargo, solo se recomienda en tanques de retención, es decir, en situaciones en donde el agua lluvia se puede infiltrar, y en este caso el suelo está compuesto de arcillas impermeables (Ingenieros Consultores de Proyectos Civiles G&V, 2017).

El procedimiento para construir el tanque comenzó con una excavación de 2.20 m ancho, 10 m de largo y 1.50 m de profundidad. Para esto se contó con ayuda mecánica como se observa en la **Fotografía 2-6**.



**Fotografía 2-6:** Inicio de instalación del tanque en el costado nororiental del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos.

Se instaló un geotextil no tejido (NT 2500) como se observa en la **Fotografía 2-7**, cuya función es proteger las celdas para que no ingrese material fino, además de evitar que el material anguloso presente en el suelo deteriore los elementos celulares.



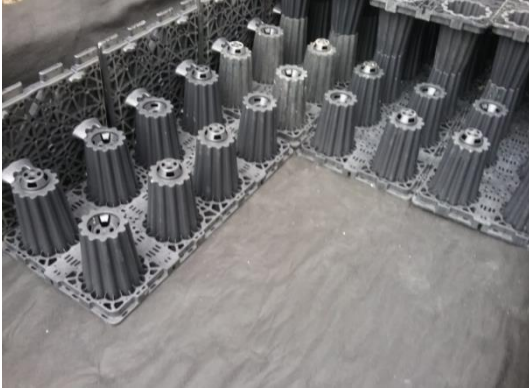
**Fotografía 2-7:** Colocación del geotextil NT2500.

La conexión de la cubierta con la entrada del tanque fue realizada por medio de una caja de inspección nueva, construida en mampostería. Se conectaron las bajantes a un colector de Ø8", el cual entrega el agua lluvia a esta caja nueva como se muestra en la **Fotografía 2-8**.



**Fotografía 2-8:** Conexión de la caja de inspección nueva con colector Ø8".

Posteriormente, se armaron las celdas sobre el geotextil como se observa en la **Fotografía 2-9** y la **Fotografía 2-10**, realizando un entramado para que queden entrelazadas, con el fin de asegurar un comportamiento estructuralmente adecuado frente a un sismo o asentamiento diferencial que pueda ocurrir (ACO DRAIN, 2015).



**Fotografía 2-9 y Fotografía 2-10:** Colocación de los elementos celulares.

Después de armar las celdas, el tanque se cubrió con el geotextil, y se instalaron ductos de inspección que se muestran en la **Fotografía 2-11**, los cuales cuentan con tapas en hierro dúctil para posteriores mantenimientos. Este tipo de tanques debe tener un mantenimiento anual (CIRIA, 2007) y por esta razón, estos ductos se instalaron en un sitio visible y de fácil acceso.



**Fotografía 2-11:** Ducto de inspección con tapa en hierro dúctil.

La cubierta del LEH-UN es drenada por medio de una tubería en arcilla (gres) de Ø6" la cual fue reemplazada por tubería de Ø8" en PVC. Se realizó un mejoramiento del sistema de drenaje, puesto que la cubierta entregaba el agua lluvia directamente a la caja de inspección existente, y esta se reemplazó por un tanque de detención que reduce el caudal de descarga.

## 2.4 Experimentación

### Instalación experimental

El LEH-UN cuenta con un tanque de almacenamiento de agua, el cual tiene un sistema de bombeo. Desde este tanque se extrajo el agua para realizar los experimentos, y se realizó la instalación de tuberías y válvulas para llevar el agua hasta el tanque de detención. La secuencia de los elementos de la instalación experimental en el sentido del flujo es:

- Tanque almacenamiento LEH-UN
- Bomba
- Válvula VALV 1
- Tubería de diámetro Ø8" y longitud 24 m con tres codos de 90°
- Válvula VALV 2
- Caja de inspección de dimensiones 20cm x 30 cm x 40 cm
- Vertedero triangular de pared delgada
- Tubería de entrada al tanque Diámetro Ø8" y longitud 1.8 m
- Tanque de detención con elementos celulares volumen 10.22 m<sup>3</sup>
- Tubería de salida en el fondo del tanque de detención, diámetro Ø2-1/2" y longitud 2.02 m
- Caja de inspección de salida dimensiones 70cm x 70 cm x 180 cm
- Alcantarillado pluvial existente ciudad universitaria

El sistema de bombeo cuenta con dos bombas instaladas en paralelo, con las siguientes características:

- Potencia 15 HP
- Frecuencia 60 Hz
- Voltaje 200 V Trifásica
- Refrigeración por aire
- Motor US 1800 RPM 254JM Frame Type UT-4 TEFC
- Impeler HIDROMAC 1800 RPM, diámetro 216 mm

Para las pruebas de esta investigación, solamente fue requerida una de las dos bombas del laboratorio. Esta bomba se muestra en la **Fotografía 2-12** y la **Fotografía 2-13**.



**Fotografía 2-12 y Fotografía 2-13:** Sistema de bombeo utilizado para las pruebas

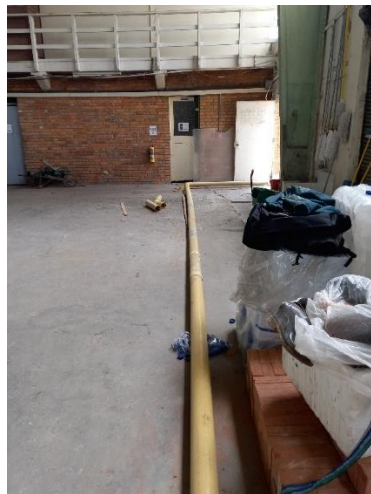
Estas bombas entregan a una tubería que tiene instalada una válvula de mariposa, la cual tiene un indicador dentado para ver la apertura de la misma. Esta válvula, denominada en esta investigación como VALV 1, se ha dejado en nivel 5 (tiene 10 niveles, de cero a nueve) y se ha mantenido en esta apertura para todas las pruebas. Esta válvula se muestra en la **Fotografía 2-14**, **Fotografía 2-15** y **Fotografía 2-16**.





**Fotografía 2-14, Fotografía 2-15 y Fotografía 2-16:** Válvula de mariposa (VALV 1) en la descarga del sistema de bombeo.

Esta válvula regula el caudal de salida de la bomba y está conectada a una tubería de PVC de Ø8" que conduce el flujo al tanque. Esta tubería es mostrada en la **Fotografía 2-17**. La tubería tiene una longitud de 24 m, y en el recorrido hay instalados 3 codos de 90°.



**Fotografía 2-17:** Tubería de conducción de fluido hacia el tanque de detención.

En esta tubería se instaló otra válvula de mariposa la cual tiene un indicador dentado de apertura. Esta válvula se llamó VALV 2 y tiene la función variar el caudal de entrada al tanque de detención para crear los hidrogramas . Esta válvula se muestra en la **Fotografía 2-18 y Fotografía 2-19**.



**Fotografía 2-18 y Fotografía 2-19** Válvula de mariposa (VALV 2) en la tubería que entrega el agua al tanque de detención.

Esta tubería entrega el agua finalmente a una caja de inspección a donde llegan las bajantes de aguas lluvias, para que posteriormente el agua llegue al vertedero triangular de pared delgada instalado para la medición de caudales. La entrega de estas bajantes de agua lluvia se han sellado al momento de hacer los experimentos para evitar fugas de caudal. La caja de inspección se muestra en la **Fotografía 2-20**, y el vertedero se muestra en la **Fotografía 2-21**.



**Fotografía 2-20 y Fotografía 2-21:** Caja de inspección y caja de medición de caudal con vertedero triangular de pared delgada.

La caja que tiene el vertedero instalado, entrega el agua por medio de una tubería de 8 pulgadas y pendiente del 1%, al tanque de detención. El tanque de detención se construyó utilizando elementos celulares de la marca ACO *StormBrixx*, fabricados en polipropileno cuyas dimensiones son: largo 1.20 m, ancho 0.60 m y altura 0.61 m cada celda.

Finalmente, el tanque de detención entrega a una caja existente por medio de una tubería de diámetro de 2-1/2" para que el agua fluya al sistema de alcantarillado existente de la universidad.

### Calibración del modelo

Para que los resultados medidos sean confiables, se realizó una calibración del modelo, es decir de las estructuras de medición de los caudales de entrada y salida del tanque.

### Calibración del vertedero triangular de pared delgada

La ecuación que relaciona el caudal con la altura de lámina de agua sobre el vertedero se muestra a continuación:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{5/2} \quad (5)$$

Donde:

$Q$  es el caudal de entrada,  $m^3/s$

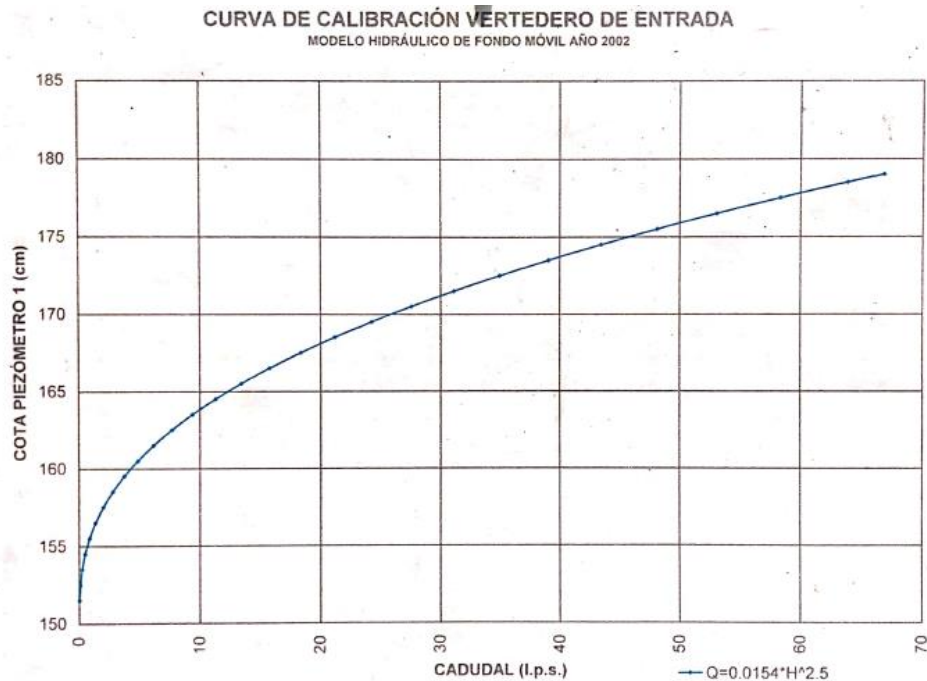
$C_d$  es el coeficiente de descarga, adimensional

$g$  es la gravedad,  $m/s^2$

$\theta$  es el ángulo del vertedero, radianes

$H$  es la altura de lámina de agua sobre el vértice del vertedero, m

Existen gráficas para hallar el valor del coeficiente de descarga en función de la altura de lámina de agua sobre el vertedero, sin embargo, este vertedero fue calibrado midiendo el caudal (variación de volumen dentro del tanque por unidad de tiempo) y realizando una regresión lineal para obtener una curva de la forma que se muestra en la **Gráfica 2-2**.



**Gráfica 2-2:** Ejemplo de curva de vertedero triangular de pared delgada, ángulo 90°, ubicado en el modelo hidráulico del LEH-UN

La calibración consistió en medir la diferencia del volumen dentro del tanque por unidad de tiempo, para calcular un caudal y compararlo con mediciones de altura de lámina de agua sobre el vertedero. Estos valores fueron graficados, y se realizó una regresión lineal para hallar la ecuación de caudal en función de altura sobre el vértice del vertedero.

### Calibración de la estructura de salida

En un orificio sumergido la ecuación que relaciona el caudal de salida con la altura de lámina de agua sobre el centroide de dicho orificio es la siguiente:

$$Q = Cd A \sqrt{2gh} \quad (6)$$

Donde:

Q es el caudal, m<sup>3</sup>/s

Cd es el coeficiente de descarga, adimensional

A es el área del orificio sumergido, m<sup>2</sup>

g es la gravedad, m/s<sup>2</sup>

$h$  es la altura de lámina de agua sobre el centroide del orificio sumergido, m

De esta ecuación se puede despejar el coeficiente de descarga  $C_d$ , entonces:

$$C_d = \frac{Q}{A \sqrt{2gh}} \quad (7)$$

La calibración se realizó sellando la salida del tanque de detención y llenándolo con agua. Después se procedió a quitar el sello de la tubería de salida, y, midiendo la variación de volumen a través del tiempo en intervalos de un minuto se obtuvieron los datos de caudal de salida.

Debido a que se tienen varios datos de caudal y de altura de lámina de agua, se graficaron estos valores, en las abscisas los caudales teóricos ( $A\sqrt{2gh}$ ), y en las ordenadas los valores de caudal  $Q$  medido. La pendiente de la línea de tendencia, representa el coeficiente de descarga.

## Diseño experimental

Existen tres tipos de variables en un experimento científico: independientes, dependientes y controladas (Kuehl, 2000) y un experimento válido solamente debe tener una variable independiente. Un diseño experimental es una serie de procedimientos para investigar una relación entre variables, y para ello se necesita: una hipótesis, una variable independiente que pueda ser manipulada de manera precisa, y al menos una variable dependiente que pueda ser medida de manera precisa.

Variable independiente:

Caudal de entrada. Se varía para observar el efecto en las variables dependientes. Inicialmente se definirá el rango en el que pueda fluctuar de manera concordante con las condiciones locales de pluviosidad sobre la cubierta del edificio del LEH-UN.

Variables dependientes:

Caudal de salida

Nivel de entrada del agua en la caja próxima a la entrada del tanque

Nivel de salida del agua en la caja próxima a la salida del tanque

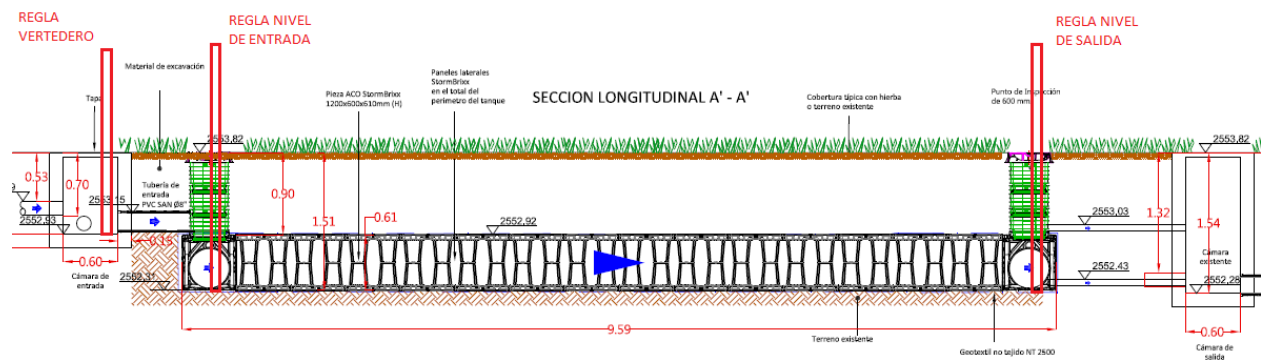
Variable controlada:

Caudal de entrada a partir de una bomba de suministro de agua.

Condiciones del tanque:

La dimensión y forma de las celdas se mantendrán para todas las pruebas que se van a realizar. Su estructura interna contiene columnas que forman pasillos internos, a través de los cuales fluye el agua.

El experimento consistió en ingresar caudales al tanque de forma controlada, y así poder medir la variación de nivel tanto en la entrada como en la salida del tanque por medio de limnómetros. Por medio de un sistema de bombeo disponible en el LEH-UN, se suministró agua al tanque, y por medio de una válvula de mariposa se reguló el caudal. En la **Figura 2-1** se muestra el lugar de instalación de los limnómetros.



**Figura 2-1:** Ubicación de limnómetros. Vista en perfil.

La medición con los limnómetros se realizó dentro de una tubería de 4 pulgadas, de manera que la turbulencia del agua no perturbara la medición. Se realizaron 10 ensayos, con caudal constante y caudal variable, para ingresar estos datos a la simulación matemática y comparar los resultados.

Cada experimento, comenzó con el tanque vacío y limpio, y se suministró el agua controlando el caudal con la válvula de mariposa denominada VALV 2. Se buscó estabilizar la altura sobre el vertedero para lograr un caudal constante y se midió la fluctuación de nivel de agua dentro del tanque.

La medición del nivel se realizó con limnímetros contruidos con varas metálicas, a las cuales se les aplicó arena a manera de material que marca el nivel, y se sumergían dentro de las cámaras de inspección a la entrada y salida del tanque en simultáneo. El nivel del agua instantáneo se marcaba en la vara y se media con una cinta métrica. Esto brindó mediciones con un margen de error de 1 milímetro. Los limnímetros son mostrados en la **Fotografía 2-22** y la **Fotografía 2-23**.

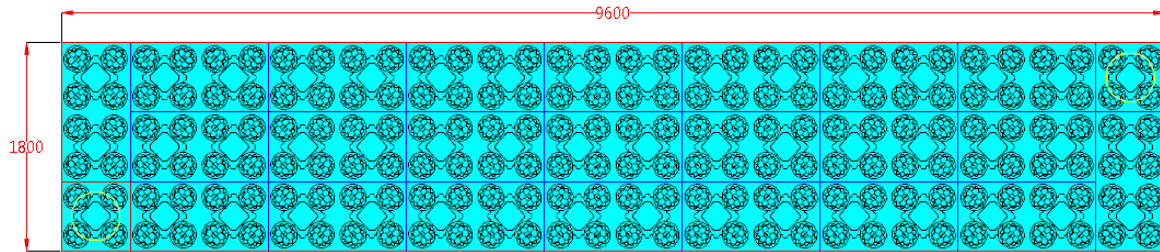


**Fotografía 2-22 y Fotografía 2-23:** Limnímetro para medición de niveles dentro del tanque construido con varas metálicas.

Estas mediciones se realizaron cada 2 minutos para caudal permanente hasta que se estabilizara el flujo, o hasta que el tanque se llenara en el nivel 0.60 m.

## 2.5 Simulación matemática

La disposición de las celdas del tanque se puede observar en la **Figura 2-5** en donde se muestra una vista en planta. Una vez fueron realizados los experimentos, se procedió a realizar la simulación asumiendo que el tanque no contempla ninguna estructura interna, y la estructura de salida es una tubería en el fondo del tanque.



**Figura 2-5:** Tanque de detención con elementos celulares, vista en planta.

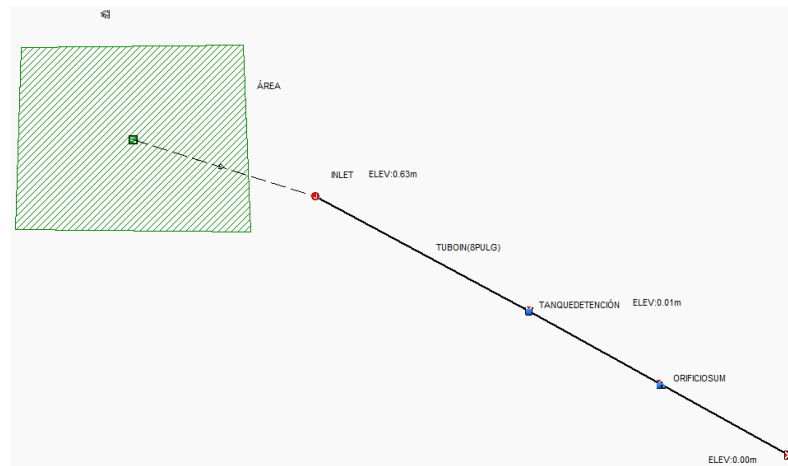
La simulación matemática del tanque de detención permitió describir su comportamiento hidráulico frente a hidrogramas creados en el laboratorio. Esta simulación se realizó para conocer teóricamente el comportamiento del tanque, y esto se comparó con los datos extraídos del tanque instalado.

Se realizó esta simulación utilizando el programa de cómputo *Storm and Sanitary Analysis* de *Autodesk*, debido a que permite el diseño y dimensionamiento de almacenamientos de detención para control de inundaciones (AUTODESK, 2022). Este programa de cómputo permite realizar evaluaciones de sistemas de drenaje, tanto para condiciones antes de desarrollo como para condiciones después de desarrollo urbano.

Por medio de *Storm and Sanitary Analysis* se puede simular las precipitaciones y escorrentías de cuencas urbanas y rurales para diseñar estructuras de detención y retención de agua lluvia, estructuras de salida y canales (AUTODESK, 2022). El programa utiliza para la simulación de un almacenamiento el método conocido como tránsito de piscina nivelada, es decir, el nivel dentro de las estructuras de almacenamiento es horizontal en todo momento.

Para realizar la simulación, se ingresaron las condiciones locales del sitio de instalación al programa de cómputo. La parte de la cubierta del edificio de LEH-UN que aporta agua lluvia al tanque de detención tiene un área de 450 m<sup>2</sup> (0.045 Ha) y su superficie es impermeable. Una captura de pantalla de los elementos de la simulación matemática en el programa de cómputo es mostrada en la **Figura 2-2**.





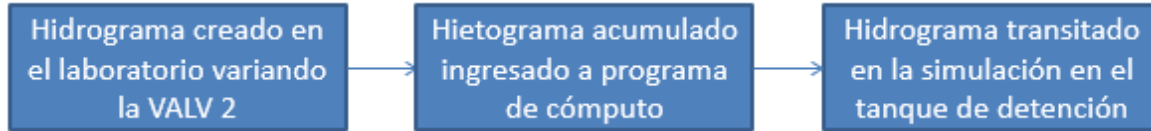
**Figura 2-2:** Condición de simulación del sistema en el programa de cómputo *Storm and Sanitary Analysis*.

En la **Figura 2-2** el rectángulo representa el área aferente, en este caso la parte de la cubierta del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos, conectada al tanque de detención en el centro, y el final de la simulación es en la caja de inspección al final del tanque.

Las suposiciones realizadas para esta simulación matemática son:

- La cuenca está perfectamente delimitada.
- No existen pérdidas por infiltración, evaporación o evapotranspiración.
- Toda el agua precipitada se convierte en caudal, es decir el coeficiente de escorrentía es igual a 1.
- El nivel del agua dentro del tanque de detención es horizontal, es decir se calcula por medio del tránsito de piscina nivelada.

La simulación matemática fue realizada con caudales que se midieron en el laboratorio. Estos caudales fueron tabulados, y con las condiciones de área se convirtieron en hietogramas acumulados, puesto que el programa de cómputo requiere los datos de esta forma. Posteriormente, este hietograma acumulado es convertido por el programa de cómputo en un hidrograma y transitado por el tanque de detención como se muestra en la **Figura 2-3**. Esto es debido a la limitación que tiene el programa de cómputo.



**Figura 2-3:** Secuencia de datos de caudal para la simulación matemática

Para convertir un hidrograma creado en el laboratorio a un hietograma, se tiene que el caudal es un volumen por unidad de tiempo:

$$Q = \frac{Vol}{t} \quad (8)$$

El volumen en un evento de precipitación, es la cantidad precipitada multiplicada por un área. En este caso el intervalo de tiempo es dos minutos:

$$Vol = P * A \quad (9)$$

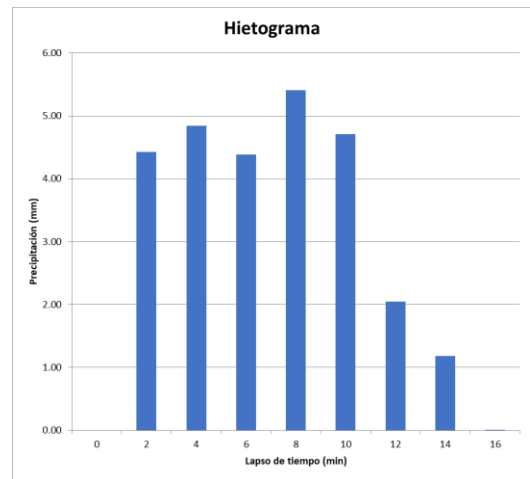
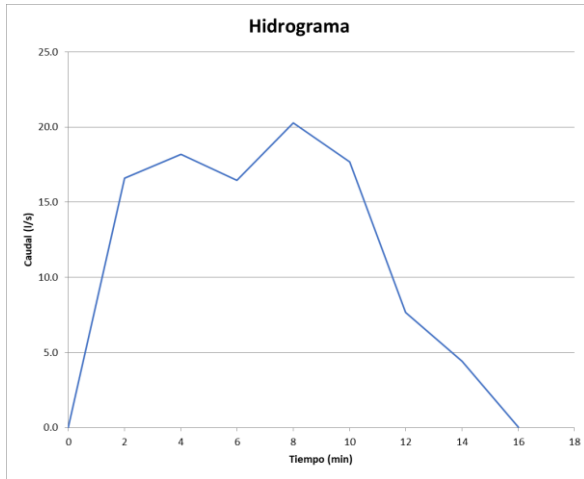
Reemplazando (9) en (8) tenemos que:

$$Q = \frac{P * A}{t} \quad (10)$$

Teniendo en cuenta que se conoce el área aferente (450 m<sup>2</sup>), el caudal (medido en el laboratorio), y el intervalo de tiempo (2 min) se puede despejar P:

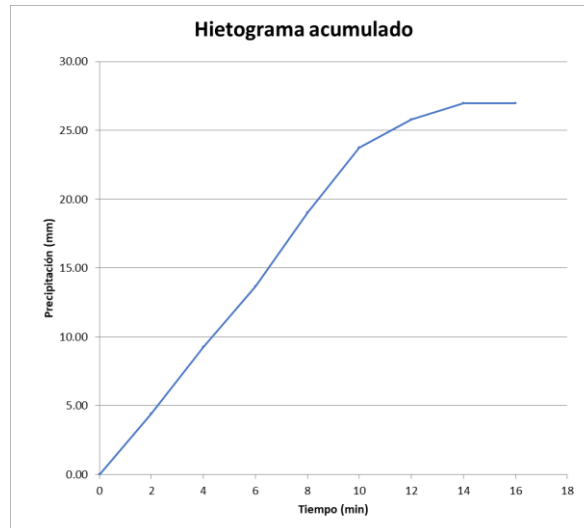
$$P = \frac{Q * t}{A} \quad (11)$$

Para cada caudal se tiene una precipitación equivalente. De esta manera, de un hidrograma creado en el laboratorio, se construyó un hietograma asumiendo que toda la precipitación es convertida en caudal de entrada al tanque. Un ejemplo de hidrograma y hietograma es mostrado en la **Gráfica 2-3** y **Gráfica 2-4**.



**Gráfica 2-3 y Gráfica 2-4:** Ejemplo de hidrograma creado en el laboratorio y hietograma equivalente.

Para realizar la simulación en el programa de cómputo, es requerido ingresar los hietogramas acumulados. Un ejemplo de este hietograma acumulado se muestra en la **Gráfica 2-5**.



**Gráfica 2-5:** Hietograma acumulado para ingresar al programa de cómputo.

El programa de cómputo tiene varias opciones de modelos lluvia – escorrentía, y el que fue seleccionado fue el método de la EPA-SWMM, cuyo valor para calcular la escorrentía es el número de curva CN. Este fue seleccionado con el valor de 100, debido a la condición de impermeabilidad de la cubierta.

## 2.6 Análisis estadístico

Para rechazar o aceptar la hipótesis nula, se realizó un análisis estadístico, que consistió en observar las varianzas de los datos obtenidos en el laboratorio. Este análisis estadístico, se realizó por medio de la técnica conocida como ANOVA, que significa análisis de varianzas por sus siglas en inglés. La técnica del análisis de varianza proporciona un procedimiento inferencial para aceptar o rechazar la hipótesis nula (Canavos, 1998).

La manera de realizar un ANOVA es calcular la media de cada uno de los grupos para posteriormente comparar la varianza de estas medias frente a la varianza promedio dentro de los grupos. Se define un coeficiente F de Fischer como la relación entre la varianza de las medias de los grupos y el promedio de la varianza dentro de los grupos (Kuehl, 2000). Para aplicar este método, los datos deben tener una distribución normal, tener homocedasticidad (homogeneidad de la varianza) en el caso de no cumplir con la condición de normalidad, y tener por lo menos 30 muestras.

La hipótesis nula se puede expresar con la ecuación ( 12 ):

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k \quad ( 12 )$$

Esto quiere decir que las medias de los grupos son iguales. La hipótesis nula es que la estructura celular no afecta el nivel del agua dentro de un tanque de detención.

Por otra parte, la hipótesis alternativa dice que por lo menos uno de los grupos tiene una media diferente de los otros grupos.

$$H_A : \mu_1 \neq \mu_k \quad ( 13 )$$

La hipótesis alternativa en esta investigación es que la estructura celular sí afecta de manera considerable el nivel de agua dentro de un tanque de detención.

Para aplicar esta técnica estadística, primero se debe definir la significancia  $\alpha$ . Este valor representa el grado de confiabilidad de rechazar o aceptar la hipótesis nula de manera acertada. Posteriormente se aplica lo que se conoce como la ecuación fundamental del análisis de varianza (Canavos, 1998) que se muestra a continuación:

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{Y}_{.j} - \bar{Y}_{..})^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{Y}_{ij} - \bar{Y}_{.j})^2 \quad (14)$$

Esta ecuación tiene 3 términos. El primer término (del lado izquierdo) es la suma de los cuadrados y se denota por STC. El término de en medio es la suma de los cuadrados de tratamientos y se denota por SCTR, y el último término es la suma de los cuadrados de los errores, denotada por SCE (Canavos, 1998). Entonces esta ecuación se puede reescribir como:

$$STC = SCTR + SCE \quad (15)$$

La técnica del análisis de varianza es en realidad un análisis de la variación de las medias, y éste se logra mediante la participación de la variación total de las observaciones de los componentes especificados por el modelo matemático (Canavos, 1998). Si se presentan valores que son atípicamente extremos, los resultados del ANOVA pueden no ser válidos, por lo que es recomendable eliminar estos datos atípicos y calcular el ANOVA nuevamente.

Cuando el análisis ANOVA tiene solamente dos tratamientos, se conoce como un modelo lineal simple, y se utiliza la **Tabla 2-3** (Canavos, 1998). El análisis ANOVA para dos tratamientos dará el mismo resultado que el análisis conocido como *T-Student* (Kuehl, 2000).

**Tabla 2-3:** Tabla ANOVA para el modelo lineal simple

ANOVA	Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F
Regresión	1	$\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$	$\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 / 1$	$\frac{\sum (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 / 1}{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - 2)}$
Error	$n - 2$	$\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - 2)$	
Total	$n - 1$	$\sum (Y_i - \bar{Y})^2$		

Con este análisis, se busca aceptar o rechazar la hipótesis nula. Si la hipótesis nula es aceptada, esto significa que la estructura de los elementos celulares no afecta significativamente el comportamiento hidráulico del tanque de detención, y es adecuado representar el nivel por medio del método de transito de piscina nivelada.

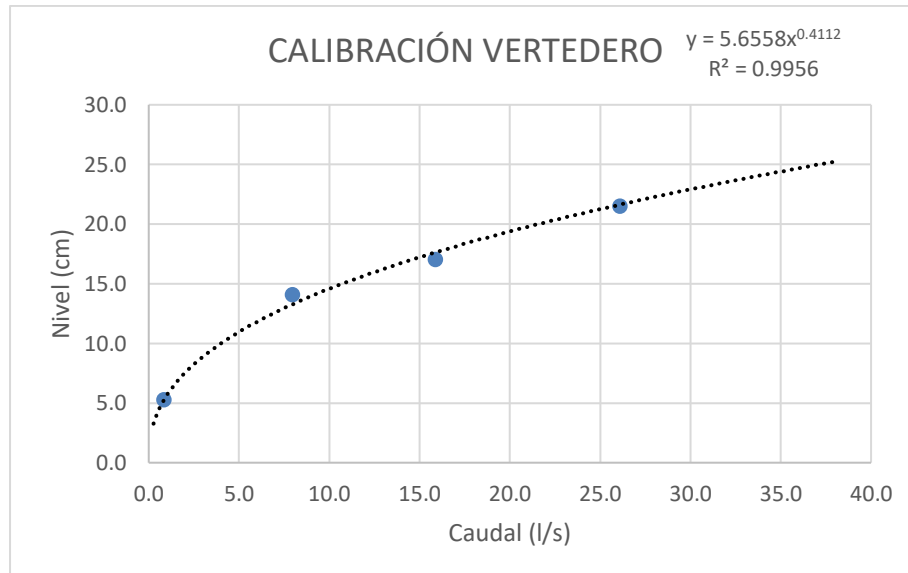


## 3. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de la experimentación, simulación matemática, y análisis estadístico. Las tablas con los resultados de las mediciones de nivel y caudal se muestran en los anexos para los 10 experimentos realizados.

### 3.1 Resultados de experimentación y simulación matemática

Para obtener resultados confiables en la experimentación, primero se realizó la calibración de las estructuras de medición de caudal a la entrada y salida del tanque. La calibración del vertedero dio como resultado la curva que relaciona el nivel del agua con el caudal de descarga. Esta curva se muestra en la **Gráfica 3-1**.



**Gráfica 3-1:** Relación de caudal y nivel sobre el vertedero triangular de pared delgada en la caja de entrada al tanque.

Los cuatro puntos resaltados en la **Gráfica 3-1**, son datos obtenidos en el laboratorio y estos fueron interpolados con una ecuación potencial. Con esta gráfica se hallaron los caudales de ingreso al tanque de detención para cada experimento. Los datos de la calibración se pueden encontrar en el **Anexo A**.

Despejando el caudal  $Q$  de la ecuación hallada en la regresión lineal, tenemos que, para hallar el caudal en función del nivel sobre el vértice del vertedero, se tiene la siguiente expresión:

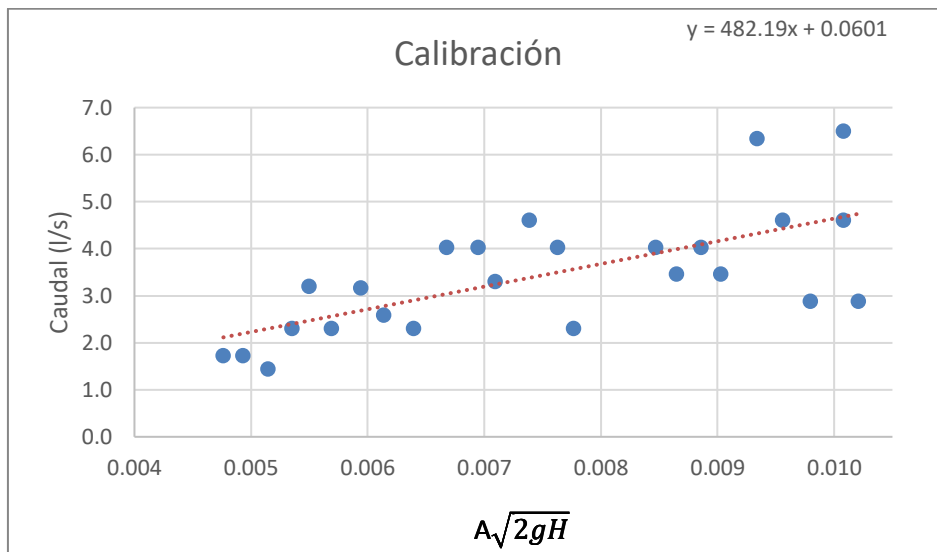
$$Q = \left( \frac{H}{5.6558} \right)^{1/0.4112} \quad (16)$$

Donde:

$Q$  es el caudal, l/s

$H$  es el nivel sobre el vértice del vertedero triangular, cm

Por otra parte, la calibración de la estructura de salida calculándola como orificio sumergido, se realizó midiendo el nivel dentro del tanque mientras se desocupó, para una condición inicial de nivel 50 cm, y caudal de entrada cero. Se graficaron los valores de caudal medido en el laboratorio, con los caudales teóricos calculados con la ecuación de orificio sumergido. Estos datos se pueden observar en la **Gráfica 3-2**.



**Gráfica 3-2:** Calibración orificio sumergido conectado con tubo horizontal



La pendiente de la línea de tendencia es el coeficiente de descarga y su resultado fue de 0.48. Los resultados de la calibración se pueden consultar en el **Anexo A**. La ecuación para calcular el caudal de salida del tanque es:

$$Q = 0.48 A \sqrt{2gH} \quad (17)$$

Donde:

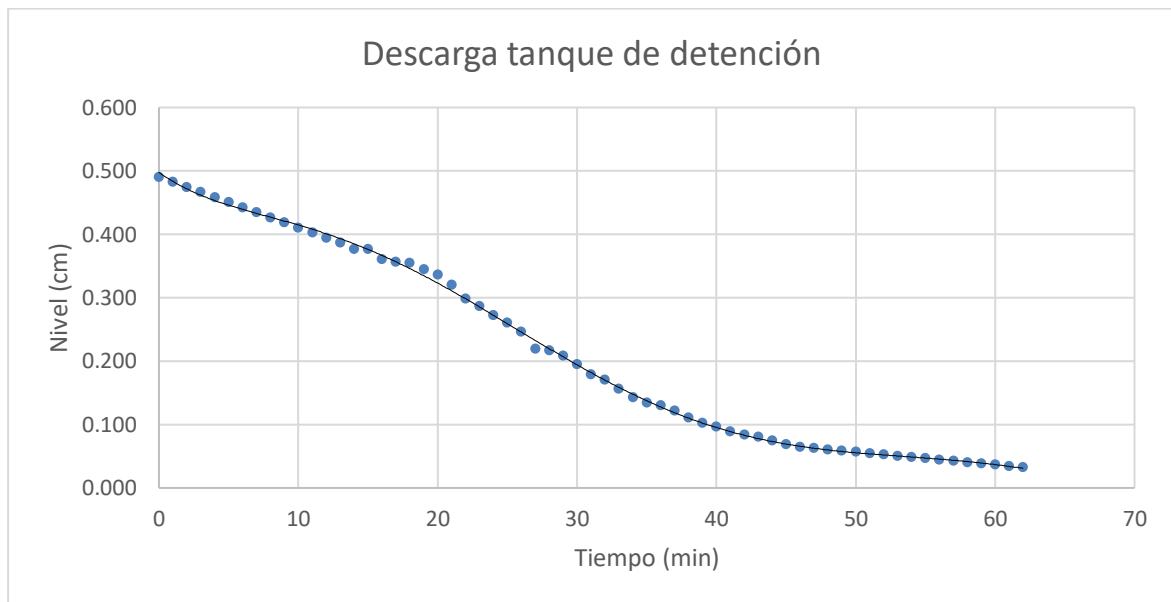
$Q$  es el caudal,  $m^3/s$

$A$  es el área del orificio sumergido,  $m^2$

$g$  es la gravedad,  $m/s^2$

$H$  es el nivel sobre el centroide del orificio sumergido,  $m$

La disminución del nivel a través del tiempo dentro del tanque, para la condición de caudal de entrada igual a cero se muestra en la **Gráfica 3-3**.



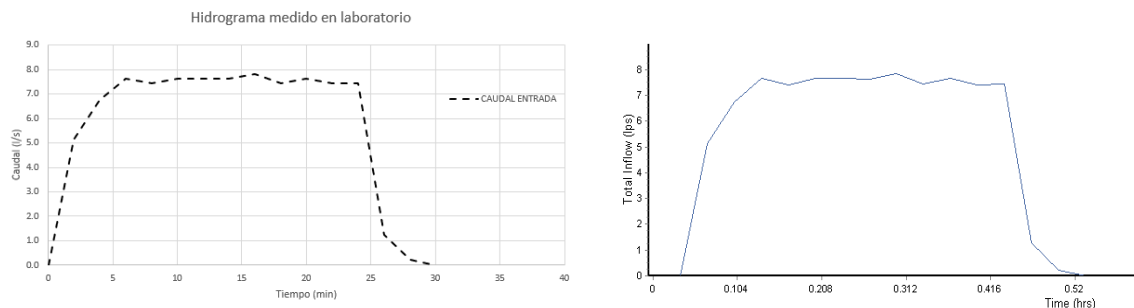
**Gráfica 3-3:** Medición del nivel en la salida del tanque de detención a través del tiempo, mientras se desocupa.

