

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL EN MODELO FÍSICO DE UNA  
ESTRUCTURA SEPARADORA DE CAUDALES CON  
UMBRAL TRANSVERSAL, ORIFICIO LATERAL Y  
RÉGIMEN DE APROXIMACIÓN SUPERCRÍTICO, CASO DE  
ESTUDIO “QUEBRADA CAUPICHO”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
MENCIÓN HIDRÁULICA**

**CAROLINA ELIZABETH LUCERO MÉNDEZ**  
carolinalucero01@hotmail.com

**JORGE ANDRES SANTAMARÍA CHAMORRO**  
jorge.santamaria.ch@gmail.com

**DIRECTOR: ING. MSc. PATRICIO RUBEN ORTEGA LARA**  
patricio.ortega@epn.edu.ec

**CODIRECTORA: ING. MSc. XIMENA DEL ROCIO HIDALGO BUSTAMANTE**  
ximena.hidalgo@epn.edu.ec

**Quito, enero 2018**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Carolina Lucero y Jorge Santamaría, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa vigente.

---

**CAROLINA ELIZABETH  
LUCERO MÉNDEZ**

---

**JORGE ANDRÉS  
SANTAMARÍA CHAMORRO**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Carolina Elizabeth Lucero Méndez y Jorge Andrés Santamaría Chamorro, bajo nuestra supervisión.

---

**ING.PATRICIO ORTEGA L. MSc**  
DIRECTOR DEL PROYECTO

---

**ING.XIMENA HIDALGO B. MSc**  
CODIRECTORA DEL PROYECTO

## AGRADECIMIENTOS

A Myriam y Vicente, su amor el inicio, su esfuerzo y ejemplo el sostén.

A Catalina y David, mis confidentes.

A Isabella, nos llenas de ternura y alegría.

Al Ing. Patricio Ortega y a la Ing. Ximena Hidalgo, por las enseñanzas y oportunidades, la confianza y el constante apoyo. Mi horizonte es más amplio ahora. Muchas Gracias.

A Jorge, hombro a hombro fue posible cada logro. Gracias por tu amistad sincera.

A todos quienes conforman el CIERHI, sus ideas, su guía y trabajo fueron fundamentales en el desarrollo de este proyecto.

La magia de la vida te permite encontrarte con personas maravillosas en el camino que aportaron en su momento, o continúan haciéndolo, de forma diversa. Gracias a todas aquellas por gratos momentos, buenos consejos y valiosas lecciones

## AGRADECIMIENTOS

A Dios; por siempre guiar mi camino

A mi familia; Lupe, Carlos y Esteban; por todo el amor, paciencia y apoyo en la consecución de este objetivo. Gracias por hacer de nuestra casa, un hogar en el cual pude crecer, equivocarme desarrollarme y aprender.

A Pame; por su apoyo y cariño constante durante toda la carrera, *eres mi camino más corto.*

A mis amigos; cómplices y confidentes de anécdotas inigualables.

A Carolina; compañera y amiga, por su gran constancia, y perseverancia en el desarrollo de esta investigación.

Un agradecimiento especial para los ingenieros y maestros Patricio Ortega, Ximena Hidalgo, Pablo Vera, Edwin Casa por compartir sus enseñanzas académicas, profesionales y personales.

## DEDICATORIA

A ti Madre.

*Carolina Elizabeth*

## DEDICATORIA

*“Cuanto control y cuanto amor tiene que haber en una casa, mucho control y mucho amor para enfrentar a la desgracia”*

*Rubén Blades.*

A mi familia, que ha sido el pilar fundamental para la culminación de este objetivo.

*Jorge Andrés*

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	i
CERTIFICACIÓN .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
DEDICATORIA.....	v
DEDICATORIA.....	vi
INDICE DE FIGURAS .....	xi
INDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	xiii
INDICE DE GRÁFICOS .....	xv
INDICE DE TABLAS .....	xvi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xix
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xx
RESUMEN .....	xxiii
ABSTRACT .....	xxiv
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Antecedentes .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Alcantarillado de Quito y los derechos del agua .....	1
1.1.2 Generalidades de la modelación hidráulica .....	4
<b>1.2 Objetivos .....</b>	<b>5</b>
1.2.1 Objetivo General.....	5
1.2.2 Objetivos Específicos .....	5
<b>1.3 Alcance .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4 Justificación.....</b>	<b>7</b>



1.4.1	Justificación teórica .....	7
1.4.2	Justificación metodológica.....	8
1.4.3	Justificación práctica.....	8
2	MARCO TEÓRICO .....	9
2.1	Marco teórico .....	9
2.1.1	Descripción del proyecto “Quebrada Caupicho” .....	9
2.1.2	Separador de Caudales PE36A.....	12
2.1.3	Caudales de separación .....	14
2.1.4	Modelación Física.....	17
2.1.5	Flujo supercrítico y ciudades andinas.....	19
2.1.6	Análisis dimensional .....	21
2.1.7	Teoría de semejanza mecánica.....	33
2.1.8	Similitud Dinámica Restringida .....	37
3	MODELO FÍSICO CON DISEÑO ORIGINAL: CONSTRUCCIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN.....	41
3.1	Introducción.....	41
3.2	Descripción del diseño original del Separador de caudales.....	42
3.3	Escala del modelo físico.....	46
3.4	Descripción del modelo físico.....	50
3.4.1	Zona de ingreso del modelo hidráulico .....	51
3.4.2	Modelo del Separador de Caudales .....	52
3.4.3	Zona de descarga, aforo y restitución.....	56
3.5	Construcción del modelo físico a escala 1:5 .....	57
3.5.1	Conformación de elementos en acrílico.....	59
3.5.2	Replanteo .....	61
3.5.3	Estructura metálica y zona de observación .....	62

3.5.4	Montaje de los elementos de acrílico.....	63
3.6	Instrumentación del modelo físico.....	67
3.6.1	Medidores de caudales.....	67
3.6.2	Limnímetros.....	69
3.6.3	Reglas, cintas y probetas.....	70
3.7	Calibración.....	71
3.7.1	Calibración de los vertederos.....	71
3.7.2	Calibración del modelo del separador.....	79
3.8	Plan de pruebas.....	140
3.9	Conclusiones.....	140
4	EXPERIMENTOS REALIZADOS EN EL MODELO FISICO CON DISEÑO ORIGINAL.....	142
4.1.1	Resultados obtenidos.....	142
4.1.2	Caudales separados.....	151
4.2	Conclusiones.....	154
5	MODELO FISICO CON DISEÑO MODIFICADO.....	157
5.1	Introducción.....	157
5.2	Descripción de las modificaciones.....	158
5.2.1	Propuesta de modificación M-2.....	158
5.2.2	Propuesta de modificación M-3.....	159
5.3	PLAN DE PRUEBAS.....	160
6	EXPERIMENTOS REALIZADOS EN EL MODELO FISICO CON MODIFICACIONES.....	163
6.1	Resultados obtenidos.....	163
6.1.1	Propuesta de modificación M-2.....	163
6.1.2	Propuesta de modificación M3.....	168

6.2	Discusión de resultados .....	179
6.2.1	Propuesta de modificación M-2 .....	179
6.2.2	Propuesta de modificación M-3 .....	181
6.3	Conclusiones.....	183
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	185
7.1	Conclusiones.....	185
7.2	Recomendaciones para el dimensionamiento.....	188
	REFERENCIAS.....	191
	ANEXO No. 1 REGISTRO DE DATOS DURANTE LAS CAMPAÑAS DE AFORO VERTEDEROS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS VERTEDEROS .....	138
	ANEXO No. 2 PLANOS DEL MODELO FÍSICO DEL SEPARADOR DE CAUDALES CON DISEÑO ORIGINAL .....	140
	ANEXO No. 3 REGISTRO DE DATOS DURANTE LA EJECUCION DEL PLAN DE PRUEBA EN EL MODELO CON DISEÑO ORIGINAL.....	138
	ANEXO No. 4 PLANOS DEL MODELO FÍSICO DEL SEPARADOR DE CAUDALES CON LA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN .....	149
	ANEXO No. 5 REGISTRO DE DATOS DURANTE LA EJECUCION DEL PLAN DE PRUEBAS EN EL MODELO LA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN .....	142

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Funcionamiento de una estructura separadora de caudales .....	3
Figura 2-1: Ubicación de los ramales Oriental y Occidental del proyecto Quebrada Caupicho en la Cuenca del Machángara.....	9
Figura 2-2: Ubicación del separador de caudales PE36A .....	10
Figura 2-3: Cuencas pluviales proyecto "Quebrada Caupicho" .....	11
Figura 2-4: Cuencas sanitarias aportantes.....	12
Figura 2-5: Ubicación del Separador de Caudales PE36A en el proyecto Quebrada Caupicho. ....	13
Figura 2-6: Regímenes del flujo asociados a la inclinación de la pendiente.....	20
Figura 2-7: Magnitud, cantidad y unidad .....	21
Figura 3-1: Ubicación del separador de caudales en el área de experimentación del laboratorio del CIERHI .....	41
Figura 3-2: Vista en Planta del Separador de Caudales prototipo (PE36A).....	42
Figura 3-3: Corte en Planta del Separador de Caudales prototipo (PE36A).....	43
Figura 3-4: Corte Longitudinal del Separador de Caudales prototipo (PE36A).....	43
Figura 3-5: Corte Transversal del Separador de Caudales prototipo (PE36A).....	44

Figura 3-6: Esquema general y elementos del modelo físico .....	50
Figura 3-7: Esquema 3D del modelo físico. Ubicación de los elementos que componen la zona de ingreso. ....	51
Figura 3-8: Esquema 3D del modelo físico. Ubicación de los elementos que componen el modelo de separador de caudales. ....	53
Figura 3-9: Esquema en planta del modelo físico de separador de caudales con sus elementos .....	57
Figura 3-10: Cortes A-A, B-B del modelo físico con sus elementos. ....	58
Figura 3-11: Cortes C-C, D-D Ubicación de los elementos del modelo físico .....	59
Figura 3-12: Esquema 3D del modelo físico de separado de caudales .....	66
Figura 3-13: Ubicación de los vertederos triangulares .....	67
Figura 3-14: Esquema de los vertederos de aforo pluvial y sanitario. ....	68
Figura 3-15: Esquema de los vertederos de aforo pluvial y sanitario. ....	72
Figura 3-16: Valores del coeficiente experimental de gasto $\mu$ en función de $h$ y $\theta$ . ....	74
Figura 3-17: Valores de $K$ para la fórmula de la Universidad de Chile .....	74
Figura 4-1: Esquemas de la configuración geométrica M2 .....	159
Figura 4-2: Esquemas de la configuración geométrica M-3 .....	160

## INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1-1: Descarga Directa del colector combinado .....	1
Fotografía 1-2: Topografía de Quito. ....	3
Fotografía 1-3: Barrio Sánchez Orellana .....	7
Fotografía 2-1: Estado actual del colector combinado .....	14
Fotografía 3-2: Cintas y reglas graduadas en milímetros y centímetros. ....	70
Fotografía 3-3: Probeta de 1 litro de capacidad .....	70
Fotografía 3-4: Campaña de aforo para la calibración de vertederos .....	76
Fotografía 3-5: Comportamiento del flujo en el separador de caudales, vista lateral zona de separación. Prueba A-3: Caudal combinado 2.68 m <sup>3</sup> /s. ....	155
Fotografía 4-1: Prueba B-1 Vista lateral Izquierda .....	163
Fotografía 4-2: Prueba B-1 Vista lateral derecha. Formación del resalto hidráulico en el canal combinado. ....	164
Fotografía 4-3: Prueba B-2 Vista lateral izquierda. Comportamiento de flujo en la zona de separación. ....	164
Fotografía 4-4: Prueba B-2 Vista lateral derecha. Formación del resalto hidráulico en el canal combinado y vertido hacia el canal pluvial. ....	165
Fotografía 4-5: Prueba B-3 Vista lateral izquierda. Comportamiento de flujo en la zona de separación. ....	166
Fotografía 4-6: Prueba B-3 Vista lateral izquierda. Formación del resalto hidráulico en el canal combinado. ....	166
Fotografía 4-7: Prueba B-3 Vista lateral derecha. Umbral de direccionamiento y vertido hacia el canal pluvial. ....	166
Fotografía 4-8: Prueba C-1. Vista superior del comportamiento del flujo en el separador de caudales con modificación definitiva .....	168

Fotografía 4-9: Prueba C-1. Comparación de la Vista superior lateral izquierda del comportamiento del flujo en el separador de caudales. (Superior). Modificación definitiva. ....	169
Fotografía 4-10: Prueba C-2. Vista lateral izquierda del comportamiento del flujo .....	170
Fotografía 4-11: Prueba C-2. Vista superior del comportamiento del flujo. ....	170
Fotografía 4-12: Prueba C-2. Vista lateral derecha, resalto hidráulico y vertedero de cresta semicircular. ....	170
Fotografía 4-13: Prueba C3. Vista superior del comportamiento del flujo .....	171
Fotografía 4-14: Prueba C3, Vista Lateral, comportamiento del flujo en el separador de caudales. (Superior) Modificación definitiva. (Inferior) Diseño original. Prueba A-3 .Q=47.97l/s.....	172
Fotografía 4-15: Prueba C-4. Vista lateral izquierda del comportamiento del flujo en el separador, descarga hacia el canal sanitario. ....	174
Fotografía 4-16: Prueba C-4. Vista lateral derecha, vertido hacia el canal pluvial, zona de embalsamiento. ....	174
Fotografía 4-17: Prueba C-5. Vista lateral izquierda. Descarga del flujo hacia el canal sanitario. ....	175
Fotografía 4-18: Prueba C-5. Vista en planta. Comportamiento del flujo en el separador (superior) modificación M-3 (inferior) Prueba A-5 Q= 93.62 l/s.....	176
Fotografía 4-19: Prueba C5. Vista lateral izquierda. formación del resalto hidráulico en el canal combinado .....	176
Fotografía 4-20: Prueba C5. Vista lateral derecha. Vertido sobre el vertedero de cresta semicircular. ....	177
Fotografía 4-21: Prueba C5. Vista frontal. Comportamiento del flujo en el separador de caudales PE36A .....	177

## INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2-1: Comparación de la curva de derivación de caudales original y propuesta, grado de contaminación en DBO. ....	16
Gráfico 3-1: Curvas de descarga teóricas - vertedero triangular. ....	76
Gráfico 3-2: Curvas de descarga del vertedero teóricas y experimentales .....	78
Gráfico 3-3: Derivación porcentual experimental- modelo con diseño original .....	154
Gráfico 3-4: Derivación porcentual teórica- diseño original .....	154
Gráfico 3-5: Derivación porcentual teórica propuesta por Calderón. ....	156
Gráfico 4-1: Curvas de derivación de caudales (caudal combinado vs caudal sanitario) para la modificación M-2, derivación teórica y diseño original. ....	180
Gráfico 4-2: Curvas de derivación de caudales (caudal combinado vs caudal sanitario) para la modificación M-3, derivación teórica y diseño original. ....	182
Gráfico 5-1: Relación entre parámetros adimensionales (Qvs/Qc) (B/w) vs Fr.....	189
Gráfico 5-2: Relación entre parámetros adimensionales (Cq) vs (Qvs/Qc) (B/w) .....	189
Gráfico 5-3 : Relación entre parámetros adimensionales (Cq) vs (w/hm).....	190
Gráfico 5-4: Relación entre parámetros adimensionales (Cq) vs (a/hm) .....	190



## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Caudales de separación según el diseño original .....	14
Tabla 2.2: Caudales de separación en cumplimiento de la TULSMA.....	16
Tabla 2.3: Regímenes del flujo.....	20
Tabla 2.4: Clasificación de magnitudes físicas.....	22
Tabla 2.5: Ejemplo ecuaciones dimensionalmente homogéneas y no homogéneas.....	24
Tabla 2.6: Variables que intervienen en análisis dimensional .....	28
Tabla 2.7: Matriz característica – separador de caudales .....	29
Tabla 2.8: Determinación del parámetro $\pi_1$ .....	29
Tabla 2.9: Determinación del parámetro $\pi_2$ .....	30
Tabla 2.10: Determinación del parámetro $\pi_3$ .....	30
Tabla 2.11: Determinación del parámetro $\pi_4$ .....	31
Tabla 2.12: Determinación del parámetro $\pi_5$ .....	31
Tabla 2.13: Magnitudes geométricas y cinemáticas que intervienen en la ecuación general de la hidráulica .....	35
Tabla 2.14: Magnitudes dinámicas que intervienen en la ecuación general de la hidráulica .....	35
Tabla 2.15: Similitud restringida según el tipo de fuerza predominante .....	37
Tabla 2.16: Relación entre escalas de las diferentes magnitudes según la similitud restringida de Froude.....	39
Tabla 3.1: Dimensiones en prototipo del separador de caudales PE36A.....	45
Tabla 3.2: Información de caudales en el Separador PE36A.....	46
Tabla 3.3: Comparación de magnitudes de interés entre prototipo y modelo físico en diferentes posibles escalas. (continúa.).....	47
Tabla 3.4: Magnitudes derivadas según la ley de similitud de Froude. ....	49
Tabla 3.5: Dimensiones de los vertederos de aforo pluvial y sanitario .....	68
Tabla 3.6: Dimensiones de los vertederos de aforo pluvial y sanitario.....	72

Tabla 3.7: Cálculos descarga del vertedero según la fórmula de la U. de Chile.....	74
Tabla 3.8: Cálculos descarga vertedero según la fórmula de Hegly .....	75
Tabla 3.9: Altura cero de los liminímetros ubicados en el canal de aforo .....	76
Tabla 3.10: Registro campaña de aforo de calibración de vertederos. ....	77
Tabla 3.11: Comparación de curvas de descarga para el vertedero triangular $\Theta=90^\circ$ .....	78
Tabla 3.12 Comparación de dimensiones entre el diseño del modelo a partir de prototipo y modelo físico construido. ....	80
Tabla 3.13: Comparación de elevaciones entre el diseño del modelo a partir de prototipo y modelo físico construido. ....	81
Tabla 3.14: Comparación de números de Reynolds y Froude para modelo y prototipo.....	138
Tabla 3.15: Comparación coeficientes de fricción $\lambda$ para modelo y prototipo.....	138
Tabla 3.16 :Numeros de Reynolds, Weber y Ranga Raju para diferentes caudales en el modelo del separador. ....	139
Tabla 3.17. Plan de pruebas modelo físico del separador PE36A .....	140
Tabla 4.1: Caudales en el separador durante la ejecución del plan de pruebas diseño original .....	151
Tabla 4.2: Caudales en el separador durante la ejecución del plan de pruebas diseño original, escalados a prototipo. ....	152
Tabla 4.3 :Caudales de diseño y separación para el separador PE36A.....	152
Tabla 4.4: Caudales teóricos vs caudales experimentales.....	153
Tabla 5.1: Funcionalidad de cada modificación.....	158
Tabla 5.2: Plan de pruebas para la propuesta de modificación M2.....	161
Tabla 5.3 Plan de pruebas para la propuesta de modificación M-3 (Modificación Definitiva) .....	162

Tabla 6.1: Resultados de las pruebas sobre el modelo físico una vez realizadas las modificaciones correspondientes a la propuesta M-2 .....	168
Tabla 6.2 : Resultados de las pruebas sobre el modelo físico una vez realizadas las modificaciones correspondientes a la propuesta M-3 .....	179
Tabla 6.3: Caudales en teóricos vs. Caudales en modelo físico del separador PE36A modificación M-3. ....	181

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>CIERHI</b>	Centro de Investigación y Estudios en Recursos Hídricos
<b>CFD</b>	Dinámica Computacional de Fluidos
<b>DBO<sub>5</sub> /</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
<b>DBO</b>	
<b>DMQ</b>	Distrito Metropolitano de Quito
<b>EPMAPS</b>	Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento Quito
<b>GIRH</b>	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
<b>PDRQ</b>	Programa de Descontaminación de los Ríos de Quito
<b>PTAR</b>	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Q</b>	Caudal circulante o derivado ( $m^3/s$ ; L/s)
<b>H</b>	Altura representativa de una estructura (m)
<b>B</b>	Ancho representativo de una estructura (m)
<b>L</b>	Longitud representativa de una estructura o de un flujo (m)
<b>h</b>	Calado de agua (m)
<b>i</b>	Pendiente de fondo de las estructuras (%)
<b>a</b>	Ancho del orificio derivador (m)
<b>qc</b>	Caudal unitario de entrada de flujo (m)
<b>hm</b>	Calado del flujo de aproximación (m)
<b>v</b>	Velocidad del flujo (m/s)
<b>t</b>	Tiempo (s, días, años)
<b>T</b>	Periodo de retorno (años)
<b>ho</b>	Altura de agua sobre el vertedero (m)
<b>Co</b>	Coefficiente de descarga de vertederos
<b>Cq</b>	Coefficiente de descarga de orificios
<b>A</b>	Área de secciones de canal u orificios ( $m^2$ )
<b>hab</b>	Población o número de habitantes
<b>Rh</b>	Radio Hidráulico para un flujo (m)
<b>hc</b>	Calado Crítico para un flujo (m)

<b>g</b>	Gravedad (m/s <sup>2</sup> )
<b>e</b>	Factor de Escala
<b>Ren , Rep</b>	Número de Reynolds del prototipo
<b>Rem</b>	Número de Reynolds del modelo
<b>Frn , Frp</b>	Número de Froude del prototipo
<b>Frm</b>	Número de Froude del modelo
<b><math>f_n = \lambda_n = f_p = \lambda_P</math></b>	Coefficiente de fricción en el prototipo (natural)
<b><math>f_m = \lambda_M</math></b>	Coefficiente de fricción en el modelo
<b><math>e_n = e_p</math></b>	Rugosidad Absoluta del material en prototipo (natural)
<b>We</b>	Número adimensional de Weber
<b>s</b>	Tensión Superficial para el agua (N/m)
<b><math>\rho</math></b>	Densidad del agua (Kg/L)
<b><math>\mu</math></b>	Viscosidad dinámica del agua (Kg/m.s)
<b><math>\nu</math></b>	Viscosidad cinemática del agua (m <sup>2</sup> /s)
<b><math>\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4</math></b>	Números adimensionales para el Análisis Dimensional
<b>w</b>	Altura medida desde el vértice del vertedero hasta el fondo del canal (m)
<b><math>\theta</math></b>	Ángulo de apertura de los vertederos (°)
<b>A-1, ..., A-5</b>	Código usado para las pruebas ejecutadas sobre el modelo original
<b>QD</b>	Caudal de Diseño (m <sup>3</sup> /s)

<b>Qmax</b>	Caudal Máximo (m <sup>3</sup> /s, L/s)
<b>Qmín</b>	Caudal Mínimo (m <sup>3</sup> /s, L/s)
<b>Qs</b>	Caudal Sanitario (m <sup>3</sup> /s, L/s)
<b>Qp</b>	Caudal Pluvial (m <sup>3</sup> /s, L/s)
<b>Qc</b>	Caudal Combinado (m <sup>3</sup> /s, L/s)
<b>Qvs</b>	Caudal de Vertido Sanitario (m <sup>3</sup> /s, L/s)
<b>Qvp</b>	Caudal de Vertido Pluvial (m <sup>3</sup> /s, L/s)

## RESUMEN

El alcantarillado de Quito, en su mayoría, es combinado con descarga directa hacia los cauces naturales. Para gestionar de manera integral las aguas residuales y disminuir el impacto sobre cuerpos receptores; el Programa para la Descontaminación de los Ríos de Quito ha planificado ejecutar obras de intercepción y tratamiento. Los separadores de caudales se enmarcan en las obras de intercepción, permitiendo conducir todo caudal hacia el lugar de tratamiento en tiempo seco, y, una descarga parcial hacia el río en presencia de precipitaciones.

El presente trabajo tiene como objetivo la optimización hidráulica de un separador de caudales con régimen de aproximación supercrítico. Para ello se construyó un modelo físico a escala 1:5 bajo el criterio de similitud restringida de Froude. El diseño original del separador se evaluó mediante un plan de pruebas que representa todo su rango de operación; desde el caudal sanitario hasta el máximo de diseño. Los resultados muestran que el separador no alcanzó los porcentajes de derivación esperados, y que su comportamiento hidráulico puede afectar la estabilidad de la estructura.

Se propusieron modificaciones al diseño en base al análisis de resultados del diseño original, y a la reconsideración de los porcentajes de separación en existencia de un estudio sanitario específico. Se implementaron en el modelo físico dos propuestas optimización con cambios en la configuración geométrica. En la propuesta seleccionada como definitiva el régimen del flujo en la zona de separación es subcrítico, los porcentajes de derivación se ajustaron a los esperados y presentó un adecuado comportamiento hidráulico.

Finalmente, se realizó ábacos a dimensionales que sirven como recomendaciones para el dimensionamiento de estructuras similares.



## ABSTRACT

The majority of Quito's sewerage system is combined, and it has direct discharge into the natural channels. In order to have an integrated waste water management system and to reduce the impact on receiving bodies, the Program for the Quito's River Decontamination has planned to execute interception and treatment works. The flow separators are framed in the interception works. They allow all flow to the treatment site in dry weather or partial discharge to the river in the presence of precipitation.

The objective of this thesis is to propose a hydraulic optimization of a flow separator structure with a supercritical approach regime. To do this, a physical model was constructed at a scale of 1: 5 under Froude's restricted similarity criterion. The original separator's design was evaluated through a test plan, which represents the entire operating range; from the sanitary flow to the maximum design. The results show that the separator did not reach the expected derivation percentages, and that its hydraulic behavior could affect the stability of the structure.

Modifications to the design were proposed based on the analysis of the results of the original design, and the reconsideration of the percentages of separation in the light of a specific sanitary study. Two optimization proposals with changes in the geometric configuration were implemented in the physical model. In the proposal selected as definitive, the flow regime in the separation zone is subcritical. In addition, the derivation percentages were adjusted to those expected, and presented an adequate hydraulic behavior.

Finally, dimensionless abacuses were made that serve as recommendations for the sizing of similar structures.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

#### 1.1.1 ALCANTARILLADO DE QUITO Y LOS DERECHOS DEL AGUA

La ciudad de Quito, en su mayoría, dispone de un sistema de alcantarillado combinado, esto quiere decir que las aguas residuales domésticas y las aguas lluvia son recogidas por el mismo colector (Secretaria Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito, 2016). Estos colectores descargan directamente y sin previo tratamiento hacia los cauces principales de la ciudad de Quito (quebradas, ríos, entre otros.) (Secretaria Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito, 2016).

**Fotografía 1-1:** Descarga Directa del colector combinado



**Fuente:** Socasi, 2012

En el año 2008 el Ecuador, a través de la Asamblea Nacional Constituyente, redacta una nueva constitución, misma que vincula al agua y de manera general a los derechos de la naturaleza como parte de un sistema integrado, de tal manera que mediante el Art.14 “Se reconoce que la población tiene el derecho a vivir en un medio ambiente sano y ecológicamente equilibrado en donde se garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*” (Asamblea Nacional Constituyente, 2008). De igual manera, el Art. 12 señala: “El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de

uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable, y esencial para la vida” (Asamblea Nacional Constituyente, 2008).

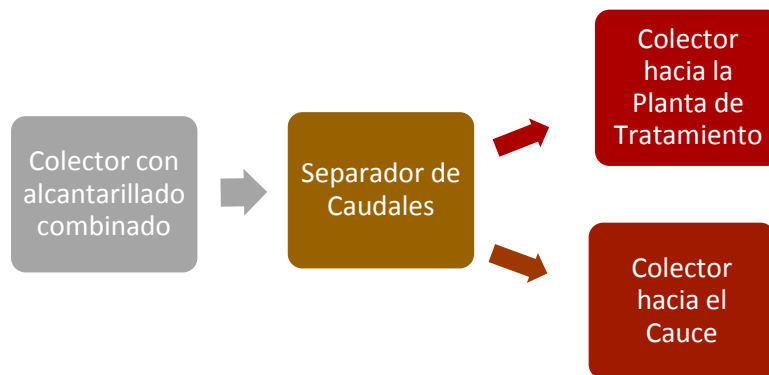
Es a partir de la constitución nacional del 2008 que la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) se ha convertido en una prioridad para las municipalidades y gobiernos descentralizados. La unidad lógica de planeación de la GIRH son las “cuencas hidrográficas”, mas no los límites territoriales (Loucks & Van Beek, 2005). Una vez conocida esta definición, cabe mencionar que los cauces principales de Quito pertenecen a la subcuenca hidrográfica del río Guayllabamba, misma que a su vez es una de las subcuencas principales del río Esmeraldas, es decir, las aguas residuales de los ciudadanos quiteños vierten y contaminan la cuenca del río Esmeraldas, hecho que es inadmisibile dentro de los lineamientos de la gestión integrada de recursos hídricos (GIRH).

La Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS) dentro de su “Programa para la Descontaminación de Ríos de Quito”, propone la construcción de plantas de tratamiento, las cuales serán alimentadas por interceptores que nacen en estructuras llamadas separadores de caudales (Gómez Ávila, Torres Guerrón, Landazuri Flores, & Mayorga Andrade, 2014).

Este tipo de estructuras en algunos casos se ejecutarán simultáneamente con los interceptores que aún no han sido construidos, y en otros casos se adaptarán a los colectores existentes, de tal manera que puedan separar el caudal combinado en los períodos lluviosos, entregando un porcentaje a la planta de tratamiento y otro al cuerpo receptor. (Gómez, Torres, Calderón, & Mayorga, 2014).

Hidráulicamente los problemas se presentan cuando la estructura separadora no es capaz de desviar el caudal necesario, generalmente consecuencia de trabajar con diseños que consideran ecuaciones simplificadas pertenecientes a la hidráulica básica. Además, Quito al ser una ciudad andina presenta una topografía con pendientes pronunciadas (Ortega et al., 2017), lo cual se traduce en que los colectores trabajen con flujo en régimen supercrítico, es decir, con considerable energía cinética (Chow, 1999).

**Figura 1-1:** Funcionamiento de una estructura separadora de caudales



**Fuente:** Autores

Las altas velocidades del flujo, provocadas por el aumento de la energía cinética se ven reflejadas en la ineficiente separación de caudales, impidiendo a la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) trabajar con el caudal para el cual fue diseñada y posibilitando el potencial incremento de la contaminación del cuerpo hídrico receptor.

**Fotografía 1-2:** Topografía de Quito.



**Fuente:** Rómulo Fotos

Las ecuaciones de la hidráulica básica consideran una serie de simplificaciones, las cuales son un limitante para predecir el comportamiento del flujo cuando el fenómeno hidráulico no está enmarcado dentro de dichas suposiciones (Castro,

Hidalgo, & Poveda, 2003), como es en el caso de un separador de caudales. Además, debido a la topografía, un porcentaje representativo de tuberías, colectores e interceptores de Quito trabajan con régimen supercrítico (Ortega et al., 2017). El régimen supercrítico se da cuando las fuerzas inerciales del fluido son mayores que la fuerza de gravedad, y por lo general se lo asocia a pendientes fuertes, altas velocidades, ondas, perturbaciones de flujo y calados relativamente pequeños. La sección de control de un flujo de aproximación con régimen supercrítico se encuentra aguas arriba (Chow, 1999), esto dificulta el funcionamiento de un separador ubicado aguas abajo de un colector con régimen supercrítico, provocando que la estructura separadora sea ineficiente y la derivación no sea la óptima ni para la planta de tratamiento ni para el río.

### **1.1.2 GENERALIDADES DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA**

El estudio de la dinámica de fluidos es complejo debido a que el fenómeno está sujeto a muchas variables. La teoría ha intentado representar el fenómeno mediante el uso de las matemáticas, y efectivamente, entre 1827 y 1845, Claude Navier y George Stokes logran representar el comportamiento de un fluido en tres dimensiones con las famosas ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones, debido a su complejidad, aun no pueden ser resueltas analíticamente (Ortega, 2015).