El tiempo de vaciado del tanque fue de 60 minutos desde un nivel de 50 cm hasta un nivel de 3 cm sobre el centroide del orificio sumergido. Estos datos se encuentran tabulados en el **Anexo A**.

Las mediciones de nivel sobre el vertedero fueron usadas para calcular el caudal y con los datos obtenidos se construyeron hidrogramas sintéticos, para convertirlos a hietogramas acumulados que fueron ingresados a la simulación matemática.

Para verificar que el programa de cómputo genera los mismos hidrogramas medidos a partir de los hietogramas acumulados, se calculó por medio de la simulación el volumen total precipitado y el caudal pico, y el programa de cómputo arrojó los mismos resultados. Es decir, el proceso de convertir cada hidrograma sintético creado en el laboratorio, a un hietograma acumulado, para que posteriormente el programa de cómputo lo convirtiera en un hidrograma de entrada al tanque fue adecuado.

Se comparó el hidrograma de entrada medido en el laboratorio con el obtenido de la simulación matemática, obteniéndose el mismo resultado. En la **Gráfica 3-4** y la **Gráfica 3-5** se muestra un ejemplo de esta comparación y su similitud se debe a que, en la simulación, el área aferente es totalmente impermeable y toda la precipitación es convertida en caudal en entrada por el programa de cómputo.



**Gráfica 3-4** y **Gráfica 3-5**: Comparación entre hidrograma medido en laboratorio, y el resultado de la simulación matemática.

Para cada experimento se realizaron dos gráficas: una de caudal y otra de nivel. La gráfica de caudal, tiene solo una curva de caudal de entrada, puesto que, son una misma la simulada y la experimental, y dos curvas de caudal de salida, una medida en el laboratorio,

y otra resultado de la simulación matemática. La gráfica de nivel tiene 3 curvas que son: el nivel en la entrada del tanque llamado  $H1$ , el nivel a la salida del tanque llamado  $H2$ , y el nivel resultado de la simulación matemática.

Todos los experimentos se realizaron con la VALV 1 en la apertura 5, y variando la VALV 2 desde la apertura 2, puesto que en la apertura 1 se presentó un caudal muy bajo -menor a 1 l/s-. La fluctuación de caudal de entrada en los experimentos fue aproximadamente de 0.2 l/s debido a oscilaciones del nivel en promedio de 3 mm.

### **Experimento 1**

En el experimento 1 se utilizaron caudales bajos, y se logró estabilizar el caudal por un tiempo aproximado de 40 minutos, entre el minuto 20 y el minuto 60. El caudal de entrada se estabilizó en un promedio de 1,7 l/s y el caudal pico de salida fue de 1.4 l/s.

Apertura VALV 1 = 5

Apertura VALV 2 = 2

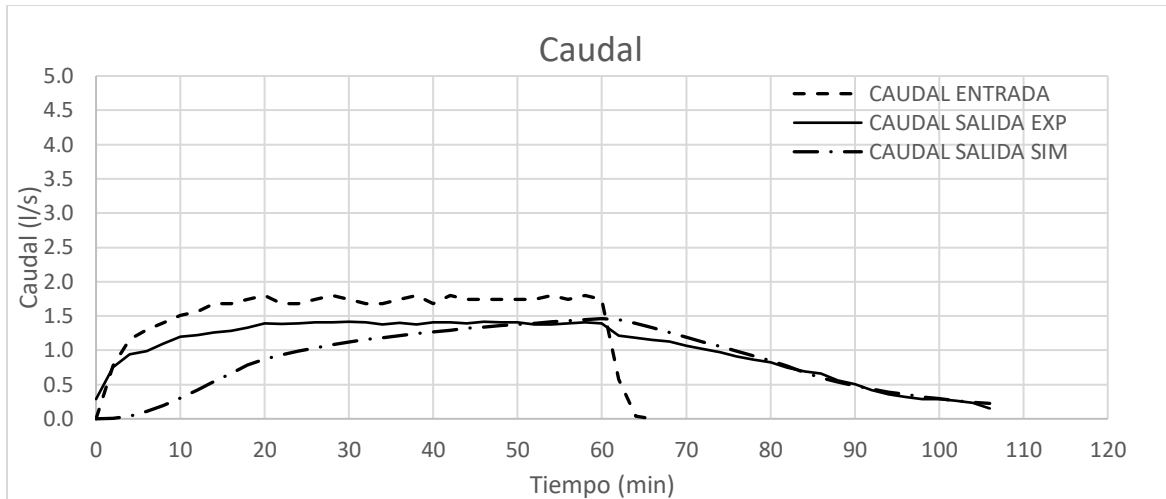
Precipitación total del evento equivalente = 13.3 mm

Periodo de retorno equivalente cantidad precipitada = 0.013 años = 4.7 días

Máxima intensidad de lluvia equivalente = 14.4 mm/h

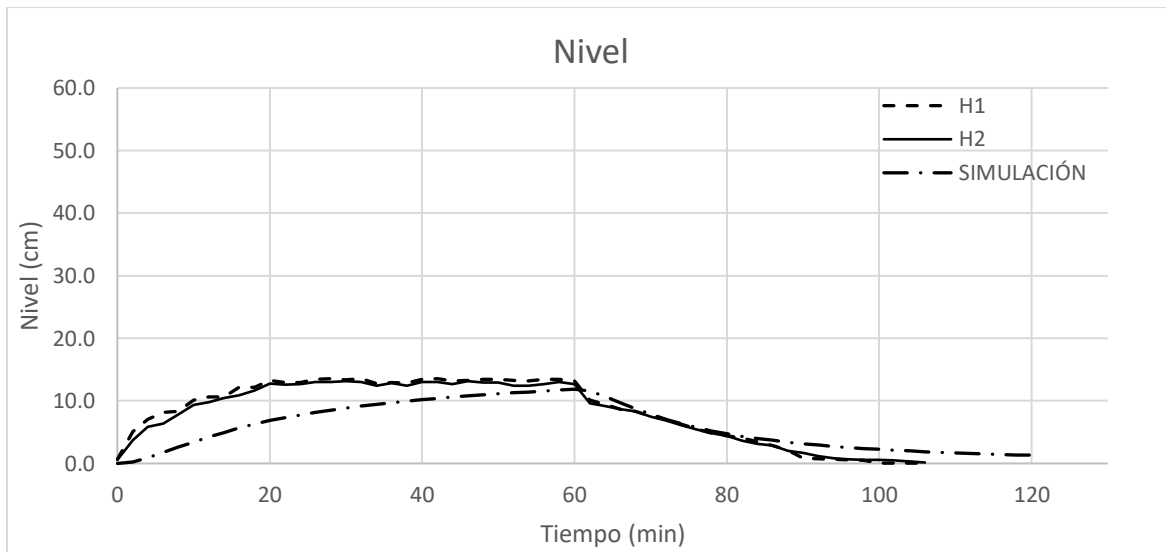
Periodo de retorno equivalente intensidad precipitación = 0.022 años = 8.0 días (Td = 60 min)

Desfase del caudal pico = 25 min



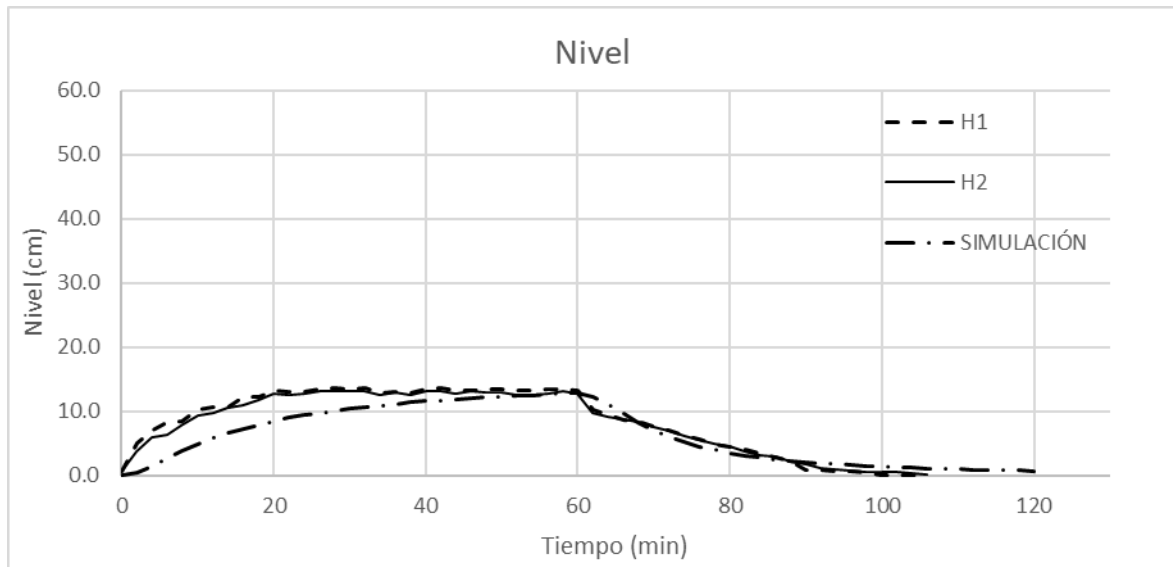
**Gráfica 3-6:** Curvas de caudal experimento 1

El nivel máximo experimental fue de 13.5 cm, el nivel máximo simulado fue de 11.9 cm y son mostrados en la **Gráfica 3-7**.



**Gráfica 3-7** Curvas de nivel experimento 1

Se realizó un ajuste de la curva de nivel producto de la simulación para que coincidiera con la curva experimental, modificando el área del tanque en un porcentaje. Este porcentaje se halló realizando una primera aproximación con el porcentaje del área que ocupan las columnas internas, y por iteraciones se obtuvo un resultado de disminución del área en un 16.4%. Esto se realizó con el fin de ajustar la curva de nivel simulado sin cambiar el coeficiente de descarga, para los 10 experimentos usando el mismo porcentaje de reducción de área. Las curvas de nivel ajustadas se pueden observar en la **Gráfica 3-8**.



**Gráfica 3-8:** Curvas de nivel ajustadas experimento 1

### Experimento 2

En el experimento 2 se abrió la VALV 2 al nivel 3, y el caudal máximo fue de 6.0 l/s. El caudal experimental de salida pico fue de 4.3 l/s.

Apertura VALV 1 = 5

Apertura VALV 2 = 3

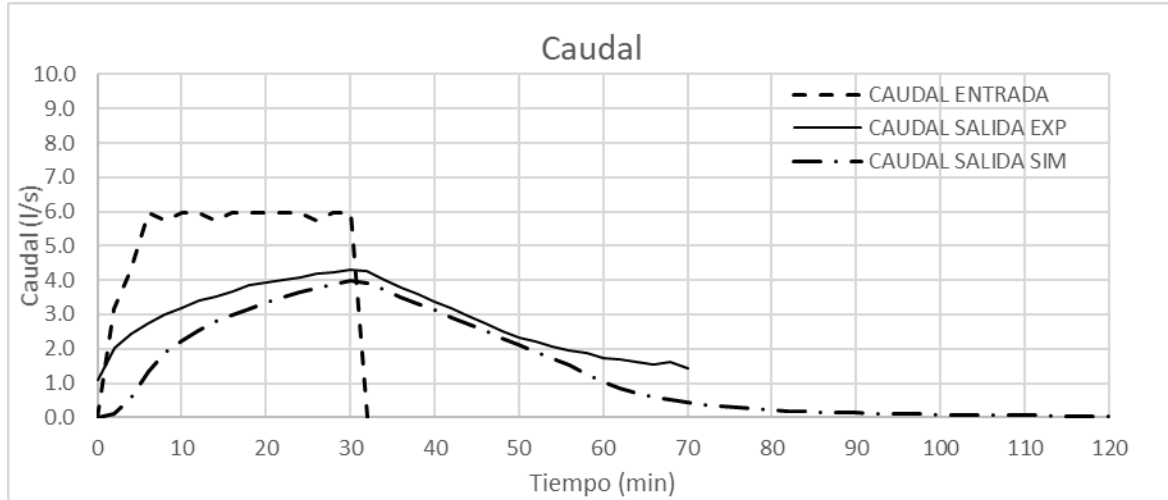
Precipitación total del evento equivalente = 22.53 mm

Periodo de retorno equivalente cantidad precipitada = 3 años

Máxima intensidad de lluvia equivalente = 48.7 mm/h

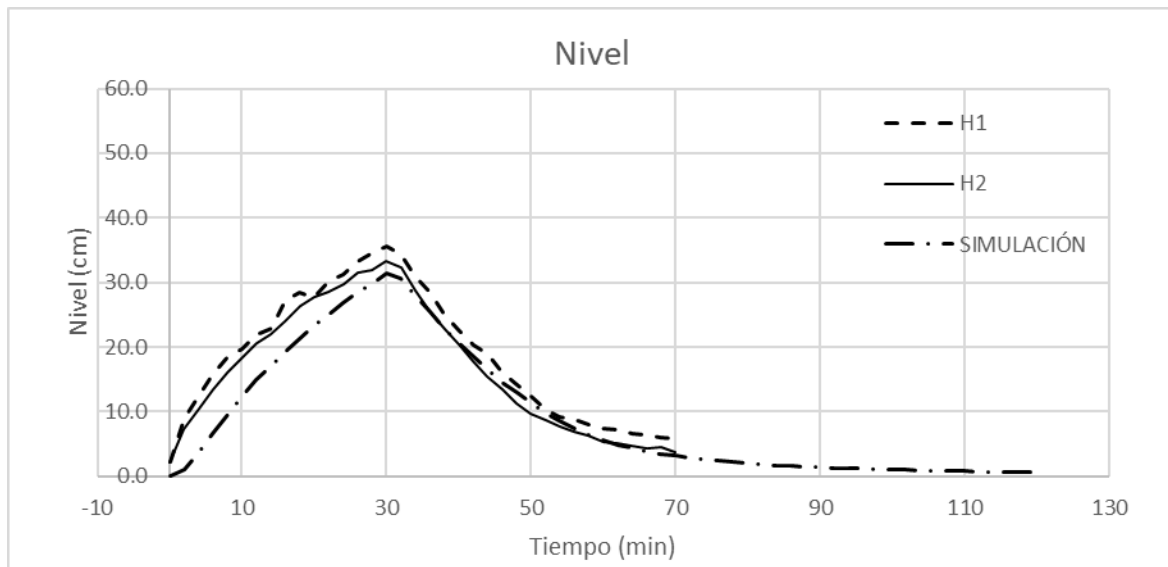
Periodo de retorno equivalente intensidad precipitación = 3.5 años ( $T_d = 32$  min)

Desfase del caudal pico = 15 min

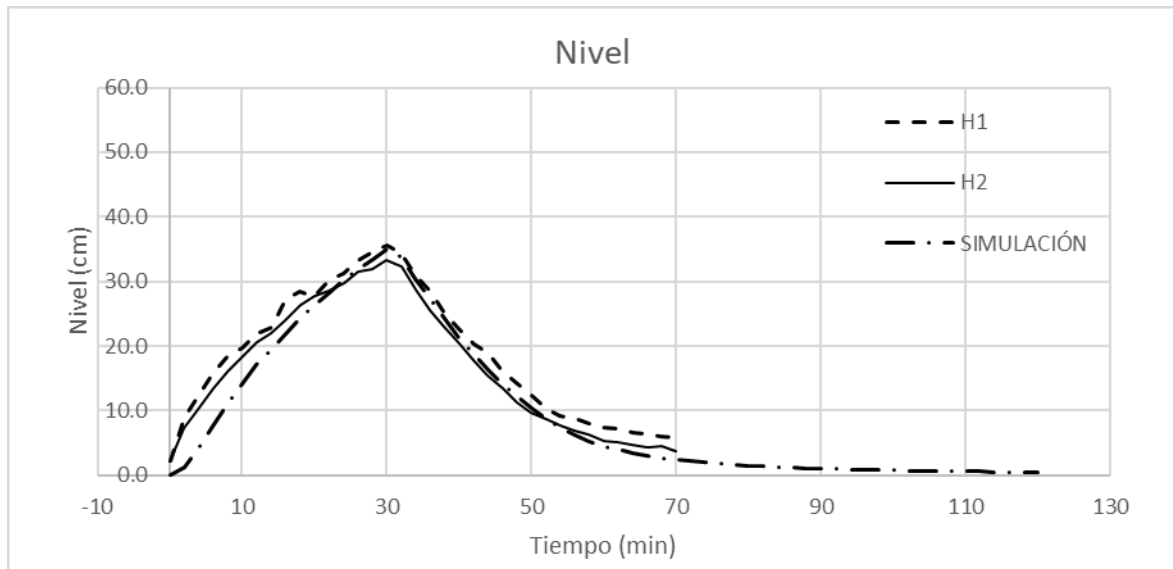


**Gráfica 3-9:** Curvas de caudal experimento 2

El nivel máximo experimental fue de 35.7 cm, el nivel máximo simulado fue de 31.4 cm y se muestran en la **Gráfica 3-10**.



**Gráfica 3-10:** Curvas de nivel experimento 2



**Gráfica 3-11:** Curvas de nivel ajustadas experimento 2

### Experimento 3

En el experimento 3 el caudal de entrada pico fue de 8,4 l/s abriendo la válvula VALV 2 en la posición 4. El caudal pico de salida fue de 4 l/s.

Apertura VALV 1 = 5

Apertura VALV 2 = 4

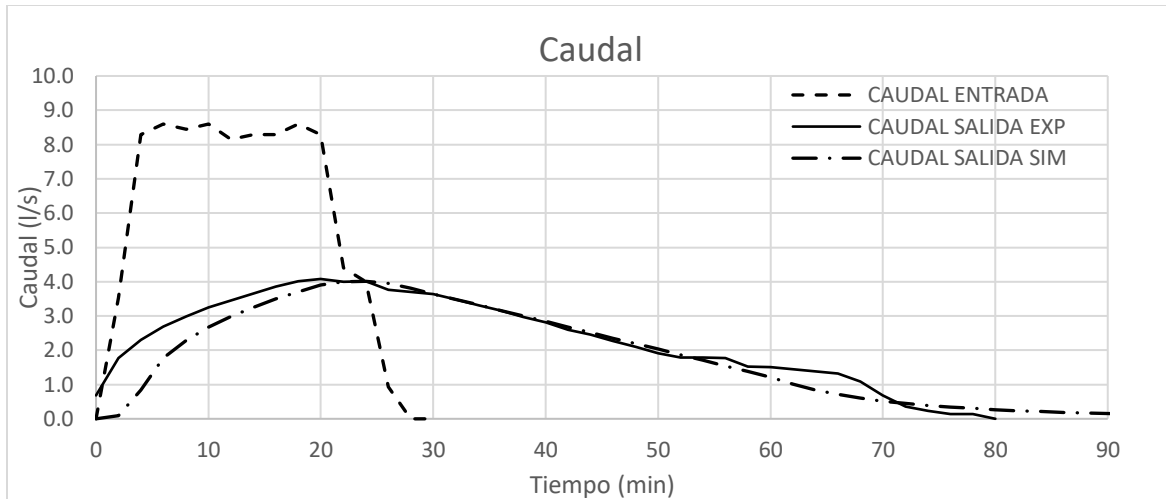
Precipitación total del evento equivalente = 23.58 mm

Periodo de retorno equivalente cantidad precipitada = 2.1 años

Máxima intensidad de lluvia equivalente = 68.78 mm/h

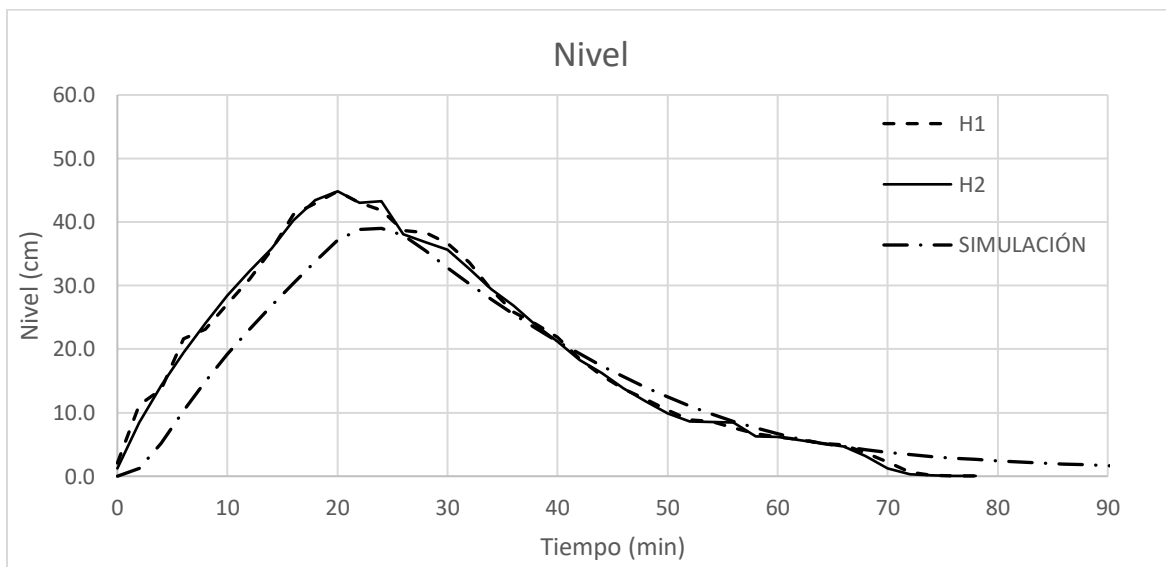
Periodo de retorno equivalente intensidad precipitación = 5.33 años (Td = 20 min)

Desfase del caudal pico = 11 min



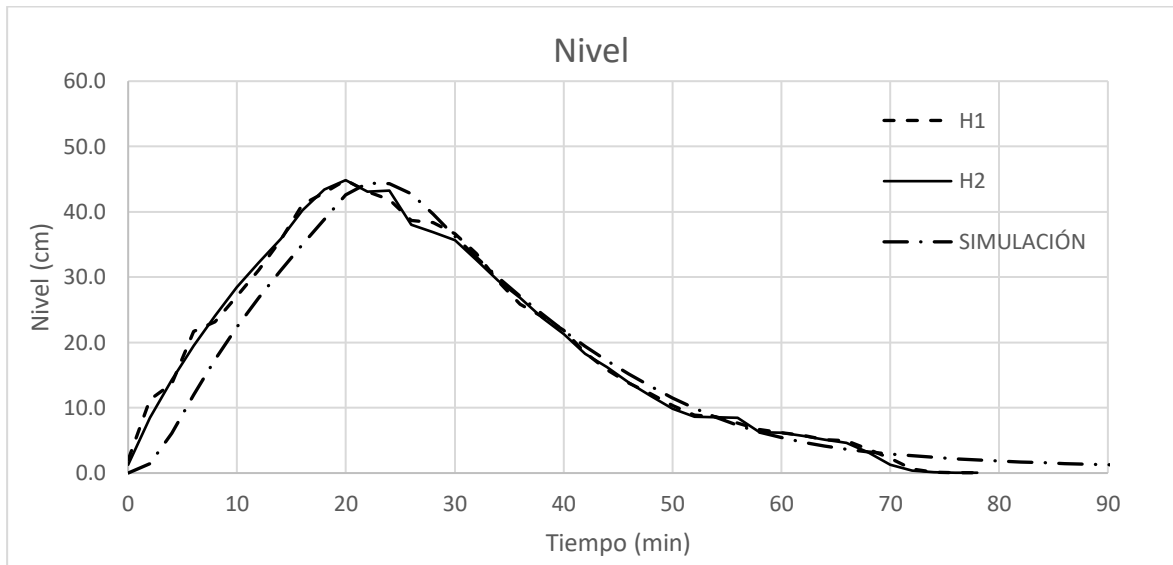
**Gráfica 3-12** Curvas de caudal experimento 3

El nivel máximo experimental fue de 44.9 cm, el nivel máximo simulado fue de 39 cm y se muestra en la **Gráfica 3-13**.



**Gráfica 3-13** Curvas de nivel experimento 3





**Gráfica 3-14:** Curvas de nivel ajustadas experimento 3

#### Experimento 4

En el experimento 4 el caudal fue aumentado a un valor de 12,2 l/s abriendo la válvula VALV 2 en 5. El caudal pico a la salida fue 5,8 l/s.

Apertura VALV 1 = 5

Apertura VALV 2 = 5

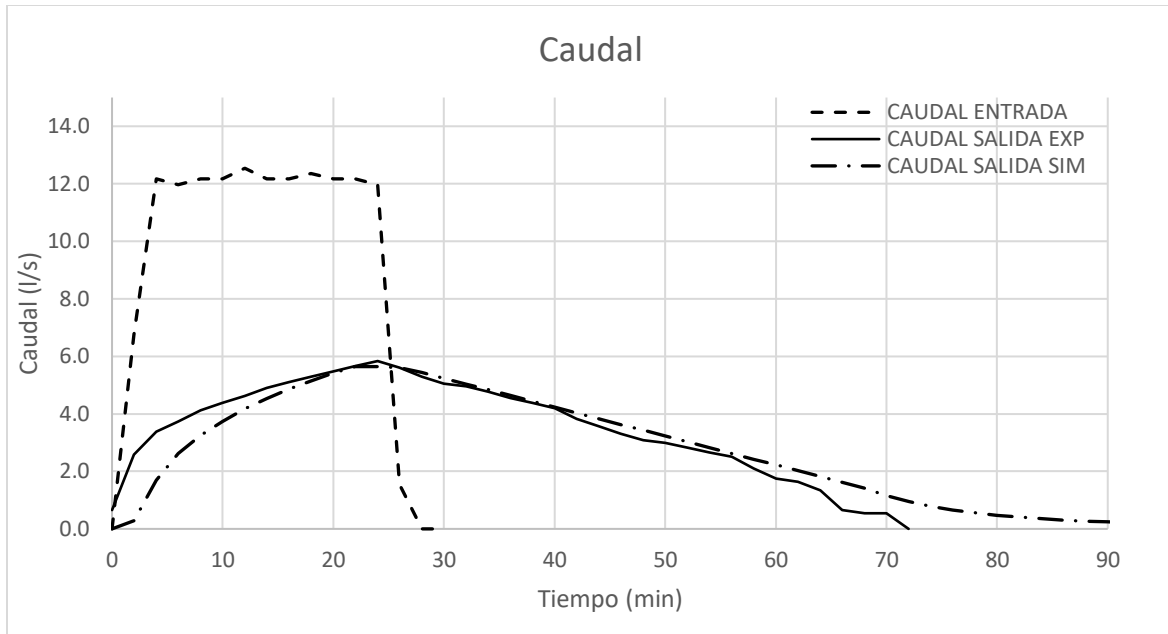
Precipitación total del evento equivalente = 37.94 mm

Periodo de retorno equivalente cantidad precipitada = 51 años

Máxima intensidad de lluvia equivalente = 100.32 mm/h

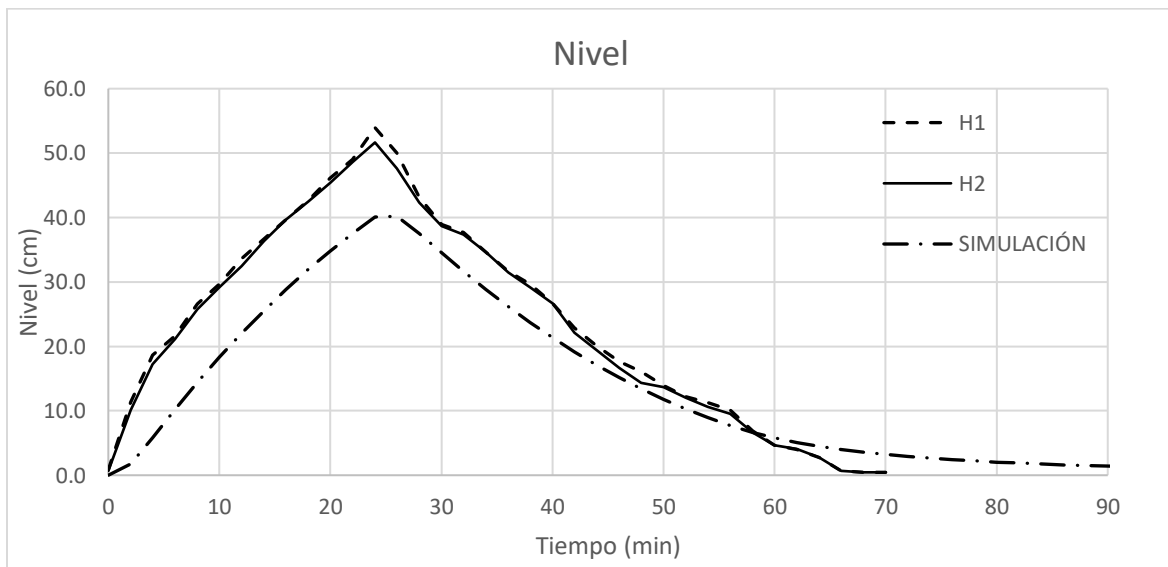
Periodo de retorno equivalente intensidad precipitación = 154 años (Td = 25 min)

Desfase del caudal pico = 11 min

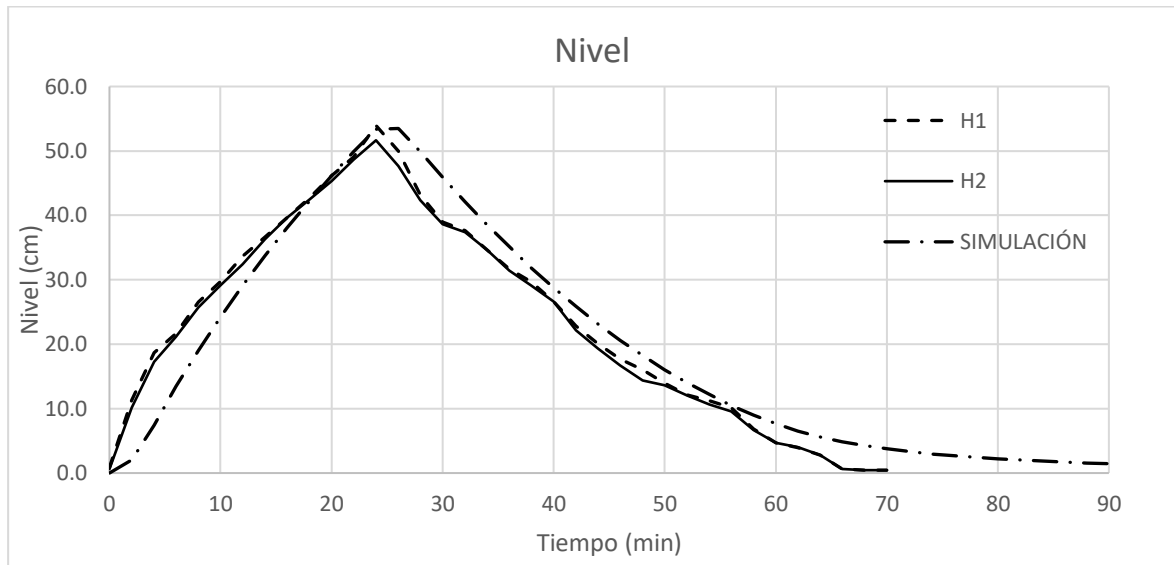


**Gráfica 3-15** Curvas de caudal experimento 4

El nivel máximo experimental fue de 51.7 cm, el nivel máximo simulado fue de 40.2 cm y se muestran en la **Gráfica 3-16**.



**Gráfica 3-16:** Curvas de nivel experimento 4



**Gráfica 3-17:** Curvas de nivel ajustadas experimento 4

### Experimento 5

En el experimento 5 el caudal pico de entrada se estabilizó en un valor promedio de 15,7 l/s, y el caudal pico de salida tuvo un valor de 5 l/s.

Apertura VALV 1 = 5

Apertura VALV 2 = 6

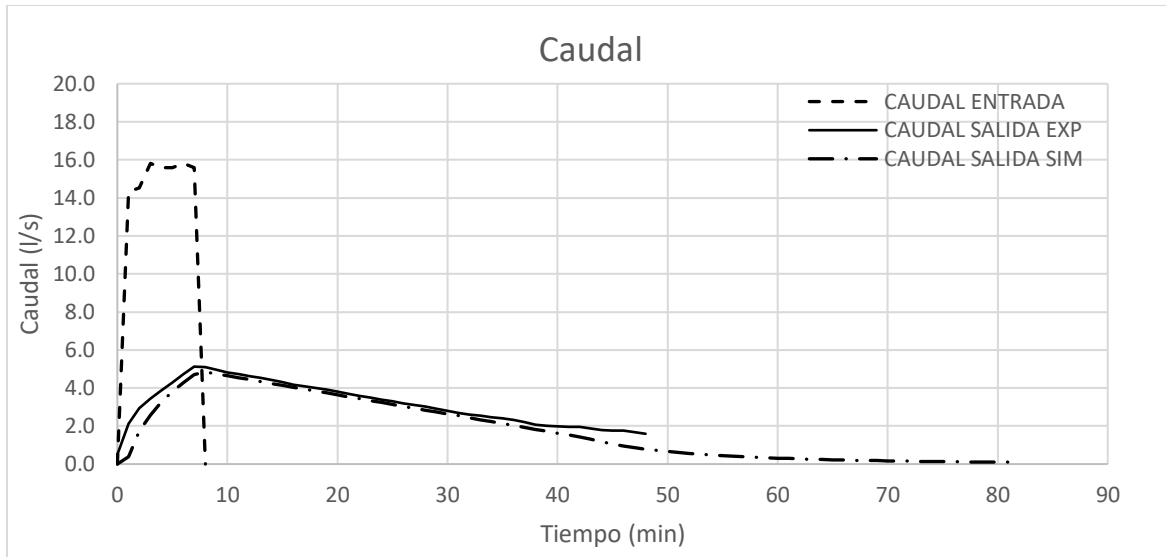
Precipitación total del evento equivalente = 19.67 mm

Periodo de retorno equivalente cantidad precipitada = 60 años

Máxima intensidad de lluvia equivalente = 126.49 mm/h

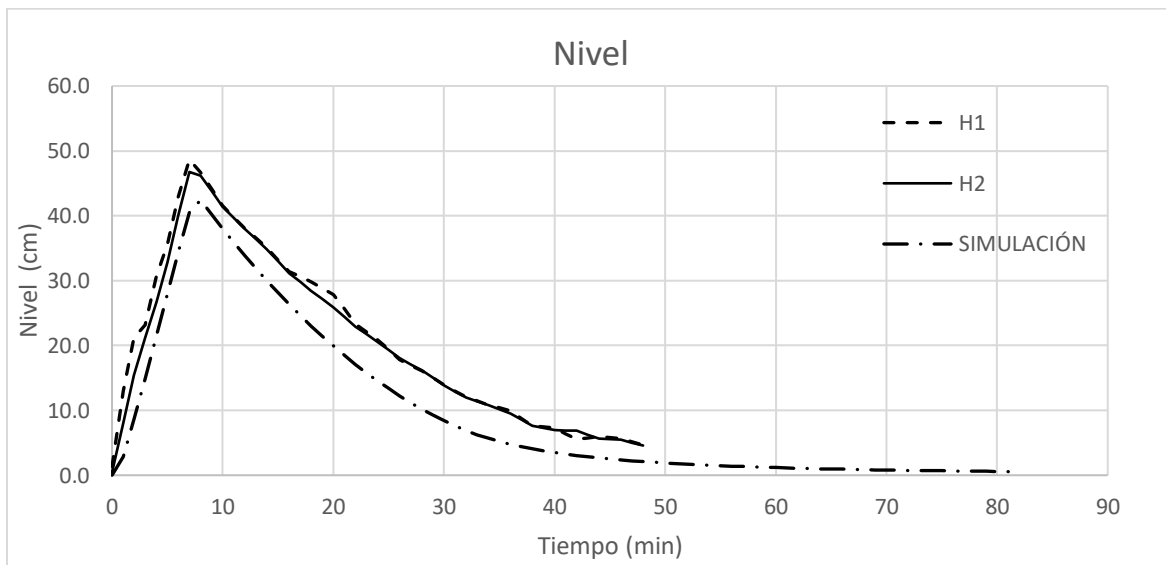
Periodo de retorno equivalente intensidad precipitación = 23 años (Td = 8 min)

Desfase del caudal pico = 3.8 min

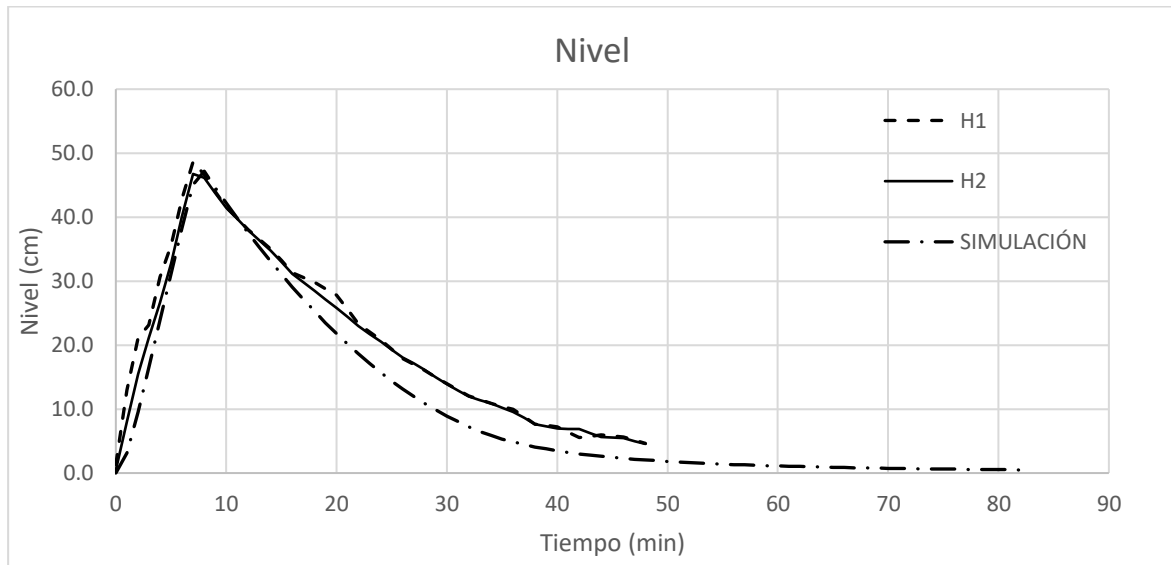


**Gráfica 3-18:** Curvas de caudal experimento 5

El nivel máximo experimental fue de 46.8 cm, el nivel máximo simulado fue de 42.4 cm y se muestran en la **Gráfica 3-19**.



**Gráfica 3-19:** Curvas de nivel experimento 5



**Gráfica 3-20:** Curvas de nivel ajustadas experimento 5

### Experimento 6

La **Gráfica 3-21** muestra los resultados del experimento 6, en el cual se logró estabilizar el caudal en un valor promedio de 19,4 l/s, con una variación de aproximadamente 0,2 l/s a la entrada del tanque, con la VALV 2 en la apertura número 7.