Es así, que dentro de la hidráulica se ha hecho una serie de simplificaciones, idealizando características del fluido, para obtener ecuaciones matemáticas simples que puedan ser resueltas analíticamente (ecuaciones de la hidráulica básica). Estas ecuaciones son válidas para fluidos en los cuales se pueda aplicar las simplificaciones antes mencionadas, aun así muchos de los fenómenos hidráulicos que ocurren en la naturaleza tienen un comportamiento que no entra dentro de esta idealización, razón por la cual resulta conveniente recurrir al análisis experimental (Vergara, 1993).

Desde tiempos inmemorables la experimentación ha sido la principal herramienta generadora de conocimiento del ser humano. Es así como los Incas, reconociendo al agua como el origen y la fuente de la vida, desarrollaron tecnologías y sistemas

de aprovechamiento para el uso sostenible del agua, atribuyendo su conocimiento al entendimiento que tenían de la naturaleza dentro de su cosmovisión, entendimiento que se concibe gracias a la experimentación que tenían los Incas con su entorno (Guhl, Montes, & Encalada, 2010). Además, en la época del renacimiento Leonardo Da Vinci menciona que cuando se trate de flujo de agua primero se debe aducir la experiencia y después la razón.

En los siglos XVIII y XIX la dinámica de fluidos tuvo un gran avance, aun así, los Ingenieros Civiles teóricos persistieron en la exclusión de la experimentación como herramienta para la solución de problemas hidráulicos. Es a inicios del siglo XX que investigadores alemanes usan con gran éxito la experimentación y convencen a los teóricos de su validez para resolver problemas hidráulico-ingenieriles (Kobus, 1980). Además, el avance de la tecnología hoy en día permite, con el hardware y software adecuado, resolver de manera aproximada las ecuaciones de Navier-Stokes, estudio conocido como la dinámica de fluidos computacional CFD.

En el Ecuador, la Escuela Politécnica Nacional ha sido pionera y líder en la experimentación de fenómenos hidráulicos. A partir de los años 60 con el Laboratorio de Hidráulica y desde 1997 con el centro de Investigación en Estudios y Recursos Hídricos CIERHI.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

- Evaluar el diseño original y plantear una propuesta de optimización para una estructura separadora de caudales útil en zonas andinas, mediante la evaluación de su comportamiento hidráulico en un modelo físico a escala reducida, con la finalidad de cumplir con los porcentajes de separación requeridos dentro de un correcto funcionamiento de la misma.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar, construir y calibrar el modelo físico de la estructura de separación de caudales de acuerdo con los diseños propuestos por la EPMAPS, previa elección de una escala de reducción adecuada.

- Evaluar el comportamiento hidráulico del separador de caudales mediante un plan de pruebas de laboratorio, mismas que abarquen condiciones de funcionamiento representativas en el rango de caudales de operación.
- Plantear las posibles modificaciones, basándose en las evaluaciones de las pruebas realizadas a los diseños originales y la bibliografía disponible, de tal manera que de entre las posibilidades se pueda elegir las óptimas, para su modelación física.
- Evaluar las modificaciones propuestas adaptándolas al modelo físico, con la finalidad de escoger la modificación que presente un mejor comportamiento hidráulico.
- Desarrollar ábacos adimensionales que caractericen el funcionamiento de este tipo de estructuras, y que a su vez funcionen como herramientas para el diseñador.
- Denotar la importancia de la modelación física, como una herramienta de evaluación tridimensional para que los diseños de estructuras hidráulicas presenten una funcionalidad óptima.

### **1.3 ALCANCE**

El fenómeno hidráulico que se presenta en un separador de caudales es del tipo tridimensional, su resolución mediante las ecuaciones simplificadas de la hidráulica básica no es factible. La presente investigación, a través de la construcción de un modelo físico, evalúa el funcionamiento hidráulico de la estructura separadora de caudales PE36A diseñada por la EPMAPS, de manera que se pueda conocer si se alcanza o no la derivación requerida. A partir de estos resultados presenta una propuesta de optimización. Además, con los resultados obtenidos en laboratorio se elaboran ábacos adimensionales que sirvan como herramienta para el diseño de estructuras con características similares. Es así, que se pretende que la inversión que se realiza por parte de la EPMAPS se vea justificada con obras que trabajen en el mayor rango de eficiencia, reduciendo el impacto ambiental sobre el cuerpo hídrico receptor y mejorando las condiciones sanitarias en la zona de descarga lo que conlleva un beneficio innegable para la población aledaña.

**Fotografía 1-3:** Barrio Sánchez Orellana



**Fuente:** CIERHI, 2017

El presente proyecto de titulación es parte de la investigación macro titulado “Modelación Física de separadores de caudales hacia colectores pluvial y sanitario para alcantarillados combinados usados en ciudades andinas en Ecuador. Caso de la descontaminación y recuperación del río Machángara en Quito”. Proyecto interno de Investigación de la Escuela Politécnica Nacional realizado por el Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos CIERHI que además de la modelación física (objeto de esta tesis), incluye el análisis sanitario (estudio que plantea los caudales a separar en función de la Demanda Bioquímica de Oxígeno) y la modelación numérica (herramienta de apoyo en el planteamiento de las modificaciones).

Los objetivos del proyecto interno de investigación desarrollado por el CIERHI fueron alcanzados con la consecución simultánea de los proyectos de titulación involucrados y de los investigadores del centro.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN**

### **1.4.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

La hidráulica básica considera simplificaciones para sus ecuaciones fundamentales, como suponer flujo unidimensional, distribución uniforme de velocidades, distribución hidrostática presiones, entre otras (Mateos, 2000). En el caso de un separador de caudales, estas ecuaciones no se transfieren de manera



apropiada a la realidad, debido a que los fenómenos que se presentan no son de tipo unidimensional, dando paso a que los diseños no cumplan la función para la cual fueron previstos, es por ello que nace la necesidad de realizar ábacos adimensionales producto del estudio experimental que expliquen el comportamiento tridimensional del flujo y que sirvan como herramienta para el diseñador.

#### **1.4.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

La modelación física permite observar y analizar el fenómeno desde una perspectiva más cercana a la realidad, debido a que se representa el comportamiento hidráulico real que tendrá la estructura, lo cual ayuda a evaluar objetivamente el funcionamiento del diseño original y de las mejoras propuestas, cubriendo así las simplificaciones de las ecuaciones fundamentales (Kobus, 1980).

#### **1.4.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

El trabajo de titulación responde a la necesidad de evaluar y optimizar el diseño original de una estructura separadora de caudales, de manera que se pueda alcanzar la derivación de caudales requerida, debido a que éste y otras estructuras similares forman parte del “Programa para la Descontaminación de Ríos de Quito PDRQ” y representan una inversión representativa por parte del Municipio de Quito (Gómez Ávila et al., 2014), programa que busca efectuar un manejo integral de los residuos líquidos de la ciudad, mediante la intercepción, conducción y tratamiento de las aguas residuales urbanas, lo cual disminuye el impacto ambiental sobre cuerpos hídricos receptores, y contribuye a mejorar la calidad de vida de los pobladores.

## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

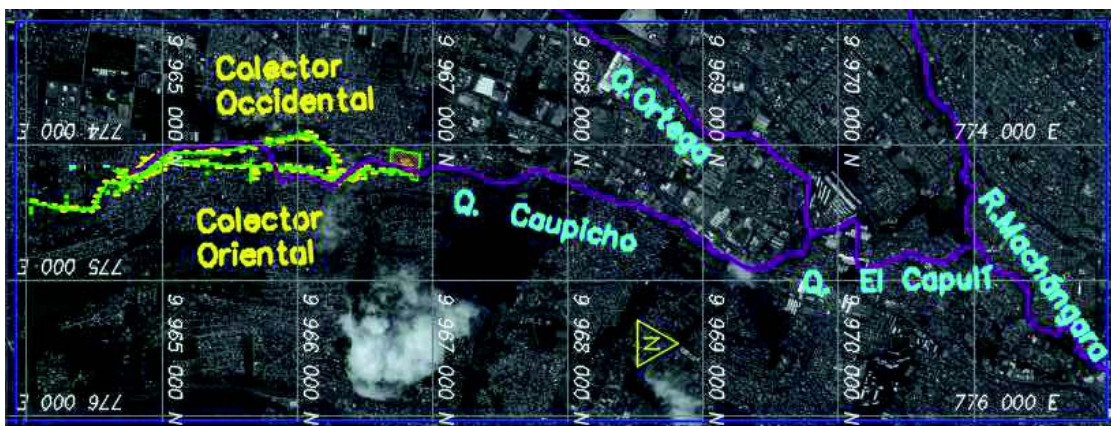
#### 2.1 MARCO TEÓRICO

##### 2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO “QUEBRADA CAUPICHO”

El proyecto Quebrada Caupicho se enmarca dentro del Programa de Saneamiento Ambiental (PSA) de la EPMAPS Quito, siendo un sistema de alcantarillado adicional que al entrar en funcionamiento interceptará y conducirá aguas servidas hacia la planta de tratamiento (PTAR) “El Beaterio”, en la Parroquia de Turubamba del DMQ (Gómez et al., 2014). Se planifica que caudal tratado por esta PTAR descargue en la quebrada Caupicho, lo que contribuiría directamente en su recuperación y en la del río Machángara del cual es un importante afluente.

Comprende dos ramales de colectores, uno occidental, con una longitud 3.3km, que inicia en el parque Caupicho, llega hasta la Av. Beaterio continuando paralelamente a los rieles del tren hasta la Av. Susana Lettor, finalizando en el espacio que a futuro ocupara la PTAR “El Beaterio”; y el segundo, con una longitud de 1.8 km, se encuentra en el margen oriental e inicia en la Avenida del Beaterio siguiendo el margen de la quebrada hasta la Av. Susana Lettor donde confluye con el tramo occidental.

**Figura 2-1:** Ubicación de los ramales Oriental y Occidental del proyecto Quebrada Caupicho en la Cuenca del Machángara

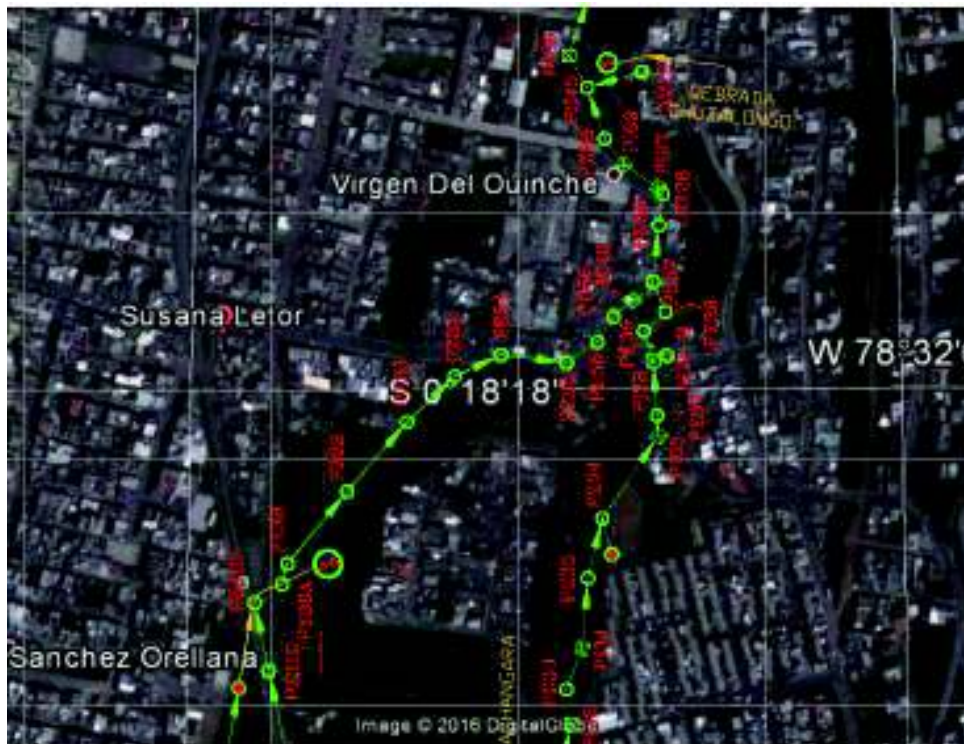


**Fuente:** Planos del estudio (plano 5 de 47) (Socasi, 2012) -Google Earth

Los separadores de caudales se ubican en la red de alcantarillado combinado existente, derivando hasta un determinado valor el caudal circulante a un interceptor y el excedente hacia el río. Los interceptores por su parte descargarán en los colectores anteriormente descritos.

El proyecto de la Quebrada Caupicho contempla la construcción de cinco separadores de caudales en el ramal occidental y seis separadores de caudales en el ramal oriental. El separador de caudales PE36A, objeto de este estudio, se encuentra sobre la rama occidental y presenta una geometría que reúne características comunes con el resto de los separadores, siendo sus dimensiones las mayores en comparación con sus similares.

**Figura 2-2:** Ubicación del separador de caudales PE36A



**Fuente:** Planos del estudio (plano 5 de 47) (Socasi, 2012). y Google Earth

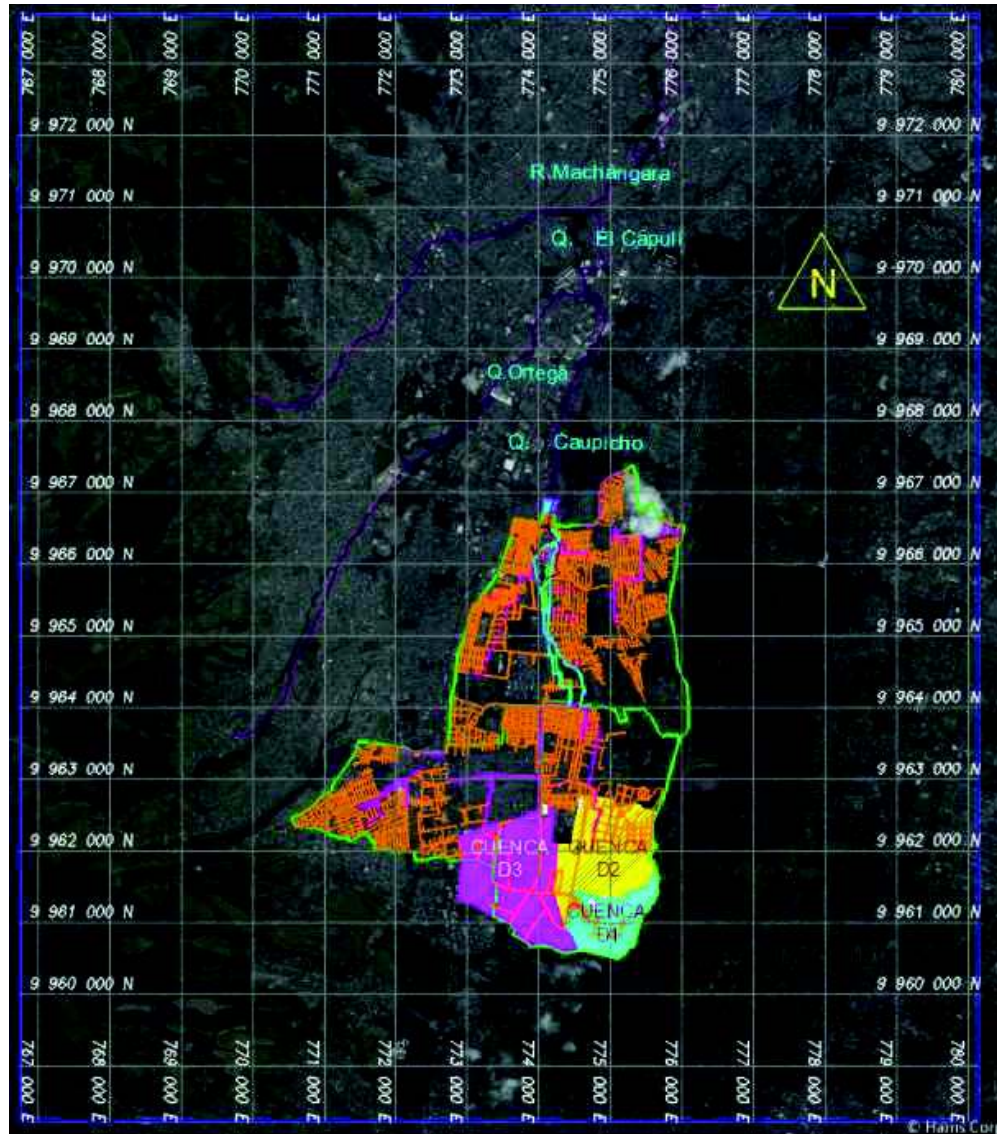
#### 2.1.1.1 ÁREA DE INFLUENCIA DEL “PROYECTO CAUPICHO”

Dentro del estudio hidrometeorológico el proyecto contempla 3 microcuencas pluviales aportantes, las cuales involucran las siguientes parroquias: La Ecuatoriana, Guamaní, Turubamba y Quitumbe, que pertenecen a la



Administración Zonal Quitumbe. Para el diseño de las diferentes estructuras que componen la nueva red de alcantarillado, según la memoria técnica, se considera un caudal pluvial de aporte con un tiempo de retorno de 25 años. El área de drenaje que genera el caudal pluvial circulante por el separador PE36A es 22,6 hectáreas (Socasi, 2012).