Apertura VALV 1 = 5

Apertura VALV 2 = 7

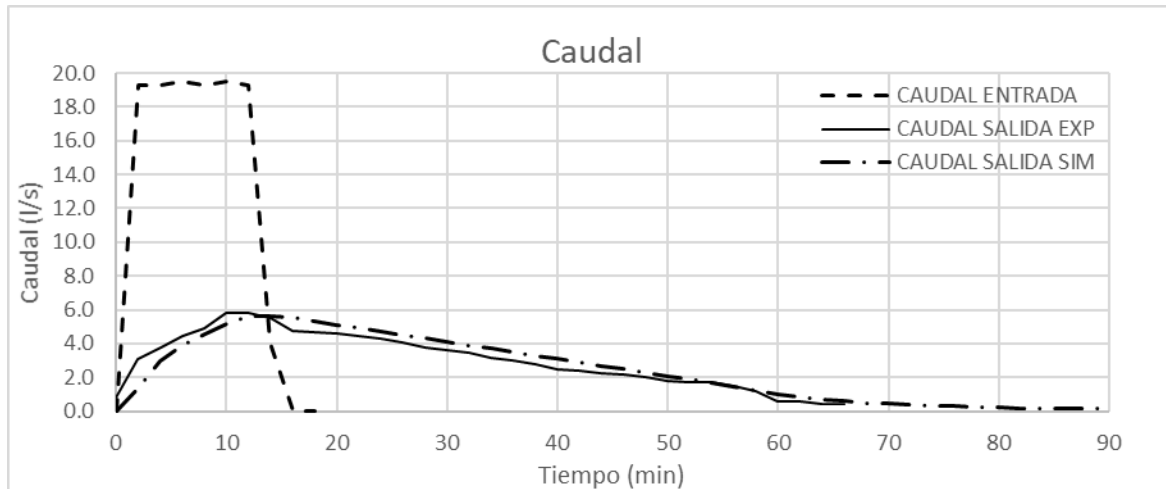
Precipitación total del evento equivalente = 31.94 mm

Periodo de retorno equivalente cantidad precipitada = 100 años

Máxima intensidad de lluvia equivalente = 154.33 mm/h

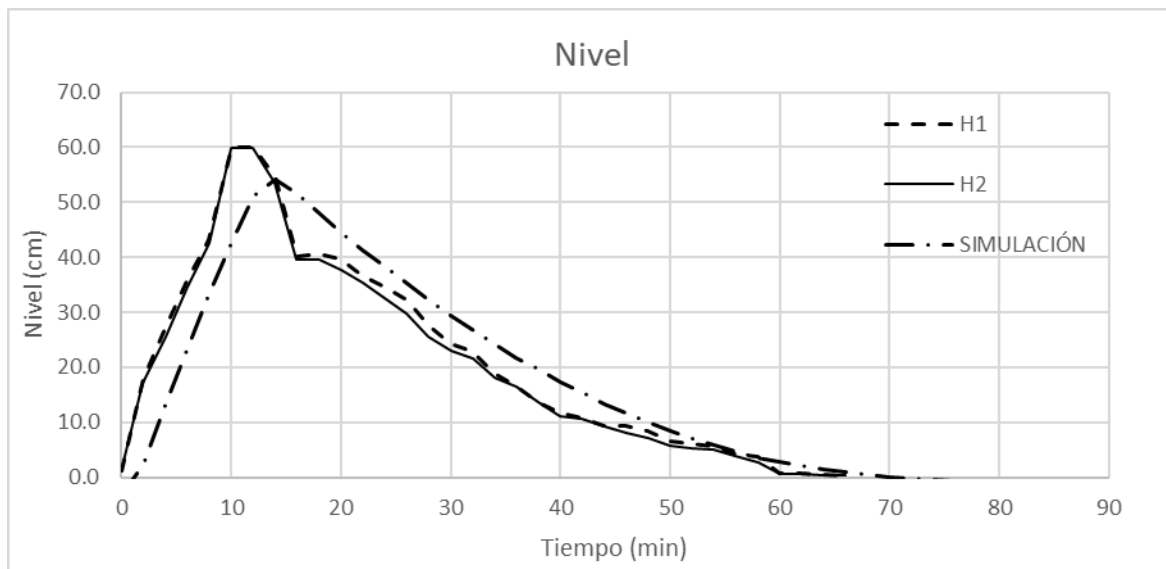
Periodo de retorno equivalente intensidad precipitación = 140 años (Td = 16 min)

Desfase del caudal pico = 6.5 min

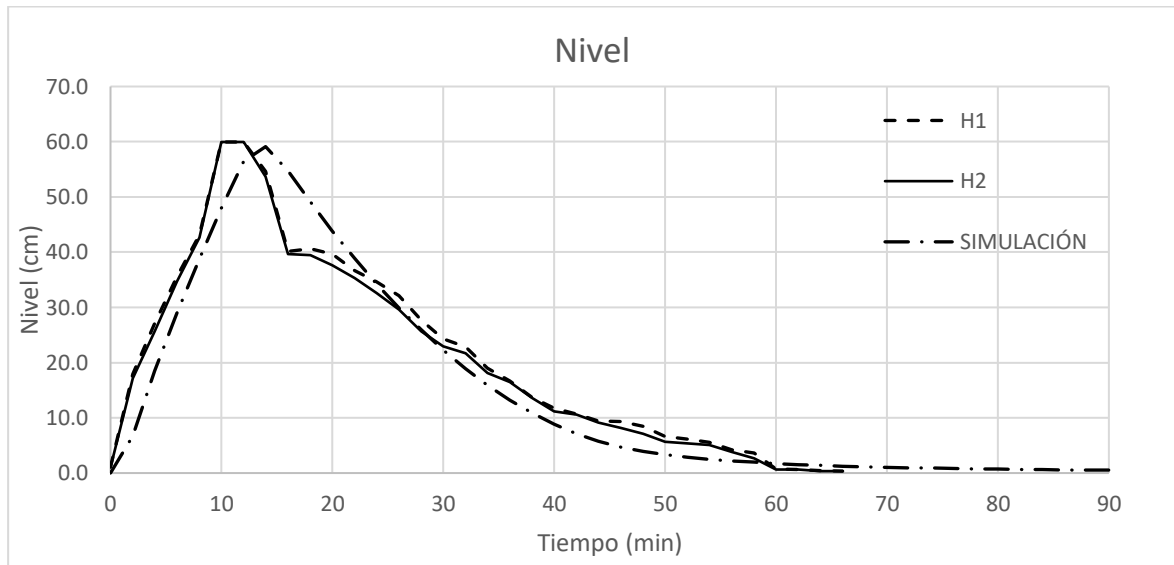


**Gráfica 3-21** Curvas de caudal experimento 6

El nivel máximo experimental fue de 60.0 cm, el nivel máximo simulado fue de 54.0 cm y se muestra en la **Gráfica 3-22**.



**Gráfica 3-22:** Curvas de nivel experimento 6



**Gráfica 3-23:** Curvas de nivel ajustadas experimento 6

### Experimento 7

En el experimento 7 el caudal de entrada fue estabilizado en un valor de 24.3 l/s. El caudal pico de salida fue 5,4 l/s

Apertura VALV 1 = 5

Apertura VALV 2 = 8

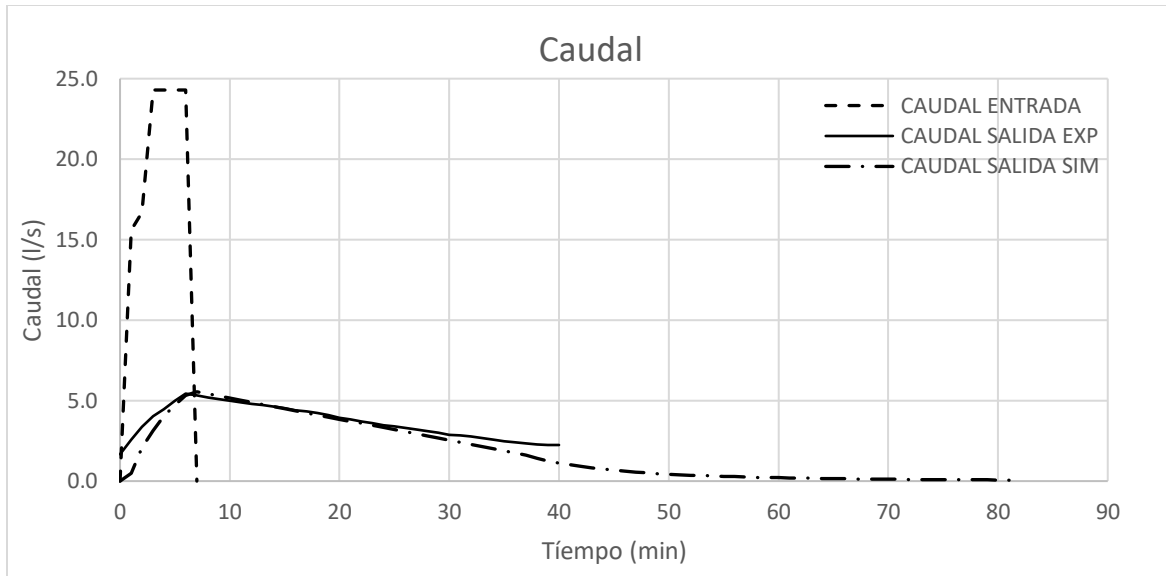
Precipitación total del evento equivalente = 19.67 mm

Periodo de retorno equivalente cantidad precipitada = 63 años

Máxima intensidad de lluvia equivalente = 221.84 mm/h

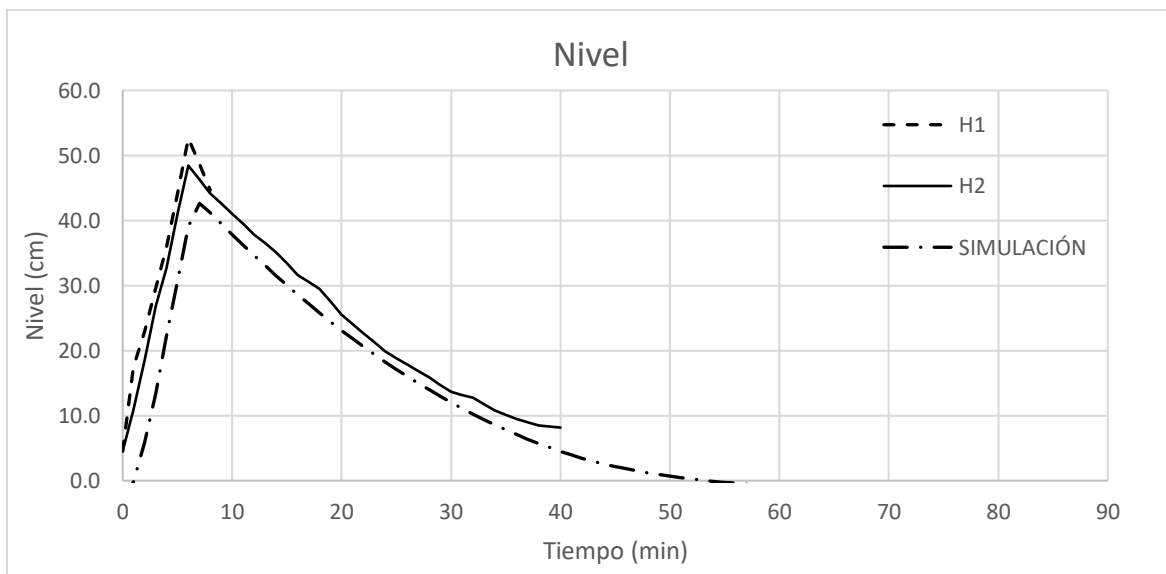
Periodo de retorno equivalente intensidad precipitación = 140 años (Td = 8 min)

Desfase del caudal pico = 2.2 min



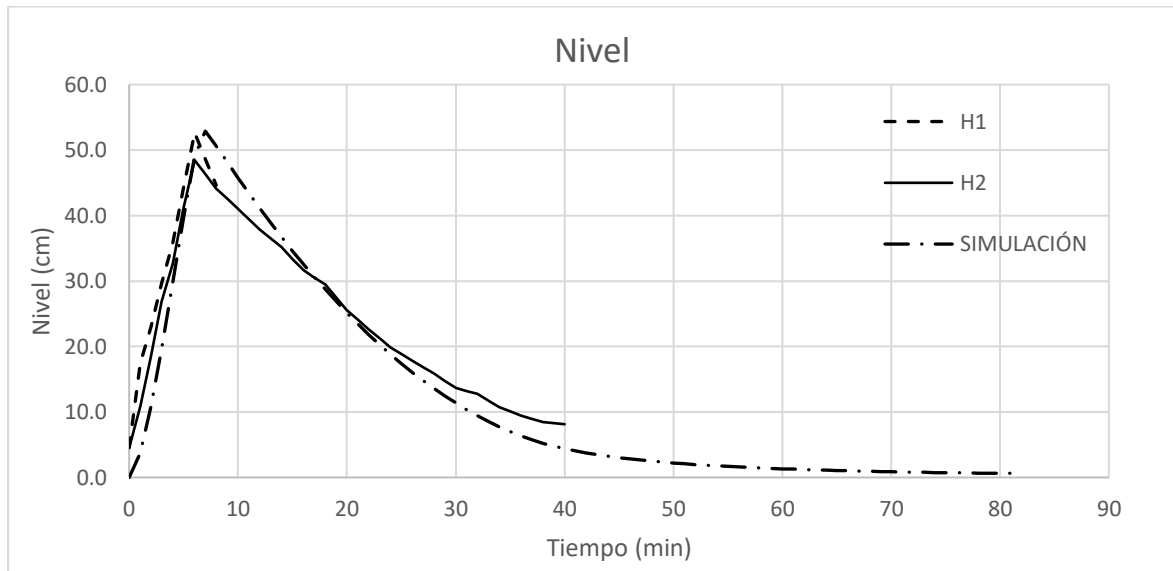
**Gráfica 3-24:** Curvas de caudal experimento 7

El nivel máximo experimental fue de 48.5 cm, el nivel máximo simulado fue de 42.6 cm y se muestran en la **Gráfica 3-25**.



**Gráfica 3-25:** Curvas de nivel experimento 7





**Gráfica 3-26:** Curvas de nivel ajustadas experimento 7

### Experimento 8

En este experimento la apertura de la VALV 2 fue variable para simular un hidrograma con diferentes picos y observar el comportamiento del nivel del tanque.

Apertura VALV 1 = 5

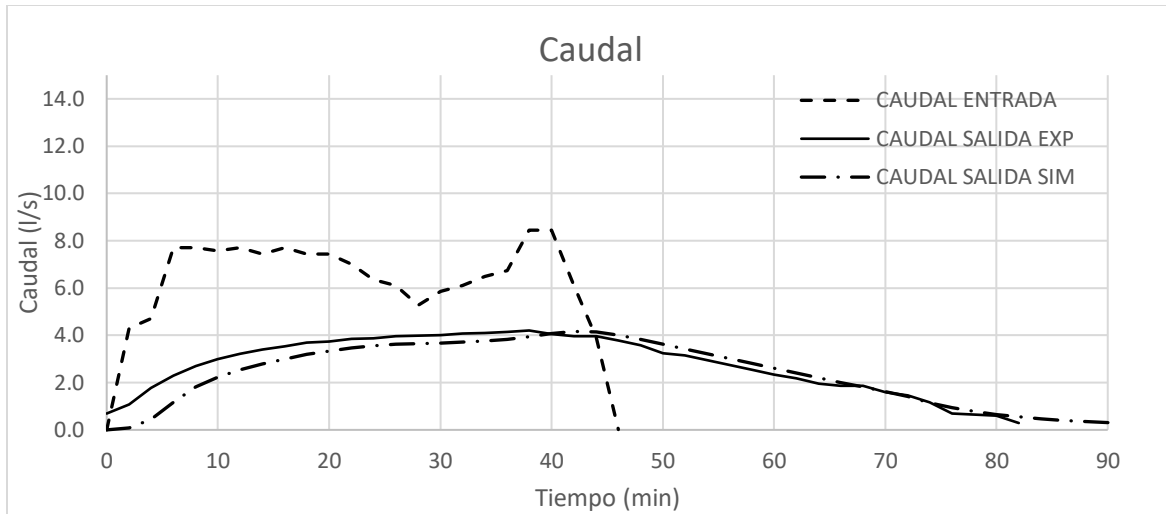
Apertura VALV 2 = VAR

Precipitación total del evento equivalente = 30.15 mm

Periodo de retorno equivalente cantidad precipitada = 4.7 años

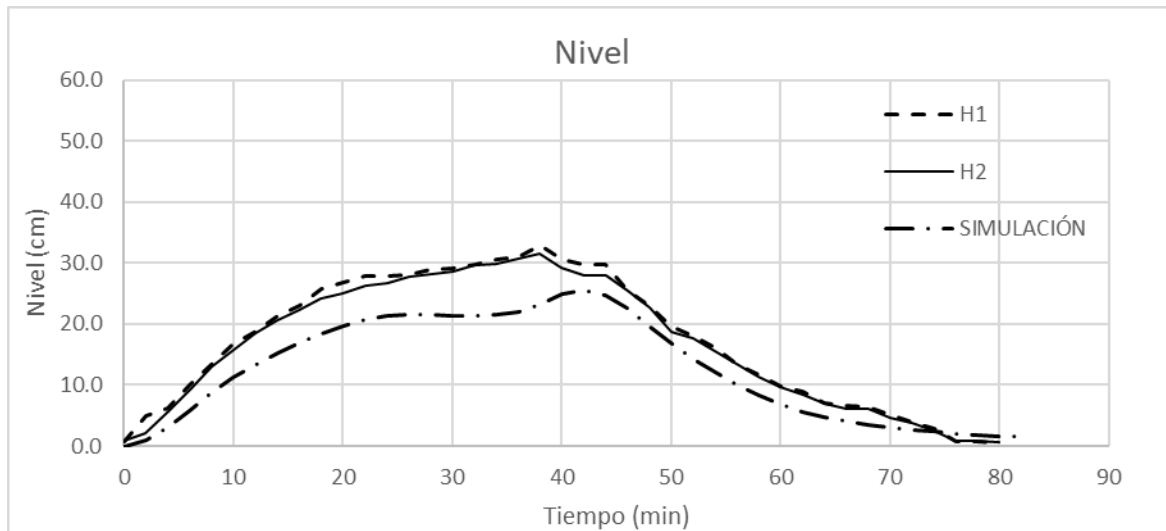
Máxima intensidad de lluvia equivalente = 48.87 mm/h

Periodo de retorno equivalente intensidad precipitación = 20 años (Td = 46 min)

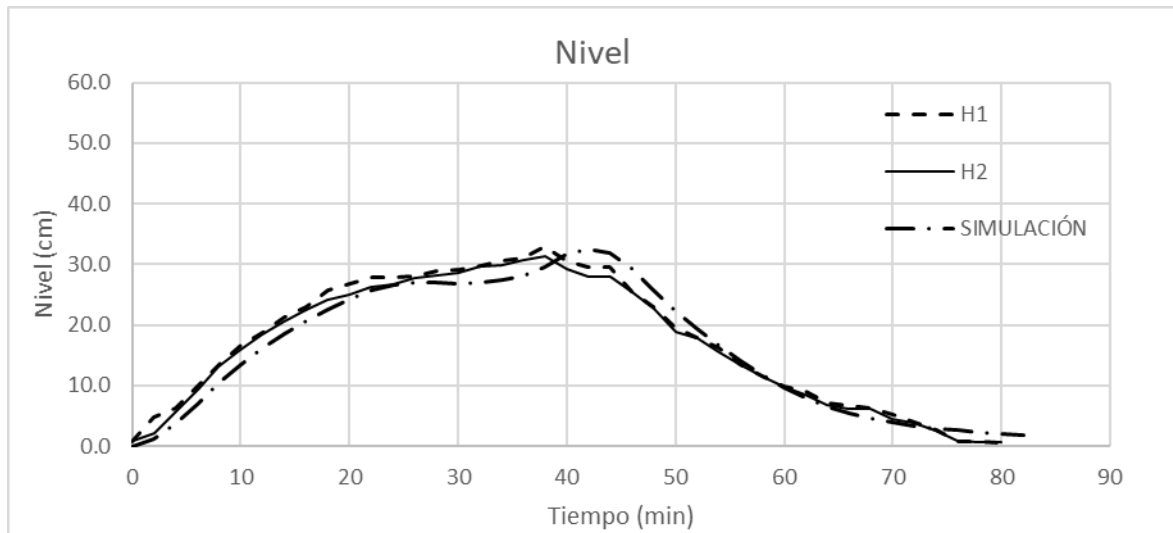


**Gráfica 3-27:** Curvas de caudal experimento 8

El nivel máximo experimental fue de 31.5 cm, el nivel máximo simulado fue de 25.6 cm y se muestran en la **Gráfica 3-28**.



**Gráfica 3-28:** Curvas de nivel experimento 8



**Gráfica 3-29:** Curvas de nivel ajustadas experimento 8

### Experimento 9

En este experimento la apertura de la VALV 2 se varió para simular un hidrograma con diferentes picos y observar el comportamiento del nivel del tanque. Se alcanzó un caudal pico de entrada de 24,3 l/s, y un caudal pico de salida de 5,2 l/s.

Apertura VALV 1 = 5

Apertura VALV 2 = VAR

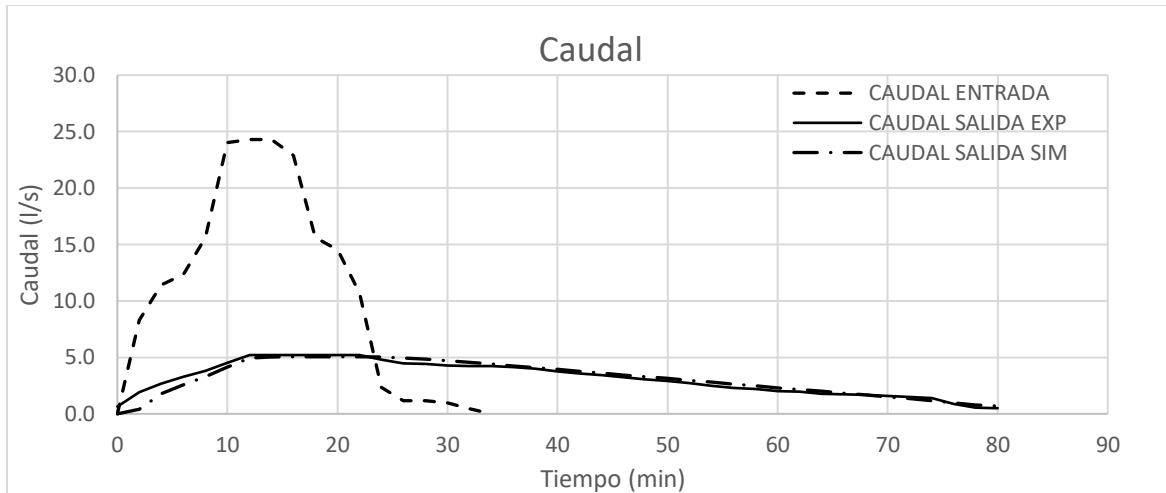
Precipitación total del evento equivalente = 57.45 mm

Periodo de retorno equivalente cantidad precipitada = 28 años

Máxima intensidad de lluvia equivalente = 221,84 mm/h

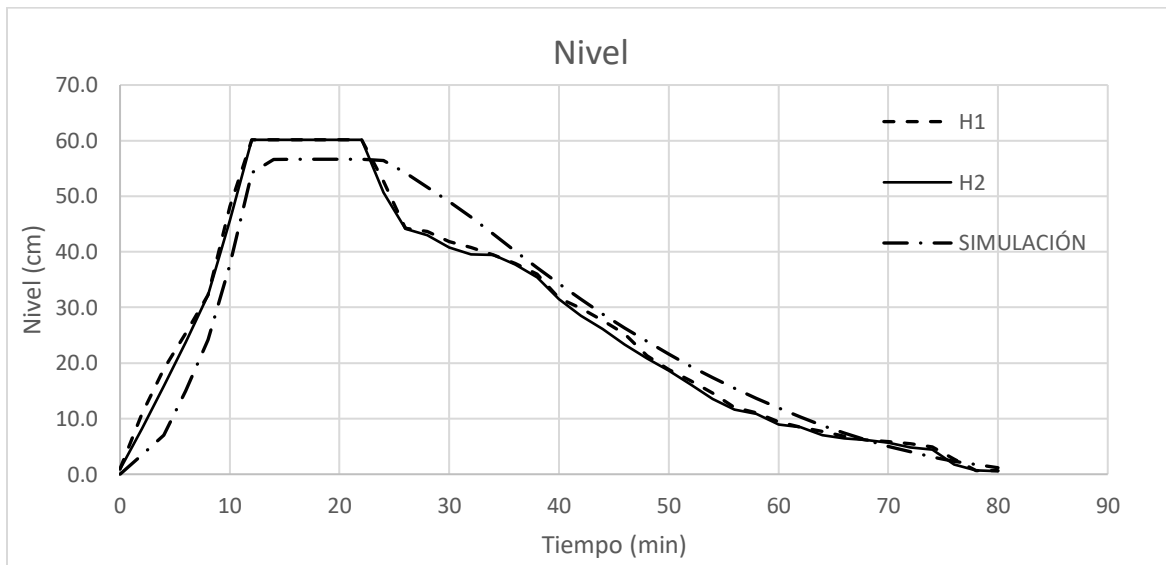
Periodo de retorno equivalente intensidad precipitación = 160 años (Td = 34 min)

Desfase del caudal pico = 10.5 min



**Gráfica 3-30:** Curvas de caudal experimento 9

El nivel máximo experimental fue de 60.2 cm, el nivel máximo simulado fue de 56.7 cm y se muestra en la **Gráfica 3-31**.



**Gráfica 3-31:** Curvas de nivel experimento 9

### Experimento 10

En este experimento la apertura de la VALV 2 se varió para simular un hidrograma con diferentes picos y observar el comportamiento del nivel del tanque. El hidrograma sintético creado en el laboratorio tiene 2 picos de caudal. El primero de 17,9 l/s y el segundo de 17,2 l/s. El caudal de salida presentó dos picos con valores iguales a 5,8 l/s.

Apertura VALV 1 = 5

Apertura VALV 2 = VAR

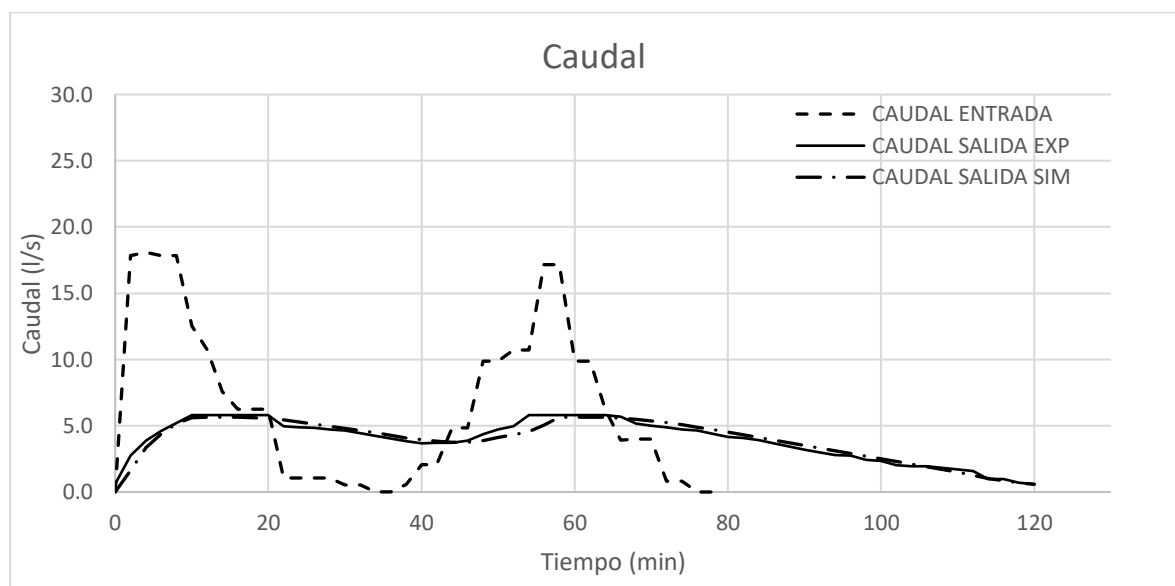
Precipitación total del evento equivalente = 70.8 mm

Periodo de retorno equivalente cantidad precipitada = 48 años

Máxima intensidad de lluvia equivalente = 186.87 mm/h

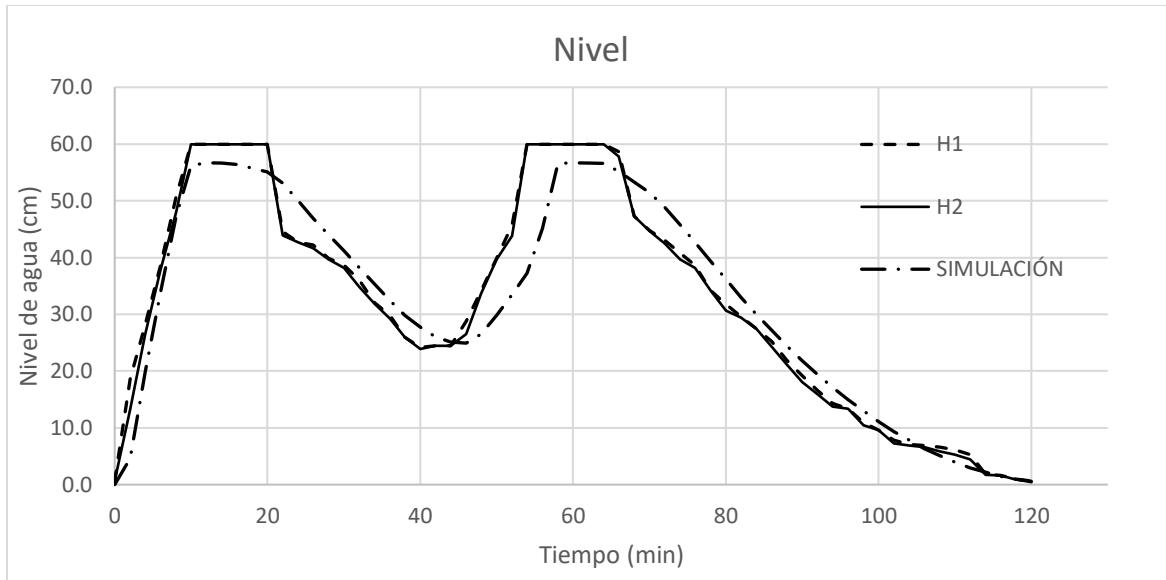
Periodo de retorno equivalente intensidad precipitación = 173 años (Td = 78 min)

Desfase del caudal pico = 15 min y 7 min

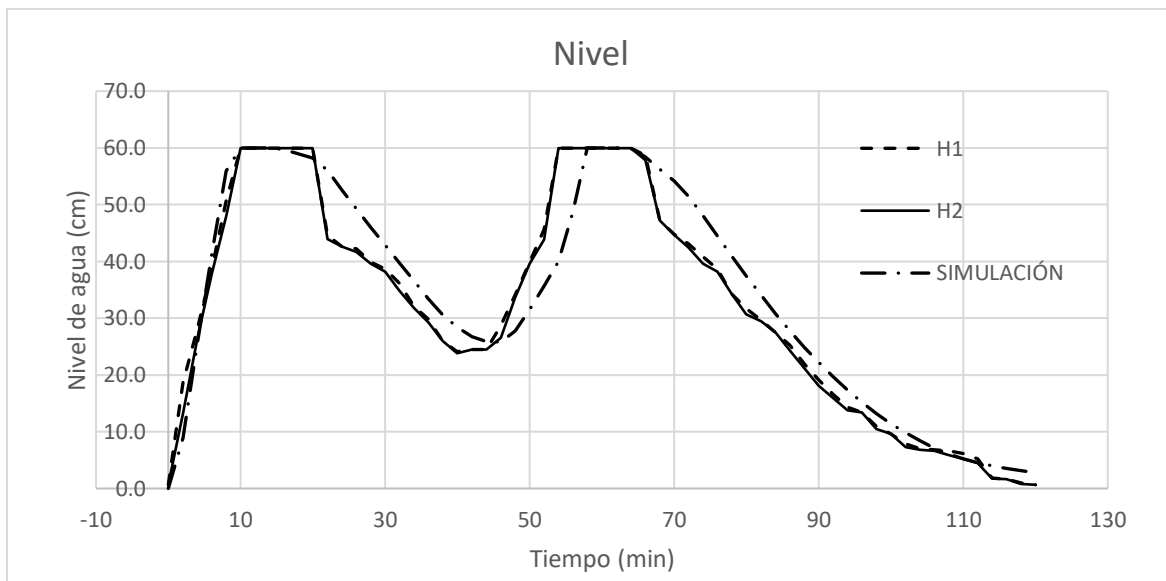


**Gráfica 3-32:** Curvas de caudal experimento 10

El nivel máximo experimental fue de 60.0 cm, el nivel máximo simulado fue de 54.3 cm y se muestran en la **Gráfica 3-33**.



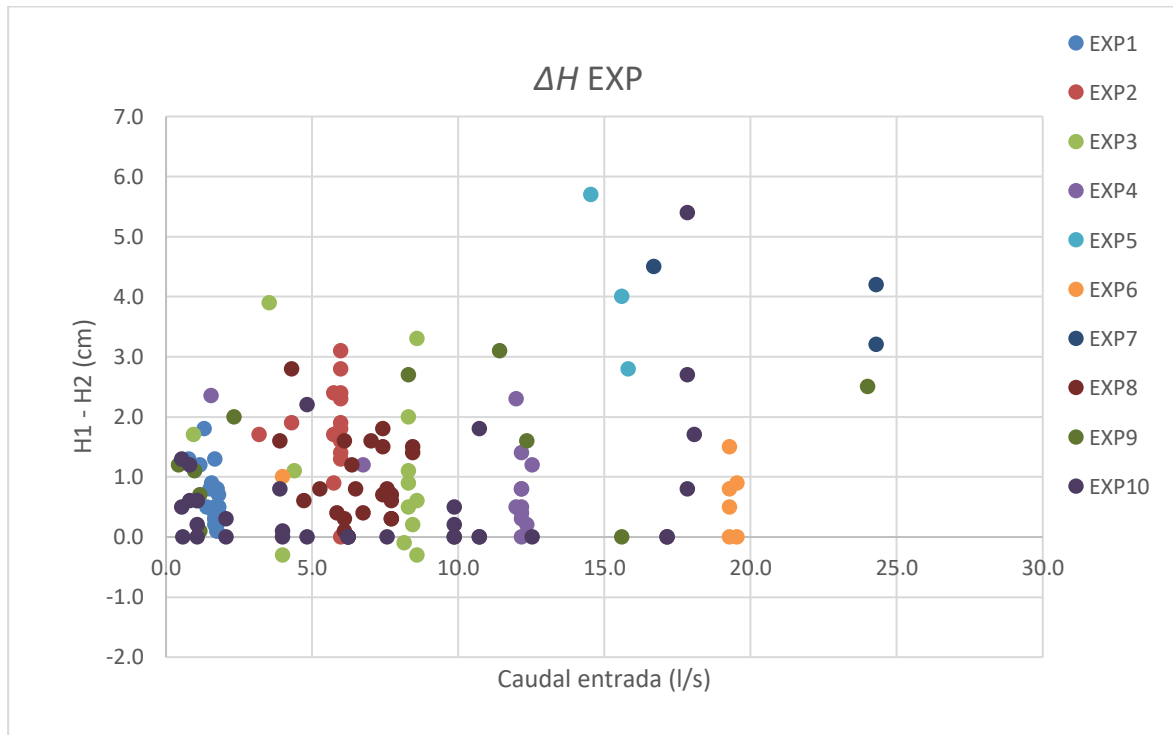
**Gráfica 3-33:** Curvas de nivel experimento 10



**Gráfica 3-34:** Curvas de nivel ajustadas experimento 10

Al abrirse la válvula VALV 2 en la apertura 9, el caudal fue superior a la capacidad hidráulica de conducción de la tubería de entrada del tanque, y se rebozaba el agua en la caja de entrada, por lo que no fue posible hacer el experimento en las dos últimas posiciones de la válvula, es decir, en las aperturas 9 y 10.

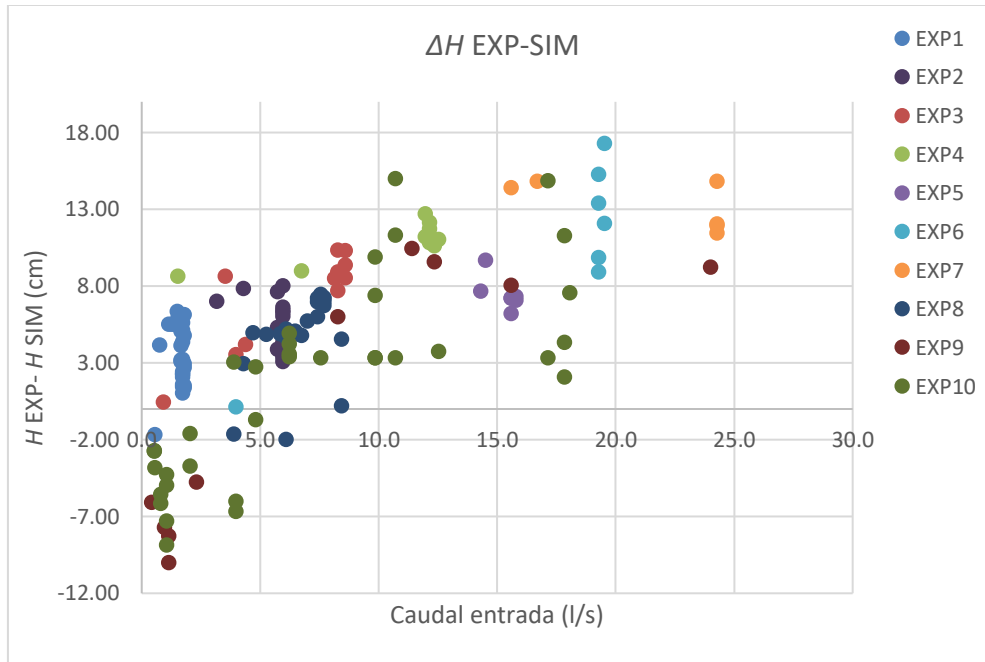
La diferencia entre el nivel a la entrada  $H1$  y el nivel a la salida  $H2$  fue llamada  $\Delta H \text{ EXP}$ . Esta diferencia se muestra en la **Gráfica 3-35** en función del caudal de entrada para los 10 experimentos realizados. Esta diferencia es mostrada para los instantes en los que el caudal de entrada es mayor a cero.



**Gráfica 3-35:** Diferencia entre el nivel de agua a la entrada ( $H1$ ) y la salida ( $H2$ ) medidos experimentalmente en función del caudal de entrada.

El valor de  $\Delta H \text{ EXP}$  presentó un rango de valores entre -0.3 cm y 5.7 cm, y el promedio fue de 1.6 cm equivalente al 2,6% de la altura total del tanque.

La diferencia entre el nivel medido experimentalmente (el promedio entre  $H1$  y  $H2$ ), y el nivel resultado de la simulación matemática, fue llamada  $\Delta H \text{ EXP-SIM}$ . Esta diferencia de nivel se muestra en la **Gráfica 3-36** con respecto al caudal de entrada. Se muestran los valores para caudales de entrada mayores a cero.