**Figura 2-3:** Cuencas pluviales proyecto "Quebrada Caupicho"

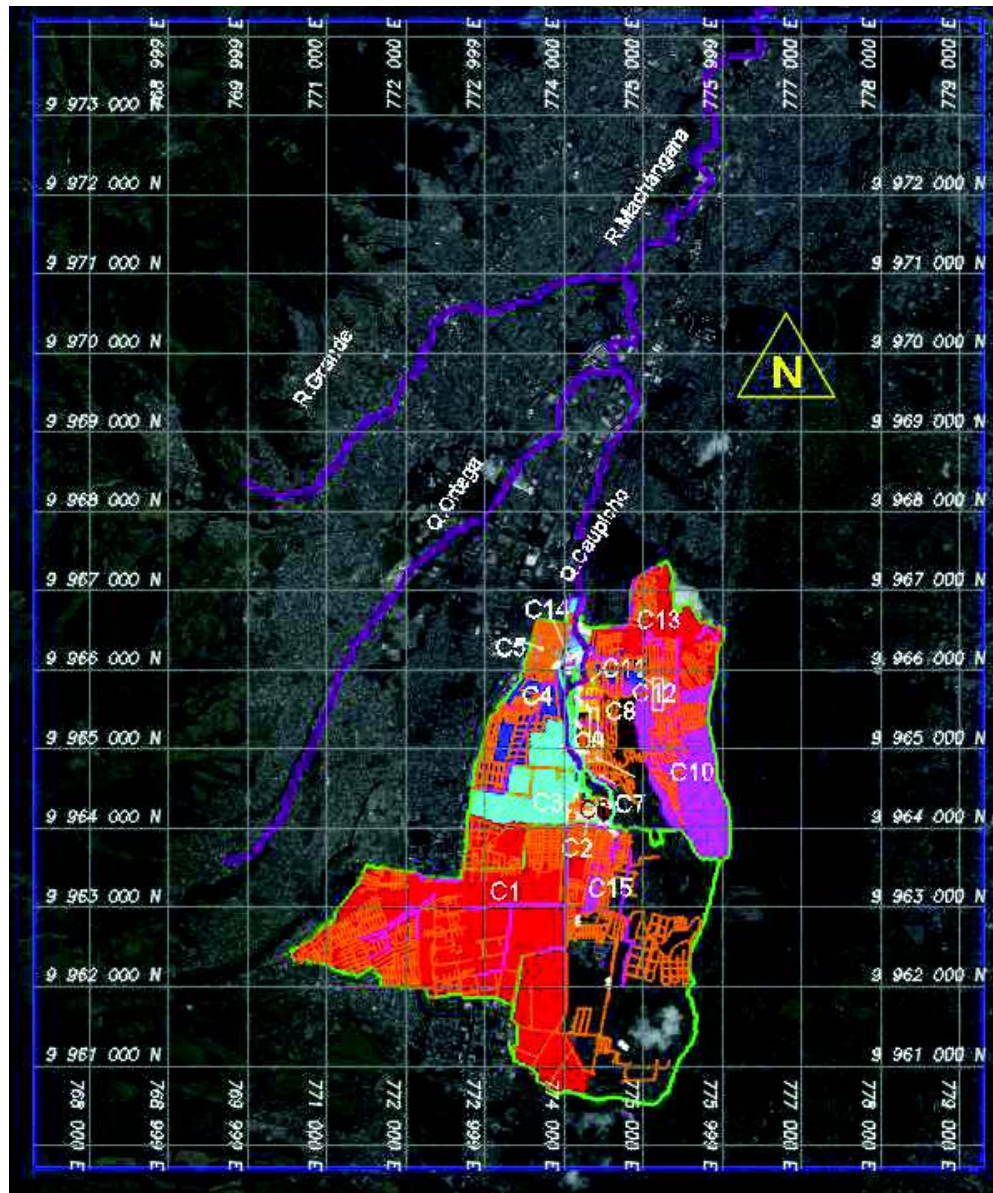


**Fuente:** Plano 2 de 47, (Socasi, 2012). y Google Earth

En cuanto a las cuencas sanitarias aportantes al proyecto suman 15. El área que aportará caudal al separador es 869.28 hectáreas, con una densidad poblacional de 165 hab/ha, lo que resulta en una población de servicio de 143 mil habitantes.

(Socasi, 2012). Por su parte la planta de tratamiento “El Beaterio” a la cual se conducirán las aguas residuales interceptadas por el proyecto tiene un horizonte de servicio poblacional de 251.194 habitantes para el año 2040. (Gómez et al., 2014).

**Figura 2-4:** Cuencas sanitarias aportantes



**Fuente:** Plano 1 de 47, (Socasi, 2012). y Google Earth

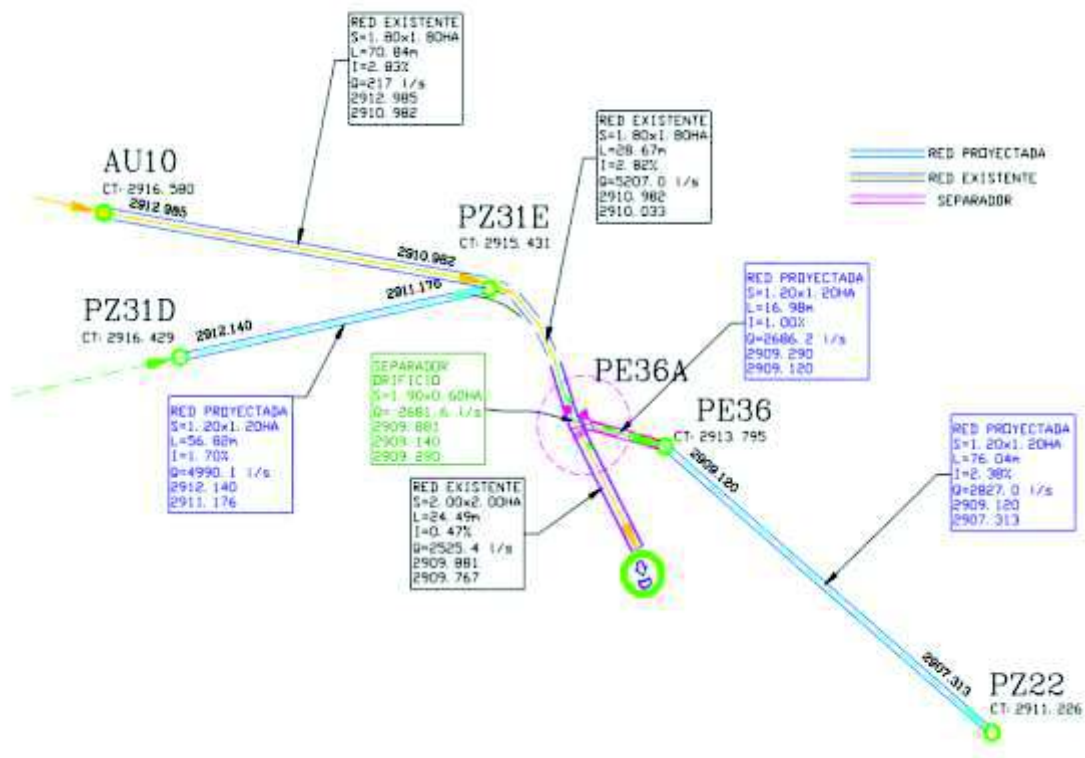
### 2.1.2 SEPARADOR DE CAUDALES PE36A

Según la memoria técnica del proyecto "Caupicho, quebrada, evaluación y diseños complementarios, interceptores, parroquia Turubamba", el separador de caudales



PE36A dividirá el caudal combinado proveniente de una red existente y una proyectada con un caudal de diseño de 217 l/s y 4990.1 l/s respectivamente. Por lo que el caudal de aproximación de diseño será de 5207.0 l/s; de los cuales 2681.6 l/s fluirán por la red proyectada hacia la planta de tratamiento y 2525.4 l/s se descargarán hacia la quebrada Caupicho. En la Figura 2-5 se esquematiza la distribución esperada.

**Figura 2-5:** Ubicación del Separador de Caudales PE36A en el proyecto Quebrada Caupicho.



**Fuente:** (Socasi, 2012)

En porcentajes la separación correspondería a 51.5 % hacia la PTAR y 48.5% hacia la quebrada, para el caudal máximo de diseño con tiempo de retorno de 25 años.

### 2.1.2.1 SITUACIÓN ACTUAL DEL SEPARADOR

Actualmente, en el sitio de ubicación del separador de caudales objeto de este estudio, existe una estructura provisional que deriva parcialmente el caudal sanitario hacia un colector que descarga aguas abajo en el Río Machángara.

**Fotografía 2-1:** Estado actual del colector combinado

**Fuente:** (Socasi, 2012)

En la **Fotografía 2-1** se observa el estado actual de la zona de separación.

### 2.1.3 CAUDALES DE SEPARACIÓN

El diseño del separador de caudales PE36A permite la descarga al cauce natural de un porcentaje del caudal combinado en épocas con presencia de precipitaciones. Según la memoria técnica (Socasi, 2012), los porcentajes de serían:

**Tabla 2.1:** Caudales de separación según el diseño original

<b>CAUDALES DE DISEÑO ORIGINALES SEPARADOR PE36A</b>						
<b>Caudal</b>	<b>Combinado (ingreso) m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Sanitario (salida) m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Pluvial (salida) m<sup>3</sup>/s</b>	<b>% Sanitario</b>	<b>% Pluvial</b>	<b>Obs.</b>
Mín.	0,536	0,563	0	100	0	Caudal sanitario en estiaje
Máx.	5,207	2,68	2,53	51,5	48,5	Caudal máximo combinado

**Fuente:** (Socasi, 2012)

El criterio para definir estos porcentajes de separación fue que el caudal a derivarse a hacia la planta de tratamiento sea un máximo de 5 veces el caudal sanitario (Socasi, 2012). Entonces se tiene:

Q sanitario x 5=Q hacia la PTAR

Ec. (2-1)

$$0.536 \text{ m}^3/\text{s} \times 5 = 2.68 \text{ m}^3/\text{s}$$

De la revisión bibliográfica, esta recomendación tiene lugar como criterio de calidad para descargas de escorrentía al cuerpo hídrico en alcantarillados combinados. De esta forma, se permite el vertido cuando el caudal circulante tenga una dilución mínima de cinco veces el caudal sanitario en época de estiaje (SGIT, 2014). Por lo tanto, la descarga al río se daría para caudales combinados superiores a 2.68 m<sup>3</sup>/s; los caudales inferiores a este valor se conducirían en su totalidad hacia la PTAR. Su aplicabilidad se considera en ausencia de estudios específicos y cuando no se comprometan objetivos medioambientales.

En Ecuador, la normativa que rige la calidad de las descargas de efluentes a cuerpos de agua dulce es Texto Unificado de Legislación Secundaria Ambiental (TULSMA), capítulo VI, anexo 1. Por lo tanto, la descarga directa del separador debe cumplir con los límites de contaminantes allí contemplados.

La determinación de estos límites para una descarga específica se los obtiene realizando un balance de masas y aplicando criterios de dilución. La información necesaria se relaciona con la calidad del recurso hídrico previo a la descarga, concentración de contaminantes del caudal de origen sanitario y del uso asignado al recurso aguas abajo de la descarga. El resultado de este procedimiento es un caudal de descarga desde el cual se iniciaría el vertido al río.

En el análisis desarrollado por (Calderón, 2017), estudio junto con el cual se integra el proyecto de investigación macro, se aplica la normativa TULSMA para el caso de estudio. Su realización propone definir el grado de contaminación del efluente urbano en términos de DBO<sub>5</sub> y considerar el uso del recurso aguas abajo con los criterios de calidad más exigentes; vida acuática con impacto moderado. El balance de masas realizado fijó el caudal de inicio de vertido en 3.57 m<sup>3</sup>/s con una concentración de DBO<sub>5</sub> asociada de 30 mgDBO<sub>5</sub>/l, por lo tanto, los nuevos caudales a derivar determinados para nuestro caso de estudio y en cumplimiento de la legislación ambiental ecuatoriana se muestran en la **Tabla 2.2**. El **Gráfico 2-1**



muestra una comparación entre comportamiento teórico del diseño original y el propuesto.

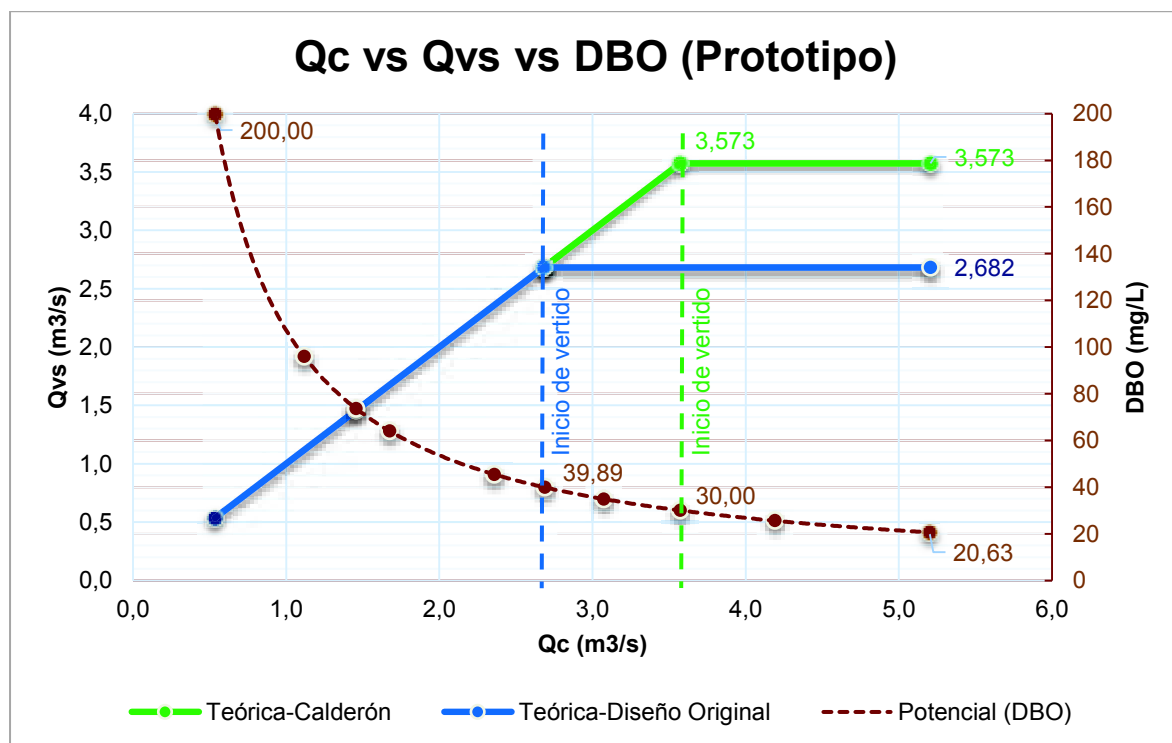
**Tabla 2.2:** Caudales de separación en cumplimiento de la TULSMA

CAUDALES DE SEPARACIÓN PROPUESTOS - SEPARADOR PE36A						
Caudal	Combinado (ingreso) m <sup>3</sup> /s	Sanitario (salida) m <sup>3</sup> /s	Pluvial (salida) m <sup>3</sup> /s	% Sanitario	% Pluvial	Obs
Mín.	0,536	0,563	0	100	0	Caudal sanitario en estiaje
Máx.	5,207	3,57	1,637	68,6	31,4	Caudal máximo combinado

Fuente: Calderón,2017

Por dilución, la relación entre la concentración y el caudal combinando es inversamente proporcional. A mayor caudal combinado la concentración de la DBO<sub>5</sub> disminuye. La serie DBO vs caudal combinado (Qc) propuesta por (Calderón, 2017) se encuentra en el **Gráfico 2-1**.

**Gráfico 2-1:** Comparación de la curva de derivación de caudales original y propuesta, grado de contaminación en DBO.



Fuente: Calderón, 2017

## **2.1.4 MODELACIÓN FÍSICA**

### **2.1.4.1 INTRODUCCIÓN A LA MODELACIÓN FÍSICA.**

Los fenómenos hidráulicos que ocurren en la naturaleza son diversos y complejos de representar con todas las variables que interfieren en cada uno de ellos. En la actualidad se los puede abordar de forma teórica, mediante una experimentación física, o con la creación de modelos numéricos, cada una con distintos grados de simplificaciones. (Hidalgo, 2007)

El planteamiento teórico para el comportamiento de un fluido que incluye tanto las fuerzas que intervienen en el movimiento como la tridimensionalidad y la dependencia del tiempo del fenómeno, constituyen las denominadas ecuaciones de Navier-Stokes que no cuentan hasta el momento con solución analítica directa.

La modelación física por su parte permite la simulación de estados y el estudio de los fenómenos de flujo en tres dimensiones, con frecuencia se los utiliza en la solución de problemas prácticos de ingeniería. Para lo cual requiere la construcción del modelo a escala reducida, un análisis de alternativas y la elección de la solución óptima en función al comportamiento deseado (Hidalgo, 2007).

En el caso de la modelación numérica, esta requiere un alto grado de experiencia y especificidad en la información ingresada, además de una significativa capacidad computacional que determinará el tiempo para la obtención de resultados. Si se cuenta con una adecuada capacidad computacional el tiempo de análisis de alternativas es una ventaja. Es posible cumplir con las solicitudes descritas, sin embargo, para asegurar la validez de los resultados muchas de las veces es necesario calibrar y validar el modelo numérico con datos de prototipo o un modelo físico (Ortega, 2015).

En ingeniería, si el objetivo es predecir y/o corregir comportamientos del flujo en estructuras hidráulicas previo a su construcción una combinación de los dos tipos de modelación aprovecha las prestaciones de las dos metodologías, y con resultados cuasi-reales en un menor tiempo.

Los modelos físicos a fin de representar el fenómeno hidráulico adecuadamente y asegurar la veracidad de la información obtenida; entre sí y el prototipo deben

cumplir el principio de semejanza. Dicho principio es alcanzable a través de la similitud mecánica, esta última se cumple a su vez cuando se verifica en el modelo hidráulico: similitud geométrica, cinemática y dinámica. Por lo tanto: dimensiones geométricas, condiciones del flujo como: caudal, velocidad, calados y fuerzas entre el modelo y el prototipo guardan una relación vinculada a la escala de reducción del modelo.

#### 2.1.4.2 CLASIFICACIÓN DE MODELOS HIDRÁULICOS.

Dependiendo de las características o requerimientos específicos de cada fenómeno hidráulico, se puede elegir entre los siguientes tipos de modelos físicos:

##### Por la relación con el prototipo

- **Modelos con geometría similar:** En ellos todas las dimensiones del modelo se relacionan bajo una misma escala con sus homologas en prototipo.
- **Modelos Distorsionados:** En los cuales las dimensiones del modelo guardan diferentes relaciones de escala con el prototipo, así la escala de profundidad es distinta a la escala de longitud.
- **Modelos Disímiles:** La semejanza física no se cumple en estos modelos, se hacen uso de campos físicos análogos.

##### Por el tipo de fronteras

- **Modelos con fondo fijo:** Los parámetros determinantes son niveles, velocidades, caudales.
- **Modelos con fondo móvil:** Reproducen variables de flujo en combinación con la mecánica de transporte y los sedimentos.

El modelo físico del separador de caudales es un modelo de fondo fijo con geometría similar a la del prototipo, puesto que su requerimiento comprende, entre otras cosas, un análisis cualitativo del flujo para evitar afectaciones en la estabilidad de la estructura, para ello, la visualización de los fenómenos recreados bajo una geometría con una sola escala es fundamental. Siendo además determinantes la cuantificación de caudal y calados para cumplir con los objetivos de derivación se considera justificadamente trabajar en fondo fijo.

### 2.1.5 FLUJO SUPERCRÍTICO Y CIUDADES ANDINAS

El sistema de alcantarillado de las ciudades andinas presenta un flujo que trabaja básicamente a superficie libre. El comportamiento de un flujo a superficie libre está regido fundamentalmente por los efectos viscosos y gravitatorios en relación con las fuerzas inerciales del flujo (Chow, 1999), esta relación se representa a través del número de Froude, definido como:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad \text{Ec. (2-2)}$$

Donde:

F: Número de Froude.

g: Gravedad [m/s<sup>2</sup>].

L: Longitud característica [m].

La longitud característica (L) para un flujo a superficie libre es la profundidad hidráulica (D), que se define como el área de la sección transversal dividida para el ancho del espejo de aguas. En la **Tabla 2.3** se resumen los regímenes de flujo, sus características y números de Froude correspondientes.

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad \text{Ec. (2-3)}$$

El estudio de ondas superficiales de un flujo define al término  $\sqrt{gD}$  como la velocidad de propagación de la onda, mejor conocida como celeridad. Cuando el número de Froude es igual a la unidad se obtiene que la velocidad crítica  $\sqrt{gD}$  es igual a la celeridad de pequeñas ondas gravitacionales que pueden ser originadas por cualquier cambio momentáneo en la profundidad del agua (Chow, 1999).

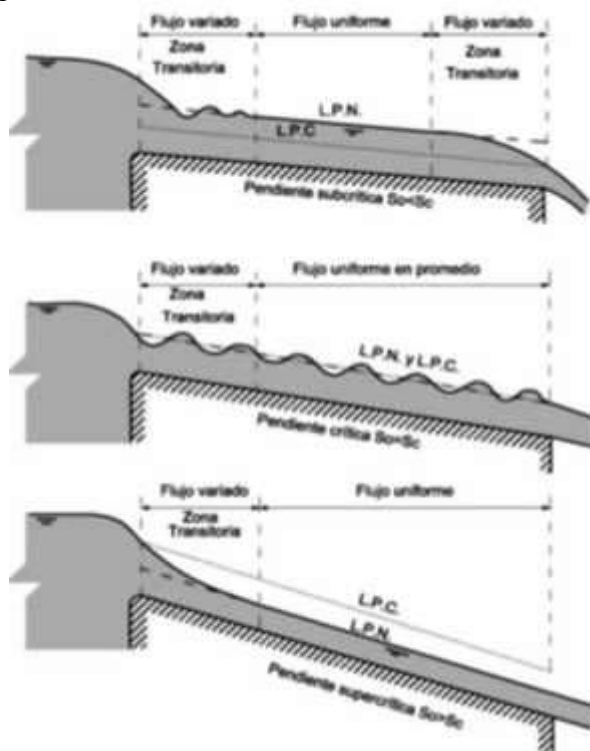
La sección de control para un flujo subcrítico se encuentra aguas abajo debido a que la celeridad es mayor que la velocidad del flujo, permitiendo que la onda gravitacional puede propagarse hacia aguas arriba. Para un flujo supercrítico la sección de control se encuentra aguas arriba debido a que la onda gravitacional no puede propagarse hacia aguas arriba debido a que la velocidad del flujo es mayor que la celeridad.

**Tabla 2.3:** Regímenes del flujo

Froude	Régimen del Flujo	Relación Velocidad-Celeridad	Fuerzas predominantes	Características
<b>F=1</b>	Crítico	$V = \sqrt{g * D}$		Velocidad Crítica
<b>F&lt;1</b>	Subcrítico	$V < \sqrt{g * D}$	Gravitacionales	Velocidad Baja, Corriente lenta
<b>F&gt;1</b>	Supercrítico	$V > \sqrt{g * D}$	Inerciales	Velocidad Alta, Corriente rápida

**Fuente:** Sotelo, 1997

Las ciudades andinas, debido a su topografía, presentan sistemas de alcantarillado con pendientes pronunciadas. Las fuertes pendientes producen predominancia de las fuerzas inerciales en el flujo, obteniendo así un sistema de alcantarillado que trabaje con régimen supercrítico. Las velocidades altas y excesiva energía cinética dificultan la separación de caudales debido a que la sección de control de un flujo con régimen supercrítico se encuentra aguas arriba.

**Figura 2-6:** Regímenes del flujo asociados a la inclinación de la pendiente

**Fuente:** Rodríguez, 2008

## 2.1.6 ANÁLISIS DIMENSIONAL

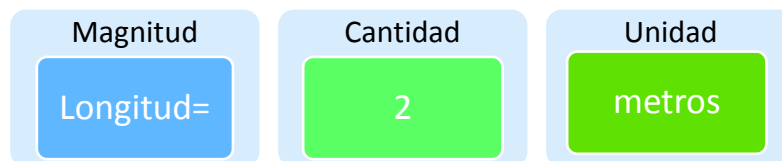
El Análisis Dimensional es una herramienta que estudia la interdependencia entre las variables que participan dentro de un fenómeno físico (magnitudes físicas), basándose en el principio de **homogeneidad dimensional** (Vergara, 1993). Su utilidad se extiende para el planteamiento y solución de problemas dentro de todos los campos de la Física; por ejemplo, en mecánica de fluidos, a partir de su estudio se formula el criterio de similitud dinámica (Kobus, 1980).

El uso de ésta herramienta es necesario cuando dentro de la investigación existen problemas complejos, en los que la variable dependiente se relaciona con una gran cantidad de variables independientes, de tal manera que las relaciones no pueden ser resueltas de forma directa (Vergara, 1993).

### 2.1.6.1 MAGNITUDES FÍSICAS

Se define a una magnitud física como la representación de un fenómeno físico susceptible de ser cuantificable. Existe un sinnúmero de magnitudes que caracterizan un fenómeno físico, el valor que otorgamos a cada una de esas magnitudes se conoce como cantidad, es así que mientras la magnitud es una propiedad abstracta la cantidad es una propiedad concreta. Para la comparación de cantidades de una misma magnitud se recurre al concepto de unidad.

**Figura 2-7:** Magnitud, cantidad y unidad



**Fuente:** Hidalgo, 2007

Así como las ecuaciones matemáticas relacionan números, la interdependencia de las magnitudes da lugar a las ecuaciones físicas, mismas que se definen como Leyes Físicas, expresadas por **ecuaciones homogéneas**.

Las representaciones de los fenómenos físicos a través de las magnitudes pueden ser simples o complejas, así se definen las Magnitudes Fundamentales y Magnitudes Derivadas.

Las Magnitudes Fundamentales son aquellas que no necesitan de una ecuación para su definición física, puesto que caracterizan a todos los objetos, constituyéndose en propiedad básica de su existencia (Hidalgo, 2007).

Las Magnitudes Derivadas son aquellas que como su nombre lo indica existen a partir de las magnitudes fundamentales, y representan características o fenómenos físicos que no necesariamente caracterizan a todos los objetos.

**Tabla 2.4:** Clasificación de magnitudes físicas

<b>Magnitudes Físicas</b>		
<b>Magnitudes Fundamentales</b>		
<b>Longitud</b>		$L$
<b>Masa</b>		$M$
<b>Tiempo</b>		$T$
<b>Magnitudes Derivadas</b>		
<b>Área</b>	= largo*ancho	$L^2$
<b>Volumen</b>	= largo*ancho*alto	$L^3$
<b>Densidad</b>	= masa/volumen	$ML^{-3}$
<b>Velocidad</b>	= longitud/tiempo	$LT^{-1}$
<b>Aceleración</b>	= velocidad/tiempo	$LT^{-2}$
<b>Caudal</b>	= volumen/tiempo	$L^3T^{-1}$
<b>Cantidad de movimiento</b>	= masa*velocidad	$MLT^{-1}$
<b>Fuerza</b>	= masa*aceleración	$MLT^{-2}$
<b>Presión</b>	= fuerza/superficie	$ML^{-1}T^{-2}$
<b>Momento de una fuerza</b>	= fuerza*longitud	$ML^2T^{-2}$
<b>Trabajo de Energía</b>	= fuerza*longitud	$ML^2T^{-2}$
<b>Energía por unidad de peso</b>		$L$
<b>Energía por unidad de volumen</b>		$ML^{-1}T^{-2}$
<b>Potencia</b>	= trabajo/tiempo	$ML^2T^{-3}$
<b>Peso Específico</b>	= peso/volumen	$ML^{-2}T^{-2}$
<b>Viscosidad Dinámica</b>	= tensión/gradiente de velocidad	$ML^{-1}T^{-1}$
<b>Viscosidad Cinemática</b>	= viscosidad/densidad	$L^2T^{-1}$
<b>Tensión Superficial</b>	= energía/área	$MT^{-2}$

**Fuente:** Hidalgo, 2007

En la **Tabla 2.4** se presenta una clasificación de las magnitudes de acuerdo con los objetivos de estudio de la Hidráulica. En determinados campos de la Física, se definen magnitudes adicionales dentro de las magnitudes fundamentales, por ejemplo, en Termología la temperatura.

### 2.1.6.2 HOMOGENEIDAD DIMENSIONAL

Si ( $Q$ ) representa una magnitud derivada y ( $q$ ) una magnitud fundamental podemos definir la siguiente relación funcional (Hidalgo, 2007):

$$Q=f(q_1, q_2, \dots, q_m) \quad \text{Ec. (2-4)}$$

Para que la relación se convierta en ecuación, se necesita de una constante ( $C$ ), así, la magnitud derivada ( $Q$ ) puede ser expresada por un monomio de potencias de las magnitudes fundamentales ( $q$ ), definiéndose la ecuación:

$$Q=C \cdot q_1^{a_1} \cdot q_2^{a_2} \cdot \dots \cdot q_m^{a_m} \quad \text{Ec. (2-5)}$$

Esta ecuación de dependencia monomía es válida para un universo regido por leyes de proporcionalidad. De las ( $m+1$ ) magnitudes que intervienen en **Ec. (3-11)** se puede tomar ( $m$ ) cualesquiera como magnitudes fundamentales, considerando la restante como derivada; y para todas estas relaciones el monomio ( $C$ ) es ADIMENSIONAL.

$$C=q_1^{-a_1} \cdot q_2^{-a_2} \cdot \dots \cdot q_m^{-a_m} \cdot Q \quad \text{Ec. (2-6)}$$

Se define como Dimensional de la magnitud derivada ( $Q$ ) a los exponentes  $a_1, a_2, \dots, a_m$  al que se encuentran elevados las magnitudes fundamentales. La **ecuación de dimensiones o ecuación dimensional** permite expresar la ecuación 2.2 prescindiendo de la constante ( $C$ ).

$$[Q]=[q_1^{a_1} \cdot q_2^{a_2} \cdot \dots \cdot q_m^{a_m}] \quad \text{Ec. (2-7)}$$



Es evidente que no se pueden comparar cantidades de magnitudes distintas. En cualquier ecuación todos los términos han de representar cantidades que pertenezcan a la misma magnitud, o como suele decirse, que tengan las mismas dimensiones. A esta propiedad se la conoce como **homogeneidad dimensional**

La homogeneidad dimensional establece que “Cualquier ecuación deducida analíticamente que represente un fenómeno físico y por ende una magnitud, debe dicha ecuación satisfacer cualquier sistema de unidades”, esto significa que los fenómenos naturales y las magnitudes ligados a ellos son independientes del sistema de unidades utilizados (Hidalgo, 2007).