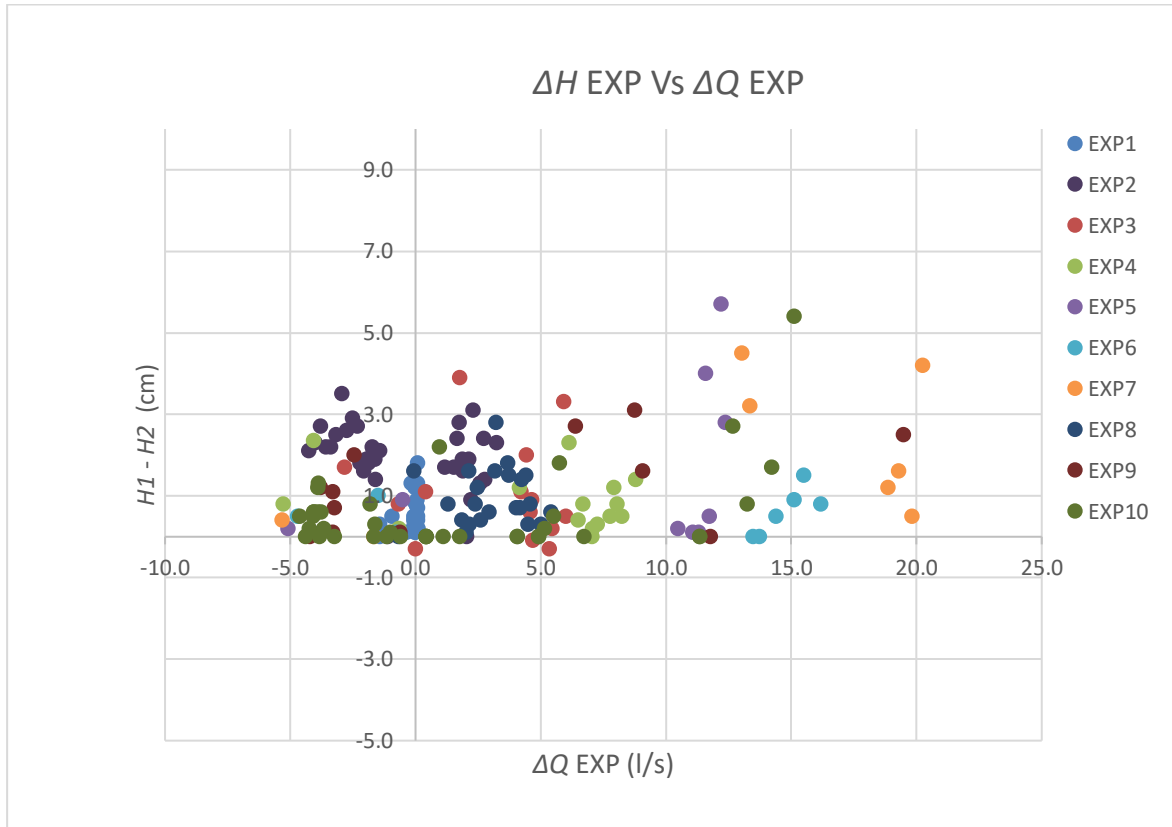


**Gráfica 3-36:** Diferencia entre el nivel experimental y el simulado en función del caudal de entrada.

Los valores negativos de  $\Delta H \text{ EXP-SIM}$  en la **Gráfica 3-36** ocurren debido a que la curva de nivel experimental interseca la curva de nivel simulada en algunos experimentos, como por ejemplo en el experimento 10 (**Gráfica 3-33**). El promedio de diferencia entre el nivel medido, y el simulado es de 6,65 cm equivalente al 10.9% de la altura total del tanque. La diferencia máxima que se presentó fue de 17.28 cm, y la mínima fue -10.0 cm.

Se graficaron los valores de  $\Delta H \text{ EXP}$  (nivel de entrada menos nivel de salida medidos en el laboratorio) en función de la diferencia entre el caudal de entrada y el caudal de salida experimental llamado  $\Delta Q \text{ EXP}$ . Estos valores se pueden observar en la **Gráfica 3-37**.

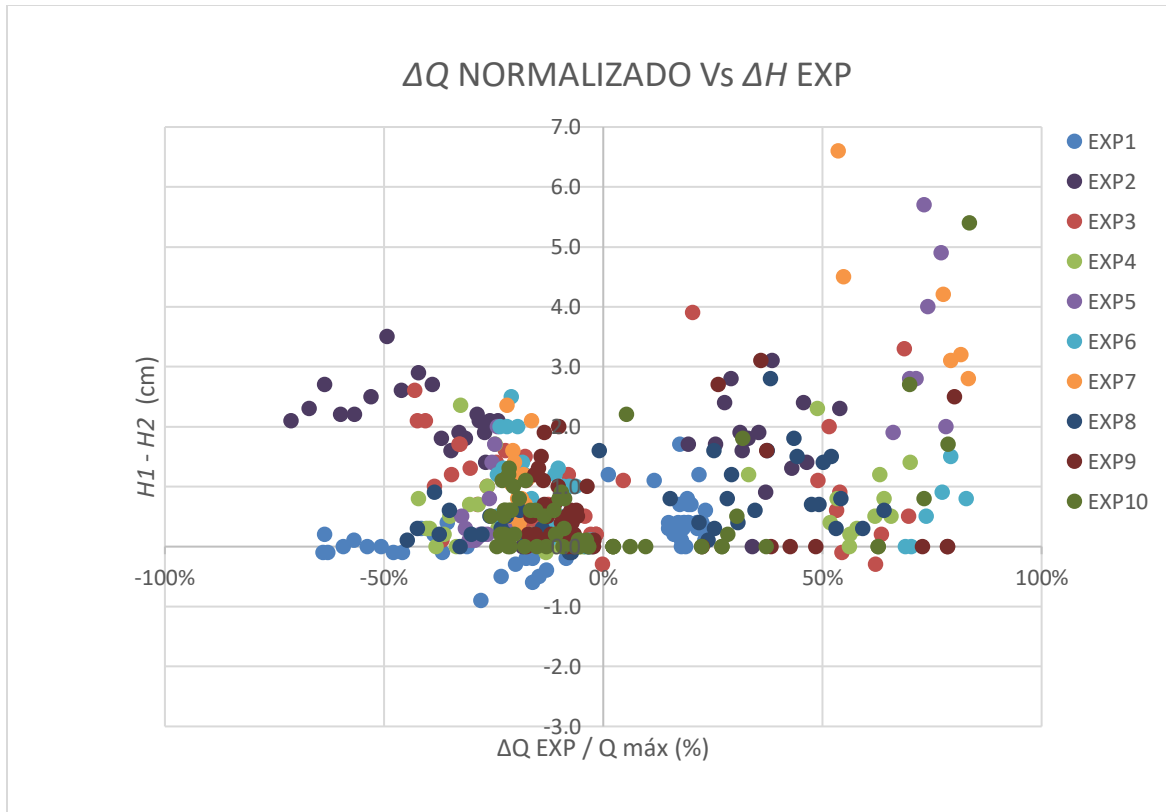




**Gráfica 3-37:** Variación de  $\Delta H \text{ EXP}$  ( $H1 - H2$ ) en función de  $\Delta Q \text{ EXP}$  (entrada menos salida)

En la **Gráfica 3-37** se puede observar que hay una tendencia al aumento de la diferencia de nivel, a medida que aumenta la diferencia del caudal de entrada con respecto al caudal de salida, es decir, la atenuación. Los valores negativos de atenuación ocurren cuando el hidrograma de entrada interseca el hidrograma de salida, y este último es mayor cuando se cierra la válvula VALV 2.

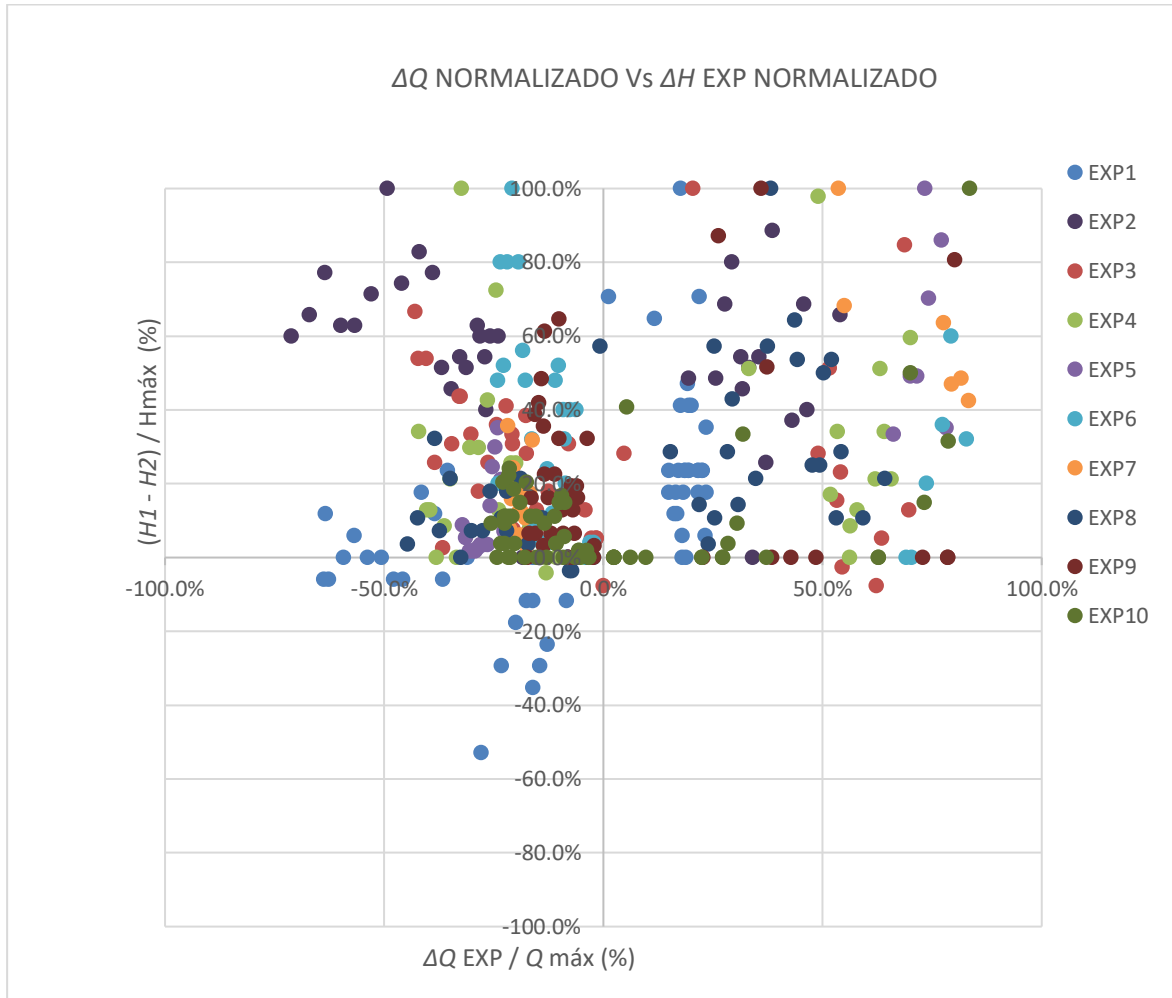
Para poder observar el efecto del caudal en términos de porcentaje del caudal pico, sobre la diferencia de alturas entre  $H1$  y  $H2$ , se normalizaron los datos de atenuación de caudal dividiéndolos por el valor pico presentado en el hidrograma. Esta normalización es la transformación de escala de los datos para poder hacer comparaciones eliminando los efectos de influencias (Canavos, 1998). Con esto, se realizó la comparación de valores y se pueden observar en la **Gráfica 3-38**.



**Gráfica 3-38:** Caudales experimentales normalizados comparados con las diferencias de nivel  $H1$  y  $H2$

En la **Gráfica 3-38** se puede observar una alta densidad de datos en el rango de  $\Delta H$  EXP entre 0 y 4 cm, y entre -40% y 0% de caudales normalizados  $\Delta Q$  EXP.

Para poder observar el efecto de la diferencia de alturas entre  $H1$  y  $H2$  con respecto a la altura pico medida en cada experimento, se normalizaron los datos de diferencia de nivel experimental  $\Delta H$  EXP, dividiéndolos entre el nivel máximo presentado en cada experimento y fueron graficados en términos de porcentaje. Esto se puede observar en la **Gráfica 3-39**.

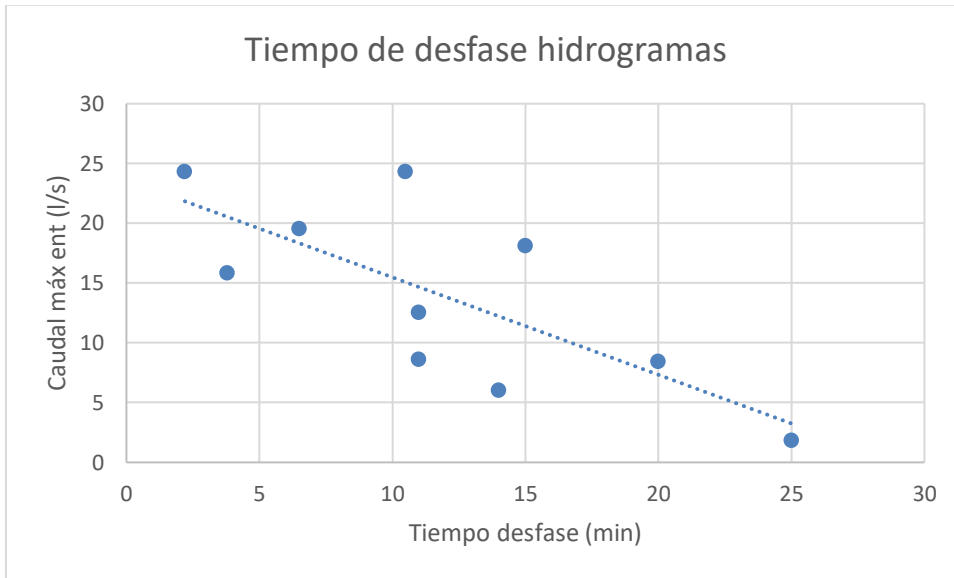


**Gráfica 3-39:** Caudales experimentales normalizados comparados con las diferencias de nivel  $H1$  y  $H2$  normalizadas

En la **Gráfica 3-39** se puede observar una alta densidad de datos en el rango de  $\Delta H$  EXP Normalizado entre 0% y 20%, y entre -40% y 0% de caudales normalizados  $\Delta Q$  EXP. Se puede observar que los resultados del Exp 1 presenta valores de  $\Delta H$  EXP Normalizado negativos en su caudal mas bajo. Esto es contraintuitivo pero demuestra que la variación de nivel se puede deber a oscilaciones del agua.

El tiempo de desfase entre el caudal pico de los hidrogramas de entrada y salida varía en función del caudal de entrada y se muestra en la **Gráfica 3-40**. Se puede observar que a medida que el caudal de entrada aumenta, el tiempo de desfase disminuye. Para los

caudales altos, el tiempo de desfase fue muy corto, debido a la alta rapidez con la que se llena el tanque.



**Gráfica 3-40:** Variación del tiempo de desfase entre hidrogramas de entrada y salida caudal máximo de entrada experimental

Un resumen de los resultados de todos los experimentos se muestra en la **Tabla 3-1**.

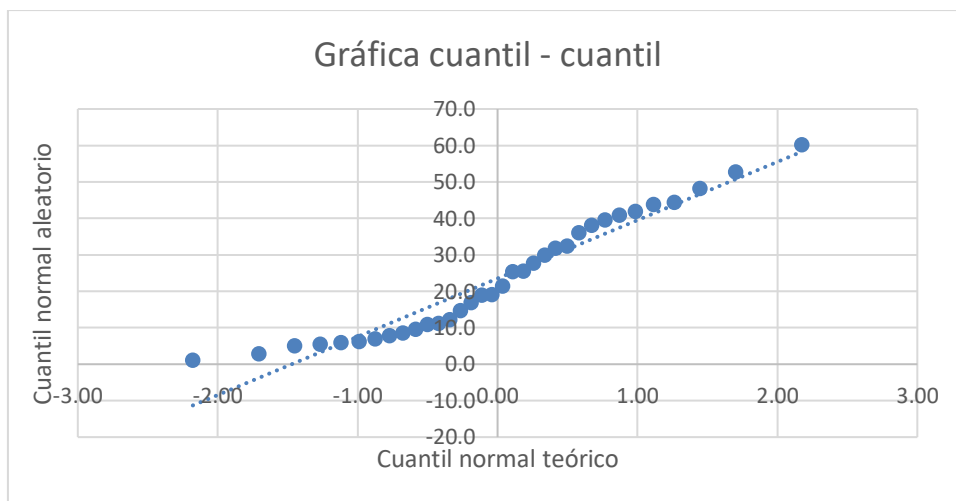
**Tabla 3-1:** Tabla resumen de resultados de todos los experimentos realizados

EXP	TIEMPO				CAUDAL						NIVEL			
	Td (min)	TP ENT (min)	TP SAL (min)	DESFASE (min)	Q MÁX ENT l/s	Q MÁX SAL (EXP) l/s	Q MÁX SAL (SIM) l/s	Atenuación (EXP) %	Atenuación (SIM) %	H MÁX EXP (cm)	H MÁX SIM (cm)	ΔH EXP (máx) (cm)	ΔH EXP-SIM (máx) (cm)	Porcentaje ΔH EXP-SIM / H total %
1	66.0	35.0	60.0	25.0	1.8	1.4	1.5	21%	19%	13.5	11.9	1.7	6.3	10%
2	32.0	17.0	31.0	14.0	6.0	4.3	4.0	28%	34%	37.5	31.4	3.5	8.0	13%
3	28.0	13.0	24.0	11.0	8.6	4.1	4.0	53%	53%	44.9	39.0	3.9	10.3	17%
4	28.0	14.0	25.0	11.0	12.5	5.8	5.6	53%	55%	51.7	40.2	2.4	12.7	21%
5	8.0	4.0	7.8	3.8	15.8	5.1	4.8	68%	69%	46.8	42.4	5.7	9.7	16%
6	16.0	7.0	13.5	6.5	19.5	5.8	5.6	70%	71%	60.0	54.0	2.5	17.3	28%
7	7.0	4.5	6.7	2.2	24.3	5.4	5.5	78%	77%	48.5	42.6	5.8	14.8	24%
8	46.0	22.0	43.0	21.0	8.4	4.2	4.2	50%	51%	31.5	25.6	2.8	7.4	12%
9	34.0	13.0	23.5	10.5	24.3	5.2	5.1	79%	79%	60.2	56.7	3.1	10.4	17%
10	78.0	5.0	20.0	15.0	18.1	5.8	5.6	68%	69%	60.0	54.3	5.4	15.0	25%

### 3.2 Resultados análisis estadístico

Se agruparon los datos de nivel a la entrada  $H1$  y la salida  $H2$  del tanque para cada uno de los experimentos, y se realizó el análisis de varianzas. Este análisis se puede resumir en la tabla de varianza ANOVA.

Para realizar el ANOVA se verificó que los datos tuvieran una distribución normal. Esta verificación se hizo por medio de una gráfica cuantil-cuantil (Q – Q Plot) que permite observar que tan cerca esta la distribución de los datos con una distribución normal (Canavos, 1998) y el resultado se puede observar en la **Gráfica 3-41**.



**Gráfica 3-41:** Gráfica cuantil - cuantil de nivel dentro del tanque

Se realizó el ANOVA con dos grupos de datos. El primer grupo es el conjunto de datos sin tratamiento, es decir el nivel medido a la entrada  $H1$ , y el segundo grupo es el conjunto de datos de nivel a la salida del tanque  $H2$ , después de haber sido afectados por la estructura celular del tanque. Los resultados del análisis de varianza de experimento 1 se muestran en la **Tabla 3-2**.

**Tabla 3-2:** Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 1

TABLA VARIANZA ANOVA					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	2.71	2.71	0.11	6.89
	ERROR	106	2575.18	24.29		
	TOTAL	107	2577.89			
					ACEPTAR HIPÓTESIS NULA	

H0 (Hipótesis nula) LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL  
 HA (Hipótesis alternativa) LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL

Debido a que el valor F de Fischer, calculado como el cociente de los cuadrados medios, es menor al valor F crítico ( $0.11 < 6.89$ ) extraído de la tabla de valores de cuantiles de la distribución F (Canavos, 1998) para un nivel de significancia  $\alpha$  de 0.01 (un 1% de riesgo de que la hipótesis sea aceptada o rechazada erróneamente), la hipótesis nula es aceptada, es decir, la estructura celular no afecta la horizontalidad del nivel de manera significativa.

En todos los experimentos el análisis de varianza determinó que la hipótesis nula es aceptada, lo que significa que la superficie del agua se puede considerar horizontal a pesar del efecto generado por la estructura de celdas. A continuación, se muestran los resultados de todos los análisis de varianza de los experimentos.

**Tabla 3-3:** Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 2

TABLA VARIANZA ANOVA					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	71.60	71.60	0.70	7.02
	ERROR	70	7148.55	102.12		
	TOTAL	71	7220.15			
					ACEPTAR HIPÓTESIS NULA	

**Tabla 3-4:** Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 3

TABLA VARIANZA ANOVA					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	29.89	29.89	0.14	6.97
	ERROR	78	17207.70	220.61		
	TOTAL	79	17237.59			
						ACEPTAR HIPÓTESIS NULA

**Tabla 3-5:** Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 4

TABLA VARIANZA ANOVA					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	5.58	5.58	0.02	6.80
	ERROR	70	18076.02	258.23		
	TOTAL	71	18081.60			
						ACEPTAR HIPÓTESIS NULA

**Tabla 3-6:** Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 5

TABLA VARIANZA ANOVA					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	11.80	11.80	0.07	6.91
	ERROR	96	16772.59	174.71		
	TOTAL	97	16784.38			
						ACEPTAR HIPÓTESIS NULA

**Tabla 3-7:** Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 6

TABLA VARIANZA ANOVA					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	10.92	10.92	0.03	7.04
	ERROR	66	21073.63	319.30		
	TOTAL	67	21084.55			
						ACEPTAR HIPÓTESIS NULA



**Tabla 3-8:** Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 7

TABLA VARIANZA ANOVA					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	30.67	30.67	0.19	6.96
	ERROR	80	13259.97	165.75		
	TOTAL	81	13290.64			
					ACEPTAR HIPÓTESIS NULA	

**Tabla 3-9:** Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 8

TABLA VARIANZA ANOVA					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	8.42	8.42	0.07	6.95
	ERROR	82	9690.04	118.17		
	TOTAL	83	9698.46			
					ACEPTAR HIPÓTESIS NULA	

**Tabla 3-10:** Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 9

TABLA VARIANZA ANOVA					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	9.29	9.29	0.02	6.96
	ERROR	80	32444.84	405.56		
	TOTAL	81	32454.13			
					ACEPTAR HIPÓTESIS NULA	

**Tabla 3-11:** Tabla análisis de varianza ANOVA para el Exp 10

TABLA VARIANZA ANOVA					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	8.60	8.60	0.02	6.87
	ERROR	120	46430.72	386.92		
	TOTAL	121	46439.33			
					ACEPTAR HIPÓTESIS NULA	

A pesar de que se encontraron diferencias de nivel entre la entrada y la salida, según el análisis de varianza, estas diferencias no son significativas, y no obedecen a algún efecto generado por las celdas.



## 4. Análisis de resultados

De acuerdo con los resultados del análisis estadístico, el nivel dentro del tanque construido con elementos celulares sí puede ser considerado horizontal, puesto que las fluctuaciones no fueron significativas entre la entrada y la salida. La diferencia entre el nivel a la entrada  $H1$  y el nivel a la salida  $H2$  fue en promedio de 1,6 cm y tuvo un rango de valores entre -0.3 cm y 5.8 cm como se puede observar en la **Gráfica 3-35**. Existe una tendencia a aumentar la diferencia entre el nivel a la entrada y la salida a medida que aumenta el caudal.

No obstante, el nivel medido tuvo una afectación por la estructura celular al ser comparado con los resultados de una simulación matemática. La afectación hidráulica generada por la estructura de las celdas, fue un ascenso del nivel experimental con respecto a los resultados de la simulación y se puede observar en la diferencia entre la curva de nivel obtenida de la experimentación y la curva obtenida de la simulación matemática, como por ejemplo en la **Gráfica 3-25**. Este afectación se presentó en todos los experimentos.

Se encontró que la diferencia entre el nivel experimental y el nivel simulado  $\Delta H_{EXP-SIM}$  fue en promedio 6.65 cm, es decir 10.9% de la altura total del tanque. Estas diferencias se pueden observar en la **Gráfica 3-36** y tuvieron un rango de valores entre -10.0 cm y 17.28 cm, para condiciones de caudal entre 1.8 l/s y 24.3 l/s. Esto se podría interpretar de manera que la simulación matemática subestimó los niveles que se presentaron en la experimentación. Estos valores se pueden observar en la **Tabla 3-1**.

Se observa en la **Gráfica 3-37** que al comparar los valores de  $\Delta H_{EXP}$  ( $H1$  menos  $H2$ ) con  $\Delta Q_{EXP}$  (diferencia del caudal de entrada menos el de salida experimental), las mayores diferencias se presentan para la condición en la que la atenuación es mayor. Se presentaron valores negativos debido a que la curva de caudal de entrada interseca la

curva de salida en la recesión del hidrograma de entrada, con resultados de  $\Delta H$  menores a 3 cm en su mayoría.

Para poder comparar los datos de caudal independientemente de su magnitud, se han normalizado dividiéndolos por el caudal máximo presentado en cada experimento, y expresados en porcentaje. En la **Gráfica 3-38** se puede observar el caudal normalizado y su relación con los valores de  $\Delta H$  EXP. Se observa una alta concentración de datos en el rango de caudal de -40% y 0% con valores  $\Delta H$  EXP de entre 0 y 4 cm (el 65% de los datos). Esto significa que la mayor parte de las diferencias entre el nivel a la entrada  $H1$  y a la salida  $H2$ , se presentaron después de que el hidrograma de entrada intersecó el hidrograma de salida, es decir, el momento en el que se cierra la válvula VALV 2 es cuando se presenta el mayor número de datos de diferencia entre los niveles  $H1$  y  $H2$ .

También se normalizaron los valores de nivel dividiendo todos los datos entre el nivel máximo presentado en cada experimento, y se graficaron en función de caudal normalizado. Estos datos se pueden observar en la **Gráfica 3-39**. Se observa una alta densidad de datos en el rango de caudal entre -40% - 0%, y de nivel  $\Delta H$  EXP entre 0%-20% (el 60% de los datos). Esto se interpreta de manera que, cuando el hidrograma de entrada interseca al hidrograma de salida y el nivel empieza a descender, se presenta el mayor número de diferencias entre el nivel a la entrada y el nivel a la salida. Esta diferencia porcentualmente es mayor para niveles bajos y la mayoría de valores de  $\Delta H$  EXP normalizados representan 20% o menos de la altura pico. Se puede observar que los primeros 3 experimentos tienen valores más altos de variación de nivel normalizados debido a que son caudales bajos en comparación con el resto de los experimentos.

En la experimentación se observó que el tiempo en el que se desocupa el tanque es muy próximo al obtenido como resultado de la simulación matemática con diferencias de aproximadamente 2 minutos. Esto es debido a que en la simulación se utilizó el coeficiente de descarga calibrado experimentalmente en el tanque. El tanque se desocupó en un tiempo aproximado a 60 min, considerando un nivel inicial de 50 cm.

Los tiempos de desfase del caudal pico dependen directamente del caudal de entrada, obteniéndose valores entre 2.2 min y 25 min (**Gráfica 3-40**). Entre más alto es el caudal de entrada, menor es el tiempo de desfase, debido a la mayor rapidez con la que se llena

el tanque. Cuando la VALV 2 es cerrada, el caudal de salida decrece presentándose el valor pico y la curva del hidrograma de entrada interseca el hidrograma de salida simulado, y en este instante el volumen es máximo, como se puede apreciar por ejemplo en la **Gráfica 3-18**. Esto se evidenció en todos los experimentos realizados.

Al comparar para un mismo instante los caudales de salida simulados con los experimentales, se observa que, los caudales de salida resultado de la simulación fueron levemente menores que los caudales experimentales antes del pico. Después del pico, los caudales se comportan de manera similar. Esto se debe a que la calibración del orificio sumergido, se realizó para un nivel de agua decreciente.

Las pérdidas de energía que generó la tubería de salida en el tanque, significaron una reducción considerable en el coeficiente de descarga. El coeficiente de descarga de un orificio sumergido tiene un valor por lo general entre 0.6 y 0.8 (White, 1999), sin embargo, en este tanque el resultado fue de 0,48. Este valor es constante para descarga a presión atmosférica a diferencia de la descarga a una tubería, puesto que la fricción genera pérdidas de energía que hacen fluctuar este valor.

A pesar de que la metodología de piscina nivelada arroja resultados muy similares a los obtenidos con simulaciones matemáticas (en tanques sin estructura interna), como por ejemplo, de onda dinámica calculada mediante el programa de cómputo SWMM (García, 2011), la estructura celular en el tanque estudiado, hace que el nivel sea más alto que lo esperado, y esto no es tenido en cuenta en la mayoría de los casos, cuando se dimensiona un tanque de detención de agua lluvia con elementos celulares.

El nivel presentó diferencias entre la entrada y salida del tanque, que después de ser analizadas estadísticamente, se puede considerar piscina nivelada, sin embargo, es interesante observar que, una vez calibrados los caudales en la simulación matemática, los niveles no se comportaron similares entre la simulación y los medidos en la experimentación. Esto se puede explicar por la estructura de las celdas que aumenta el nivel, aun manteniéndolo horizontal.

Para ajustar la curva de nivel simulada a la curva de nivel registrada en el laboratorio, fue necesario afectar la curva del tanque que relaciona el nivel con el área superficial. Esta afectación fue realizada en un 16.4% y fue aplicada en todos los experimentos obteniendo un ajuste del orden de 1 cm aproximadamente.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

La diferencia entre los niveles de entrada y salida medidos en el tanque de detención con elementos celulares, sugieren que la superficie del agua en el interior de un tanque con elementos celulares no es horizontal. Sin embargo, después de realizar una experimentación y un análisis estadístico se concluye que el flujo se puede considerar piscina nivelada. La hipótesis de que el agua no debe ser considerada horizontal en un tanque de detención construido con elementos celulares, de acuerdo con los análisis de varianza fue rechazada, y por tanto la hipótesis nula es aceptada.

La estructura celular genera un efecto importante en el desempeño hidráulico de un tanque de detención, respecto a los valores obtenidos con la simulación matemática. En el tanque estudiado se observó un aumento del nivel experimental con respecto al resultado de la simulación ( $\Delta H_{EXP-SIM}$ ) en promedio de 10,9%.

La estructura celular aumenta el nivel con respecto a los resultados de la simulación matemática en el modelo, manteniendo la horizontalidad de la superficie del agua. Esto puede generar un subdimensionamiento cuando se diseña bajo la suposición de piscina nivelada, puesto que se tiene en cuenta los parámetros de la estructura de salida, pero usualmente no se tiene en cuenta la afectación que genera la estructura celular interna.

Los valores de  $\Delta H_{EXP}$  (diferencia entre  $H1$  y  $H2$ ) se presentaron en su mayoría, cuando el hidrograma de entrada interseca el hidrograma de salida, es decir, cuando cesa de entrar agua al tanque. En tal situación, el valor de  $\Delta H_{EXP}$  tuvo un rango entre 0 y 4 cm.

El elemento que gobierna el caudal de salida del tanque es el orificio sumergido conformado por la tubería de descarga hacia la caja de inspección final, cuyo comportamiento depende del coeficiente de descarga.

El coeficiente de descarga es variable con el caudal de salida debido a la fricción generada por la tubería; no obstante, en la simulación se utilizó un valor fijo de 0,48. Cuando se compararon los resultados de nivel de la experimentación con los de la simulación, siendo esta última calibrada con los caudales medidos, se observaron diferencias importantes, que obedecen a la resistencia al flujo que ejerce la estructura celular de este tipo de tanques. La estructura celular genera un aumento del nivel con respecto a una simulación matemática bajo la suposición de piscina nivelada para un tanque sin interferencias internas.

La diferencia entre los resultados simulados y medidos en el laboratorio, tiene como consecuencia un posible subdimensionamiento de los tanques de detención con elementos celulares, lo cual puede llevar a fallas funcionales en el sistema como reboses aguas arriba de los tanques de detención, o la incapacidad de amortiguar los caudales para los que fueron diseñados.

### **Recomendaciones**

Esta tesis constituye una primera fase de estudios de los SUDS en la Universidad Nacional, y el tanque de detención instalado será útil para futuras investigaciones comparando entre modelaciones matemáticas y medición de niveles correspondientes a eventos reales. Con esto se busca brindar herramientas de dimensionamiento y aportar conocimiento en el campo de los SUDS y su aplicabilidad en nuestro medio.

Se recomienda que la altura de un tanque de detención con elementos celulares, dimensionada con una simulación matemática suponiendo piscina nivelada sea mayorada por un factor de seguridad de entre un 10% y un 15%, esto debido al incremento de nivel que se observó en la experimentación en esta investigación.

Los resultados de esta investigación deben ser observados con precaución, puesto que no pueden ser extrapolados directamente. Estos resultados obedecen a una geometría determinada, y a un tipo de elementos celulares en particular. En futuras investigaciones se podría utilizar otro tipo de elementos celulares, dado que actualmente existen diversas formas y otras geometrías para poder establecer una relación entre el caudal de entrada y la geometría del tanque.



Este trabajo de investigación ha utilizado un método hidrológico por su frecuente uso para dimensionar tanques de detención, y para futuras investigaciones se recomienda utilizar métodos de cálculo hidráulico que permitan estimar las pérdidas de energía que ocurren en el interior del tanque, y posteriormente se podrían utilizar técnicas de computación de dinámica de fluidos (CFD) para obtener un mayor detalle.

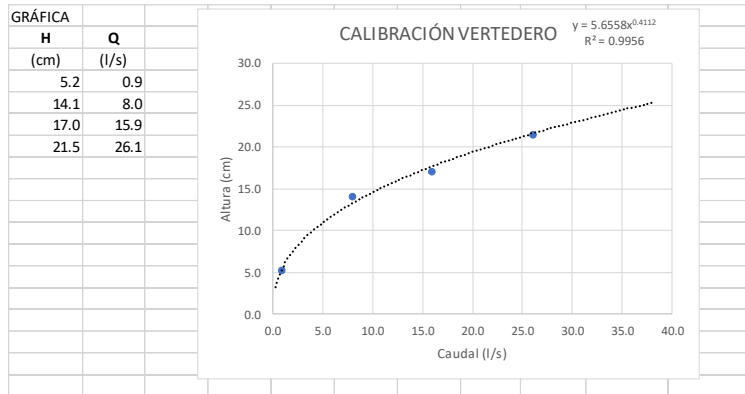
Finalmente, por medio del estudio experimental de este tipo de tanques se puede obtener información que permita evaluar la conveniencia de utilizar este tipo de estructuras para un manejo sostenible del agua lluvia en las ciudades, y apoyar el establecimiento de normas y recomendaciones de diseño.



## **A. Anexo: Tablas de calibración**

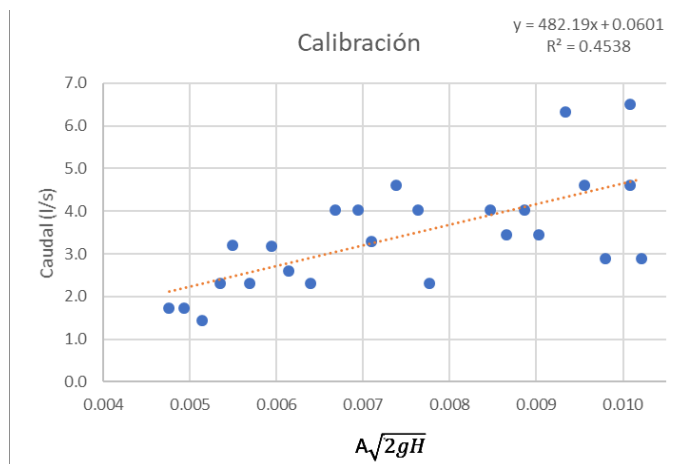
Tabla 5-1: Calibración vertedero triangular

		Hvert ref			Diametro tubería		0.067 m			
		48.5 cm			LARGO		Área		0.0035 m <sup>2</sup>	
							ANCHO		1.8	
		ALTURAS			MEDIDO		CORREGIDO			
VÁLV	TIEMP	Hvert	Hvert	Hvert	H1	H2	H1	H2	CAUDAL	CAUDAL
(Apertura)	(min)	(cm)	(cm)	(pie)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	m <sup>3</sup> /s	l/s
0	0	48.5	0.0	0.00	4.4	5.3	2.0	2.0		
2	2	52.0	3.5	0.11	6.4	5.8	4.0	2.5	0.0010	1.0
2	4	53.6	5.1	0.17	7.3	6.1	4.9	2.8	0.0013	1.3
2	6	53.7	5.2	0.17	7.5	6.6	5.1	3.3	0.0008	0.8
2	8	53.7	5.2	0.17	7.6	7.2	5.2	3.9	0.0006	0.6
2	10	53.5	5.0	0.16	8.3	8.0	5.9	4.7	0.0010	1.0
2	12	53.9	5.4	0.18	8.7	8.5	6.3	5.2	0.0006	0.6
2	14	53.7	5.2	0.17	9.7	9.1	7.3	5.8	0.0014	1.4
2	16	53.9	5.4	0.18	10.2	10.0	7.8	6.7	0.0010	1.0
2	18	54.0	5.5	0.18	11.1	10.6	8.7	7.3	0.0013	1.3
2	20	53.7	5.2	0.17	11.4	10.8	9.0	7.5	0.0004	0.4
<b>PROMEDIO</b>			<b>5.2</b>	<b>0.17</b>					<b>0.0009</b>	<b>0.9</b>
0	0	48.5	0.0	0.00	10.4	11.2	8.0	7.9	0.0070	7.0
4	2	61.3	12.8	0.42	17.5	16.8	15.1	13.5	0.0102	10.2
4	4	62.7	14.2	0.47	21.9	22.0	19.5	18.7	0.0070	7.0
4	6	62.5	14.0	0.46	27.0	27.6	24.6	24.3	0.0073	7.3
4	8	62.5	14.0	0.46	32.8	33.0	30.4	29.7	0.0084	8.4
4	10	62.5	14.0	0.46	37.8	38.4	35.4	35.1	0.0072	7.2
4	12	62.7	14.2	0.47	44.0	44.6	41.6	41.3	0.0089	8.9
<b>PROMEDIO</b>			<b>14.1</b>	<b>0.46</b>					<b>0.0080</b>	<b>8.0</b>
0	0	48.5	0.0	0.00	5.5	6.8	3.1	3.5	0.0110	11.0
6	1	64.5	16.0	0.52	13.0	10.8	10.6	7.5	0.0190	19.0
6	2	65.0	16.5	0.54	17.4	16.0	15.0	12.7	0.0127	12.7
6	3	65.4	16.9	0.55	22.3	21.4	19.9	18.1	0.0141	14.1
6	4	65.7	17.2	0.56	27.8	26.5	25.4	23.2	0.0158	15.8
6	5	65.6	17.1	0.56	30.5	31.8	28.1	28.5	0.0180	18.0
6	6	65.7	17.2	0.56	36.7	37.8	34.3	34.5	0.0179	17.9
6	7	65.6	17.1	0.56	43.3	45.6	40.9	42.3	0.0190	19.0
6	8	65.6	17.1	0.56	53.0	52.8	50.6	49.5		
<b>PROMEDIO</b>			<b>17.0</b>	<b>0.56</b>					<b>0.016</b>	<b>15.9</b>
0	0	48.5	0.0	0.00	3.8	4.7	1.4	1.4	0.0190	19.0
8	1	68.7	20.2	0.66	15.3	16.3	12.9	13.0	0.0331	33.1
8	2	68.7	20.2	0.66	27.3	28.3	24.9	25.0	0.0346	34.6
8	3	70.2	21.7	0.71	35.4	36.4	33.0	33.1	0.0233	23.3
8	4	70.2	21.7	0.71	43.7	44.7	41.3	41.4	0.0239	23.9
8	5	70.7	22.2	0.73	52.3	53.3	49.9	50.0	0.0248	24.8
8	6	70.0	21.5	0.71	60.6	61.6	58.2	58.3	0.0239	23.9
<b>PROMEDIO</b>			<b>21.5</b>	<b>0.70</b>					<b>0.026</b>	<b>26.1</b>



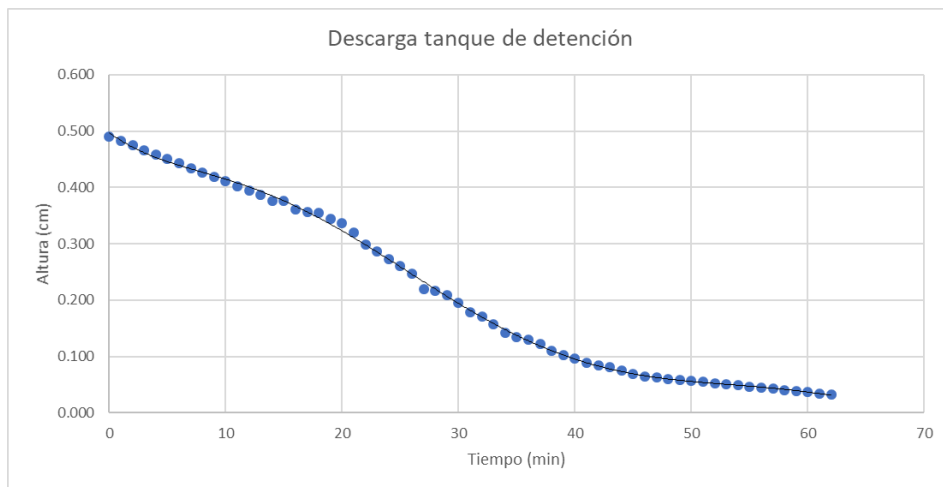
**Tabla 5-2: Calibración orificio sumergido**

Diametro tubería		0.067 m		
Área		0.0035 m <sup>2</sup>		
LARGO	9.6	ANCHO	1.8	
MIN	ALTURAS CALIB (m)	CAUDALES CALIB (l/s)	Cd CALIB -	EXP 1 $A\sqrt{2gH}$
0	0.403			
1	0.395	2.3	0.23	0.010
2	0.387	2.3	0.23	0.010
3	0.377	2.9	0.30	0.010
4	0.377	6.5	0.68	0.010
5	0.361	4.6	0.48	0.010
6	0.357	1.2	0.49	0.007
7	0.355	0.6	0.49	0.007
8	0.345	2.9	0.31	0.009
9	0.337	2.3	0.49	0.007
10	0.321	4.6	0.51	0.009
11	0.299	6.3	0.72	0.009
12	0.287	3.5	0.41	0.009
13	0.273	4.0	0.48	0.008
14	0.261	3.5	0.42	0.008
15	0.247	4.0	0.51	0.008
16	0.220	7.8	0.49	0.007
17	0.217	0.9	0.49	0.007
18	0.209	2.3	0.32	0.007
19	0.195	4.0	0.57	0.007
20	0.179	4.6	0.67	0.007
21	0.171	3.3	0.50	0.007
22	0.157	4.0	0.63	0.006
23	0.143	4.0	0.65	0.006
24	0.135	2.3	0.39	0.006
25	0.131	1.2	0.49	0.007
26	0.122	2.6	0.46	0.006
27	0.111	3.2	0.58	0.005
28	0.103	2.3	0.44	0.005
29	0.097	3.2	0.64	0.005
30	0.089	2.3	0.47	0.005
31	0.084	1.4	0.31	0.005
32	0.081	3.5	0.49	0.007
33	0.075	1.7	0.39	0.004
34	0.069	1.7	0.41	0.004
35	0.065	1.2	0.49	0.007
36	0.063	0.6	0.49	0.007
37	0.061	0.6	0.49	0.007
38	0.059	0.6	0.49	0.007
			CD PROMEDIO	CD CALCULADO GRÁFICAMENTE
			0.49	0.48



**Tabla 5-3:** Datos de descarga tanque de detención

TIEMPO (min)	CALIB (m)	TIEMPO (min)	CALIB (m)
0	0.490	31	0.179
1	0.482	32	0.171
2	0.474	33	0.157
3	0.467	34	0.143
4	0.459	35	0.135
5	0.451	36	0.131
6	0.443	37	0.122
7	0.435	38	0.111
8	0.427	39	0.103
9	0.419	40	0.097
10	0.411	41	0.089
11	0.403	42	0.084
12	0.395	43	0.081
13	0.387	44	0.075
14	0.377	45	0.069
15	0.377	46	0.065
16	0.361	47	0.063
17	0.357	48	0.061
18	0.355	49	0.059
19	0.345	50	0.057
20	0.337	51	0.055
21	0.321	52	0.053
22	0.299	53	0.051
23	0.287	54	0.049
24	0.273	55	0.046
25	0.261	56	0.044
26	0.247	57	0.042
27	0.220	58	0.040
28	0.217	59	0.038
29	0.209	60	0.036
30	0.195	61	0.034
		62	0.032



## **B. Anexo: Tablas de toma de datos experimentos**







Tabla 5-5: Registro de datos EXP 2

EXPERIMENTO 2		DATOS TUBERIA DE SALIDA										VOL TOTAL				SIMULACIÓN				
		Long. tube	2.02 m	Hw		0.485	PROM.DH EXP-SIM		2.0 cm	CAUDAL SALIDA		CAUDAL SALIDA	ΔH EXP	ATENÚACION EXP	CAUDAL SALIDA	H1=H2	ΔH EXP-SIM	ΔQSAL EXP-SIM	Atenuación Sim	
V2	TIEMPO	H medido	H	H	θ	θ	CAUDAL ENT CALIBRADO	NIVEL ENT H1	NIVEL SALIDA H2	CAUDAL SALIDA	CAUDAL SALIDA	ΔH EXP	ATENÚACION EXP	CAUDAL SALIDA	H1=H2	ΔH EXP-SIM	ΔQSAL EXP-SIM	Atenuación Sim		
min		cm	m	cm	grados	Rad	l/s	cm	cm	cm	m <sup>3</sup> /s	cm	l/s	l/s	cm	cm	cm	l/s	l/s	
0	0	48.5	0.00	0.00	90.00	1.57	0.0	4.6	2.2	0.022	5.5	7.2	0.073	1.1	0.00	0.0	2.2	1.1	0.0000	
3	2	57.6	0.09	9.10	90.00	1.57	3.2	11.4	9.0	0.090	10.6	7.3	0.022	2.0	1.70	1.1	7.0	1.9	0.0390	
3	4	58.8	0.10	10.30	90.00	1.57	4.3	14.8	12.4	0.124	13.8	10.5	0.105	2.4	1.90	1.9	7.8	1.9	0.5355	
3	6	60.3	0.12	11.80	90.00	1.57	6.0	18.2	15.8	0.158	16.8	13.5	0.135	2.7	2.30	3.2	8.0	1.4	1.3437	
3	8	60.1	0.12	11.60	90.00	1.57	5.7	20.9	18.5	0.185	19.4	16.1	0.161	3.0	2.40	2.7	7.6	1.1	1.8803	
3	10	60.3	0.12	11.80	90.00	1.57	6.0	22.1	19.7	0.197	21.6	18.3	0.183	3.2	1.40	2.8	6.6	1.0	2.2489	
3	12	60.3	0.12	11.80	90.00	1.57	6.0	24.4	22.0	0.220	24.0	20.7	0.207	3.4	1.30	2.6	6.4	0.9	2.5492	
3	14	60.1	0.12	11.60	90.00	1.57	5.7	25.4	23.0	0.230	25.4	22.1	0.221	3.5	0.90	2.2	5.3	0.7	2.7902	
3	16	60.3	0.12	11.80	90.00	1.57	6.0	26.6	27.2	0.272	27.4	24.1	0.241	3.7	3.10	2.3	6.3	0.7	2.9860	
3	18	60.3	0.12	11.80	90.00	1.57	6.0	30.8	28.4	0.284	29.8	26.5	0.265	3.9	1.90	2.1	6.0	0.7	3.1881	
3	20	60.3	0.12	11.80	90.00	1.57	6.0	30.1	27.7	0.277	31.0	27.7	0.277	3.9	0.00	2.0	3.5004	2.3	3.5004	
3	22	60.3	0.12	11.80	90.00	1.57	6.0	32.7	30.3	0.303	31.8	28.5	0.285	4.0	1.80	2.0	3.5006	2.5	3.5006	
3	24	60.3	0.12	11.80	90.00	1.57	6.0	33.7	31.3	0.313	33.0	29.7	0.297	4.1	1.60	1.9	3.6368	2.6	3.6368	
3	26	60.1	0.12	11.60	90.00	1.57	5.7	35.6	33.2	0.332	34.8	31.5	0.315	4.2	1.70	1.5	3.7543	2.8	3.7543	
3	28	60.3	0.12	11.80	90.00	1.57	6.0	37.1	34.7	0.347	35.2	31.9	0.319	4.2	2.80	1.7	3.8632	2.9	3.8632	
3	30	60.3	0.12	11.80	90.00	1.57	6.0	38.1	35.7	0.357	36.6	33.3	0.333	4.3	2.40	1.7	3.9694	3.1	3.9694	
3	32	48.5	0.00	0.00	90.00	1.57	0.0	36.8	34.4	0.344	35.6	32.3	0.323	4.3	2.10	-4.3	3.9214	30.7	2.6	0.3
3	34							33.4	31.0	0.310	32.0	28.7	0.287	4.0	2.30	-4.0	3.7203	28.0	1.8	0.3
3	36							30.8	28.4	0.284	29.0	25.7	0.257	3.8	2.70	-3.8	3.5190	25.4	1.6	0.3
3	38							27.5	25.1	0.251	26.2	22.9	0.229	3.6	2.20	-3.6	3.3177	22.9	1.0	0.3
3	40							25.1	22.7	0.227	23.8	20.5	0.205	3.4	2.20	-3.4	3.1163	20.6	0.9	0.3
3	42							22.8	20.4	0.204	21.2	17.9	0.179	3.2	2.50	-3.2	2.9162	18.5	0.6	0.3
3	44							21.4	19.0	0.190	18.8	15.5	0.155	3.0	3.50	-2.9	2.7148	16.5	0.7	0.2
3	46							18.5	16.1	0.161	16.8	13.5	0.135	2.7	2.60	-2.7	2.5132	14.6	0.2	0.2
3	48							16.6	14.2	0.142	14.6	11.3	0.113	2.5	2.90	-2.5	2.3116	12.9	-0.2	0.2
3	50							14.8	12.4	0.124	13.0	9.7	0.097	2.3	2.70	-2.3	2.1100	11.3	-0.3	0.2
3	52							12.9	10.5	0.105	12.0	8.7	0.087	2.2	1.80	-2.2	1.9083	9.8	-0.3	0.3
3	54							11.7	9.3	0.093	11.0	7.7	0.077	2.1	1.60	-2.1	1.7066	8.5	-0.1	0.4
3	56							11.2	8.8	0.088	10.2	6.9	0.069	2.0	1.90	-2.0	1.5048	7.4	0.4	0.5
3	58							10.5	8.1	0.081	9.6	6.3	0.063	1.9	1.80	-1.9	1.2732	6.4	0.8	0.6
3	60							9.9	7.5	0.075	8.6	5.3	0.053	1.7	2.20	-1.7	1.0374	5.6	0.8	0.7
2	62							9.6	7.2	0.072	8.4	5.1	0.051	1.7	2.10	-1.7	0.8528	4.9	1.2	0.8
1	64							9.0	6.6	0.066	8.0	4.7	0.047	1.6	1.90	-1.6	0.7097	4.3	1.3	0.9
0	66							8.8	6.4	0.064	7.6	4.3	0.043	1.5	2.10	-1.5	0.5969	3.8	1.5	0.9
0	68							8.4	6.0	0.060	7.9	4.6	0.046	1.6	1.40	-1.6	0.5068	3.4	1.8	1.1
0	70							8.2	5.8	0.058	7.0	3.7	0.037	1.4	2.10	-1.4	0.4366	3.1	1.6	1.0



Tabla 5-7: Registro de datos EXP 4

EXPERIMENTO 4		DATOS TUBERIA DE SALIDA				EXPERIMENTACIÓN				SIMULACIÓN												
V2	TIEMPO min	H medido cm	H m	H cm	θ grados	θ Rad	CAUDAL ENT CALIBRADO l/s	NIVEL ENT H1		NIVEL SALIDA H2		CAUDAL SALIDA m³/s	ΔH EXP cm	ATENUACION EXP l/s	CAUDAL SALIDA l/s	H1 = H2 cm	ΔH EXP-SIM cm	ΔQ SAL-EXP-SIM l/s	Atenuación Sim l/s			
								cm	cm (cor)	m	cm									cm (cor)	m	
0	0	0.0	0.00	0.00	90.00	1.57	0.0	3.0	0.7	0.007	4.0	0.7	0.007	0.0	-0.7	0.0000	0.0	0.0	0.7	0.0		
5	2	60.9	0.12	12.40	90.00	1.57	6.7	13.7	11.4	0.114	13.5	10.2	0.102	0.003	2.6	1.20	4.2	0.2838	1.8	9.0	2.3	6.5
5	4	64.3	0.16	15.80	90.00	1.57	12.2	21.0	18.7	0.187	20.6	17.3	0.173	0.003	3.4	1.40	8.8	1.6918	5.8	12.1	1.7	10.5
5	6	64.2	0.16	15.70	90.00	1.57	12.0	24.0	21.7	0.217	24.5	21.2	0.212	0.004	3.7	0.50	8.2	2.6156	10.2	11.2	1.1	9.4
5	8	64.3	0.16	15.80	90.00	1.57	12.2	28.9	26.6	0.266	29.1	25.8	0.258	0.004	4.1	0.80	8.0	3.2432	14.4	11.7	0.9	8.9
5	10	64.3	0.16	15.80	90.00	1.57	12.2	32.0	29.7	0.297	32.5	29.2	0.292	0.004	4.4	0.50	7.8	3.7418	18.3	11.1	0.6	8.4
5	12	64.5	0.16	16.00	90.00	1.57	12.5	36.0	33.7	0.337	35.8	32.5	0.325	0.005	4.6	1.20	7.9	4.1691	22.0	11.0	0.5	8.4
5	14	64.3	0.16	15.80	90.00	1.57	12.2	39.0	36.7	0.367	39.7	36.4	0.364	0.005	4.9	0.30	7.3	4.5389	25.5	11.0	0.4	7.6
5	16	64.3	0.16	15.80	90.00	1.57	12.2	42.0	39.7	0.397	43.0	39.7	0.397	0.005	5.1	0.00	7.0	4.8580	28.8	10.8	0.3	7.3
5	18	64.4	0.16	15.90	90.00	1.57	12.4	45.0	42.7	0.427	45.8	42.5	0.425	0.005	5.3	0.20	7.1	5.1469	31.9	10.6	0.1	7.2
5	20	64.3	0.16	15.80	90.00	1.57	12.2	48.5	46.2	0.462	48.7	45.4	0.454	0.005	5.5	0.80	6.7	5.4158	34.8	10.9	0.1	6.7
5	22	64.3	0.16	15.80	90.00	1.57	12.2	51.4	49.1	0.491	52.0	48.7	0.487	0.006	5.7	0.40	6.5	5.6426	37.6	11.3	0.0	6.5
5	24	64.2	0.16	15.70	90.00	1.57	12.0	56.3	54.0	0.540	55.0	51.7	0.517	0.006	5.8	2.30	6.1	5.6433	40.1	12.7	0.2	6.3
3	26	55.3	0.07	6.75	90.00	1.57	1.5	52.4	50.0	0.500	51.0	47.7	0.477	0.006	5.6	2.35	-4.1	5.6153	40.2	8.6	0.0	-4.1
0	28	48.5	0.00	0.00	90.00	1.57	0.0	45.5	43.2	0.432	45.7	42.4	0.424	0.005	5.3	0.80	-5.3	5.4424	37.5	5.2	-0.2	-5.4
0	30							41.3	39.0	0.390	42.0	38.7	0.387	0.005	5.0	0.30	-5.0	5.2412	34.5	4.3	-0.2	-5.4
0	32							40.0	37.7	0.377	40.7	37.4	0.374	0.005	5.0	0.30	-5.0	5.0399	31.6	5.9	-0.1	-5.0
0	34							37.0	34.7	0.347	38.0	34.7	0.347	0.005	4.8	0.00	-4.8	4.8386	28.8	5.8	-0.1	-4.8
0	36							34.0	31.7	0.317	34.8	31.5	0.315	0.005	4.6	0.20	-4.6	4.6372	26.2	5.4	-0.1	-4.6
0	38							32.0	29.7	0.297	32.5	29.2	0.292	0.004	4.4	0.50	-4.4	4.4359	23.7	5.7	-0.1	-4.4
0	40							29.0	26.7	0.267	30.0	26.7	0.267	0.004	4.2	0.00	-4.2	4.2345	21.3	5.3	0.0	-4.2
0	42							25.2	22.9	0.229	25.5	22.2	0.222	0.004	3.8	0.70	-3.8	4.0332	19.1	3.4	-0.2	-4.0
0	44							22.4	20.1	0.201	22.7	19.4	0.194	0.004	3.6	0.70	-3.6	3.8318	17.1	2.6	-0.3	-3.8
0	46							20.0	17.7	0.177	20.0	16.7	0.167	0.003	3.3	1.00	-3.3	3.6304	15.2	2.0	-0.3	-3.6
0	48							18.4	16.1	0.161	17.7	14.4	0.144	0.003	3.1	1.70	-3.1	3.4291	13.4	1.8	-0.4	-3.4
0	50							16.3	14.0	0.140	17.0	13.7	0.137	0.003	3.0	0.30	-3.0	3.2277	11.8	2.0	-0.2	-3.2
0	52							14.5	12.2	0.122	15.4	12.1	0.121	0.003	2.8	0.10	-2.8	3.0263	10.3	1.8	-0.2	-3.0
0	54							13.6	11.3	0.113	14.0	10.7	0.107	0.003	2.7	0.60	-2.7	2.8262	8.9	2.0	-0.2	-2.8
0	56							12.5	10.2	0.102	12.9	9.6	0.096	0.003	2.5	0.60	-2.5	2.6248	7.7	2.1	-0.1	-2.6
0	58							9.2	6.9	0.069	10.0	6.7	0.067	0.002	2.1	0.20	-2.1	2.4252	6.7	0.1	-0.3	-2.4
0	60							7.0	4.7	0.047	8.0	4.7	0.047	0.002	1.8	0.00	-1.8	2.2215	5.8	-1.2	-0.5	-2.2
0	62							6.3	4.0	0.040	7.4	4.1	0.041	0.002	1.6	-0.10	-1.6	2.0199	5.1	-1.1	-0.4	-2.0
0	64							5.1	2.8	0.028	6.1	2.8	0.028	0.001	1.3	0.00	-1.3	1.8182	4.5	-1.7	-0.5	-1.8
0	66							3.0	0.7	0.007	4.0	0.7	0.007	0.001	0.7	0.00	-0.7	1.6164	4.0	-3.3	-1.0	-1.6
0	68							2.8	0.5	0.005	3.8	0.5	0.005	0.001	0.5	0.00	-0.5	1.4146	3.6	-3.1	-0.9	-1.4
0	70							2.8	0.5	0.005	3.8	0.5	0.005	0.001	0.5	0.00	-0.5	1.1616	3.2	-2.8	-0.6	-1.2

Tabla 5-8: Registro de datos EXP 5

EXPERIMENTACIÓN													SIMULACIÓN											
EXPERIMENTO 5	TIEMPO	H medido	H		θ	θ	θ	CAUDAL ENT CALIBRADO	NIVEL ENT H1			NIVEL SALIDA H2			CAUDAL SALIDA		ΔH EXP	ATENUCIACIÓN N EXP	CAUDAL SALIDA	H1 = H2	ΔH EXP-SIM	AQ SAL EXP-SIM	Atenuación Sim	
			m	cm					cm (cor)	m	cm (cor)	m	cm (cor)	m	cm (cor)	m								cm (cor)
0	0	48.5	0.00	0.00	0.00	90.00	1.57	0.0	2.8	0.5	0.005	3.8	0.5	0.005	0.001	0.5	0.00	-0.5	0.0000	0.0	0.5	0.08	15.8	l/s
6	1	65.4	0.17	16.90	14.3	15.3	13.0	0.130	14.3	8.1	0.081	11.4	8.1	0.081	0.002	2.1	4.90	12.2	0.3791	2.8	7.7	1.33	5.1	l/s
6	2	65.5	0.17	17.00	14.5	23.5	21.2	0.212	38.8	15.5	0.155	38.8	15.5	0.155	0.003	2.9	5.70	11.6	1.7442	8.6	9.7	1.67	4.8	l/s
6	3	66.1	0.18	17.60	15.8	25.5	23.2	0.232	24.5	21.2	0.212	30.0	26.7	0.267	0.004	3.9	4.00	12.4	2.5856	14.8	7.3	1.26	68%	l/s
6	4	66.0	0.18	17.50	15.6	33.0	30.7	0.307	30.0	26.7	0.267	30.0	26.7	0.267	0.004	3.9	4.00	11.7	3.2547	21.4	7.2	1.24	68%	l/s
6	5	66.0	0.18	17.50	15.6	38.0	35.7	0.357	36.2	32.9	0.329	36.2	32.9	0.329	0.004	4.3	2.80	11.3	3.8118	28.0	6.2	1.07	69%	l/s
6	6	66.1	0.18	17.50	15.8	45.2	42.9	0.429	43.4	40.1	0.401	43.4	40.1	0.401	0.005	4.7	2.80	11.1	4.2844	34.4	7.1	1.22	69%	l/s
0	8	48.5	0.00	0.00	0.00	90.00	1.57	15.6	51.0	48.7	0.487	50.1	46.8	0.468	0.005	5.1	1.90	10.5	4.7004	40.5	7.2	1.24	10.9	l/s
0	9	48.5	0.00	0.00	0.00	90.00	1.57	0.0	49.0	46.1	0.461	47.2	43.8	0.438	0.005	5.0	0.30	-5.0	4.7447	40.2	3.8	0.65	-4.7	l/s
0	10	43.9	0.16	16.90	14.5	43.9	41.6	0.416	44.8	41.5	0.415	44.8	41.5	0.415	0.005	4.8	0.10	-4.8	4.6441	38.0	3.5	0.60	-4.6	l/s
0	11	42.2	0.15	16.90	14.5	42.2	39.8	0.398	43.1	39.7	0.397	43.1	39.7	0.397	0.005	4.7	0.10	-4.7	4.5435	35.9	3.8	0.66	-4.5	l/s
0	12	40.4	0.14	16.90	14.5	40.4	38.1	0.381	41.3	38.0	0.380	41.3	38.0	0.380	0.005	4.6	0.10	-4.6	4.4429	33.9	4.1	0.71	-4.4	l/s
0	13	38.9	0.13	16.90	14.5	38.9	36.6	0.366	39.8	36.4	0.364	39.8	36.4	0.364	0.005	4.5	0.15	-4.5	4.3422	31.9	4.6	0.79	-4.3	l/s
0	14	37.4	0.12	16.90	14.5	37.4	35.1	0.351	38.2	34.9	0.349	38.2	34.9	0.349	0.004	4.4	0.20	-4.4	4.2415	30.0	5.0	0.86	-4.2	l/s
0	15	35.6	0.11	16.90	14.5	35.6	33.2	0.332	36.4	33.0	0.330	36.4	33.0	0.330	0.004	4.3	0.20	-4.3	4.1409	28.1	5.0	0.86	-4.1	l/s
0	16	33.7	0.10	16.90	14.5	33.7	31.4	0.314	34.5	31.2	0.312	34.5	31.2	0.312	0.004	4.2	0.20	-4.2	4.0402	26.4	4.9	0.84	-4.0	l/s
0	17	33.0	0.09	16.90	14.5	33.0	30.6	0.306	33.2	29.8	0.298	33.2	29.8	0.298	0.004	4.1	0.80	-4.1	3.9395	24.7	5.5	0.96	-3.9	l/s
0	18	32.2	0.09	16.90	14.5	32.2	29.9	0.299	31.8	28.5	0.285	31.8	28.5	0.285	0.004	4.0	1.40	-4.0	3.8388	23.0	6.1	1.06	-3.8	l/s
0	19	28.9	0.08	16.90	14.5	28.9	28.9	0.289	30.5	27.2	0.272	30.5	27.2	0.272	0.004	3.9	1.70	-3.9	3.7382	21.4	6.6	1.14	-3.7	l/s
0	20	27.9	0.08	16.90	14.5	27.9	27.9	0.279	29.2	25.9	0.259	29.2	25.9	0.259	0.004	3.8	2.00	-3.8	3.6375	19.9	6.9	1.20	-3.6	l/s
0	21	25.6	0.07	16.90	14.5	25.6	25.6	0.256	27.8	24.4	0.244	27.8	24.4	0.244	0.004	3.7	1.20	-3.7	3.5368	18.5	6.5	1.13	-3.5	l/s
0	22	23.4	0.07	16.90	14.5	23.4	23.4	0.234	26.3	23.0	0.230	26.3	23.0	0.230	0.004	3.6	0.40	-3.6	3.4361	17.1	6.1	1.05	-3.4	l/s
0	23	22.1	0.07	16.90	14.5	22.1	22.1	0.221	25.1	21.8	0.218	25.1	21.8	0.218	0.003	3.5	0.35	-3.5	3.3354	15.8	6.2	1.06	-3.3	l/s
0	24	20.9	0.06	16.90	14.5	20.9	20.9	0.209	23.9	20.6	0.206	23.9	20.6	0.206	0.003	3.4	0.30	-3.4	3.2347	14.5	6.2	1.07	-3.2	l/s
0	25	19.4	0.06	16.90	14.5	19.4	19.4	0.194	22.7	19.3	0.193	22.7	19.3	0.193	0.003	3.3	0.05	-3.3	3.1340	13.3	6.0	1.03	-3.1	l/s
0	26	17.9	0.05	16.90	14.5	17.9	17.9	0.179	21.4	18.1	0.181	21.4	18.1	0.181	0.003	3.2	-0.20	-3.2	3.0334	12.2	5.7	0.99	-3.0	l/s
0	27	17.0	0.05	16.90	14.5	17.0	17.0	0.170	20.5	17.1	0.171	20.5	17.1	0.171	0.003	3.1	-0.15	-3.1	2.9340	11.2	5.8	1.01	-2.9	l/s
0	28	16.1	0.05	16.90	14.5	16.1	16.1	0.161	19.5	16.2	0.162	19.5	16.2	0.162	0.003	3.0	-0.10	-3.0	2.8332	10.2	5.9	1.02	-2.8	l/s
0	29	15.0	0.05	16.90	14.5	15.0	15.0	0.150	18.4	15.0	0.150	18.4	15.0	0.150	0.003	2.9	0.00	-2.9	2.7326	9.3	5.7	0.99	-2.7	l/s
0	30	14.0	0.05	16.90	14.5	14.0	14.0	0.140	17.2	13.9	0.139	17.2	13.9	0.139	0.003	2.8	0.10	-2.8	2.6318	8.4	5.5	0.95	-2.6	l/s
0	31	13.0	0.05	16.90	14.5	13.0	13.0	0.130	16.3	12.9	0.129	16.3	12.9	0.129	0.003	2.7	0.10	-2.7	2.5310	7.6	5.3	0.92	-2.5	l/s
0	32	12.1	0.05	16.90	14.5	12.1	12.1	0.121	15.3	12.0	0.120	15.3	12.0	0.120	0.003	2.6	0.10	-2.6	2.4302	6.9	5.1	0.88	-2.4	l/s
0	33	11.5	0.05	16.90	14.5	11.5	11.5	0.115	14.2	11.4	0.114	14.2	11.4	0.114	0.003	2.5	0.05	-2.5	2.3294	6.3	5.2	0.89	-2.3	l/s
0	34	10.9	0.05	16.90	14.5	10.9	10.9	0.109	14.2	10.9	0.109	14.2	10.9	0.109	0.002	2.5	0.00	-2.5	2.2286	5.7	5.2	0.89	-2.2	l/s
0	35	10.4	0.05	16.90	14.5	10.4	10.4	0.104	13.6	10.2	0.102	13.6	10.2	0.102	0.002	2.4	0.20	-2.4	2.1278	5.2	5.1	0.88	-2.1	l/s
0	36	10.0	0.05	16.90	14.5	10.0	10.0	0.100	12.9	9.6	0.096	12.9	9.6	0.096	0.002	2.3	0.40	-2.3	2.0269	4.8	5.0	0.86	-2.0	l/s
0	37	8.8	0.05	16.90	14.5	8.8	8.8	0.088	12.0	8.6	0.086	12.0	8.6	0.086	0.002	2.2	0.20	-2.2	1.9261	4.4	4.3	0.74	-1.9	l/s
0	38	7.7	0.05	16.90	14.5	7.7	7.7	0.077	11.0	7.7	0.077	11.0	7.7	0.077	0.002	2.1	0.00	-2.1	1.8252	4.1	3.6	0.62	-1.8	l/s
0	39	7.5	0.05	16.90	14.5	7.5	7.5	0.075	10.7	7.3	0.073	10.7	7.3	0.073	0.002	2.0	0.15	-2.0	1.7244	3.8	3.6	0.62	-1.7	l/s
0	40	7.3	0.05	16.90	14.5	7.3	7.3	0.073	10.3	7.0	0.070	10.3	7.0	0.070	0.002	2.0	0.30	-2.0	1.6235	3.5	3.6	0.62	-1.6	l/s
0	41	6.4	0.05	16.90	14.5	6.4	6.4	0.064	10.3	6.9	0.069	10.3	6.9	0.069	0.002	2.0	-0.30	-2.0	1.5226	3.3	3.4	0.59	-1.5	l/s
0	42	5.6	0.05	16.90	14.5	5.6	5.6	0.056	10.2	6.9	0.069	10.2	6.9	0.069	0.002	2.0	-1.30	-2.0	1.4217	3.0	3.2	0.55	-1.4	l/s
0	43	5.8	0.05	16.90	14.5	5.8	5.8	0.058	9.6	6.3	0.063	9.6	6.3	0.063	0.002	1.9	-0.50	-1.9	1.2976	2.8	3.2	0.54	-1.3	l/s
0	44	6.0	0.05	16.90	14.5	6.0	6.0	0.060	9.0	5.7	0.057	9.0	5.7	0.057	0.002	1.8	0.30	-1.8	1.1701	2.7	3.1	0.54	-1.2	l/s
0	45	5.8	0.05	16.90	14.5	5.8	5.8	0.058	8.9	5.6	0.056	8.9	5.6	0.056	0.002	1.8	0.25	-1.8	1.0559	2.5	3.2	0.55	-1.1	l/s
0	46	5.7	0.05	16.90	14.5	5.7	5.7	0.057	8.8	5.5	0.055	8.8	5.5	0.055	0.002	1.7	0.20	-1.7	0.9553	2.4	3.2	0.55	-1.0	l/s
0	47	5.2	0.05	16.90	14.5	5.2	5.2	0.052	8.4	5.0	0.050	8.4	5.0	0.050	0.002	1.7	0.15	-1.7	0.8671	2.2	2.8	0.49	-0.9	l/s
0	48	4.7	0.05	16.90	14.5	4.7	4.7	0.047	7.9	4.6	0.046	7.9	4.6	0.046	0.002	1.6	0.10	-1.6	0.7895	2.1	2.5	0.43	-0.8	l/s



Tabla 5-10: Registro de datos EXP 7

EXPERIMENTO 7		DATOS TUBERIA DE SALIDA												VOL TOTAL		10.5 m <sup>3</sup>			CAUDAL SALIDA		ATENUACIÓ N Exp		SIMULACION			
V2	TIEMPO min	H m	H cm	θ grados	θ Rad	CAUDAL ENT CALIBRADO l/s	NIVEL ENT H1		NIVEL SALIDA H2		CAUDAL SALIDA		ΔH EXP cm	ATENUACIÓ N Exp l/s	CAUDAL SALIDA l/s	H1 = H2 cm	ΔH EXP-SIM cm	AQ SAL EXP-SIM m3	Atenuación Sim							
							cm	cm (cor)	m	cm	m	cm (cor)								m <sup>3</sup> /s	l/s	l/s	cm	cm		
0	0	48.5	0.00				2.9	0.6	0.006	3.9	0.6	0.006	1.7	0.00	-1.7	0.0000	0.0	0.6	0.10	0.0						
8	1	66.0	0.18	17.50	90.00	1.57	15.6	19.8	17.5	0.175	14.2	10.9	0.109	6.60	13.0	0.9943	1.9	12.3	2.12	15.1						
8	2	66.5	0.18	18.00	90.00	1.57	16.7	25.3	23.0	0.230	21.8	18.5	0.185	3.4	4.50	13.3	2.0746	5.9	14.8	2.56	14.6					
8	3	69.5	0.21	21.00	90.00	1.57	24.3	32.0	29.7	0.297	30.2	26.9	0.269	4.0	2.80	20.2	3.1267	13.4	14.8	2.56	21.2					
8	4	69.5	0.21	21.00	90.00	1.57	24.3	38.2	35.9	0.359	36.0	32.7	0.327	0.004	4.5	3.20	19.8	4.0198	22.2	2.08	20.3					
8	5	69.5	0.21	21.00	90.00	1.57	24.3	46.6	44.3	0.443	44.5	41.2	0.412	0.005	5.0	3.10	19.3	4.7249	30.8	11.9	2.06	19.6				
8	6	69.5	0.21	21.00	90.00	1.57	24.3	55.0	52.7	0.527	51.8	48.5	0.485	5.4	4.20	18.9	5.3215	39.1	11.4	1.98	19.0					
0	7	48.5	0.00				47.0	44.7	0.447	47.5	44.2	0.442	0.005	5.2	0.50	-5.2	5.4343	41.2	3.2	0.55	-5.4					
0	9						46.0	43.7	0.437	46.0	42.6	0.426	0.005	5.1	1.05	-5.1	5.3026	39.5	3.6	0.63	-5.3					
0	10						45.0	42.7	0.427	44.4	41.1	0.411	0.005	5.0	1.60	-5.0	5.1705	37.8	4.0	0.69	-5.2					
0	11						43.2	40.9	0.409	42.8	39.5	0.395	0.005	4.9	1.40	-4.9	5.0384	36.2	3.9	0.68	-5.0					
0	12						41.4	39.1	0.391	41.2	37.9	0.379	0.005	4.8	1.20	-4.8	4.9062	34.6	3.8	0.66	-4.9					
0	13						39.7	37.3	0.373	39.9	36.5	0.365	0.005	4.7	0.80	-4.7	4.7741	33.0	3.9	0.67	-4.8					
0	14						37.9	35.6	0.356	38.5	35.2	0.352	0.005	4.6	0.40	-4.6	4.6419	31.5	3.8	0.66	-4.6					
0	15						36.6	34.2	0.342	36.8	33.4	0.334	0.005	4.5	0.80	-4.5	4.5097	30.0	3.8	0.65	-4.5					
0	16						35.2	32.9	0.329	35.0	31.7	0.317	0.004	4.4	1.20	-4.4	4.3775	28.6	3.7	0.63	-4.4					
0	17						33.6	31.3	0.313	33.9	30.6	0.306	0.004	4.3	0.70	-4.3	4.2453	27.2	3.7	0.65	-4.2					
0	18						32.0	29.7	0.297	32.8	29.5	0.295	0.004	4.2	0.20	-4.2	4.1131	25.8	3.8	0.65	-4.1					
0	19						31.0	28.7	0.287	30.9	27.5	0.275	0.004	4.1	1.15	-4.1	3.9809	24.4	3.6	0.63	-4.0					
0	20						30.0	27.7	0.277	28.9	25.6	0.256	0.004	3.9	2.10	-3.9	3.8487	23.1	3.5	0.60	-3.8					
0	21						27.8	25.4	0.254	27.5	24.1	0.241	0.004	3.8	1.30	-3.8	3.7165	21.9	2.9	0.50	-3.7					
0	22						25.5	23.2	0.232	26.0	22.7	0.227	0.004	3.7	0.50	-3.7	3.5843	20.6	2.3	0.40	-3.6					
0	23						24.7	22.3	0.223	24.6	21.3	0.213	0.004	3.6	1.05	-3.6	3.4521	19.4	2.4	0.41	-3.5					
0	24						23.8	21.5	0.215	23.2	19.9	0.199	0.003	3.5	1.60	-3.5	3.3199	18.2	2.4	0.42	-3.3					
0	25						21.9	19.5	0.195	22.2	18.9	0.189	0.003	3.4	0.65	-3.4	3.1876	17.1	2.1	0.36	-3.2					
0	26						19.9	17.6	0.176	21.2	17.9	0.179	0.003	3.3	-0.30	-3.3	3.0554	16.0	1.7	0.29	-3.1					
0	27						19.6	17.2	0.172	20.2	16.9	0.169	0.003	3.2	0.35	-3.2	2.9249	15.0	2.1	0.36	-2.9					
0	28						19.2	16.9	0.169	19.2	15.9	0.159	0.003	3.1	1.00	-3.1	2.7926	13.9	2.4	0.42	-2.8					
0	29						17.8	15.5	0.155	18.1	14.8	0.148	0.003	3.0	0.70	-3.0	2.6604	13.0	2.1	0.37	-2.7					
0	30						16.4	14.1	0.141	17.0	13.7	0.137	0.003	2.9	0.40	-2.9	2.5280	12.0	1.8	0.32	-2.5					
0	31						15.7	13.4	0.134	16.6	13.2	0.132	0.003	2.8	0.15	-2.8	2.3956	11.1	2.2	0.37	-2.4					
0	32						15.0	12.7	0.127	16.1	12.8	0.128	0.003	2.8	-0.10	-2.8	2.2631	10.2	2.5	0.43	-2.3					
0	33						14.5	12.2	0.122	15.1	11.8	0.118	0.003	2.7	0.40	-2.7	2.1307	9.4	2.6	0.44	-2.1					
0	34						14.0	11.7	0.117	14.1	10.8	0.108	0.003	2.6	0.90	-2.6	1.9982	8.6	2.6	0.45	-2.0					
0	35						13.0	10.7	0.107	13.5	10.1	0.101	0.002	2.5	0.50	-2.5	1.8657	7.8	2.6	0.44	-1.9					
0	36						12.0	9.7	0.097	12.8	9.5	0.095	0.002	2.4	0.20	-2.4	1.7332	7.1	2.5	0.43	-1.7					
0	37						11.5	9.2	0.092	12.3	9.0	0.090	0.002	2.3	0.20	-2.3	1.6006	6.4	2.7	0.46	-1.6					
0	38						11.0	8.7	0.087	11.8	8.5	0.085	0.002	2.2	0.20	-2.2	1.4255	5.7	2.8	0.49	-1.4					
0	39						10.9	8.6	0.086	11.7	8.3	0.083	0.002	2.2	0.25	-2.2	1.2641	5.1	3.3	0.58	-1.3					
0	40						10.8	8.5	0.085	11.5	8.2	0.082	0.002	2.2	0.30	-2.2	1.1262	4.5	3.8	0.66	-1.1					