**Tabla 2.5:** Ejemplo ecuaciones dimensionalmente homogéneas y no homogéneas.

<p><b>Ecuación dimensionalmente homogénea</b></p>	<p>Período=<math>2\pi\left(\frac{L}{g}\right)^{1/2}</math></p>	<p><math>[T]=[LT^2L^{-1}]^{1/2}</math>  <math>[T]=[T]</math></p>
<p><b>Ecuación dimensionalmente no homogénea</b></p>	<p>Período=<math>1.111(L)^{1/2}</math></p>	<p>La gravedad está en el sistema inglés (pies/s<sup>2</sup>), por lo tanto, las unidades de la constante 1.111 quedan restringidas, y la ecuación ya no es válida para cualquier sistema de unidades.</p>

**Fuente:** Vergara, 2007

### 2.1.6.3 TEOREMA DE BUCKINGHAM

Vaschy y Buckingham plantean en su análisis dimensional, una metodología conocida como el método o teorema  $\pi$ , esta metodología posibilita la simplificación del fenómeno físico al reducir el número de variables implicadas. El resultado de la aplicación del teorema  $\pi$  es un número de monomios adimensionales que

describen el fenómeno físico con menos variables que el planteamiento inicial, pero con la misma precisión.

En un fenómeno físico en el cual intervienen  $(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_m)$  variables, donde cada una de ellas son dependientes de  $(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$  magnitudes fundamentales, la función homogénea de las variables podrá expresarse como otra función homogénea de monomios  $\pi$ .

$$f(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_m) = 0 \quad \xrightarrow{\text{teorema } \pi} \quad \varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_z) = 0 \quad \text{Ec. (2-8)}$$

En la expresión **Ec. (2-8)**, cada monomio  $\pi_i$  es un producto adimensional de la forma:

$$\pi_i = Q_1^{x_{1i}} * Q_2^{x_{2i}} * Q_3^{x_{3i}} \dots Q_m^{x_{mi}} \quad \text{Ec. (2-9)}$$

El número de monomios adimensionales  $\pi$ , es igual a la diferencia entre el número de variables y el número de magnitudes fundamentales.

$$z = m - n \quad \text{Ec. (2-10)}$$

La ecuación dimensional de  $\pi_i$  es:

$$[\pi_i] = [Q_1]^{x_{1i}} [Q_2]^{x_{2i}} [Q_3]^{x_{3i}} \dots [Q_m]^{x_{mi}} \quad \text{Ec. (2-11)}$$

La ecuación dimensional **Ec. (2-11)** puede expresarse en función de las magnitudes fundamentales:

$$[\pi_i] = [q_1^{y_{11}} * q_2^{y_{21}} * q_3^{y_{31}} * \dots * q_n^{y_{n1}}]^{x_{1i}} \dots [q_1^{y_{1m}} * q_2^{y_{2m}} * q_3^{y_{3m}} * \dots * q_n^{y_{nm}}]^{x_{mi}} \quad \text{Ec. (2-12)}$$

$$[\pi_i] = [q_1]^{y_{11}x_{1i} + \dots + y_{1m}x_{mi}} * [q_2]^{y_{21}x_{1i} + \dots + y_{2m}x_{mi}} \dots [q_n]^{y_{n1}x_{1i} + \dots + y_{nm}x_{mi}}$$

Para que los parámetros  $\pi$  cumplan con la condición de ser monomios adimensionales, entonces los exponentes de cada  $q$  deben ser igual a cero:

$$\text{para } q_1: \quad y_{11}x_{1i} + \dots + y_{1m}x_{mi} = 0$$

$$\text{para } q_2: \quad y_{21}x_{1i} + \cdots + y_{2m}x_{mi} = 0$$

.

.

$$\text{para } q_n: \quad y_{n1}x_{1i} + \cdots + y_{nm}x_{mi} = 0$$

De esta manera se obtiene un sistema de ecuaciones, en el cual las únicas incógnitas son las  $(x)$ , puesto que las  $(y)$  al ser las dimensiones de las magnitudes fundamentales son conocidas. Siempre y cuando el número de variables  $(m)$  sea menor o igual que el número de magnitudes fundamentales  $(n)$ , el sistema de ecuaciones anterior será determinado.

Para resolver el sistema de ecuaciones anteriormente mencionado aplicado a un problema hidráulico resulta conveniente aplicar los siguientes puntos:

- a. Las variables serán clasificadas en tres grupos: Las que describen geoméricamente las fronteras, las que describen al flujo y las que describen al fluido
- b. Cada parámetro  $\pi$  contendrá cierto número de variables repetitivas y otra variable diferente (variable no repetitiva).
- c. Para que el sistema de ecuaciones sea determinado, el número de variables repetitivas deberá ser igual al número de magnitudes fundamentales  $(n)$ , y cada variable no repetitiva estará distribuida dentro de un parámetro  $\pi$ .
- d. Se seleccionará a una variable de cada grupo para definir las variables repetitivas, independizando así una de otra.
- e. Una variable necesaria de despejar, no se seleccionará como repetitiva.
- f. Para el planteamiento y solución del sistema de ecuaciones, las variables repetitivas conservarán su exponente  $(x)$ , mientras que las variables no repetitivas que se distribuyan deberán tener exponente igual a la unidad.

Todos los parámetros adimensionales  $\pi$  quedan definidos al encontrar los exponentes  $(x)$ . El resultado de este procedimiento ayuda en la explicación de la física del fenómeno y reduce considerablemente el número de parámetros para los ensayos, análisis y presentación de resultados.

#### 2.1.6.4 APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL- TEOREMA DE BUCKINGHAM

El análisis dimensional y el teorema de Buckingham se pueden aplicar para el estudio de diversos fenómenos físicos. La separación de caudales es un fenómeno físico hidráulico y su análisis mediante esta herramienta permite encontrar relaciones adimensionales entre las variables que intervienen en el fenómeno.

El desarrollo de estas relaciones debe obedecer a las condiciones dinámicas del movimiento y el principio de semejanza mecánica. Además, se las puede representar en ábacos que describan y faciliten la comprensión del comportamiento hidráulico al interior del separador.

En primera instancia se identificaron las variables influyentes para el caso de un separador de caudales con orificio lateral y vertedero de cresta semicircular, estas variables están organizadas en tres grupos: geométricas, de flujo y de fluido.

En segunda instancia, se filtra dentro de cada grupo, las variables que participaran de acuerdo con los siguientes criterios:

- No considerar variables que sean dependientes entre sí.
- Procurar obtener los números adimensionales de la hidráulica.
- Eliminar las variables que no influyen o que son constantes.
- Para escoger las variables repetitivas se deben seleccionar tres, cuyo determinante sea no nulo.

En la **Tabla 2.6** se identifica ocho variables  $O$  ( $r$ ) que influyen en el fenómeno de separación de caudales, tomando en cuenta que ellas se derivan de las magnitudes fundamentales ( $m$ ) que son tres: masa ( $M$ ), longitud ( $L$ ) y tiempo ( $T$ ). La cantidad de números  $\pi$  ( $\pi=r-m$ ) a determinar es cinco.

Además, de cumplir con los criterios de selección se propició que las variables presenten versatilidad para su aplicación, así, el caudal unitario  $q_c$  permite tener una aplicación a cualquier ancho de colector de entrada. Las variables que intervinieron en el análisis son:

**Tabla 2.6:** Variables que intervienen en análisis dimensional

<b>VARIABLES QUE INTERVIENEN EN LA ESTRUCTURA PE36A</b>			
<b>Variable</b>	<b>Denominación</b>	<b>Simbología</b>	<b>Dimensión</b>
<b>Geométrica</b>	Ancho orificio lateral	a	L
	Altura del dique transversal	w	L
	Calado de aproximación	$h_m$	L
<b>Cinemáticas</b>	Caudal unitario combinado	$q_c$	$L^2/T$
	Caudal derivado/sanitario	$Q_s$	$L^3/T$
	Gravedad	g	$L/T^2$
	Velocidad de aproximación	V	$L/T$
<b>Dinámicas</b>	Densidad	$\rho$	$M/L^3$

Fuente: Autores

La **Ec. (2-13)** es la función homogénea de las variables que intervienen en el análisis:

$$f(a, w, h_m, q_c, Q_s, g, V, \rho) = 0 \quad \text{Ec. (2-13)}$$

Siguiendo el Teorema de Buckingham, la función homogénea **Ec. (2-13)** se transforma en:

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5) = 0 \quad \text{Ec. (2-14)}$$

Las variables que se seleccionan como repetitivas son:  $q_c, h_m, \rho$ . Por lo tanto, la matriz característica que se plantea se muestra en la Tabla 2.7

**Tabla 2.7:** Matriz característica – separador de caudales

<b>MATRIZ CARACTERÍSTICA</b>			
<b>NOTACIÓN</b>	<b>DIMENSIÓN</b>		
	<b>L</b>	<b>M</b>	<b>T</b>
<b>qc</b>	2	0	-1
<b>hm</b>	1	0	0
<b>ρ</b>	-3	1	0
<b>a</b>	1	0	0
<b>w</b>	1	0	0
<b>Qs</b>	3	0	-1
<b>g</b>	1	0	-2
<b>v</b>	1	0	-1

Fuente: Autores

**Determinación de los parámetros  $\pi$** Se tiene la ecuación dimensional de  $\pi_1$ :

$$[\pi_1] = [q_c^\alpha h_m^\beta \rho^\gamma a^1] \quad \text{Ec. (2-15)}$$

**Tabla 2.8:** Determinación del parámetro  $\pi_1$ 

	<b><math>\pi_1</math></b>			
	<b><math>q_c^\alpha</math></b>	<b><math>h_m^\beta</math></b>	<b><math>\rho^\gamma</math></b>	<b><math>a^1</math></b>
<b>L</b>	2	1	-3	1
<b>M</b>	0	0	1	0
<b>T</b>	-1	0	0	0

<b><math>\alpha</math></b>	0
<b><math>\beta</math></b>	-1
<b><math>\gamma</math></b>	0

$$\pi_1 = \frac{a}{h_m} \quad \text{Ec. (2-16)}$$

Para  $\pi_2$  la ecuación dimensional sería:

$$[\pi_2] = [q_c^\alpha h_m^\beta \rho^\gamma w^1] \quad \text{Ec. (2-17)}$$

**Tabla 2.9:** Determinación del parámetro  $\pi_2$

	$\pi_2$			
	$q_c^\alpha$	$h_m^\beta$	$\rho^\gamma$	$w^1$
L	2	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	0

$\alpha$	0
$\beta$	-1
$\gamma$	0

$$\pi_2 = \frac{w}{h_m} \quad \text{Ec. (2-18)}$$

En el caso de  $\pi_3$  la ecuación dimensional sería:

$$[\pi_3] = [q_c^\alpha h_m^\beta \rho^\gamma Q_s^1] \quad \text{Ec. (2-19)}$$

**Tabla 2.10:** Determinación del parámetro  $\pi_3$

	$\pi_3$			
	$q_c^\alpha$	$h_m^\beta$	$\rho^\gamma$	$Q_s^1$
L	2	1	-3	3
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	-1

$\alpha$	-1
$\beta$	-1
$\gamma$	0

$$\pi_3 = \frac{Q_s}{q_c h_m} \quad \text{Ec. (2-20)}$$

La ecuación dimensional para  $\pi_4$ :

$$[\pi_4] = [q_c^\alpha h_m^\beta \rho^\gamma g^1] \quad \text{Ec. (2-21)}$$

**Tabla 2.11:** Determinación del parámetro  $\pi_4$

$\pi_4$				
	$q_c^\alpha$	$h_m^\beta$	$\rho^\gamma$	$g^1$
L	2	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	-2

$\alpha$	-2
$\beta$	3
$\gamma$	0

$$\pi_4 = \frac{g h_m^3}{q_c^2} \quad \text{Ec. (2-22)}$$

Para  $\pi_5$  la ecuación dimensional sería:

$$[\pi_5] = [q_c^\alpha h_m^\beta \rho^\gamma v^1] \quad \text{Ec. (2-23)}$$

**Tabla 2.12:** Determinación del parámetro  $\pi_5$

$\pi_5$				
	$q_c^\alpha$	$h_m^\beta$	$\rho^\gamma$	$v^1$
L	2	1	-3	1
M	0	0	1	0
T	-1	0	0	-1

$\alpha$	-1
$\beta$	1
$\gamma$	0

$$\pi_5 = \frac{h_m v}{q_c} \quad \text{Ec. (2-24)}$$



Entonces se establece la función que relaciona los cinco monomios adimensionales:

$$0=f\left(\frac{a}{h_m}, \frac{w}{h_m}, \frac{Q_s}{q_c \cdot h_m}, \frac{h_m^3 g}{q_c^2}, \frac{V \cdot h_m}{q_c}\right) \quad \text{Ec. (2-25)}$$

El número adimensional  $\pi_4$  puede expresarse como el coeficiente de descarga del orificio lateral ( $C_q$ ) de tal manera que:

$$\frac{1}{\pi_4} \times \pi_3^2 = \frac{Q_s^2}{h_m^5 g} = \frac{Q_s}{\sqrt{h_m^5 g}} = \pi_4 \quad \text{Ec. (2-26)}$$

Además, número adimensional  $\pi_3$  se puede expresar en función del porcentaje de derivación y la geometría por medio de la multiplicación aritmética con el número  $\pi_2$ .

$$\pi_3 \times \frac{1}{\pi_2} = \frac{Q_s}{q_c w} = \frac{Q_s \cdot B}{Q_c \cdot w} = \pi_3 \quad \text{Ec. (2-27)}$$

De la misma manera se puede expresar el número adimensional  $\pi_5$  como el número de Froude, multiplicándolo por  $\pi_4$ .

$$\pi_5^2 \times \frac{1}{\pi_4} = \frac{V^2 h_m^2}{q_c^2} \times \frac{q_c^2}{h_m^3 g} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot h_m}} = \pi_5 \quad \text{Ec. (2-28)}$$

Reemplazando las ecuaciones **Ec. (2-26)**, **Ec. (2-27)**, **Ec. (2-28)** en la **Ec. (2-25)** se obtiene la relación entre los números adimensionales, despejando el coeficiente de descarga  $C_q$  se tiene:

$$C_q = f\left(\frac{a}{h_m}, \frac{w}{h_m}, \frac{Q_s B}{Q_c w}, \frac{V}{\sqrt{g \cdot h_m}}\right) \quad \text{Ec. (2-29)}$$

De acuerdo con esta expresión, el coeficiente de descarga de el orificio lateral de separación es función del número adimensional  $Q_s B / Q_c w$ , de su geometría y de las características del flujo de aproximación (número de Froude).

La representación en ábacos de las posibles relaciones entre los parámetros según la **Ec. (2-29)** se la realizó priorizando su aplicabilidad.

## 2.1.7 TEORÍA DE SEMEJANZA MECÁNICA

La teoría de la semejanza mecánica es la base conceptual mediante la cual se justifica el hecho de que un modelo físico construido a escala represente al comportamiento de un fenómeno físico real. La utilidad de la teoría de la semejanza mecánica presenta un amplio marco conceptual para diversos “MEDIOS CONTINUOS” y “CAMPOS FÍSICOS”. Para esta investigación el medio continuo es el agua y el campo físico es la hidráulica (Hidalgo, 2007).

### 2.1.7.1 SIMILITUD MECÁNICA

La similitud entre el fenómeno a escala real (prototipo) y el fenómeno escalado (modelo físico) implica la verificación de las similitudes geométrica, cinemática y dinámica (Kobus, 1980).