Tabla 5-11: Registro de datos EXP 8

EXPERIMENTO 8		DATOS TUBERIA DE SALIDA				VOL TOTAL		VOL EXP		VOL TOTAL		VOL EXP		VOL TOTAL		VOL EXP				
		Long. tube	Diam. tube	Cd	A	Hw	Angulo VALV 1	Angulo VALV 1	VALV 1	0.485	90°	5	10.5 m³	10.5 m³	10.5 m³	10.5 m³	10.5 m³			
		2.02 m	0.067 m	0.480	0.0035 m²	0.485	90°	5	5	0.485	90°	5	10.5 m³	10.5 m³	10.5 m³	10.5 m³	10.5 m³			
V2	TIEMPO min	H medido cm	EXPERIMENTACIÓN			NIVEL H1			NIVEL SALIDA H2			CAUDAL SALIDA		AENUACION Exp	CAUDAL SALIDA	HI = H2 cm	ΔQ SAL-EXP-SIM m³	Atenuación Sim		
			H m	H cm	θ grados	θ Rad	CAUDAL ENT CALIBRADO l/s	cm (med)	cm (cor)	m	cm (med)	cm (cor)	m						m²/s	l/s
0	48.5	0.00	0.00	0.00	0.00	3.5	4.9	0.009	4.2	0.9	0.021	0.001	0.7	0.00	0.00	0.0	0.9	0.15	0.0	
3	2	58.8	0.10	10.30	90.00	1.57	4.9	0.049	5.4	2.1	0.021	0.001	1.1	2.80	3.2	0.0849	1.0	2.4	0.42	4.2
3	4	59.2	0.11	10.70	90.00	1.57	6.3	0.063	9.0	5.7	0.057	0.002	1.8	0.60	2.9	0.4484	3.1	2.8	0.49	4.3
4	6	61.6	0.13	13.10	90.00	1.57	12.6	0.100	12.7	9.4	0.094	0.002	2.3	0.60	5.4	1.1704	5.8	3.8	0.66	6.5
4	8	61.6	0.13	13.10	90.00	1.57	16.0	0.134	16.4	13.1	0.131	0.003	2.7	0.30	5.0	1.8285	8.8	4.4	0.77	5.9
4	10	61.5	0.13	13.00	90.00	1.57	19.3	0.167	19.2	15.9	0.159	0.003	3.0	0.80	4.6	2.2260	11.2	5.0	0.87	5.3
4	12	61.6	0.13	13.10	90.00	1.57	21.4	0.188	21.8	18.5	0.185	0.003	3.2	0.30	4.5	2.5350	13.3	5.3	0.91	5.2
4	14	61.4	0.13	12.90	90.00	1.57	24.0	0.214	24.0	20.7	0.207	0.003	3.4	0.70	4.0	2.7848	15.2	5.8	1.00	4.6
4	16	61.6	0.13	13.10	90.00	1.57	25.7	0.231	25.7	22.4	0.224	0.004	3.5	0.70	4.2	2.9985	16.9	5.8	1.00	4.7
4	18	61.4	0.13	12.90	90.00	1.57	28.4	0.258	27.6	24.3	0.243	0.004	3.7	1.80	3.7	3.1842	18.4	6.6	1.14	4.2
5	20	61.4	0.13	12.90	90.00	1.57	29.4	0.268	28.3	25.0	0.250	0.004	3.7	1.80	3.7	3.3416	19.7	6.2	1.06	4.1
5	22	61.1	0.13	12.60	90.00	1.57	30.6	0.280	29.7	26.4	0.264	0.004	3.8	1.60	3.2	3.4719	20.7	6.4	1.11	3.5
5	24	60.6	0.12	12.10	90.00	1.57	30.6	0.280	30.1	26.8	0.268	0.004	3.9	1.20	2.5	3.5618	21.3	6.0	1.04	2.8
4	26	60.4	0.12	11.90	90.00	1.57	30.8	0.282	31.2	27.9	0.279	0.004	4.0	0.30	2.1	3.6204	21.5	6.5	1.12	2.5
3	28	59.7	0.11	11.20	90.00	1.57	31.6	0.290	31.5	28.2	0.282	0.004	4.0	0.80	1.3	3.6498	21.5	7.1	1.23	1.6
4	30	60.2	0.12	11.70	90.00	1.57	31.7	0.291	32.0	28.7	0.287	0.004	4.0	0.40	1.8	3.6716	21.3	7.6	1.31	2.2
5	32	60.4	0.12	11.90	90.00	1.57	32.4	0.298	33.0	29.7	0.297	0.004	4.1	0.10	2.0	3.7113	21.3	8.4	1.45	2.4
5	34	60.7	0.12	12.20	90.00	1.57	33.3	0.307	33.2	29.9	0.299	0.004	4.1	0.80	2.4	3.7631	21.6	8.6	1.49	2.7
5	36	60.9	0.12	12.40	90.00	1.57	33.7	0.311	34.0	30.7	0.307	0.004	4.1	0.40	2.6	3.8283	22.1	8.8	1.52	2.9
5	38	62.1	0.14	13.60	90.00	1.57	35.5	0.329	34.8	31.5	0.315	0.004	4.2	1.40	4.2	3.9403	23.2	8.9	1.55	4.5
5	40	62.1	0.14	13.60	90.00	1.57	33.3	0.307	32.5	29.2	0.292	0.004	4.0	1.50	4.4	4.0861	24.9	5.0	0.87	4.4
4	42	60.4	0.12	11.90	90.00	1.57	32.3	0.297	31.4	28.1	0.281	0.004	4.0	1.60	2.1	4.1633	25.6	3.3	0.57	1.9
3	44	58.4	0.10	9.90	90.00	1.57	32.3	0.297	31.4	28.1	0.281	0.004	4.0	1.60	2.1	4.1406	24.8	4.1	0.70	-0.2
0	46	49.4	0.00	0.00	90.00	1.57	28.2	0.256	28.8	25.5	0.255	0.004	3.8	0.10	-3.8	4.0148	22.6	2.9	0.50	-4.0
0	48					25.7	23.1	0.231	26.1	22.8	0.228	0.004	3.6	0.30	-3.6	3.8214	19.6	3.3	0.56	-3.8
0	50					22.3	19.7	0.197	22.1	18.8	0.188	0.003	3.2	0.90	-3.2	3.6202	16.8	2.4	0.41	-3.6
0	52					20.6	18.0	0.180	21.1	17.8	0.178	0.003	3.2	0.20	-3.2	3.4189	14.3	3.5	0.61	-3.4
0	54					18.8	16.2	0.162	18.9	15.6	0.156	0.003	3.0	0.60	-3.0	3.2175	12.0	3.8	0.66	-3.2
0	56					16.1	13.5	0.135	16.8	13.5	0.135	0.003	2.7	0.00	-2.7	3.0161	10.0	3.4	0.59	-3.0
0	58					14.3	11.7	0.117	14.8	11.5	0.115	0.003	2.5	0.20	-2.5	2.8160	8.3	3.3	0.57	-2.8
0	60					12.5	9.9	0.099	13.0	9.7	0.097	0.002	2.3	0.20	-2.3	2.6146	6.8	3.0	0.51	-2.6
0	62					11.6	9.0	0.090	11.8	8.5	0.085	0.002	2.2	0.50	-2.2	2.4130	5.6	3.1	0.53	-2.4
0	64					9.8	7.2	0.072	10.2	6.9	0.069	0.002	2.0	0.30	-2.0	2.2113	4.7	2.3	0.39	-2.2
0	66					9.3	6.7	0.067	9.5	6.2	0.062	0.002	1.9	0.50	-1.9	2.0097	4.0	2.4	0.41	-2.0
0	68					9.0	6.4	0.064	9.5	6.2	0.062	0.002	1.9	0.20	-1.9	1.8080	3.5	2.8	0.48	-1.8
0	70					7.8	5.2	0.052	7.9	4.6	0.046	0.002	1.6	0.60	-1.6	1.6062	3.0	1.8	0.32	-1.6
0	72					6.5	3.9	0.039	7.1	3.8	0.038	0.001	1.5	0.10	-1.5	1.4044	2.6	1.2	0.20	-1.4
0	74					5.4	2.8	0.028	5.8	2.5	0.025	0.001	1.2	0.30	-1.2	1.1494	2.3	0.3	0.05	-1.1
0	76					3.5	0.9	0.009	4.2	0.9	0.009	0.001	0.7	0.00	-0.7	0.9396	2.1	-1.2	-0.22	-0.9
0	78					3.3	0.7	0.007	4.1	0.8	0.008	0.001	0.6	-0.10	-0.6	0.7772	1.9	-1.2	-0.20	-0.8
0	80					3.2	0.6	0.006	4.0	0.7	0.007	0.001	0.6	-0.10	-0.6	0.6503	1.7	-1.1	-0.19	-0.7
0	82					2.8	0.2	0.002	3.5	0.2	0.002	0.000	0.3	0.00	-0.3	0.5496	1.5	-1.4	-0.24	-0.5



Tabla 5-12: Registro de datos EXP 9

EXPERIMENTO 9		DATOS TUBERIA DE SALIDA				VOL TOTAL				CAUDAL SALIDA				CAUDAL SALIDA				SIMULACION				
V2	TIEMPO	H medido	H	H	θ	θ	CAUDAL ENT CALIBRADO	NIVEL ENT H1				NIVEL SALIDA H2				CAUDAL SALIDA	ΔH EXP	ATENUACION EXP	CAUDAL SALIDA	ΔH EXP-SIM	ΔQ SAL EXP-SIM	Atenuación Sim
								cm	m	cm	m	cm	m	cm	m							
0	0	48.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	3.2	0.9	0.009	4.2	0.9	0.009	0.6	0.0	-0.6	0.0	0.0	0.9	0.15	0.0	
6	2	62.0	0.14	13.50	90.00	1.57	8.3	13.2	10.9	0.109	11.5	8.2	0.082	1.9	2.7	6.4	0.4	3.5	6.0	1.04	7.9	
6	4	63.9	0.15	15.40	90.00	1.57	11.4	21.3	19.0	0.190	19.2	15.9	0.159	2.7	3.1	8.8	1.8	7.0	10.4	1.80	9.7	
6	6	64.4	0.16	15.90	90.00	1.57	12.4	27.7	25.4	0.254	27.1	23.8	0.238	3.3	1.6	9.1	2.6	15.0	9.6	1.65	9.7	
6	8	66.0	0.18	17.50	90.00	1.57	15.6	34.6	32.3	0.323	35.6	32.3	0.323	3.8	0.0	11.8	3.3	24.2	8.1	1.39	12.3	
8	10	69.4	0.21	20.90	90.00	1.57	24.0	50.5	48.2	0.482	49.0	45.7	0.457	4.5	2.5	19.5	4.1	37.7	9.2	1.59	19.9	
8	12	69.5	0.21	21.00	90.00	1.57	24.3	62.5	60.2	0.602	63.5	60.2	0.602	5.2	0.0	19.1	4.9	54.2	6.0	1.03	19.4	
8	14	69.5	0.21	21.00	90.00	1.57	24.3	62.5	60.2	0.602	63.5	60.2	0.602	5.2	0.0	19.1	5.1	56.6	3.5	0.60	19.2	
8	16	69.0	0.21	20.50	90.00	1.57	22.9	62.5	60.2	0.602	63.5	60.2	0.602	5.2	0.0	17.7	5.1	56.7	3.5	0.60	17.9	
8	18	66.0	0.18	17.50	90.00	1.57	15.6	62.5	60.2	0.602	63.5	60.2	0.602	5.2	0.0	10.4	5.1	56.7	3.5	0.60	10.5	
8	20	65.5	0.17	17.00	90.00	1.57	14.5	62.5	60.2	0.602	63.5	60.2	0.602	5.2	0.0	9.3	5.1	56.7	3.5	0.60	9.5	
6	22	63.5	0.15	15.00	90.00	1.57	10.7	62.5	60.2	0.602	63.5	60.2	0.602	5.2	0.0	5.5	5.1	56.7	3.5	0.60	5.7	
5	24	56.5	0.08	8.00	90.00	1.57	2.3	55.0	52.7	0.527	54.0	50.7	0.507	4.8	2.0	-2.5	5.0	56.4	-4.8	-0.83	-2.7	
4	26	54.5	0.06	6.00	90.00	1.57	1.2	46.6	44.3	0.443	47.5	44.2	0.442	4.4	0.1	-3.3	4.9	54.2	-8.0	-1.73	-3.8	
4	28	54.5	0.06	6.00	90.00	1.57	1.0	44.2	41.9	0.419	44.1	40.8	0.408	4.3	1.1	-3.3	4.7	49.0	-7.7	-1.33	-3.7	
0	30	54.1	0.06	5.60	90.00	1.57	0.4	43.1	40.8	0.408	42.9	39.6	0.396	4.2	1.2	-3.8	4.6	46.2	-6.1	-1.05	-4.4	
0	32	52.5	0.04	4.00	90.00	1.57	0.0	41.8	39.5	0.395	42.8	39.5	0.395	4.0	0.5	-4.0	4.1	37.1	-1.4	-0.24	-4.1	
0	34	48.5	0.00	0.00	90.00	1.57	0.0	40.3	38.0	0.380	41.1	37.8	0.378	4.1	0.2	-4.1	4.3	40.1	-2.2	-0.39	-4.3	
0	36						38.3	36.0	0.360	36.8	35.5	0.355	0.004	4.0	0.5	-4.0	4.1	37.1	-1.4	-0.24	-4.1	
0	38						34.0	31.7	0.317	34.8	31.5	0.315	0.004	3.8	0.2	-3.8	3.9	34.2	-2.7	-0.46	-3.9	
0	40						32.2	29.9	0.299	31.9	28.6	0.286	0.004	3.6	1.3	-3.6	3.8	31.5	-2.3	-0.39	-3.8	
0	42						30.0	27.7	0.277	29.5	26.2	0.262	0.003	3.4	1.5	-3.4	3.6	28.8	-1.9	-0.33	-3.6	
0	44						27.6	25.3	0.253	26.7	23.4	0.234	0.003	3.2	1.9	-3.2	3.4	26.3	-2.0	-0.35	-3.4	
0	46						23.7	21.4	0.214	24.2	20.9	0.209	0.003	3.1	0.5	-3.1	3.3	23.9	-2.8	-0.48	-3.3	
0	48						21.2	18.9	0.189	22.0	18.7	0.187	0.003	2.9	0.2	-2.9	3.1	21.6	-2.9	-0.49	-3.1	
0	50						19.2	16.9	0.169	19.5	16.2	0.162	0.003	2.7	0.7	-2.7	3.0	19.4	-2.9	-0.51	-3.0	
0	52						16.9	14.6	0.146	16.9	13.6	0.136	0.002	2.5	1.0	-2.5	2.8	17.4	-3.3	-0.57	-2.8	
0	54						14.4	12.1	0.121	15.0	11.7	0.117	0.002	2.3	0.4	-2.3	2.6	15.4	-3.6	-0.62	-2.6	
0	56						13.4	11.1	0.111	14.2	10.9	0.109	0.002	2.2	0.2	-2.2	2.5	13.6	-2.6	-0.46	-2.5	
0	60						11.8	9.5	0.095	12.3	9.0	0.090	0.002	2.0	0.5	-2.0	2.3	11.9	-2.7	-0.46	-2.3	
0	62						10.8	8.5	0.085	11.8	8.5	0.085	0.002	2.0	0.0	-2.0	2.2	10.3	-1.8	-0.31	-2.2	
0	64						10.0	7.7	0.077	10.4	7.1	0.071	0.002	1.8	0.6	-1.8	2.0	8.8	-1.4	-0.25	-2.0	
0	66						9.2	6.9	0.069	9.8	6.5	0.065	0.002	1.7	0.4	-1.7	1.8	7.4	-0.8	-0.13	-1.8	
0	68						8.5	6.2	0.062	9.5	6.2	0.062	0.002	1.7	0.0	-1.7	1.7	6.2	0.0	0.00	-1.7	
0	70						8.2	5.9	0.059	9.0	5.7	0.057	0.002	1.6	0.2	-1.6	1.5	5.0	0.7	0.13	-1.5	
0	72						7.8	5.5	0.055	8.2	4.9	0.049	0.001	1.5	0.6	-1.5	1.3	4.0	1.1	0.20	-1.3	
0	74						7.3	5.0	0.050	7.8	4.5	0.045	0.001	1.4	0.5	-1.4	1.2	3.1	1.6	0.28	-1.2	
0	76						5.1	2.8	0.028	5.1	1.8	0.018	0.001	0.9	1.0	-0.9	1.0	2.3	-0.1	-0.02	-1.0	
0	78						3.0	0.7	0.007	4.0	0.7	0.007	0.001	0.5	0.0	-0.5	0.8	1.7	-0.1	-0.18	-0.8	
0	80						3.0	0.7	0.007	3.9	0.6	0.006	0.001	0.5	0.1	-0.5	0.7	1.2	-0.6	-0.10	-0.7	

Tabla 5-13: Registro de datos EXP 10

EXPERIMENTACIÓN													SIMULACIÓN							
V2	TIEMPO min	H medido		H	θ	θ	θ	CAUDAL EN CAUBRADO l/s	NIVEL H1		NIVEL SAIDA H2		CAUDAL SALIDA		ΔH EXP-SIM cm	H1 = H2 cm	ΔQ SAL EXP-SIM m3	Atenuación Sim l/s		
		cm	m						cm	cm	cm	cm	m³/s	l/s					cm	cm
0	0	48.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	3.2	0.7	0.007	4.0	0.7	0.007	0.001	0.6	0.0	0.7	0.11	0.00
8	2	67.0	0.19	18.50	90.00	1.57	1.57	17.9	21.2	18.7	0.187	16.6	13.3	0.133	0.003	2.7	5.4	15.1	1.6215	4.7
8	4	67.1	0.19	18.60	90.00	1.57	1.57	18.1	30.7	28.2	0.282	29.8	26.5	0.265	0.004	3.9	1.7	14.2	3.3328	19.8
8	6	67.0	0.19	18.50	90.00	1.57	1.57	17.9	41.2	38.7	0.387	41.2	37.9	0.379	0.005	4.6	0.8	13.2	4.3663	33.2
8	8	67.0	0.19	18.50	90.00	1.57	1.57	17.9	53.2	50.7	0.507	51.3	48.0	0.480	0.005	5.2	2.7	12.7	5.1526	47.9
5	10	64.5	0.16	16.00	90.00	1.57	1.57	12.5	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	6.7	5.6212	56.2
5	12	63.5	0.15	15.00	90.00	1.57	1.57	10.7	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	4.9	5.6433	56.6
5	14	64.5	0.15	15.00	90.00	1.57	1.57	7.6	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	1.8	5.6433	56.6
3	18	60.5	0.12	12.00	90.00	1.57	1.57	6.2	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	0.4	5.6310	56.4
3	20	60.5	0.12	12.00	90.00	1.57	1.57	6.2	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	0.4	5.6310	56.4
3	22	60.5	0.12	12.00	90.00	1.57	1.57	6.2	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	0.4	5.6310	56.4
2	24	54.3	0.06	5.80	90.00	1.57	1.57	1.1	47.1	44.6	0.446	47.3	44.0	0.440	0.005	5.0	0.6	-3.9	5.4643	53.1
2	26	54.3	0.06	5.80	90.00	1.57	1.57	1.1	45.2	42.7	0.427	46.0	42.7	0.427	0.005	4.9	0.0	-3.8	5.3002	50.0
2	28	54.3	0.06	5.80	90.00	1.57	1.57	1.1	44.8	42.3	0.423	45.0	41.7	0.417	0.005	4.8	0.6	-3.8	5.1372	46.9
1	30	52.9	0.04	4.40	90.00	1.57	1.57	0.5	41.2	38.7	0.387	41.5	38.2	0.382	0.005	4.7	0.2	-3.7	4.9755	44.0
1	32	52.9	0.04	4.40	90.00	1.57	1.57	0.5	38.7	36.2	0.362	38.2	34.9	0.349	0.004	4.4	1.3	-3.9	4.6379	38.3
0	34	49.0	0.01	0.50	90.00	1.57	1.57	0.0	34.6	32.1	0.321	35.2	31.9	0.319	0.004	4.2	0.2	-4.2	4.4582	35.4
0	36	49.0	0.01	0.50	90.00	1.57	1.57	0.0	32.4	29.9	0.299	32.6	29.3	0.293	0.004	4.1	0.6	-4.1	4.2689	32.4
1	38	53.0	0.05	4.50	90.00	1.57	1.57	0.6	28.5	26.0	0.260	29.3	26.0	0.260	0.004	3.8	0.0	-3.2	4.0910	29.8
2	40	56.1	0.08	7.60	90.00	1.57	1.57	2.1	26.7	24.2	0.242	27.2	23.9	0.239	0.004	3.7	0.3	-1.6	3.9478	27.7
2	42	56.1	0.08	7.60	90.00	1.57	1.57	2.1	27.0	24.5	0.245	27.8	24.5	0.245	0.004	3.7	0.0	-1.7	3.8279	26.1
3	44	59.3	0.11	10.80	90.00	1.57	1.57	4.8	27.0	24.5	0.245	27.8	24.5	0.245	0.004	3.7	0.0	1.1	3.7606	25.2
4	46	59.3	0.11	10.80	90.00	1.57	1.57	4.8	31.3	28.8	0.288	29.9	26.6	0.266	0.004	3.9	2.2	1.0	3.7442	24.9
4	48	63.0	0.15	14.50	90.00	1.57	1.57	9.9	36.7	34.2	0.342	37.0	33.7	0.337	0.004	4.3	0.5	5.5	3.8608	26.5
5	50	63.0	0.15	14.50	90.00	1.57	1.57	9.9	42.4	39.9	0.399	43.0	39.7	0.397	0.005	4.7	0.2	5.2	4.0967	29.9
5	52	63.5	0.15	15.00	90.00	1.57	1.57	10.7	48.2	45.7	0.457	47.2	43.9	0.439	0.005	5.0	1.8	5.8	4.3357	33.4
5	54	63.5	0.15	15.00	90.00	1.57	1.57	10.7	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	4.9	4.5765	37.3
6	56	66.7	0.18	18.20	90.00	1.57	1.57	17.2	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	11.4	5.0960	45.1
5	58	66.7	0.18	18.20	90.00	1.57	1.57	17.2	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	11.4	5.0960	45.1
6	60	63.0	0.15	14.50	90.00	1.57	1.57	9.9	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	4.1	5.6433	56.6
5	62	63.0	0.15	14.50	90.00	1.57	1.57	9.9	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	4.1	5.6433	56.6
4	64	60.5	0.12	12.00	90.00	1.57	1.57	6.2	62.5	60.0	0.600	63.3	60.0	0.600	0.006	5.8	0.0	0.4	5.6397	56.6
3	66	58.4	0.10	9.90	90.00	1.57	1.57	3.9	61.2	58.7	0.587	61.2	57.9	0.579	0.006	5.7	0.8	-1.8	5.5713	55.2
3	68	58.5	0.10	10.00	90.00	1.57	1.57	4.0	49.8	47.3	0.473	50.6	47.3	0.473	0.005	5.2	0.0	-1.2	4.7418	53.3
3	70	58.5	0.10	10.00	90.00	1.57	1.57	4.0	47.3	44.8	0.448	48.0	44.7	0.447	0.005	5.0	0.1	-1.0	5.3755	51.4
2	72	53.7	0.05	5.20	90.00	1.57	1.57	0.8	45.6	43.1	0.431	45.8	42.5	0.425	0.005	4.9	0.6	-4.1	5.2433	48.9
2	74	53.7	0.05	5.20	90.00	1.57	1.57	0.8	43.4	40.9	0.409	43.0	39.7	0.397	0.005	4.7	1.2	-3.9	5.0757	45.8
1	76	48.5	0.00	0.00	90.00	1.57	1.57	0.0	41.2	38.7	0.387	41.5	38.2	0.382	0.005	4.6	0.5	-4.6	4.8963	42.6
0	78	48.5	0.00	0.00	90.00	1.57	1.57	0.0	36.8	34.3	0.343	37.6	34.3	0.343	0.004	4.4	0.0	-4.4	4.7052	39.4
0	80								34.3	31.8	0.318	34.0	30.7	0.307	0.004	4.1	1.1	-4.1	4.5097	36.2
0	82								32.2	29.7	0.297	32.8	29.5	0.295	0.004	4.1	0.2	-4.1	4.3085	33.0
0	84								30.0	27.5	0.275	30.8	27.5	0.275	0.004	3.9	0.0	-3.9	4.1072	30.0
0	86								27.8	25.3	0.253	27.6	24.3	0.243	0.004	3.7	1.0	-3.7	3.9059	27.1
0	88								24.5	22.0	0.220	24.5	21.2	0.212	0.003	3.4	0.8	-3.4	3.7045	24.4
0	90								21.7	19.2	0.192	21.4	18.1	0.181	0.003	3.2	1.1	-3.2	3.5032	21.8
0	92								19.1	16.6	0.166	19.3	16.0	0.160	0.003	3.0	0.6	-3.0	3.3018	19.4
0	94								16.9	14.4	0.144	17.1	13.8	0.138	0.003	2.8	0.6	-2.8	3.1004	17.1
0	96								15.9	13.4	0.134	16.7	13.4	0.134	0.003	2.7	0.0	-2.7	2.8991	15.0
0	98								13.5	11.0	0.110	13.8	10.5	0.105	0.002	2.4	0.5	-2.4	2.6889	13.0
0	100								12.2	9.7	0.097	13.0	9.7	0.097	0.002	2.3	0.0	-2.3	2.4973	11.1
0	102								10.4	7.9	0.079	10.6	7.3	0.073	0.002	2.0	0.6	-2.0	2.2957	9.4
0	104								9.6	7.1	0.071	10.2	6.9	0.069	0.002	2.0	0.2	-2.0	2.0941	7.8
0	106								9.4	6.9	0.069	10.0	6.7	0.067	0.002	1.9	0.2	-1.9	1.8924	6.4
0	108								9.2	6.7	0.067	9.2	5.9	0.059	0.002	1.8	0.8	-1.8	1.6907	5.1
0	110								8.7	6.2	0.062	8.6	5.3	0.053	0.002	1.7	0.9	-1.7	1.4889	3.9
0	112								7.8	5.3	0.053	7.8	4.5	0.045	0.002	1.6	0.8	-1.6	1.2518	3.0
0	114								4.4	1.9	0.019	5.1	1.8	0.018	0.001	1.0	0.1	-1.0	1.0209	2.2
0	116								4.2	1.7	0.017	5.0	1.7	0.017	0.001	1.0	0.0	-1.0	0.8402	1.5
0	118								3.5	1.0	0.010	4.2	0.9	0.009	0.001	0.7	0.1	-0.7	0.6997	0.9
0	120								3.2	0.7	0.007	4.0	0.7	0.007	0.001	0.6	0.0	-0.6	0.5890	0.5

## **C. Anexo: Dimensionamiento método racional modificado.**



El método racional modificado se utiliza para calcular un hidrograma a la entrada y otro hidrograma a la salida (utilizando los caudales pico calculados con el método racional) de una estructura de almacenamiento, simulando las condiciones antes y después de un desarrollo urbano. Para esto se debe calcular el caudal producto de la escorrentía superficial antes del desarrollo por medio del método racional, asumiendo las variables correspondientes a una condición no urbanizada.

Para aplicar este método es necesario contar con el caudal pico  $Q_p$  generado por el desarrollo o cambio de uso del suelo, y con el caudal pico  $Q_A$  que se generaba supuestamente antes del desarrollo urbano. Este caudal  $Q_A$  en algunos casos es solicitado por la autoridad local competente, como el máximo caudal que puede entregar un proyecto de urbanización a un cauce natural, o a un alcantarillado público.

Por medio del método racional se calcularon los caudales pico antes y después del desarrollo. Este método se empezó a utilizar alrededor de la mitad del siglo XIX, y es probablemente el método más utilizado hoy en día para calcular caudales pico (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1949). La expresión para calcular el caudal pico con el método racional es la siguiente:

$$Q = C i A \quad (18)$$

El caudal  $Q$  está dado en pies cúbicos por segundo ( $\text{pie}^3/\text{s}$ ), la intensidad  $i$  en pulgadas por hora ( $\text{pulg}/\text{h}$ ) y el área  $A$  en acres, por lo cual el factor de conversión ( $1 \text{ pie}^3/\text{s} = 1.008 \text{ acre} \times \text{pulg}/\text{h}$ ) se considera incluido en el coeficiente de escorrentía (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1949). Esta expresión también se puede escribir de la siguiente manera:

$$Q = C \frac{i}{100} \frac{A}{36} \quad (19)$$

Donde el resultado del caudal  $Q$  es en  $\text{l}/\text{s}$ , utilizando la intensidad en  $\text{mm}/\text{h}$ , el área en  $\text{m}^2$  y el coeficiente de escorrentía adimensional.

Al usar el método racional se hacen las siguientes suposiciones:

- La lluvia es homogénea en toda el área de la cuenca

- Toda el área aferente aporta escorrentía superficial al punto de análisis en el cuerpo de agua. Es decir, el tiempo de concentración de la cuenca, es igual o menor al tiempo de duración del evento de tormenta
- El coeficiente de escorrentía es homogéneo
- No se tiene en cuenta la evaporación, infiltración o almacenamientos temporales en la cuenca

El tiempo de concentración después del desarrollo es un parámetro que se calcula de acuerdo a las condiciones topológicas de la cuenca y generalmente presenta una alta incertidumbre. Este dato tiene la particularidad que algunas normas de diseño, sugieren tomar un valor mínimo, como por ejemplo en la norma NS-085 de la EAAB la cual plantea un valor mínimo de 15 minutos (EAAB, 2020). Esto obedece a que, al utilizar un tiempo de concentración muy bajo, se obtienen como resultado valores muy altos de intensidad de precipitación, lo cual tiende a sobredimensionar las estructuras.

La curva IDF utilizada para aplicar este método en el sitio de instalación fue la correspondiente a la estación climatológica UNIV NACIONAL – IDEAM la cual se muestra en la ecuación ( 20 ).

$$i = \frac{1968.56 Tr^{0.15}}{D^{1.00} + 16.79} \quad ( 20 )$$

Esta curva tiene una ecuación de la forma:

$$i = \frac{c Tr^m}{T_d^e + f} \quad ( 21 )$$

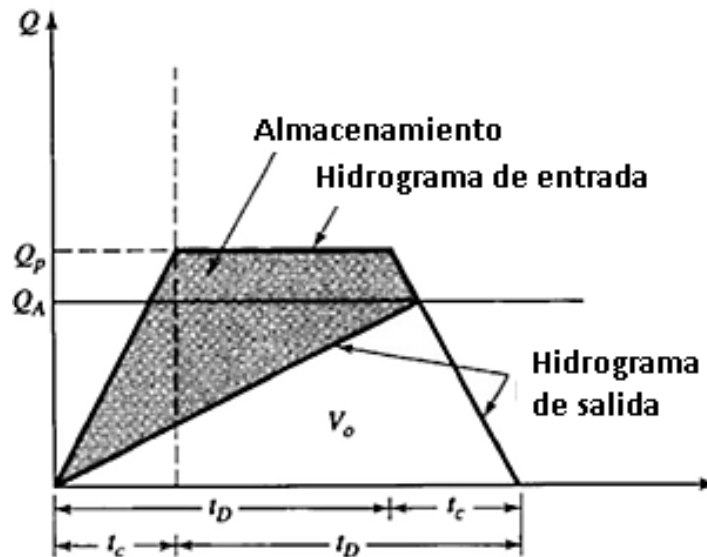
Donde  $i$  es la intensidad de diseño (mm/h) para el periodo de retorno seleccionado  $T_R$  (años),  $T_d$  (min) es la duración de la tormenta, y  $c$ ,  $m$ ,  $e$  y  $f$  son coeficientes específicos que dependen del lugar de la curva IDF.

Reemplazando ( 21 ) en ( 18 ) se obtiene una ecuación para calcular el caudal pico, con la intensidad de precipitación en función del tiempo de duración:

$$Q_p = C_p \left[ \frac{c T r^m}{T_d^e + f} \right] A \quad (22)$$

Si se construye un hidrograma en forma trapezoidal ajustando la duración de las ramas de aumento y de recesión del hidrograma hasta hacerlas iguales al tiempo de concentración  $t_c$ , se obtiene un hidrograma como el que se muestra en la **Gráfica 5-1**.

$Q_A$  es calculado como el valor del caudal antes del desarrollo, clasificando el área aferente como pastizales con un coeficiente de escorrentía de 0.4 (Chow, Maidment, & Mays, Hidrología Aplicada, 1949).



**Gráfica 5-1:** Representación del método racional modificado. Fuente: (Butler & Davies, 2011)

El área bajo el hidrograma trapezoidal, representa el volumen de agua que ingresó por escorrentía superficial en el evento de precipitación para la condición después del desarrollo. Esta área se puede calcular por medio de la ecuación ( 23 ):

$$V_i = 60 (0.5) Q_p [(t_D - t_c) + (t_D + t_c)] \quad (23)$$

Dónde:

$V_i$  es el volumen precipitado en el evento de tormenta, l

$Q_p$  es el caudal pico, l/s

$t_D$  es el tiempo de duración de la tormenta, min

$t_c$  es el tiempo de concentración después del desarrollo, min

El área triangular bajo el hidrograma de salida de la **Gráfica 5-1** representa el volumen de agua producido por escorrentía, suponiendo las condiciones de antes del desarrollo y se puede calcular por medio de la ecuación ( 24 ).

$$V_0 = 60(0.5)Q_A(t_D + t_c) \quad (24)$$

Dónde:

$V_0$  es el volumen del hidrograma de salida, l

$Q_A$  es el caudal máximo permitido (caudal generado antes del desarrollo), l/s

$t_D$  es el tiempo de duración de la tormenta, min

$t_c$  es el tiempo de concentración de la cuenca en estudio, min

El volumen de almacenamiento será la resta entre el volumen de ingreso (después del desarrollo) menos el volumen de salida (antes del desarrollo):

$$V_s = V_i - V_0 \quad (25)$$

Reemplazando ( 23 ) y ( 24 ) en ( 25 ), y simplificando se obtiene una expresión para calcular el volumen de almacenamiento en función del tiempo de duración de la tormenta  $t_D$ .

$$V_s = 60Q_p t_D - 30Q_A(t_D + t_c) \quad (26)$$

El caudal pico  $Q_p$  y el volumen de almacenamiento  $V_s$  dependen directamente del tiempo de duración de la tormenta  $t_D$ . El objetivo de este método es hallar el tiempo de duración



$t_D$  que hace máximo el volumen de almacenamiento, es decir la condición más desfavorable. Esto se logra derivando la ecuación ( 26 ) en función de  $t_D$  para después igualar a cero y hallar su valor máximo.

Derivando la ecuación ( 26 ) con respecto a  $t_D$ :

$$\frac{d V_s}{d t_D} = \frac{d}{d t_D} 60 Q_p t_D - \frac{d}{d t_D} 30 Q_A t_D + \frac{d}{d t_D} 30 Q_A t_c \quad ( 27 )$$

$$\frac{d V_s}{d t_D} = 60 \left[ \frac{d Q_p t_D}{d t_D} + Q_p \right] - 30 Q_A \quad ( 28 )$$

Reemplazando la ecuación ( 19 ) en ( 28 ) se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{d V_s}{d t_D} = 60 \frac{d}{d t_D} t_D \left[ C_p \frac{i}{100} \frac{A}{36} \right] + 60 \left[ C_p \frac{i}{100} \frac{A}{36} \right] - 30 Q_A \quad ( 29 )$$

Debido a que en la diferencial el término que varía con respecto al tiempo de duración de tormenta es la intensidad  $i$ , entonces:

$$\frac{d V_s}{d t_D} = \frac{60 t_D C_p A}{3600} \frac{d i}{d t_D} + 60 C_p \frac{i A}{3600} - 30 Q_A \quad ( 30 )$$

Ahora se deriva la ecuación de la intensidad  $i$  con respecto al tiempo de duración de la tormenta  $t_D$ . La ecuación que relaciona la intensidad de lluvia con respecto al tiempo de duración es:

$$i = \frac{c T r^m}{t_D^e + f} \quad ( 31 )$$

Derivando con respecto a  $t_D$ :

$$\frac{di}{dt_D} = c Tr^m \frac{d}{dt_D} (t_D^e + f)^{-1} \quad (32)$$

Aplicando la regla de la cadena:

$$\frac{di}{dt_D} = -cTr^m(t_D^e + f)^{-2}et_D^{e-1} \quad (33)$$

$$\frac{di}{dt_D} = -\frac{c e Tr^m t_D^{e-1}}{(t_D^e + f)^2} \quad (34)$$

Reemplazando ( 34 ) en la ecuación ( 30 ) se obtiene:

$$\frac{d V_s}{d t_D} = \frac{60t_D C_p A}{3600} \left[ -\frac{c e Tr^m t_D^{e-1}}{(t_D^e + f)^2} \right] + 60C_p \frac{A}{3600} \left[ \frac{c Tr^m}{t_D^e + f} \right] - 30Q_A \quad (35)$$

Simplificando e igualando a cero:

$$\frac{d V_s}{d t_D} = 0 = -\frac{et_D^e}{(t_D^e + f)^2} + \frac{1}{t_D^e + f} - \frac{1800Q_A}{C_p A c Tr^m} \quad (36)$$

Entonces:

$$F(t_D) = -\frac{et_D^e}{(t_D^e + f)^2} + \frac{1}{t_D^e + f} - \frac{1800Q_A}{C_p A c Tr^m} \quad (37)$$

Con la ecuación ( 37 ) se puede calcular cuál es el tiempo de duración  $t_D$  que arroja el máximo volumen que se debe almacenar para el periodo de retorno seleccionado.

Debido a que despejar  $t_D$  en la ecuación ( 37 ) no es un proceso sencillo, se utilizó la técnica de iteración de Newton, la cual consiste evaluar la ecuación  $F(t_D)$  con un valor (de tiempo en minutos) inicial estimado, después, evaluar su derivada con el mismo valor y realizar iteraciones hasta que la relación entre los dos resultados sea menor a 0.5 (Butler & Davies, 2011).

$$\frac{F(t_D)}{F'(t_D)} < 0.5 \quad (38)$$

Derivando la ecuación ( 37 ) con respecto a  $t_D$ :

$$F'(t_D) = \left[ -\frac{et_D^e}{(t_D^e + f)^2} \right]' + \left[ \frac{1}{t_D^e + f} \right]' \quad (39)$$

$$F'(t_D) = -[et_D^e(t_D^e + f)^{-2}]' + [1(t_D + f)^{-1}]' \quad (40)$$

Aplicando la regla de la cadena y la derivada de un producto:

$$F'(t_D) = -[e^2 t_D^{e-1} (t_D^e + f)^{-2} + et_D^e (-2(t_D^e + f)^{-3}) et_D^{e-1}] + [-1(t_D^e + f)^{-2} et_D^{e-1}] \quad (41)$$

Reorganizando la ecuación se obtiene:

$$F'(t_D) = -\frac{e^2 t_D^{e-1}}{(t_D^e + f)^2} + \frac{2et_D^{2e-1}}{(t_D^e + f)^3} - \frac{et_D^{e-1}}{(t_D^e + f)^2} \quad (42)$$

El procedimiento para hallar el tiempo de duración  $t_D$  que arroja el valor máximo de volumen de almacenamiento consiste en evaluar las dos ecuaciones  $F(t_D)$  y  $F'(t_D)$ , ( 36 ) y ( 41 ) respectivamente, asumiendo un tiempo de duración  $t_D$  inicial, y después el resultado restárselo al tiempo inicial asumido de manera iterativa obteniendo un tiempo  $i+1$  hasta que la variación sea menor que 0.5 (Butler & Davies, 2011).

$$t_{D_{i+1}} = t_{D_i} - \frac{F(t_D)}{F'(t_D)} \quad (43)$$

A pesar de que el método racional modificado es uno de los más utilizados para dimensionar volúmenes de almacenamiento, una de sus limitaciones es que asume que el tiempo de concentración, es el mismo tiempo en el que el caudal tiene un comportamiento

creciente y decreciente. En otras palabras, que el hidrograma es simétrico y esto en muy pocas ocasiones se cumple.

La intensidad de lluvia utilizada para hallar el caudal pico antes del desarrollo, fue calculada con la ecuación de la curva IDF de la estación climatológica UNIV NACIONAL-IDEAM( 3 ) utilizando un tiempo de duración  $t_D$  de 15 min como una primera aproximación.

$$i = \frac{1968.56 Tr^{0.15}}{D^{1.00} + 16.79} = \frac{1968.56 (2 \text{ años})^{0.15}}{(15 \text{ min})^{1.00} + 16.79} = 68.7 \text{ mm/h} \quad (44)$$

El cálculo del caudal para las condiciones antes del desarrollo y periodo de retorno de 2 años se muestra en la ecuación ( 45 ).

$$Q_A = C \frac{i}{100} \frac{A}{36} = 0.4 \frac{68.7 \text{ mm/h}}{100} \frac{450 \text{ m}^2}{36} = 3.44 \text{ l/s} \quad (45)$$

Con este caudal se aplicó el método racional modificado y se halló el tiempo de duración para el cual se presenta el máximo valor de almacenamiento. Al usar el método de iteración de Newton, el valor de duración del aguacero  $t_D$  asumido inicialmente fue 15 minutos. El resultado final del tiempo de duración  $t_D$  es 62.96 min.