La *Similitud Geométrica* se consigue cuando todas las dimensiones geométricas en modelo presentan una relación constante a sus correspondientes dimensiones geométricas en prototipo.

$$r_L = \frac{L_p}{L_m}$$

**Ec. (2-30)**

Donde:

$r_L$ : Relación entre magnitudes geométricas.

$L_p$ : Magnitudes geométricas prototipo [m].

$L_m$ : Magnitudes geométricas modelo [m].

La *Similitud Cinemática* se obtiene cuando los fenómenos hidráulicos dependientes del tiempo suscitados en modelo físico presenten una relación constante a los intervalos de tiempo ocurridos en prototipo.

$$r_V = \frac{V_p}{V_m} \quad \text{Ec. (2-31)}$$

Donde:

$r_V$ : Relación entre magnitudes cinemáticas.

$V_p$ : Magnitudes cinemáticas prototipo [m/s<sup>2</sup>].

$V_m$ : Magnitudes cinemáticas modelo [m/s<sup>2</sup>].

La *Similitud Dinámica* establece que las fuerzas en el prototipo y en el modelo deben mostrar una relación constante.

$$r_F = \frac{F_p}{F_m} \quad \text{Ec. (2-32)}$$

Donde:

$r_F$ : Relación entre magnitudes dinámicas.

$F_p$ : Magnitudes dinámicas prototipo [N\*m/s<sup>2</sup>].

$F_m$ : Magnitudes dinámicas modelo [N\*m/s<sup>2</sup>].

Asegurar la similitud dinámica es necesaria para asegurar que en la similitud geométrica los eventos dependientes del tiempo sean cinemáticamente similares. Por lo tanto, la clave para conseguir que el fenómeno hidráulico pueda ser reproducido en un modelo a escala, es asegurar la similitud dinámica.

### 2.1.7.2 SEMEJANZA HIDRÁULICA

La aplicación del análisis dimensional a un fenómeno hidráulico, considerando todas las magnitudes físicas que en este intervienen, permite obtener una relación matemática fundamental conocida como la ecuación general de la hidráulica.

En las tablas **Tabla 2.13** se detalla las magnitudes que son consideradas para obtener la ecuación general de la hidráulica. Las fuerzas son representadas por una magnitud representativa

**Tabla 2.13:** Magnitudes geométricas y cinemáticas que intervienen en la ecuación general de la hidráulica

Magnitudes Geométricas	Magnitudes Cinemáticas
a → Largo	V → Velocidad
b → Ancho	
c → Profundidad	
d → Longitud Característica	

**Fuente:** Autores

**Tabla 2.14:** Magnitudes dinámicas que intervienen en la ecuación general de la hidráulica

Magnitudes Dinámicas	
Fuerza	Magnitud representativa
Fuerzas Internas (Fuerzas debido a la presión)	$\Delta p \rightarrow$ Variación de presión
Fuerzas Externas (Fuerzas debido a la gravedad)	$\gamma \rightarrow$ Peso específico
Fuerzas Elásticas	E → Módulo de elasticidad
Fuerzas Viscosas	$\mu \rightarrow$ Viscosidad dinámica
Fuerzas de Tensión Superficial	$\sigma \rightarrow$ Tensión superficial
Fuerza de Inercia	$\rho \rightarrow$ Densidad o masa específica

**Fuente:** Autores

La ecuación **Ec. (2-33)**, conocida como la ecuación general de la hidráulica describe el fenómeno hidráulico tanto en modelo como en prototipo.

$$V = \phi \left( \frac{d}{a}, \frac{d}{b}, \frac{d}{c}, \frac{V^2}{\frac{\gamma}{\rho} d}, \frac{V \cdot d}{\frac{\mu}{\rho}}, \frac{V^2 \cdot d}{\frac{\sigma}{\rho}}, \frac{V^2}{\frac{E}{\rho}} \right) \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad \text{Ec. (2-33)}$$

Los cuatro términos finales dentro de la función  $\phi$  se los denomina como números de Froude, Reynolds, Weber y Cauchy; introducen en la ecuación general de la

hidráulica la influencia de la dinámica de las acciones del peso, viscosidad, tensión superficial y elasticidad, en relación con la fuerza de inercia y que en su conjunto caracterizan el fluido y campo real.

$$V = \phi \left( \frac{d}{a}, \frac{d}{b}, \frac{d}{c}, Fr, Re, W, M \right) \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad \text{Ec. (2-34)}$$

Matemáticamente el fenómeno está condicionado por la función  $\phi$ , es decir por la influencia de la geometría y las fuerzas que actúan (gravitacionales, viscosas, tensión superficial, elásticas, y debido a la presión). La mayor o menor relevancia que tenga una determinada fuerza incide en el tipo de régimen que se establece y en el comportamiento particular inercial que presenta el movimiento.

Así, la ecuación representa el fenómeno tanto en modelo como en prototipo.

$$V_p = \phi_p \left( \frac{d_p}{a_p}, \frac{d_p}{b_p}, \frac{d_p}{c_p}, Fr_p, Re_p, W_p, M_p \right) \sqrt{\frac{\Delta p_p}{\rho_p}} \quad \text{Ec. (2-35)}$$

$$V_m = \phi_m \left( \frac{d_m}{a_m}, \frac{d_m}{b_m}, \frac{d_m}{c_m}, Fr_m, Re_m, W_m, M_m \right) \sqrt{\frac{\Delta p_m}{\rho_m}} \quad \text{Ec. (2-36)}$$

Elevando al cuadrado y dividiendo las ecuaciones **Ec. (2-35)** y **Ec. (2-36)**

$$\frac{V_p^2}{V_m^2} = \frac{\phi_p^{2*} \frac{F_p^* L_p}{M_p}}{\phi_m^{2*} \frac{F_m^* L_m}{M_m}} = \frac{\phi_p^2}{\phi_m^2} * \frac{e_F^* e_L}{e_M} \quad \text{Ec. (2-37)}$$

$$\frac{e_L^2}{e_T^2} = \frac{\phi_p^2}{\phi_m^2} * \frac{e_F^* e_L}{e_M} \quad \text{Ec. (2-38)}$$

Despejando  $e_F$  de la ecuación **Ec. (2-38)**

$$e_F = \frac{\phi_m^2}{\phi_p^2} e_M \frac{e_L}{e_T^2} \quad \text{Ec. (2-39)}$$

La ecuación **Ec. (2-39)** es la ecuación de la dinámica de Newton, esto quiere decir que se alcanza la semejanza mecánica si  $\phi_p = \phi_m$ , condición que exige la igualdad en los números de Froude, Reynolds, Weber y Mach. Esta condición implica que el único modelo semejante al prototipo resulta ser el mismo prototipo (semejanza perfecta) (Hidalgo, 2007)

### 2.1.8 SIMILITUD DINÁMICA RESTRINGIDA

Una escala geométrica diferente de 1, induce en el modelo desviaciones que se las conoce como “efectos de escala” y que serán sujetos de análisis posteriormente. La teoría sobre modelos hidráulicos tiene como objetivo principal que las desviaciones en la semejanza mecánica sean mínimas en los sistemas semejantes que se propongan.

Al no poder alcanzar la similitud hidráulica perfecta, se tratará de alcanzar una similitud restringida o particular, pudiéndose establecer en principio las siguientes:

**Tabla 2.15:** Similitud restringida según el tipo de fuerza predominante

FUERZA PREDOMINANTE	IDENTIDAD	SIMILITUD PARTICULAR	TIPO DE MODELO
$F_g$ gravitacional	$Fr_p = Fr_m$	Froude	Froudiano
$F_\mu$ viscosa	$Re_p = Re_m$	Reynolds	Viscoso
$F_\sigma$ tensión superficial	$W_p = W_m$	Weber	-----
$F_E$ elástica	$Ma_p = Ma_m$	Mach	Elástico
$F_g, F_\mu$	$Fr_p = Fr_m,$ $Re_p = Re_m$	Froude- Reynolds	Gravico- Viscoso

**Fuente:** Hidalgo, 2007

Es así como se intenta alcanzar la fuerza más preponderante en el fenómeno hidráulico y representarla en modelo a través de la identidad de uno solo de los parámetros  $Fr$ ,  $Re$ ,  $W$ ,  $Ma$

### 2.1.8.1 SIMILITUD RESTRINGIDA DE FROUDE

La similitud restringida de Froude es aplicable en fenómenos hidráulicos en los cuales predominan las fuerzas gravitacionales, es decir cuando la función  $\phi$  dependa solo de la geometría del contorno y del número de Froude, de esta manera ese desprecia el efecto de las demás fuerzas (Kobus, 1980).

En este caso se tiene que identificar la identidad entre el número de Froude en prototipo y en modelo.

$$\frac{Fr_p}{Fr_m} = 1 \quad \text{Ec. (2-40)}$$

$$\frac{Fr_p^2}{Fr_m^2} = \frac{\frac{V_p^2}{\left(\frac{\gamma}{\rho}\right)_p d_p}}{\frac{V_m^2}{\left(\frac{\gamma}{\rho}\right)_m d_m}} = \frac{V_p^2}{V_m^2} * \frac{1}{\left(\frac{\gamma}{\rho}\right)_p} * \frac{1}{\frac{d_p}{d_m}} \quad \text{Ec. (2-41)}$$

En función de las escalas:

$$1 = e_V^2 * \frac{1}{e_{\left(\frac{\gamma}{\rho}\right)}} * \frac{1}{e_L} = \frac{e_L^2}{e_T^2} * \frac{1}{e_{\left(\frac{\gamma}{\rho}\right)}} * \frac{1}{e_L} \quad \text{Ec. (2-42)}$$

Despejando la escala de tiempo:

$$e_T = \frac{e_L^{(1/2)}}{e_{\left(\frac{\gamma}{\rho}\right)}^{(1/2)}} \quad \text{Ec. (2-43)}$$

Si consideramos que en modelo como en prototipo se trabaja con el mismo fluido (agua) entonces  $\rho_p = \rho_m$ , además tomando en cuenta que nos encontramos dentro del mismo campo gravitatorio para el modelo y el prototipo  $g_p = g_m$ , así la escala de tiempo se expresa:

$$e_T = e_L^{(1/2)} \quad \text{Ec. (2-44)}$$

Con esta relación podemos obtener las siguientes reglas para las escalas. Las magnitudes físicas se resumen en el cuadro que se presenta a continuación.

**Tabla 2.16:** Relación entre escalas de las diferentes magnitudes según la similitud restringida de Froude.

<b>Magnitud</b>	<b>Similitud restringida de Froude</b>
Longitud	$e_L$
Tiempo	$e_L^{(1/2)}$
Velocidad	$e_L^{(1/2)}$
Aceleración	1
Caudal	$e_L^{(5/2)}$
Presión	$e_L$
Energía	$e_L^4$
Presión	$e_L^3$

**Fuente:** Autores

### 2.1.8.2 EFECTOS DE ESCALA

La única forma de alcanzar completamente la semejanza mecánica implicaría la igualdad entre el modelo y el prototipo en los números de Froude, Reynolds, Weber y Match; es decir el único modelo semejante al prototipo resulta ser el mismo prototipo. Es por esta razón que para el planteamiento de un modelo físico se analiza cual sería la fuerza predominante, y así acogerse a una similitud restringida (Froude, Reynolds, Weber o Match).

Al optar por una similitud restringida en vez de la completa semejanza mecánica, pueden aparecer los “efectos de escala” debido a que existen fuerzas que cobran importancia dependiendo de la escala adoptada. Los efectos de escala, generalmente son producidos por las fuerzas moleculares que son insignificantes en prototipo, pero por la reducción de dimensiones son relevantes en modelo. Estas fuerzas moleculares se derivan de los efectos de Reynolds (fuerzas viscosas) y de los de tensión superficial (capilaridad). Es por ello que, para el diseño del



modelo, se enuncian a continuación aspectos que se deben tomar en cuenta para evitar o minimizar los efectos de escala.

Los efectos de las fuerzas viscosas se reducen cuando:

- Se garantiza un flujo con turbulencia totalmente desarrollada, es decir números de Reynolds mayores a  $2 \times 10^4$  que se encuentren en zona turbulenta, asegurando así que el efecto de las fuerzas gravitacionales es más importante que el de la viscosidad.
- No exista una variación apreciable entre los coeficientes de fricción de modelo y prototipo, para ello se necesita que el modelo sea hidráulicamente más liso que el prototipo.

Los efectos de las fuerzas de tensión superficial se reducen cuando:

- Las profundidades del modelo sean mayores a 2cm, o a su vez cubrir de una capa jabonosa a los contornos. Esto reduciría las fuerzas intermoleculares que producen capilaridad entre los contornos del modelo con el fluido.

Para evaluar el efecto conjunto de la tensión superficial y la viscosidad Ranga Raju propuso una relación desarrollada experimentalmente para vertederos:

$$Re^{0.2}We^{0.6} > 900 \qquad \text{Ec. (2-45)}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

We: Número de Weber

Estas recomendaciones no pueden ser siempre verificadas, por lo que se reduce la veracidad de los resultados cuantitativos, permitiendo que solo se usen como referencia las características cualitativas del modelo para inferir sobre el prototipo. En general, los efectos de viscosidad y la tensión superficial se reducen cuando los números de Weber y Reynolds son significativamente grandes.

## CAPÍTULO 3

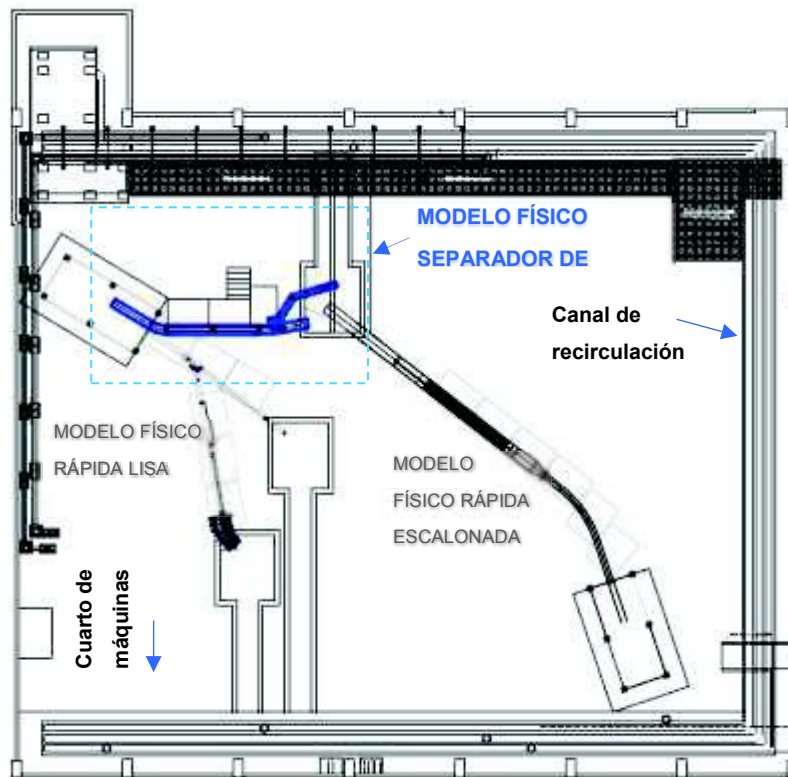
### MODELO FÍSICO CON DISEÑO ORIGINAL: CONSTRUCCIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN.

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

La construcción y el montaje de estructura analizada se realizó en el laboratorio del Centro de Investigación en Recursos Hídricos CIERHI de la Escuela Politécnica Nacional. Laboratorio que cuenta sistemas de impulsión y recirculación en un área experimental de 1200m<sup>2</sup>. La capacidad conjunta de sus cuatro bombas centrifugas alcanzan los 800 l/s, lo que le permite abastecer con holgura a diferentes tipos modelos hidráulicos.

La **figura 3.1** muestra la ubicación del separador de caudales en el laboratorio.