Esto significa que, calculando el volumen de almacenamiento por medio de la ecuación ( 37 ), con el tiempo de duración  $t_D$  de 62.96 min, se obtiene como resultado el máximo valor, o, en otras palabras, el volumen que debe ser instalado para tener las condiciones de caudal antes del desarrollo. Con este valor  $t_D = 62.96$  min se calculó la intensidad de precipitación para la condición después del desarrollo.

$$i = \frac{1968.56 (2 \text{ años})^{0.15}}{(62.96 \text{ min})^{1.00} + 16.79} = 27.4 \text{ mm/h} \quad (46)$$

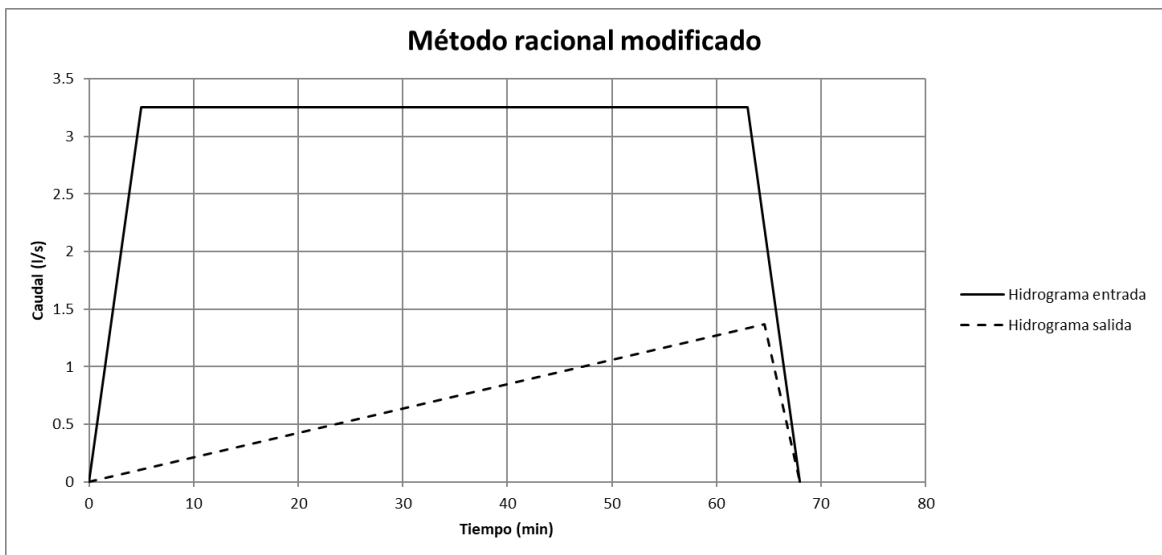
Para calcular el caudal después del desarrollo  $Q_p$  se utilizó un coeficiente de escorrentía de 0.95 debido a que la cubierta es impermeable. El caudal pico para después del desarrollo es:

$$Q_p = C \frac{i}{100} \frac{A}{36} = 0.95 \frac{27.4 \text{ mm/h}}{100} * \frac{450 \text{ m}^2}{36} = 3.25 \text{ l/s} \quad (47)$$

El caudal antes del desarrollo, se calculó nuevamente con la intensidad calculada con el tiempo de duración  $t_D = 62.96 \text{ min}$

$$Q_A = C \frac{i}{100} \frac{A}{36} = 0.4 \frac{27.4 \text{ mm/h}}{100} * \frac{450 \text{ m}^2}{36} = 1.37 \text{ l/s} \quad (48)$$

Con estos resultados se construyó un hidrograma de forma trapezoidal, como se observa en la **Gráfica 5-2**.



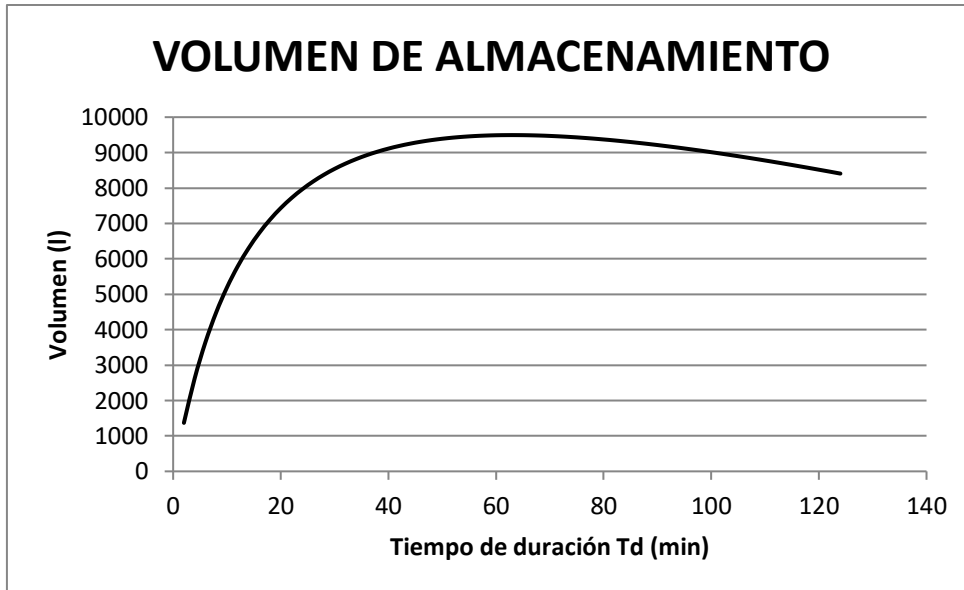
**Gráfica 5-2:** Resultado del volumen de detención. Periodo de retorno 2 años.

El área que hay entre los dos hidrogramas (entrada y salida) representa el volumen de almacenamiento. Utilizando la ecuación ( 26 ) se calculó este volumen:

$$V_s = 60(3.25 \text{ l/s})(62.96 \text{ min}) - 30(1.37 \text{ l/s})(62.96 \text{ min} + 5 \text{ min}) = 9.49 \text{ m}^3 \quad (49)$$

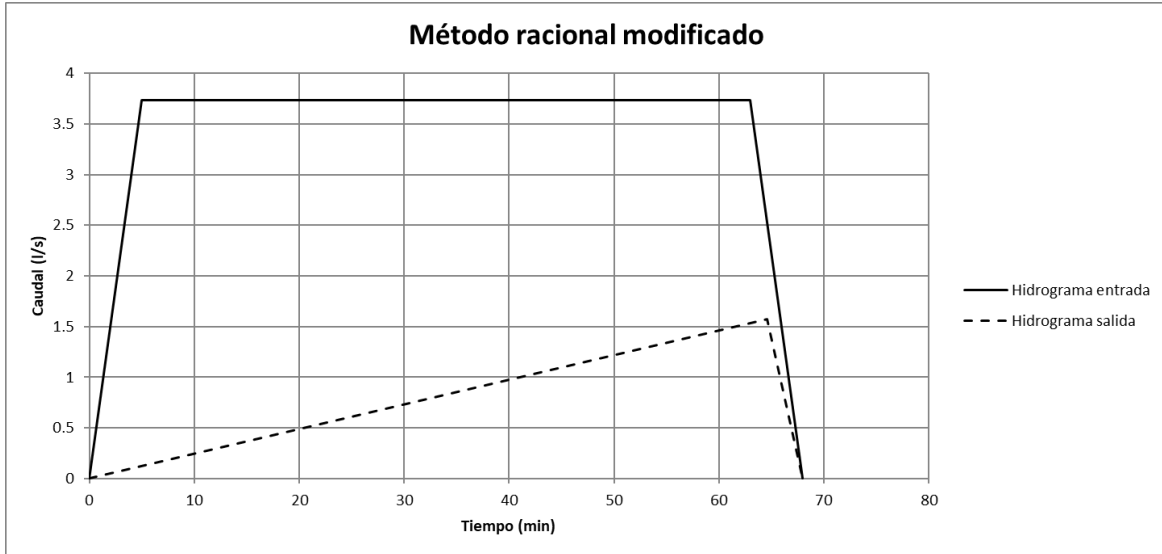
Esto quiere decir que para atenuar el caudal pico hasta un valor teóricamente presentado antes del desarrollo, para un periodo de retorno de 2 años, se debe instalar un volumen de almacenamiento de  $9.49 \text{ m}^3$ . A manera de verificación, se graficó la ecuación ( 26 )

variando el tiempo de duración  $t_D$  manteniendo los demás parámetros constantes, y los resultados se muestran en la **Gráfica 5-3**. Se puede observar que el mayor volumen es de 9494 litros con un tiempo de duración de 62.96 minutos, con lo que se comprueba el resultado.



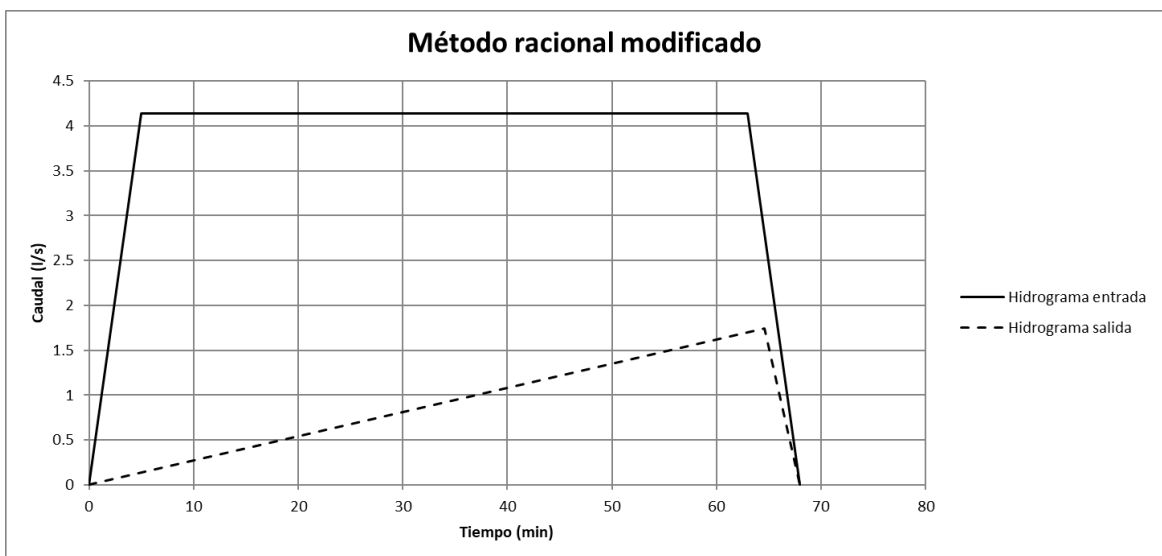
**Gráfica 5-3:** Variación del volumen de detención con respecto al tiempo de duración de la tormenta, periodo de retorno 2 años.

Se realizaron los cálculos para los periodos de retorno de 5 y 10 años, los cuales se muestran en la **Gráfica 5-4** y la **Gráfica 5-5** respectivamente. El caudal pico antes del desarrollo para el periodo de retorno de 5 años fue de 1.57 l/s, y el caudal pico después del desarrollo fue de 3.73 l/s. El tiempo de duración  $t_D$  para el cual el volumen es máximo es de 62.96 min y el volumen de almacenamiento obtenido para el periodo de retorno de 5 años es de 10.89 m<sup>3</sup>.



**Gráfica 5-4:** Cálculo del método racional modificado. Período de retorno 5 años.

El caudal pico antes del desarrollo para el período de 10 años fue de 1.74 l/s, y el caudal pico después del desarrollo fue de 4.14 l/s. El tiempo de duración  $t_D$  es de 62.96 min y el volumen de almacenamiento obtenido para el período de retorno de 10 años, es de 12.09 m<sup>3</sup>.



**Gráfica 5-5:** Cálculo del método racional modificado. Período de retorno 10 años.

El método racional modificado es muy sensible a la variación del coeficiente de escorrentía antes del desarrollo puesto que el volumen fluctúa considerablemente con un leve cambio

de este parámetro. Por ejemplo, una variación del coeficiente de escorrentía de 0.35 a 0.4 para la condición antes del desarrollo, arroja como resultado una variación del volumen de  $7.48 \text{ m}^3$  a  $6.39 \text{ m}^3$  respectivamente, lo que es una diferencia del 15% aproximadamente. Entre mayor es el coeficiente de escorrentía antes del desarrollo, menor es el volumen de almacenamiento calculado por este método.

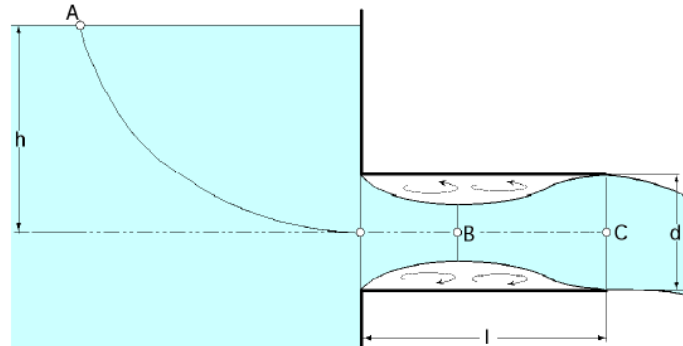
Todos los tiempos de duración  $T_d$  calculados con el método racional modificado, para distintos periodos de retorno resultaron iguales. Esto se debe a que en la ecuación del método ( 36 ), la relación  $Q_A / T_r^m$  se mantiene constante al variar el periodo de retorno. En esta ecuación ( 36 ) los parámetros  $e$ ,  $f$ ,  $C_p$ ,  $A$  y  $c$ , son valores que dependen de la localización del almacenamiento y cuando varían, como por ejemplo un aumento en el área o coeficiente de escorrentía, se presenta una diferencia considerable en el resultado.



## **D. Anexo: Ecuación de Bernoulli estructura de salida.**



La descarga del tanque de detención con elementos celulares es por medio de una tubería instalada en la parte inferior, y esta fue calculada como un orificio sumergido. Este tipo de orificio sumergido se le conoce como tubo adicional cilíndrico exterior (Fernández, 2000) y al colocar descargar a un tubo adicional se logra que la vena líquida que salía contraída comparada a la condición sin tubo, vuelva a ensancharse y salir con el mismo diámetro del orificio como se puede observar en la **Figura 5-1**. Esto genera pérdidas por fricción que afectan el coeficiente de descarga.



**Figura 5-1:** Orificio sumergido tubo adicional cilíndrico. Fuente: (Fernández, 2000).

Para calcular el caudal de salida de este tipo de orificios se hacen las siguientes suposiciones:

- La velocidad en el punto A es cero
- La presión en el punto A y el punto C es atmosférica
- La vena líquida reanuda su contacto con la pared del tubo este afecta el coeficiente de descarga.

Si se aplica Bernoulli entre los puntos A y B se obtiene:

$$\frac{P_A}{\gamma} + h + 0 = \frac{P_B}{\gamma} + 0 + \frac{U_B^2}{2g} \quad (50)$$

Aplicando la ecuación de Belanguer entre B y C se obtiene:

$$\frac{P_B}{\gamma} + 0 + \frac{U_B^2}{2g} = \frac{P_C}{\gamma} + 0 + \frac{U_C^2}{2g} + \frac{(U_B - U_C)^2}{2g} + \varepsilon \frac{U_C^2}{2g} \quad (51)$$

Igualando ( 50 ) y ( 51 ):

$$\frac{P_A}{\gamma} + h + 0 = \frac{P_C}{\gamma} + \frac{U_C^2}{2g} + \frac{(U_B - U_C)^2}{2g} + \varepsilon \frac{U_C^2}{2g} \quad (52)$$

A su vez, si  $P_A = P_C = P_{atm}$  y teniendo en cuenta que el coeficiente de contracción  $\varphi$  es

$$\varphi = \frac{A_B}{A_C} = \frac{U_C}{U_B} \quad (53)$$

Resulta:

$$h = \frac{U_C^2}{2g} + \frac{\left(\frac{U_C}{\varphi} - U_C\right)^2}{2g} + \varepsilon \frac{U_C^2}{2g} = \frac{U_C^2}{2g} + \frac{\left(\frac{U_C^2}{\varphi^2} - \frac{2U_C^2}{\varphi} + U_C^2\right)}{2g} + \varepsilon \frac{U_C^2}{2g} \quad (54)$$

$$h = \frac{U_C^2}{2g} \left\{ 1 + \left( \frac{1}{\varphi^2} - \frac{2}{\varphi} + 1 \right) + \varepsilon \right\} \quad (55)$$

Despejando  $U_C$  resulta:

$$U_C = \sqrt{\frac{2gh}{1 + \left(\frac{1}{\varphi^2} - \frac{2}{\varphi} + 1\right) + \varepsilon}} \quad (56)$$

El coeficiente de corrección de velocidad  $\varepsilon$  para un tubo adicional cilíndrico exterior es (Fernández, 2000):

$$\varepsilon = 0.22 \left( \frac{A_C}{A_B} - 1 \right) = 0.22 \left( \frac{1}{\varphi} - 1 \right) \quad (57)$$

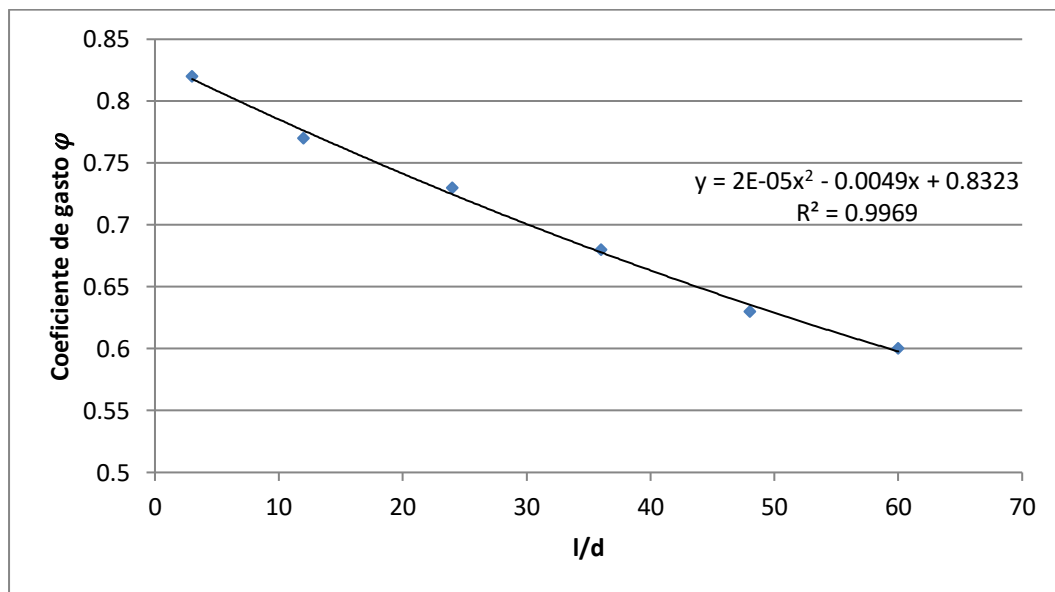
El coeficiente de gasto  $\varphi$  se calcula en función de la relación  $l/d$  en donde  $l$  es la longitud del tubo adicional cilíndrico exterior en metros y  $d$  es el diámetro de la tubería en metros. Según Weisbach el coeficiente de gasto se muestra en la **Tabla 5-14** (Fernández, 2000).

**Tabla 5-14:** Coeficiente de gasto  $\varphi$  en función de la relación  $l/d$ .

$l/d$	3	12	24	36	48	60
Coeficiente de gasto $\varphi$	0.82	0.77	0.73	0.68	0.63	0.6

Teniendo en cuenta las condiciones de instalación del tanque, la longitud de la tubería de descarga es aproximadamente 2.77 m, y el diámetro de la tubería interno se asume inicialmente en 0.067 m ( $\text{Ø}2\text{-}1/2''$ ), entonces  $l/d$  es 41.34. Haciendo una regresión polinómica de los valores del coeficiente de gasto se obtiene la ecuación ( 58 ).

$$\varphi = 2E - 05 \frac{l^2}{d} - 0.049 \frac{l}{d} + 0.8323 \quad (58)$$

**Figura 5-2:** Regresión polinómica del coeficiente de gasto  $\varphi$  en función de  $l/d$ .

Con la ecuación polinómica de orden 2 se halla el coeficiente de gasto para la relación  $l/d=41.34$ . Reemplazando en la ecuación ( 58 ) se obtiene un valor de  $\varphi = 0.66$

Reemplazando el coeficiente de gasto  $\varphi$  en ( 57 ) se obtiene:

$$\varepsilon = 0.22 \left( \frac{1}{0.66} - 1 \right) = 0.1133 \quad (59)$$

Reemplazando los valores  $\varepsilon$  y  $\varphi$  en ( 56 ):

$$U_c = \sqrt{\frac{2gh}{1 + \left( \frac{1}{0.66^2} - \frac{2}{0.66} + 1 \right) + 0.1133}} \quad (60)$$

Resolviendo ( 60 ) se obtiene una ecuación para hallar la velocidad de salida de agua del tanque en función de la altura de lámina de agua sobre el centro de la tubería:

$$U_c = \sqrt{\frac{2gh}{1.37868}} = \frac{1}{\sqrt{1.37868}} * \sqrt{2gh} \quad (61)$$

$$U_c = Cd \sqrt{2gh} \quad (62)$$

El caudal de descarga de la tubería en función de la altura de lámina de agua sobre el centro del orificio es:

$$Q_c = Cd A_c \sqrt{2gh} \quad (63)$$

Con esta ecuación se puede hallar un caudal de salida del tanque de detención en función de la lámina de agua sobre el tubo de salida. Para determinar si el diámetro de la tubería asumido inicialmente es adecuado, se observaron los caudales producto de la modelación matemática y su similitud con los calculados con las condiciones antes de desarrollo.

## **E. Anexo: Reporte de simulación matemática.**









## **F. Anexo: Tablas de resultados ANOVA**



**Tabla 5-16:** Tabla análisis ANOVA EXP 1

CANT DATOS	N	108				
GRUPOS	k	2				
PROMEDIOS	8.36	8.0				
VARIANZA	25.49	23.10				
DESV ESTAN	5.05	4.81				

TABLA VARIANZA ANOVA				ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
	Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
TRATAMIENTOS	1	2.71	2.71	0.11	6.89
ERROR	106	2575.18	24.29		
TOTAL	107	2577.89			
ACEPTAR HIPÓTESIS NULA					

H0	LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL			
HA	LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL			
H1	H2	EXP1	EXP2	
0.7	0.6	0.4	0.3	
5.1	3.8	25.5	14.1	
7.1	5.9	49.7	34.2	
8.2	6.4	66.4	40.3	
8.4	7.9	69.7	61.6	
10.2	9.4	103.0	87.4	
10.7	9.8	113.4	95.1	
10.7	10.5	113.4	109.2	
12.2	10.9	147.6	117.7	
12.2	11.7	147.6	135.7	
13.3	12.8	175.6	162.6	
13.0	12.6	167.7	157.5	
13.0	12.7	167.7	160.0	
13.5	13.1	180.9	170.3	
13.6	13.1	183.6	170.3	
13.4	13.2	178.2	172.9	
13.6	13.1	183.6	170.3	
12.8	12.5	162.6	155.0	
13.0	12.9	167.7	165.1	
12.9	12.5	165.1	155.0	
13.5	13.1	180.9	170.3	
13.6	13.1	183.6	170.3	
13.2	12.7	172.9	160.0	
13.3	13.2	175.6	172.9	
13.5	13.0	180.9	167.7	
13.5	13.0	180.9	167.7	
13.3	12.5	175.6	155.0	
13.2	12.5	172.9	155.0	
13.5	12.7	180.9	160.0	
13.5	13.1	180.9	170.3	
13.2	12.7	172.9	160.0	
10.2	9.7	103.0	93.1	
9.5	9.2	89.3	83.7	
8.7	8.7	74.8	74.8	
8.4	8.4	69.7	69.7	
7.6	7.5	57.0	55.5	
7.1	6.9	49.7	46.9	
6.3	6.2	39.1	37.8	
5.6	5.5	30.8	29.7	
4.9	4.9	23.5	23.5	
4.5	4.5	19.8	19.8	
4.1	3.7	16.4	13.3	
3.5	3.2	11.9	9.9	
2.9	2.9	8.1	8.1	
2.2	2.1	4.6	4.2	
0.9	1.7	0.7	2.7	
0.8	1.2	0.6	1.3	
0.7	0.9	0.4	0.7	
0.6	0.7	0.3	0.4	
0.5	0.6	0.2	0.3	
0.0	0.6	0.0	0.3	
0.0	0.5	0.0	0.2	
0.0	0.4	0.0	0.1	
0.0	0.2	0.0	0.0	

Tabla 5-17: Tabla análisis ANOVA EXP 2

CANT DATOS	N	72				
GRUPOS	k	2				
PROMEDIOS	18.59	16.6				
VARIANZA	103.09	101.15				
DESV ESTAN	10.15	10.06				
<b>TABLA VARIANZA ANOVA</b>					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
TRATAMIENTOS		1	71.60	71.60	0.70	7.02
ERROR		70	7148.55	102.12		
TOTAL		71	7220.15			
ACEPTAR HIPÓTESIS NULA						
H0	LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL					
HA	LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL					
H1	H2		EXP1	EXP2		
2.2	2.2		4.6	4.6		
9.0	7.3		80.1	52.6		
12.4	10.5		152.5	109.2		
15.8	13.5		248.1	180.9		
18.5	16.1		340.4	257.6		
19.7	18.3		386.1	333.1		
22.0	20.7		481.8	426.4		
23.0	22.1		526.7	486.2		
27.2	24.1		737.1	578.4		
28.4	26.5		803.7	699.6		
27.7	27.7		764.5	764.5		
30.3	28.5		915.1	809.4		
31.3	29.7		976.6	879.1		
33.2	31.5		1098.9	989.1		
34.7	31.9		1200.6	1014.4		
35.7	33.3		1270.9	1105.6		
34.4	32.3		1179.9	1040.1		
31.0	28.7		957.9	820.8		
28.4	25.7		803.7	657.9		
25.1	22.9		627.5	522.1		
22.7	20.5		513.0	418.2		
20.4	17.9		414.1	318.6		
19.0	15.5		359.1	238.7		
16.1	13.5		257.6	180.9		
14.2	11.3		200.2	126.6		
12.4	9.7		152.5	93.1		
10.5	8.7		109.2	74.8		
9.3	7.7		85.6	58.5		
8.8	6.9		76.6	46.9		
8.1	6.3		64.8	39.1		
7.5	5.3		55.5	27.6		
7.2	5.1		51.1	25.5		
6.6	4.7		42.9	21.6		
6.4	4.3		40.3	18.1		
6.0	4.6		35.4	20.7		
5.8	3.7		33.1	13.3		

Tabla 5-18: Tabla análisis ANOVA EXP 3

CANT DATOS	N		80			
GRUPOS	k		2			
PROMEDIOS		20.02	18.8			
VARIANZA		219.72	221.51			
DESV ESTAN		14.82	14.88			
<b>TABLA VARIANZA ANOVA</b>					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
TRATAMIENTOS		1	29.89	29.89	0.14	6.97
ERROR		78	17207.70	220.61		
TOTAL		79	17237.59			
						ACEPTAR HIPÓTESIS NULA
H0	LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL					
HA	LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL					
H1	H2		EXP1	EXP2		
1.3	1.3		1.6	1.6		
12.4	8.5		152.5	71.4		
14.8	14.3		217.6	203.1		
22.8	19.5		517.6	378.3		
24.3	24.1		588.1	578.4		
28.2	28.5		792.4	809.4		
32.2	32.3		1033.6	1040.1		
36.8	35.9		1350.6	1285.2		
42.3	40.3		1785.1	1620.1		
44.1	43.5		1940.4	1887.9		
46.0	44.9		2111.4	2011.5		
44.2	43.1		1949.2	1853.3		
43.0	43.3		1844.7	1870.6		
39.8	38.1		1580.1	1447.8		
39.5	36.9		1556.3	1357.9		
37.8	35.7		1425.1	1270.9		
34.8	32.7		1207.6	1066.0		
30.5	29.5		927.2	867.3		
27.0	26.9		726.3	720.9		
25.1	23.9		627.5	568.8		
23.0	21.3		526.7	451.6		
19.6	18.3		382.2	333.1		
17.0	16.3		287.3	264.1		
14.9	13.9		220.5	191.8		
13.3	11.9		175.6	140.4		
11.5	9.9		131.1	97.0		
10.0	8.7		99.0	74.8		
9.8	8.6		95.1	73.1		
8.8	8.5		76.6	71.4		
7.8	6.3		60.1	39.1		
7.3	6.2		52.6	37.8		
6.9	5.7		46.9	31.9		
6.3	5.2		39.1	26.5		
6.1	4.7		36.6	21.6		
4.8	3.2		22.6	9.9		
3.4	1.3		11.2	1.6		
1.8	0.4		3.1	0.1		
1.3	0.2		1.6	0.0		
1.2	0.0		1.3	0.0		
1.2	0.0		1.3	0.0		

Tabla 5-19: Tabla análisis ANOVA EXP 4

CANT DATOS	N	72				
GRUPOS	k	2				
PROMEDIOS	23.52	23.0				
VARIANZA	262.21	254.25				
DESV ESTAN	16.19	15.95				
<b>TABLA VARIANZA ANOVA</b>						
						ALFA =0.01
						1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
TRATAMIENTOS		1	5.58	5.58	0.02	6.80
ERROR		70	18076.02	258.23		
TOTAL		71	18081.60			
						ACEPTAR HIPÓTESIS NULA
HO	LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL					
HA	LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL					
H1	H2		EXP1	EXP2		
0.9	0.7		0.7	0.4		
11.4	10.2		128.8	103.0		
18.7	17.3		347.8	297.6		
21.7	21.2		468.7	447.3		
26.6	25.8		704.9	663.1		
29.7	29.2		879.1	849.7		
33.7	32.5		1132.3	1053.0		
36.7	36.4		1343.2	1321.3		
39.7	39.7		1572.1	1572.1		
42.7	42.5		1819.0	1802.0		
46.2	45.4		2129.8	2056.6		
49.1	48.7		2405.9	2366.8		
54.0	51.7		2910.6	2667.7		
50.0	47.7		2500.0	2270.5		
43.2	42.4		1861.9	1793.5		
39.0	38.7		1517.1	1493.8		
37.7	37.4		1417.5	1395.0		
34.7	34.7		1200.6	1200.6		
31.7	31.5		1001.7	989.1		
29.7	29.2		879.1	849.7		
26.7	26.7		710.2	710.2		
22.9	22.2		522.1	490.6		
20.1	19.4		402.0	374.4		
17.7	16.7		311.5	277.2		
16.1	14.4		257.6	205.9		
14.0	13.7		194.6	186.3		
12.2	12.1		147.6	145.2		
11.3	10.7		126.6	113.4		
10.2	9.6		103.0	91.2		
6.9	6.7		46.9	44.2		
4.7	4.7		21.6	21.6		
4.0	4.1		15.6	16.4		
2.8	2.8		7.6	7.6		
0.7	0.7		0.4	0.4		
0.5	0.5		0.2	0.2		
0.5	0.5		0.2	0.2		



**Tabla 5-20:** Tabla análisis ANOVA EXP 5

CANT DATOS	N	98				
GRUPOS	k	2				
PROMEDIOS		20.69	20.0			
VARIANZA		179.26	170.16			
DESV ESTAN		13.39	13.04			
<b>TABLA VARIANZA ANOVA</b>						
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
					VALOR F	VALOR F CRÍTICO
	TRATAMIENTOS	1	11.80	11.80	0.07	6.91
	ERROR	96	16772.59	174.71		
	TOTAL	97	16784.38			
ACEPTAR HIPÓTESIS NULA						
H0	LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL					
HA	LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL					
H1	H2		EXP1	EXP2		
	0.5	0.5	0.2	0.2		
	13.0	8.1	167.7	64.8		
	21.2	15.5	447.3	238.7		
	23.2	21.2	535.9	447.3		
	30.7	26.7	939.4	710.2		
	35.7	32.9	1270.9	1079.1		
	42.9	40.1	1836.1	1604.0		
	48.7	46.8	2366.8	2185.6		
	46.7	46.2	2176.2	2129.8		
	44.1	43.8	1944.8	1918.4		
	41.6	41.5	1726.4	1718.1		
	39.8	39.7	1584.0	1576.1		
	38.1	38.0	1447.8	1440.2		
	36.6	36.4	1335.9	1325.0		
	35.1	34.9	1228.5	1214.5		
	33.2	33.0	1102.2	1089.0		
	31.4	31.2	982.8	970.3		
	30.6	29.8	936.4	888.0		
	29.9	28.5	891.0	809.4		
	28.9	27.2	832.3	737.1		
	27.9	25.9	775.6	668.2		
	25.6	24.4	655.4	595.4		
	23.4	23.0	545.2	526.7		
	22.1	21.8	488.4	473.1		
	20.9	20.6	434.7	422.3		
	19.4	19.3	374.4	372.5		
	17.9	18.1	318.6	325.8		
	17.0	17.1	287.3	292.4		
	16.1	16.2	257.6	260.8		
	15.0	15.0	225.0	225.0		
	14.0	13.9	194.6	191.8		
	13.0	12.9	169.0	166.4		
	12.1	12.0	145.2	142.8		
	11.5	11.4	131.1	130.0		
	10.9	10.9	117.7	117.7		
	10.4	10.2	108.2	104.0		
	10.0	9.6	99.0	91.2		
	8.8	8.6	77.4	74.0		
	7.7	7.7	58.5	58.5		
	7.5	7.3	55.5	53.3		
	7.3	7.0	52.6	48.3		
	6.4	6.9	41.0	47.6		
	5.6	6.9	30.8	46.9		
	5.8	6.3	33.1	39.1		
	6.0	5.7	35.4	31.9		
	5.8	5.6	33.6	30.8		
	5.7	5.5	31.9	29.7		
	5.2	5.0	26.5	25.0		
	4.7	4.6	21.6	20.7		

Tabla 5-21: Tabla análisis ANOVA EXP 6

CANT DATOS	N	68				
GRUPOS	k	2				
PROMEDIOS	21.34	20.5				
VARIANZA	322.60	315.99				
DESV ESTAN	17.96	17.78				
<b>TABLA VARIANZA ANOVA</b>						
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
					VALOR F	VALOR F CRÍTICO
TRATAMIENTOS		1	10.92	10.92	0.03	7.04
ERROR		66	21073.63	319.30		
TOTAL		67	21084.55			
ACEPTAR HIPÓTESIS NULA						
H0	LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL					
HA	LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL					
H1	H2		EXP1	EXP2		
1.1	1.1		1.1	1.1		
18.0	17.2		322.2	294.1		
27.2	25.7		737.1	657.9		
35.7	34.8		1270.9	1207.6		
43.2	42.7		1861.9	1819.0		
60.0	60.0		3594.0	3594.0		
60.0	60.0		3594.0	3594.0		
54.7	53.7		2986.6	2878.3		
40.2	39.7		1612.0	1572.1		
40.7	39.5		1652.4	1556.3		
39.7	37.7		1572.1	1417.5		
36.7	35.4		1343.2	1249.6		
34.7	32.7		1200.6	1066.0		
32.2	29.7		1033.6	879.1		
27.7	25.7		764.5	657.9		
24.4	23.0		592.9	526.7		
22.9	21.7		522.1	468.7		
19.0	18.2		359.1	329.4		
16.7	16.5		277.2	270.6		
13.7	13.6		186.3	183.6		
11.8	11.2		138.1	124.3		
10.7	10.6		113.4	111.3		
9.5	9.2		89.3	83.7		
9.4	8.2		87.4	66.4		
8.5	7.2		71.4	51.1		
6.7	5.7		44.2	31.9		
6.2	5.4		37.8	28.6		
5.6	5.1		30.8	25.5		
4.2	3.9		17.6	14.8		
3.7	2.7		13.3	7.0		
0.8	0.7		0.6	0.4		
0.7	0.7		0.4	0.4		
0.5	0.4		0.2	0.1		
0.4	0.4		0.1	0.1		

Tabla 5-22: Tabla análisis ANOVA EXP 7

CANT DATOS	N		82				
GRUPOS	k		2				
PROMEDIOS		24.92	23.7				
VARIANZA		172.02	159.48				
DESV ESTAN		13.12	12.63				
<b>TABLA VARIANZA ANOVA</b>					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99	
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO	
TRATAMIENTOS		1	30.67	30.67	0.19	6.87	
ERROR		80	13259.97	165.75			
TOTAL		81	13290.64				
							ACEPTAR HIPÓTESIS NULA
H0	LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL						
HA	LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL						
H1	H2		EXP1	EXP2			
4.6	4.6		20.7	20.7			
17.5	10.9		304.5	117.7			
23.0	18.5		526.7	340.4			
29.7	26.9		879.1	720.9			
35.9	32.7		1285.2	1066.0			
44.3	41.2		1958.1	1693.3			
52.7	48.5		2772.0	2347.4			
48.7	46.3		2366.8	2143.7			
44.7	44.2		1993.6	1949.2			
43.7	42.6		1905.3	1814.8			
42.7	41.1		1819.0	1685.1			
40.9	39.5		1668.7	1556.3			
39.1	37.9		1524.9	1432.6			
37.3	36.5		1391.3	1332.3			
35.6	35.2		1263.8	1235.5			
34.2	33.4		1169.6	1115.6			
32.9	31.7		1079.1	1001.7			
31.3	30.6		976.6	933.3			
29.7	29.5		879.1	867.3			
28.7	27.5		820.8	756.3			
27.7	25.6		764.5	652.8			
25.4	24.1		645.2	580.8			
23.2	22.7		535.9	513.0			
22.3	21.3		497.3	451.6			
21.5	19.9		460.1	394.0			
19.5	18.9		380.3	355.3			
17.6	17.9		308.0	318.6			
17.2	16.9		295.8	283.9			
16.9	15.9		283.9	251.2			
15.5	14.8		238.7	217.6			
14.1	13.7		197.4	186.3			
13.4	13.2		178.2	174.2			
12.7	12.8		160.0	162.6			
12.2	11.8		147.6	138.1			
11.7	10.8		135.7	115.6			
10.7	10.1		113.4	102.0			
9.7	9.5		93.1	89.3			
9.2	9.0		83.7	80.1			
8.7	8.5		74.8	71.4			
8.6	8.3		73.1	68.9			
8.5	8.2		71.4	66.4			

Tabla 5-23: Tabla análisis ANOVA EXP 8

CANT DATOS	N	84				
GRUPOS	k	2				
PROMEDIOS		16.77	16.1			
VARIANZA		121.05	115.29			
DESV ESTAN		11.00	10.74			
<b>TABLA VARIANZA ANOVA</b>					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
TRATAMIENTOS		1	8.42	8.42	0.07	6.95
ERROR		82	9690.04	118.17		
TOTAL		83	9698.46			
						ACEPTAR HIPÓTESIS NULA
HO	LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL					
HA	LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL					
H1	H2		EXP1	EXP2		
	0.9	0.9	0.7	0.7		
	4.9	2.1	23.5	4.2		
	6.3	5.7	39.1	31.9		
	10.0	9.4	99.0	87.4		
	13.4	13.1	178.2	170.3		
	16.7	15.9	277.2	251.2		
	18.8	18.5	351.6	340.4		
	21.4	20.7	455.8	426.4		
	23.1	22.4	531.3	499.5		
	25.8	24.3	663.1	588.1		
	26.8	25.0	715.6	622.5		
	28.0	26.4	781.2	694.3		
	28.0	26.8	781.2	715.6		
	28.2	27.9	792.4	775.6		
	29.0	28.2	838.1	792.4		
	29.1	28.7	843.9	820.8		
	29.8	29.7	885.1	879.1		
	30.7	29.9	939.4	891.0		
	31.1	30.7	964.1	939.4		
	32.9	31.5	1079.1	989.1		
	30.7	29.2	939.4	849.7		
	29.7	28.1	879.1	786.8		
	29.7	28.1	879.1	786.8		
	25.6	25.5	652.8	647.7		
	23.1	22.8	531.3	517.6		
	19.7	18.8	386.1	351.6		
	18.0	17.8	322.2	315.1		
	16.2	15.6	260.8	241.8		
	13.5	13.5	180.9	180.9		
	11.7	11.5	135.7	131.1		
	9.9	9.7	97.0	93.1		
	9.0	8.5	80.1	71.4		
	7.2	6.9	51.1	46.9		
	6.7	6.2	44.2	37.8		
	6.4	6.2	40.3	37.8		
	5.2	4.6	26.5	20.7		
	3.9	3.8	14.8	14.1		
	2.8	2.5	7.6	6.0		
	0.9	0.9	0.7	0.7		
	0.7	0.8	0.4	0.6		
	0.6	0.7	0.3	0.4		
	0.2	0.2	0.0	0.0		

**Tabla 5-24: Tabla análisis ANOVA EXP 9**

CANT DATOS	N	82				
GRUPOS	k	2				
PROMEDIOS		26.87	26.2			
VARIANZA		404.54	406.59			
DESV ESTAN		20.11	20.16			
<b>TABLA VARIANZA ANOVA</b>					ALFA =0.01	1-ALFA=0.99
		Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO
TRATAMIENTOS		1	9.29	9.29	0.02	6.95
ERROR		80	32444.84	405.56		
TOTAL		81	32454.13			
						ACEPTAR HIPÓTESIS NULA
H0	LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL					
HA	LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL					
H1	H2		EXP1	EXP2		
1.0	0.9		0.9	0.7		
10.9	8.2		117.7	66.4		
19.0	15.9		359.1	251.2		
25.4	23.8		642.6	564.1		
32.3	32.3		1040.1	1040.1		
48.2	45.7		2318.4	2083.9		
60.2	60.2		3618.0	3618.0		
60.2	60.2		3618.0	3618.0		
60.2	60.2		3618.0	3618.0		
60.2	60.2		3618.0	3618.0		
60.2	60.2		3618.0	3618.0		
60.2	60.2		3618.0	3618.0		
52.7	50.7		2772.0	2565.4		
44.3	44.2		1958.1	1949.2		
43.7	43.0		1905.3	1844.7		
41.9	40.8		1751.4	1660.6		
40.8	39.6		1660.6	1564.2		
39.5	39.5		1556.3	1556.3		
38.0	37.8		1440.2	1425.1		
36.0	35.5		1292.4	1256.7		
31.7	31.5		1001.7	989.1		
29.9	28.6		891.0	815.1		
27.7	26.2		764.5	683.8		
25.3	23.4		637.6	545.2		
21.4	20.9		455.8	434.7		
18.9	18.7		355.3	347.8		
16.9	16.2		283.9	260.8		
14.6	13.6		211.7	183.6		
12.1	11.7		145.2	135.7		
11.1	10.9		122.1	117.7		
9.5	9.0		89.3	80.1		
8.5	8.5		71.4	71.4		
7.7	7.1		58.5	49.7		
6.9	6.5		46.9	41.6		
6.2	6.2		37.8	37.8		
5.9	5.7		34.2	31.9		
5.5	4.9		29.7	23.5		
5.0	4.5		24.5	19.8		
2.8	1.8		7.6	3.1		
0.7	0.7		0.4	0.4		
0.7	0.6		0.4	0.3		

Tabla 5-25: Tabla análisis ANOVA EXP 10

CANT DATOS	N	122				
GRUPOS	k	2				
PROMEDIOS		32.49	32.0			
VARIANZA		384.70	389.14			
DESV ESTAN		19.61	19.73			
TABLA VARIANZA ANOVA				ALFA =0.01	1-ALFA=0.99	
	Grados libertad	Suma Cuadrados	Cuadrados Medios	VALOR F	VALOR F CRÍTICO	
TRATAMIENTOS	1	8.60	8.60	0.02	6.87	
ERROR	120	46430.72	386.92			
TOTAL	121	46439.33				
ACEPTAR HIPÓTESIS NULA						
H0	LA ESTRUCTURA NO AFECTA EL NIVEL					
HA	LA ESTRUCTURA SI AFECTA EL NIVEL					
H1	H2	EXP1	EXP2			
0.7	0.7	0.4	0.4			
18.7	13.3	347.8	175.6			
28.2	26.5	792.4	699.6			
38.7	37.9	1493.8	1432.6			
50.7	48.0	2565.4	2299.2			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
44.6	44.0	1984.7	1931.6			
42.7	42.7	1819.0	1819.0			
42.3	41.7	1785.1	1734.7			
39.9	39.7	1588.0	1572.1			
38.7	38.2	1493.8	1455.4			
36.2	34.9	1306.8	1214.5			
32.1	31.9	1027.2	1014.4			
29.9	29.3	891.0	855.6			
26.0	26.0	673.4	673.4			
24.2	23.9	583.2	568.8			
24.5	24.5	597.8	597.8			
24.5	24.5	597.8	597.8			
28.8	26.6	826.6	704.9			
34.2	33.7	1166.2	1132.3			
39.9	39.7	1588.0	1572.1			
45.7	43.9	2083.9	1922.8			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
60.0	60.0	3594.0	3594.0			
58.7	57.9	3439.8	3346.6			
47.3	47.3	2232.6	2232.6			
44.8	44.7	2002.6	1993.6			
43.1	42.5	1853.3	1802.0			
40.9	39.7	1668.7	1572.1			
38.7	38.2	1493.8	1455.4			
34.3	34.3	1173.1	1173.1			
31.8	30.7	1008.1	939.4			
29.7	29.5	879.1	867.3			
27.5	27.5	753.5	753.5			
25.3	24.3	637.6	588.1			
22.0	21.2	481.8	447.3			
19.2	18.1	366.7	325.8			
16.6	16.0	273.9	254.4			
14.4	13.8	205.9	189.1			
13.4	13.4	178.2	178.2			
11.0	10.5	119.9	109.2			
9.7	9.7	93.1	93.1			
7.9	7.3	61.6	52.6			
7.1	6.9	49.7	46.9			
6.9	6.7	46.9	44.2			
6.7	5.9	44.2	34.2			
6.2	5.3	37.8	27.6			
5.3	4.5	27.6	19.8			
1.9	1.8	3.4	3.1			
1.7	1.7	2.7	2.7			
1.0	0.9	0.9	0.7			
0.7	0.7	0.4	0.4			

## **G. Anexo: Plano de instalación del tanque de detención.**





## Bibliografía

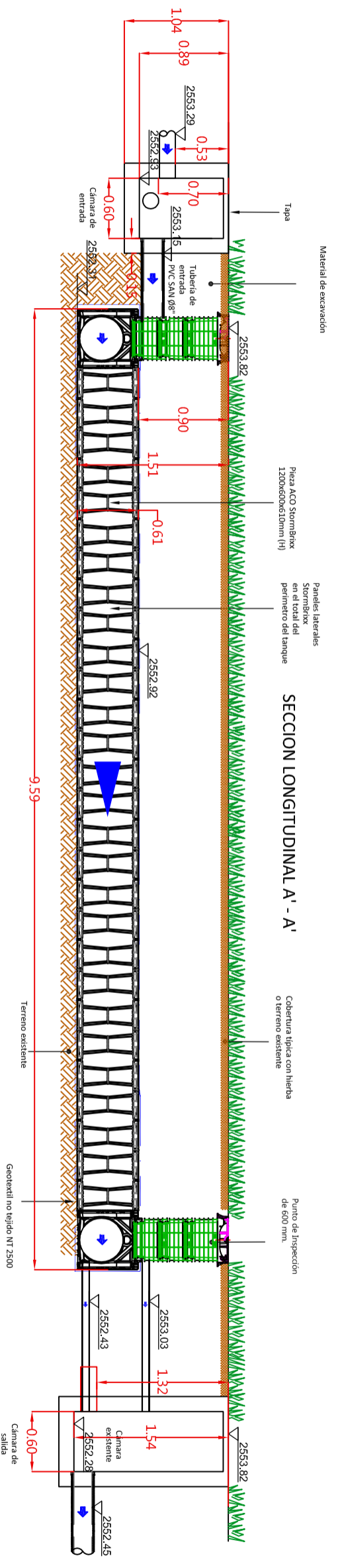
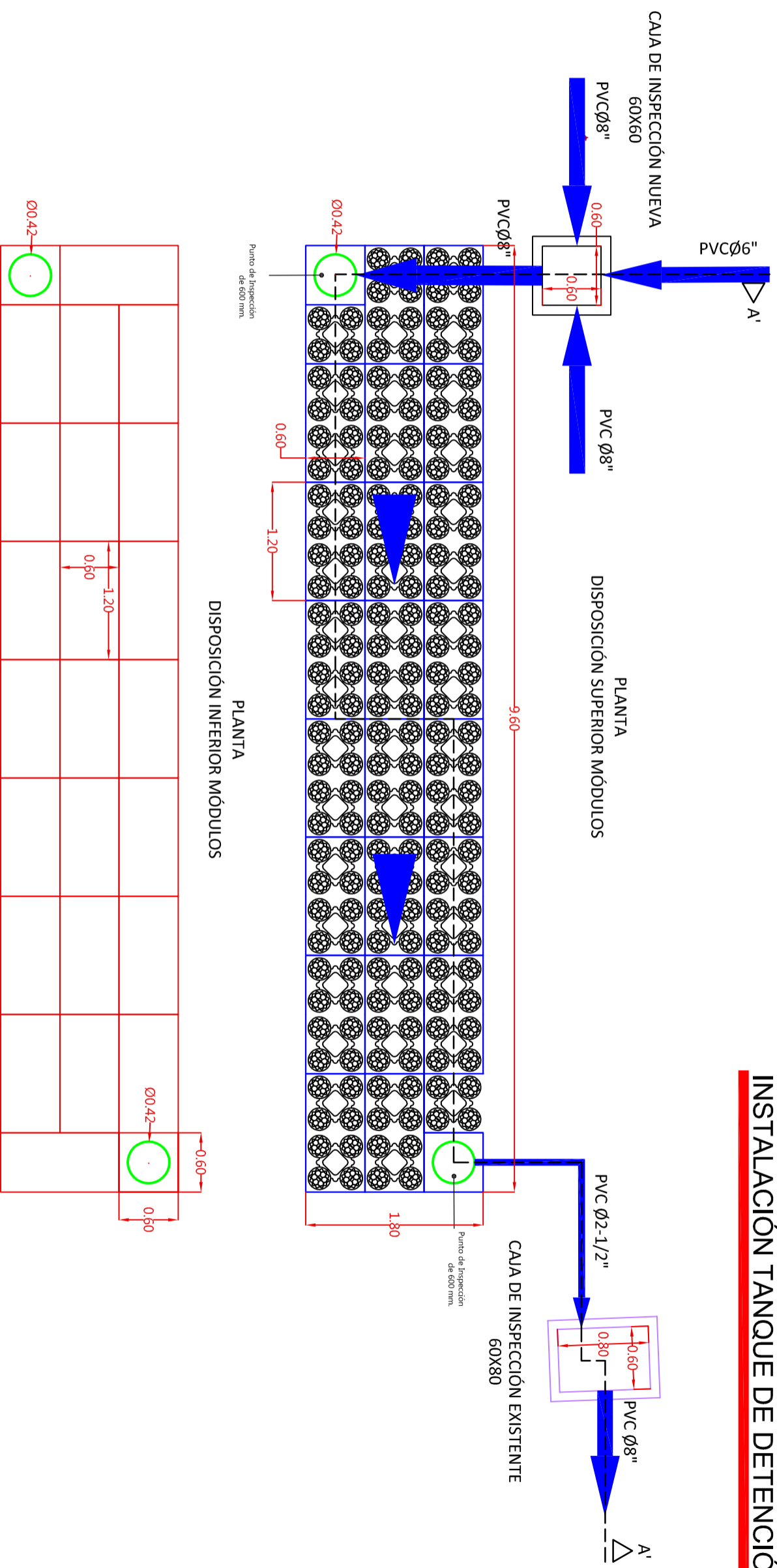
- Abellán, A. (12 de Enero de 2016). *SuD Sostenible*. Recuperado el 18 de Febrero de 2018, de <http://sudsostenible.com/tipologia-de-las-tecnicas/medidas-estructurales/>
- Abellán, A. (20 de Junio de 2017). *iAgua Magazine*. Recuperado el 22 de Abril de 2018, de <https://www.iagua.es/blogs/ana-abellan/cambio-climatico-y-suds>
- ACO DRAIN. (10 de Enero de 2015). Stormbrixx Stormtank SUDS. Rendsburg, Alemania.
- Álvarez, J. A., & Celedón, E. A. (2012). *Evaluación de las capacidades hidráulicas y de retención de contaminantes de un modelo de trinchera de retención construida con una canastilla en resinas de Polipropileno (Aquacell) acoplada con capa filtrante utilizada como componente del drenaje urbano*. Bogotá : Pontificia Universidad Javeriana.
- AUTODESK . (10 de Abril de 2017). *AUTOCAD CIVIL 3D*. Recuperado el 21 de Enero de 2018, de Autodesk Storm and Sanitary Analysis: <https://knowledge.autodesk.com/es/support/autocad-civil-3d/troubleshooting/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ESP/Installation-Civil3D/files/GUID-A4080DA5-3C5C-47E3-9396-F42FD24DBF2C-htm.html>
- Autodesk. (2014). *Autodesk Storm and Sanitary Analysis* . San Rafael CA: AutoCAD Civil 3D.
- AUTODESK. (2022). *Storm and Sanitary Analysis User's Guide*. San Rafael, California: AUTODESK.
- BENTLEY. (2002). *PONDPACK Users's Guide*. Waterbury, EEUU: Haestad Methods.
- BENTLEY. (10 de Febreo de 2017). *PondPack*. Recuperado el 21 de Enero de 2018, de <https://www.bentley.com/es/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/pondpack>
- BENTLEY. (10 de Abril de 2017). *SewerGEMS*. Recuperado el 21 de Enero de 2018, de <https://www.bentley.com/es/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/sewergems>
- Boyd, M. J. (1981). Preliminary design procedures for detention basins. *Water Resources Publications*, 45-49.
- Building Research Establishment . (2016). *Soakaway design 365*. Hertfordshire: BRE.
- Butler, D., & Davies, J. W. (2011). *Urban Drainage*. London: Spon Press.
- Canavos, G. C. (1998). *PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA Aplicaciones y métodos*. Virginia: McGraw Hill.
- Casavonne, J. L. (27 de Abril de 2012). *RPP Noticias*. Recuperado el 10 de Febrero de 2018, de Lambayeque: Sobrecarga de alcantarillado, problema latente: <http://rpp.pe/lima/actualidad/lambayeque-sobrecarga-de-alcantarillado-problema-latente-noticia-476398>
- Chow, V. T. (1959). *Hidráulica de canales abiertos*. Illinois: McGRAW HILL.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1949). *Hidrología Aplicada*. Illinois: McGRAW-HILL.
- CIRIA. (2007). *C 697 The SuDS Manual*. Londres, UK: CIRIA.
- CIRIA. (2008). *C 680 Structural Design of Modular Geocellular Drainage Tanks*. Londres, UK: CIRIA.
- CIRIA. (2015). *C 753 The SuDS Manual*. Londres, UK: CIRIA.
- CIRIA. (2016). *C 737 Structural and Geotechnical Design of Modular Geocellular Drainage Systems*. Londres, UK: CIRIA.
- CONAGUA. (2009). *Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII*. México, D. F.: Aguas del Valle de México. Edición2009.
- Cuéllar, D. (1995). El desarrollo sostenible. *Agronomía Colombiana*. *Agronomía Colombiana*, Vol. 12, núm. 2 (1995); 192-197.
- Department of Environment, Water and Natural Resources . (2015). *Water sensitive urban design* . Adelaide, Australia: Government of South Australia.

- Duarte, C. P. (2014). *Estado del Arte de la Normalización de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) para la ciudad de Bogotá*. Bogotá: CIACUA - Universidad de Los Andes.
- Dupuis, V., Proust, S., Berni, C., & Paquier, A. (2018). Combined effects of bed friction and emergent cylinder drag in open channel flow. *Environmental Fluid Mechanics, Springer Verlag, 2016, 16*, pp.1173-1193.
- EAAB. (06 de Diciembre de 2020). *NS-085 CRITERIOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO*. Bogotá: Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.
- EMSERCHÍA. (15 de Enero de 2010). *Empresa de Servicios Públicos de Chía*. Recuperado el 24 de Febrero de 2018, de <http://emserchia.gov.co/historia.html>
- Federal Highway Administration. (2009). *URBAN DRAINAGE DESIGN MANUAL*. Fort Collins, Colorado: FHWA.
- Fernández, P. (2000). *Mecánica de fluidos*. Cantabria, España: Universidad de Cantabria.
- Figuroa, C. A. (2016). *Caracterización del campo de precipitación sobre la microcuenca urbana del campus Universidad Nacional de Colombia - sede Bogotá*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., . . . Dagenais, D. (2014). *SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage*. Londres: Urban Water Journal.
- García, J. T. (2011). *Estudio de las mejores prácticas para la gestión de las aguas pluviales y su carga contaminante en zonas urbanas consolidadas y costeras del mar menor*. Cartagena, España: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Geiger, W. F. (2000). Sustainable Urban Drainage Concept for Beijing . *Global Solutions for Urban Drainage, 3-4*.
- Giraldo, E. (2000). *¿Combinar o separar? Una discusión con un siglo de antigüedad y de gran actualidad para los bogotanos*. Bogotá: Universidad de Los Andes.
- GOOGLE EARTH. (09 de Febrero de 2015). GOOGLE IMAGES. Bogotá, Cundinamarca, Bogotá. Obtenido de GOOGLE EARTH COLOMBIA.
- Gravater, L. (15 de Febrero de 2010). *Warped Frost*. Recuperado el 23 de Enero de 2018, de <https://warpedfrost.net/artwork/japan-photography/atop-acros-fukuoka/>
- Guo, J. C., & Urbonas, B. (1996). MAXIMIZED DETENTION VOLUME DETERMINED BY RUNOFF CAPTURE RATIO. *JOURNAL OF WATER RESOURCES PLANNING AND MANAGEMENT ASCE, 34*.
- Haestad Methods Water Solutions. (2007). *Stormwater Conveyance Modeling and Design*. Exton, PA: Bentley Institute Press.
- Hernández, D. M. (2011). *Criterios para una planeación estratégica de SUDS en Bogotá*. Bogotá: Universidad de Los Andes.
- Hydros Chía. (2011). *Disponibilidad de Servicios Proyecto La Colina, Vereda La Balsa, Sector Los Caobos*. Chía, Cundinamarca: Emserchía.
- IDEAM. (2012). *Análisis de la alteración de la precipitación y otras variables meteorológicas, bajo fenómenos de variabilidad climática*. Bogotá: IDEAM.
- Ingenieros Consultores de Proyectos Civiles G&V. (2017). *ESTUDIO DE SUELOS Y RECOMENDACIONES DE CIMENTACIÓN PARA EL PROYECTO OFICINAS DE EXTENSIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - SEDE BOGOTÁ*. Bogotá: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- INGETEC. (2015). *CONSULTORÍA PARA LA ACTUALIZACIÓN DEL PLAN MAESTRO DE ABASTECIMIENTO Y LA ELABORACIÓN Y FORMULACIÓN DEL PLAN MAESTRO DE ALCANTARILLADO PARA BOGOTÁ Y SUS MUNICIPIOS VECINOS*. Bogotá: EAAB.
- Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de Drenaje para Carreteras*. Bogotá: Ministerio de Transporte - República de Colombia .
- Kuehl, R. O. (2000). *Diseño de experimentos. Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. Tucson, Arizona: University of Arizona.
- León, E. A. (2014). *Evaluación de una cubierta verde como sistema de drenaje urbano*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Martínez, C. O. (2015). *SISTEMAS URBANOS DE DRENAJE SOSTENIBLE SUDS: INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA URBANA PARA EL CONTROL Y APROVECHAMIENTO DEL AGUA DE LLUVIA*. Ciudad de México: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

- Mays, L. W., & Tung, Y.-K. (2002). *HYDROSYSTEMS ENGINEERING AND MANAGEMENT*. New York: Water Resources Pubns.
- McDonald, R., Weber, K., Padowski, J., Flörke, M., Schneider, C., Green, P., . . . Montgomery, M. (2014). Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global Environmental Change*, Vol. 27, pp. 96-105.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2016). *Sistemas de Recolección y Evacuación de Aguas Residuales Domésticas y Aguas Lluvias*. Bogotá: Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2021). *Reolución 0799*. Bogotá: República de Colombia.
- Nakanishi, M. (2002). *An Evaluation Method for Stormwater Infiltration*. Kumano Japan: Global Solutions for Urban Drainage.
- New Jersey Department of Environmental Protection. (2004). *New Jersey Stormwater Best Management Practices Manual*. New Jersey: Division of Watershed Management.
- Poleto, C., & Tass, R. (2004). Sustainable Urban Drainage Systems. *Urban drainage 2002: global solutions for urban drainage*, 57.
- Roesner, L. A., Urbonas, B., & Sonnen, M. A. (1989). *Current practices in design of urban runoff quality facilities*. New York, N. Y.: ASCE.
- Santa, A. L., & Quintero, J. A. (2010). *Desempeño hidráulico y ambiental de un modelo de trinchera de retención utilizado como componente del drenaje urbano*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Schladweiler, J. C. (23 de Enero de 2018). *Sewer History*. Recuperado el 17 de Abril de 2018, de <http://www.sewerhistory.org/photosgraphics/mesopotamia/>
- Schlüter, W., Spitzer, A., & Jefferies, C. (2002). Performance of Three Sustainable Urban Drainage Systems in East Scotland. *Global Solutions for Urban Drainage*, 1.
- SCIENTEC. (24 de Septiembre de 2017). *Software Científico y Técnico*. Recuperado el 21 de Enero de 2018, de xpdrainage: <http://scientec.com.mx/xpdrainage/>
- Secretaria Distrial de Ambiente. (2011). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Silva, A., Nilo, N., Martin, S., & Luciano, V. (2009). Infiltration and detention systems for stormwater control in Belo Horizonte: assessment of demo performance and perspective for use. *Switch Scientific Meeting*, (pág. 10). Belo Horizonte.
- Susdrain. (12 de Marzo de 2012). *susdrain*. Recuperado el 25 de Febrero de 2018, de [http://www.susdrain.org/case-studies/case\\_studies/dunfermline\\_eastern\\_expansion\\_residential\\_suds\\_scheme\\_dunfermline.html](http://www.susdrain.org/case-studies/case_studies/dunfermline_eastern_expansion_residential_suds_scheme_dunfermline.html)
- SUSDRAIN. (03 de February de 2012). *SUSDRAIN*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, de DELIVERING SuDS: [http://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/retention\\_and\\_detention/Retention-detention.html#\\_](http://www.susdrain.org/delivering-suds/using-suds/suds-components/retention_and_detention/Retention-detention.html#_)
- The Guardian. (6 de Mayo de 2004). *The Guardian International Edition*. Recuperado el 14 de Enero de 2018, de The sciense behind the news: <https://www.theguardian.com/science/2004/may/06/thisweekssciencequestions>
- US EPA. (07 de Agosto de 2017). *United States Environmental Protection Agency*. Recuperado el 21 de Enero de 2018, de Storm Water Management Model (SWMM): <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#description>
- USDA. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Washington, EEUU: U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE.
- Vanegas, A. F., & Flórez, S. H. (2012). *TRINCHERAS DE RETENCIÓN / INFILTRACIÓN UTILIZADAS COMO SISTEMAS ALTERNATIVOS AL DRENAJE URBANO*. 2012: PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.
- Villarreal, E. L. (2005). *Beneficial Use of Stormwater*. Lund, Suecia: Department of Water Resources Engineering, Lund Institute of Technology.
- Waldhus. (05 de Diciembre de 2012). *Waldhus*. Recuperado el 03 de Enero de 2018, de ¿Qué es un sistema de drenaje francés?: <http://www.waldhus.com/Y2LZBL3M/>
- Watkins, D. (1991). *The Hydraulic Design and Performance of Soakaway*. Wallingford: HR Wallingford.
- White, F. M. (1999). *Fluid Mechanics*. Pennsylvania: McGraw-Hill.

- Winer-Skonovd. (2010). *A Solution to Requiring LID in Stockton Urbanized Area: A Volume Runoff Reduction Approach*. Stockton CA: ASCE.
- Zhou, Q. (2014). *A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts*. Basel, Switzerland: MDPI.

# INSTALACIÓN TANQUE DE DETENCIÓN. UN-LEH



Profundidades mínimas de recubrimiento (1) sobre el sistema ACO StormBrixx	
Aplicación	Profundidad mínima de recubrimiento (m) (4)
Áreas sin tráfico p.e. parques	0,5 (2)
Parqueaderos, vehículos de hasta 2500 kg	0,6
Parqueaderos, vehículos ocasionalmente con peso superior a 2500kg (3)	0,75
Tráfico ocasional con peso superior a 44000kg	Consultar a ACO

- (1) Se asume una distribución de carga de 27 grados a través del material de relleno y la superficie superior de asfalto o losa de concreto
- (2) Cobertura mínima para evitar daños accidentales por trabajos de jardinería
- (4) Confirmar coberturas mínimas de congelamiento de acuerdo a ubicación geográfica
- El propósito de este dibujo es solamente como guía. Se deberá leer en conjunto con los planos de ACO y está sujeto a la guía de Tecnologías ACO, responsabilidades y garantías de los fabricantes. Para mayor información por favor contacte nuestro departamento técnico

Escala: **A3 - 1:50**

Proyección: ISO-E

Dibujos:

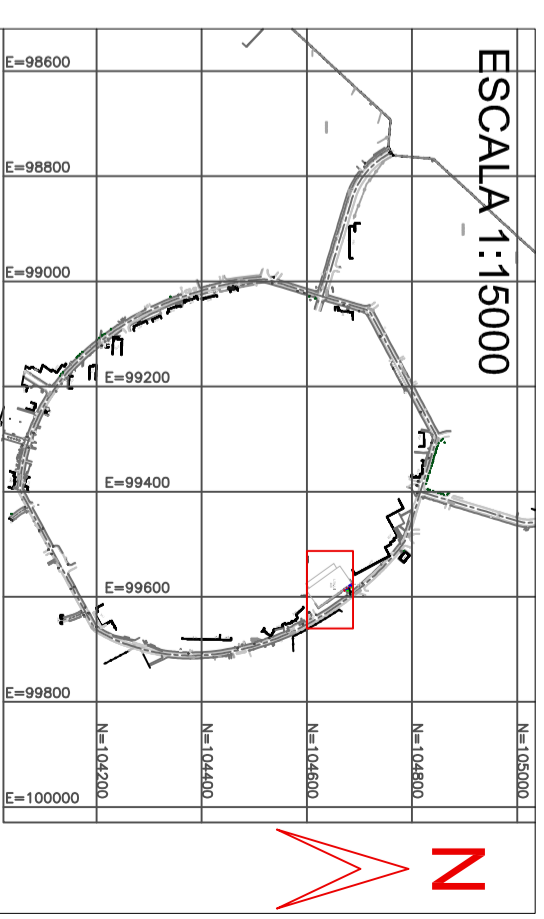
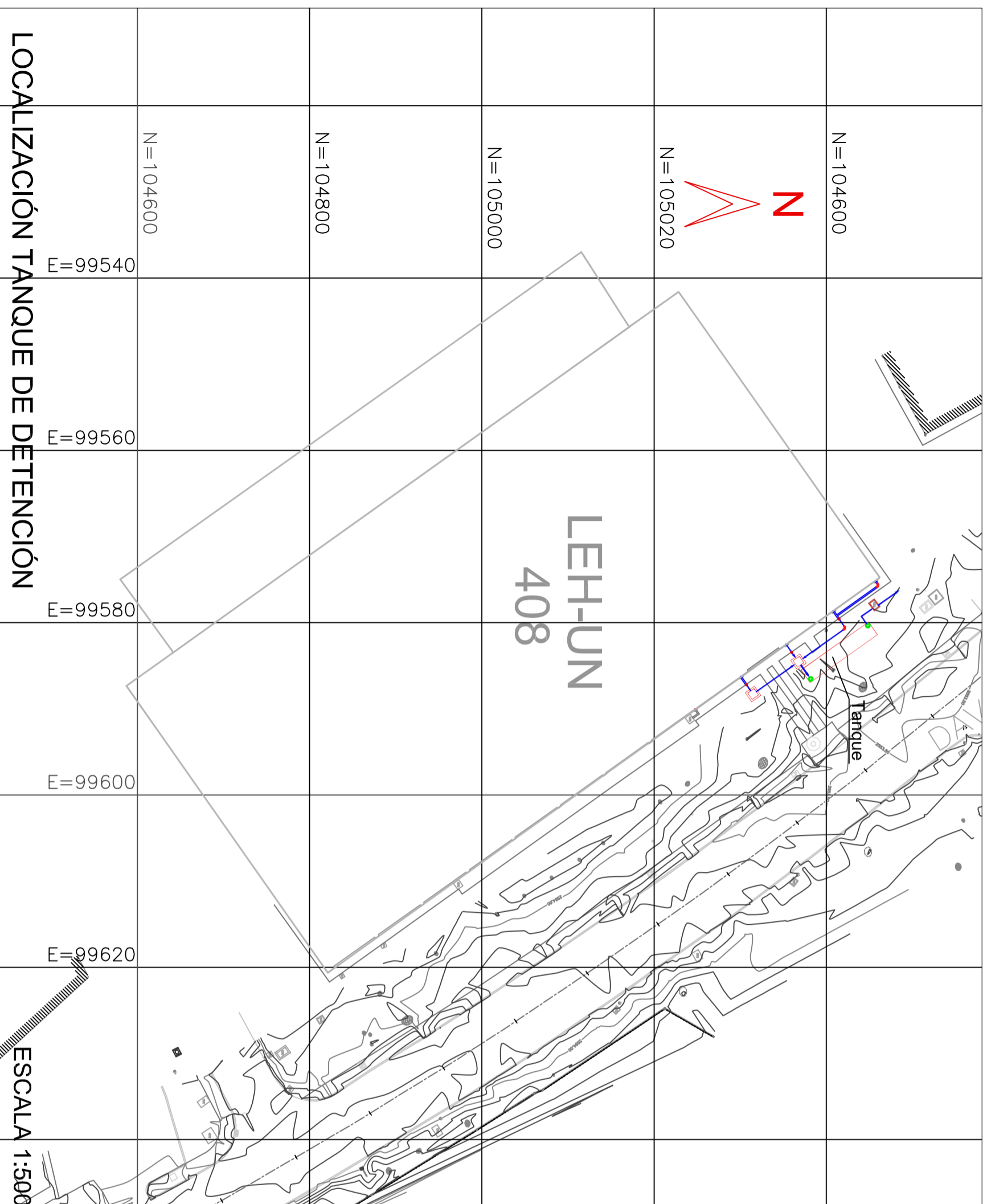
Date	Name	Checked by	Dibujo No.
06.12.17	SCL	JaimeParra	E1-E01-1201-3
24.09.18	UNAL	JaimeParra	

Título: **ACO STORMBRIXX UNAL**

Sección **A**

Cualquier reproducción parcial o total sin el respectivo permiso de ACO Tecnologías está prohibido.

**LOCALIZACIÓN DE TANQUE DE DETENCIÓN. UN-LEH**



**LOCALIZACIÓN TANQUE DE DETENCIÓN**

Profundidades mínimas de recubrimiento (1) sobre el sistema ACO StormBrixx	
Aplicación	Profundidad mínima de recubrimiento (m) (4)
Parqueaderos, vehículos de hasta 2500 kg	0,6
Parqueaderos, vehículos ocasionalmente con peso superior a 2500kg (3)	0,75
Tráfico ocasional con peso superior a 44000kg GVV (HA loading)	Please consult with ACO

(1) Se asume una distribución de carga de 27 grados a través del material de relleno y la superficie superior de asfalto o losa de concreto  
 (2) Cobertura mínima para evitar daños accidentales por trabajos de jardinería

(4) Confirmar coberturas mínimas de congelamiento de acuerdo a ubicación geográfica

El propósito de este dibujo es solamente como guía. Se deberá leer en conjunto con los planos de ACO y está sujeto a la guía de Tecnologías ACO, responsabilidades y garantías de los fabricantes. Para mayor información por favor contacte nuestro departamento técnico al 3046301592 o al email [jaime.parrara@aco.com](mailto:jaime.parrara@aco.com)

Escala:

**A3 - 1:50**

Created	Date	Name	Checked by
Actualizado	06.12.17	SCL	JaimeParrara
	24.09.18	UNAL	JaimeParrara

Proyección: ISO-E

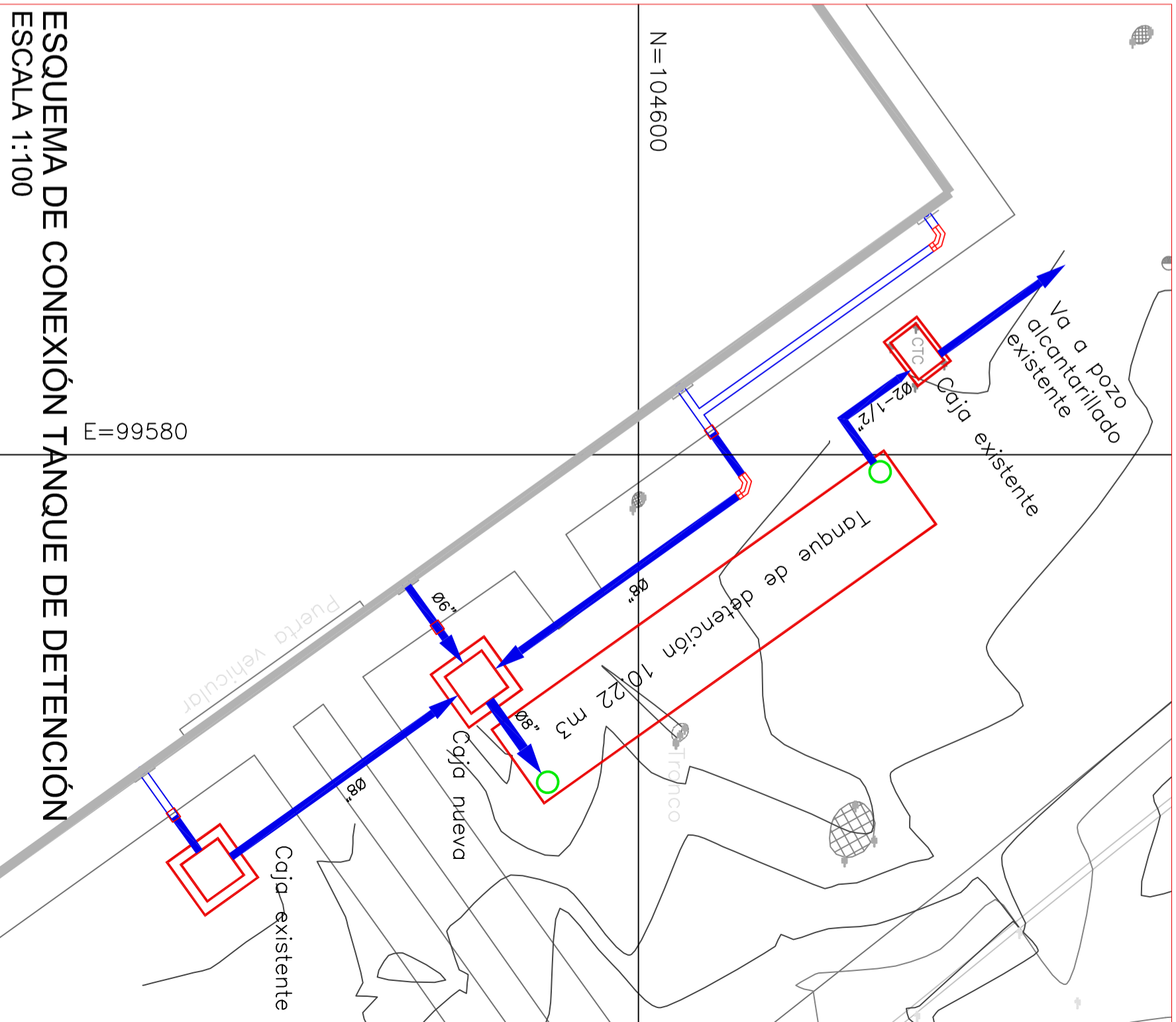
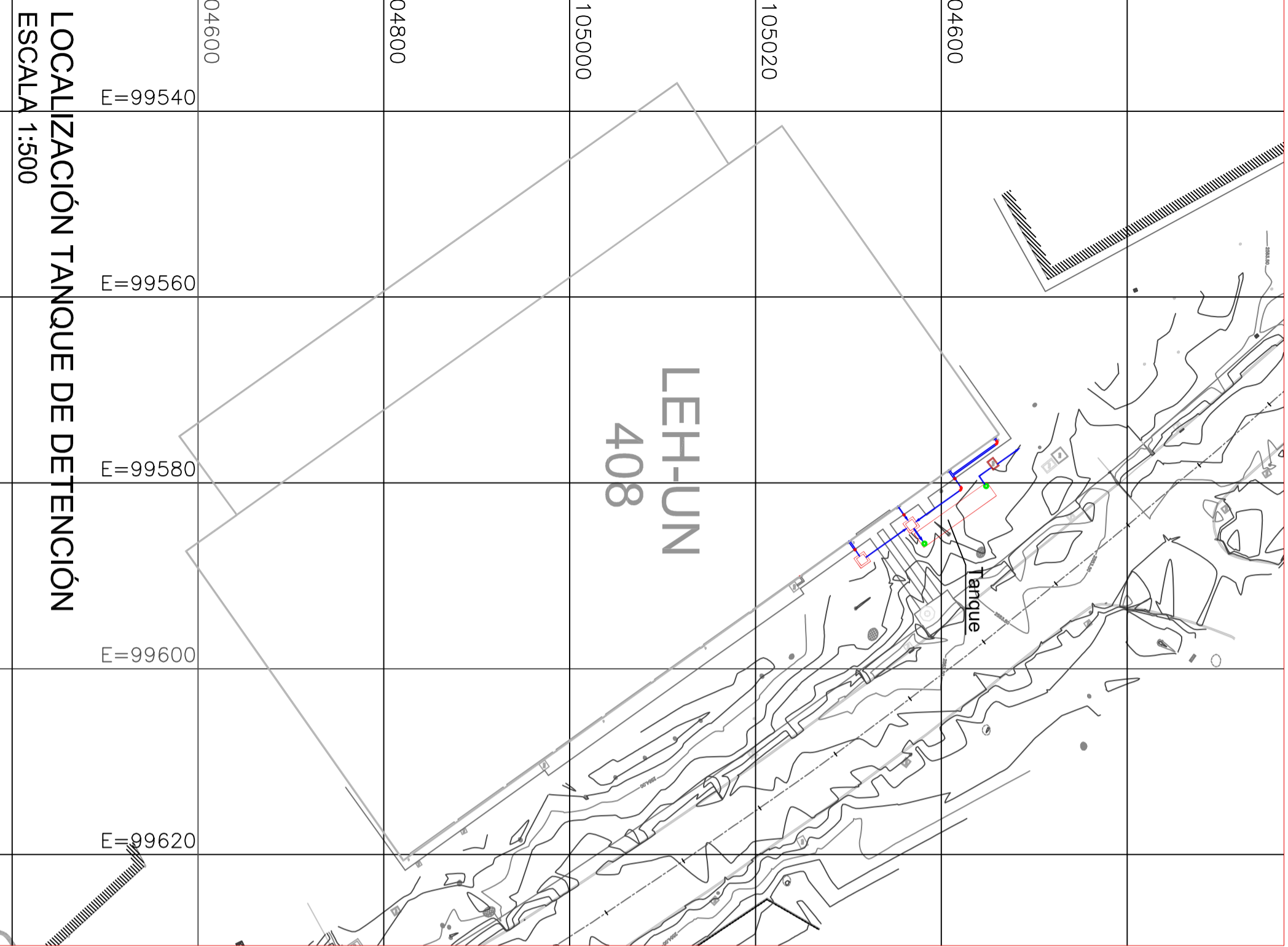
Unidades: mm

Cualquier reproducción parcial o total sin el respectivo permiso de ACO Tecnologías está prohibido.

Dibujo No. **E1-E01-1201-3**

Título: **ACO STORMBRIXX LOCALIZACIÓN UNAL**

Sección **A**



ESQUEMA DE CONEXIÓN TANQUE DE DETENCIÓN  
 ESCALA 1:100

Proyección: ISO-E  
 Unidades: mm

ACO  
 Cualquier reproducción parcial o total sin el respectivo permiso de ACO Technologies está prohibido.

Date	Name	Checked by	Dibujo No.	Sección
06.12.17	SCL	JaimeParra	E1-E01-1201-3	A
24.09.18	UNAL	JaimeParra		

Titulo: ACO STORMBRIXX LOCALIZACIÓN UNAL

LOCALIZACIÓN TANQUE DE DETENCIÓN  
 ESCALA 1:500