**Figura 3-1:** Ubicación del separador de caudales en el área de experimentación del laboratorio del CIERHI



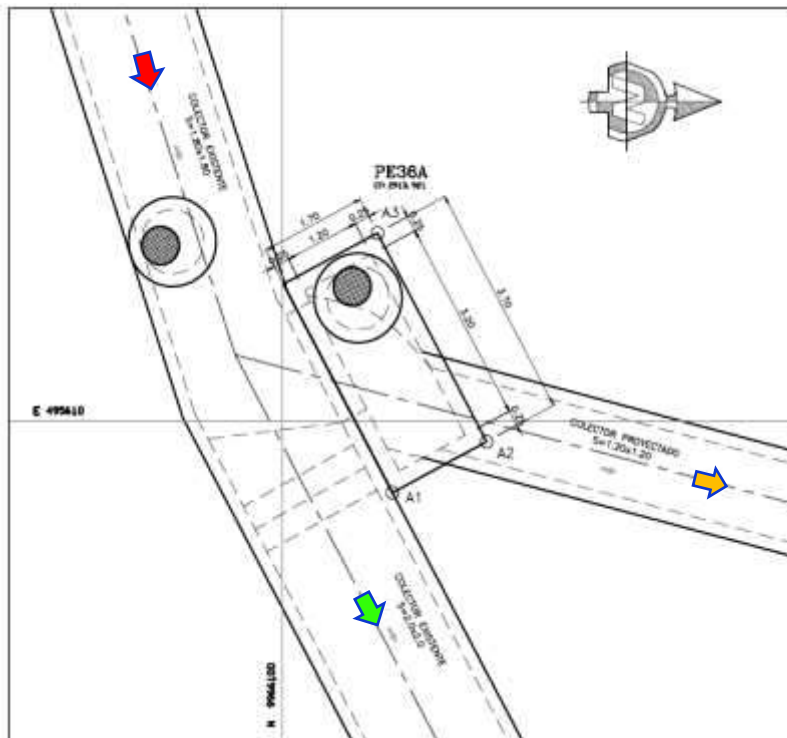
Fuente: Autores

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO ORIGINAL DEL SEPARADOR DE CAUDALES.

La geometría del diseño original descrito a continuación es la que consta en la memoria técnica y planos del Proyecto "Caupicho, quebrada, evaluación y diseños complementarios, interceptores, Parroquia Turubamba "

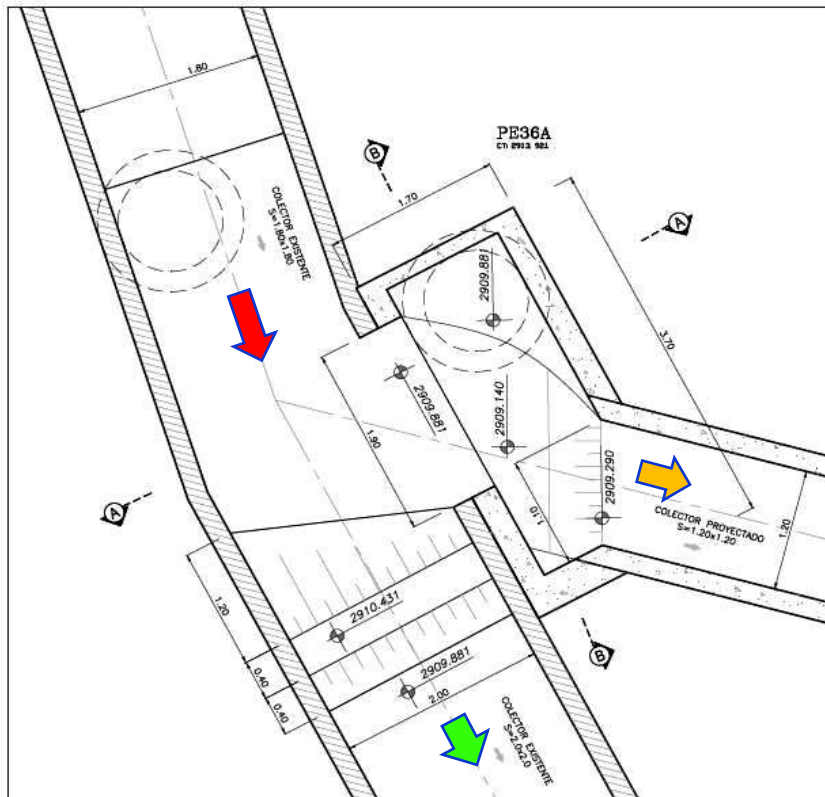
Como tal el separador de caudales cuenta con un canal combinado de aproximación de sección 1.80m x 1.80m y 2.87% de pendiente longitudinal. En la zona de separación (al final del canal combinado) se sitúan: un umbral transversal trapezoidal de 0.6 m de alto x 2.0m de ancho y hacia la margen izquierda un orificio de 0.6m de alto x 1.9 m de ancho que descarga en el canal sanitario de sección 1.2m x 1.2m y pendiente del 1%. Finalmente, a continuación del umbral inicia el canal de descarga hacia el cuerpo hídrico, denominado canal pluvial de sección 2.0m x 2.0m y 0.47% de pendiente longitudinal. La Figura 3-2, Figura 3-3, Figura 3-4,y Figura 3-5, se presenta las vistas en planta y corte del diseño original.

**Figura 3-2:** Vista en Planta del Separador de Caudales prototipo (PE36A)



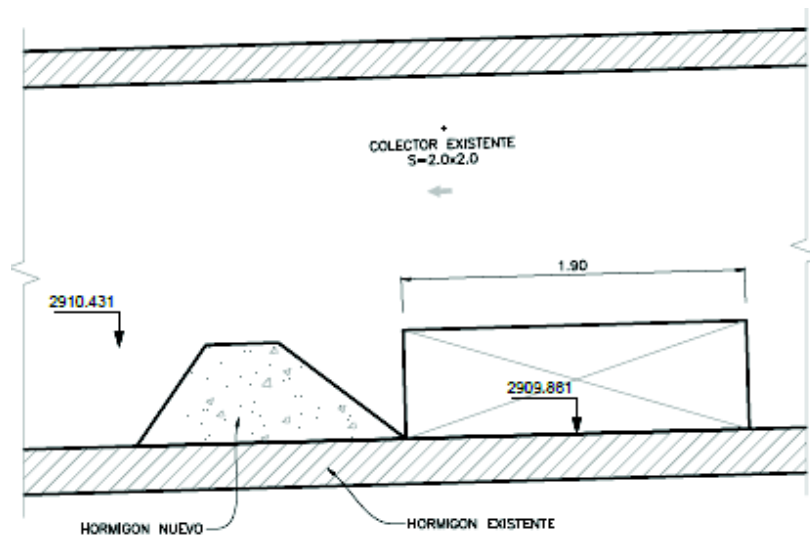
**Fuente:** plano 24 de 47 (Socasi, 2012)

**Figura 3-3:** Corte en Planta del Separador de Caudales prototipo (PE36A)



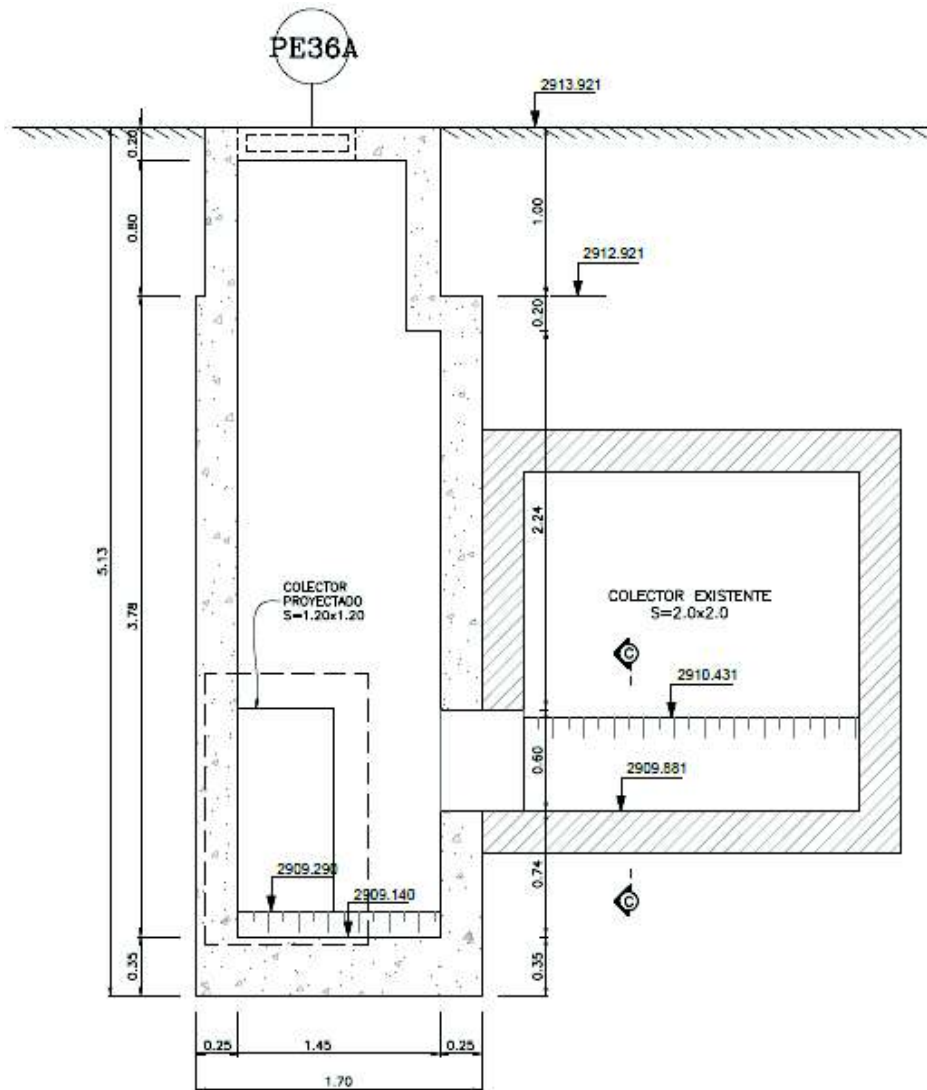
**Fuente:** plano 24 de 47 (Socasi, 2012)

**Figura 3-4:** Corte Longitudinal del Separador de Caudales prototipo (PE36A)



**Fuente:** plano 24 de 47 (Socasi, 2012)

**Figura 3-5:** Corte Transversal del Separador de Caudales prototipo (PE36A)



**Fuente:** plano 24 de 47 (Socasi, 2012).

A través del orificio - vertedero lateral se deriva el caudal sanitario, para el cálculo de sus dimensiones se determinaron las condiciones de flujo en el colector combinado (1.80m x1.80m) con un caudal de diseño para un período de retorno de 25 años (5.207 m<sup>3</sup>/s). En estas condiciones el caudal de derivación hacía el colector sanitario son 2.68 m<sup>3</sup>/s (5\*0.536 m<sup>3</sup>/s), por lo tanto, para caudales inferiores a este, se prevé trabaje como vertedero y cuando el caudal de aproximación se situé entre 2.68 y 5.207 m<sup>3</sup>/s como orificio.

Para el cálculo de las dimensiones del vertedero lateral se utilizó la fórmula de vertedero:

$$Q = Co. L.ho^{1.5} \quad \text{Ec. (3-1)}$$

Donde:

Q: Caudal derivado [m<sup>3</sup>/s].

L: Longitud del vertedero [m].

ho: Altura de agua sobre el vertedero [m].

Co: Coeficiente de descarga, asumiendo un valor de 1.9 para las condiciones del caso [ ].

Y para el orificio se utilizó la fórmula:

$$Q = C. A. \sqrt{2gH} \quad \text{Ec. (3-2)}$$

Donde:

A: Área del orificio [m<sup>2</sup>].

H: Altura sobre el vertedero [m].

Co: Coeficiente de descarga, asumiendo un valor de 0.6 para las condiciones del caso [ ].

La altura del umbral trapezoidal se considera adecuada una altura menor en 5 cm a la altura del orificio-vertedero lateral. Con una altura de 0.55 m. Como se observa en la Figura 3-4. La **Tabla 3.1** contiene las dimensiones en prototipo del separador de caudales PE36A.

**Tabla 3.1:** Dimensiones en prototipo del separador de caudales PE36A

<b>SEPARADOR DE CAUDALES PE36A</b>				
<b>ESTRUCTURA</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>ANCHO</b>	<b>ALTO</b>	<b>LARGO</b>
Colector combinado	m	1.80	1.80	11.00
Colector pluvial	m	2.00	2.00	23.15
Colector sanitario	m	1.20	1.20	12.30
Separador de Caudales	m	1.20	4.58	3.20
Vertedero lateral	m	0.50	0.60	1.90

**Fuente:** Autores

En resumen, los caudales de operación de esta estructura se muestran en la **Tabla 3.2**.

**Tabla 3.2:** Información de caudales en el Separador PE36A.

<b>CAUDALES MÁXIMOS (De Diseño)</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>PROTOTIPO</b>
Caudal combinado (caudal residual + infiltración + pluvial) ( <b>Qc</b> )	l/s	5206.90
Caudal de vertido pluvial ( <b>Qvp</b> )	l/s	2525.30
Caudal de vertido sanitario ( <b>Qvs</b> )	l/s	2681.60
<b>CAUDALES MÍNIMOS</b>		
Caudal sanitario ( <b>Qs</b> )	l/s	536.30

**Fuente:** (Socasi, 2012)

### 3.3 ESCALA DEL MODELO FÍSICO

La escala apropiada para la construcción de un modelo físico cumple con las solicitudes demandadas por la ley de similitud que gobierna el fenómeno a representar. Asimismo, su selección toma en cuenta recursos disponibles para la operación del modelo y la medición de las magnitudes de interés.

Por ello, los factores a considerar son:

Teóricos:

- Similitud que gobierna el fenómeno
- Efectos de escala

Físicos y operacionales:

- Espacio disponible para la construcción y montaje del modelo
- Capacidad del sistema de abastecimiento y distribución hidráulica
- Instrumentación para mediciones
- Disponibilidad de los materiales a utilizarse
- Presupuesto de construcción

Para la construcción y estudio del modelo de físico del separador de caudales se identificaron las estructuras del prototipo necesarias para la representación de los fenómenos hidráulicos:

- Colector existente de ingreso; caudal combinado.
- Zona o cámara de separación
- Orificio-vertedero de derivación
- Colector existente de salida; caudal de descarga directa.
- Umbral o dique trapezoidal
- Colector proyectado de salida; caudal hacia la PTAR

Se propusieron tres escalas de reducción: 1:2, 1:5, 1:10. Éstas fueron analizadas tomando en cuenta las consideraciones descritas, la **Tabla 3.3** compara las magnitudes de interés para cada escala.

**Tabla 3.3:** Comparación de magnitudes de interés entre prototipo y modelo físico en diferentes posibles escalas. (continúa.)

	<b>PROTOTIPO</b>	<b>MODELO FÍSICO</b>		
<b>ESCALA</b>	<b>1:01</b>	<b>1:2</b>	<b>1:5</b>	<b>1:10</b>
<b>Factor longitud</b>	1	0.5	<b>0.2</b>	0.1
<b>Factor caudal</b>	1	5.66	<b>55.9</b>	316.23
<b>CAUDAL (l/s)</b>				
<b>QMax Colector Combinado</b>	5206.95	920.47	<b>93.14</b>	16.47
<b>QMax Colector Sanitario</b>	2686.2	474.86	<b>48.05</b>	8.49
<b>QMin Colector Sanitario en estiaje</b>	536.35	94.81	<b>9.59</b>	1.7
<b>QMax Colector Pluvial</b>	2525.3	446.41	<b>45.17</b>	7.99
<b>CALADO (m)</b>				
<b>h -combinado</b>	0.43	0.22	<b>0.09</b>	0.04
<b>h -sanitario</b>	0.57	0.28	<b>0.11</b>	0.06
<b>h-pluvial</b>	0.18	0.09	<b>0.04</b>	0.02
<b>COLECTOR EXISTENTE -INGRESO (CAUDAL COMBINADO) S= 2.82%</b>				
<b>Altura</b>	1.8	0.9	<b>0.36</b>	0.18
<b>Ancho</b>	1.8	0.9	<b>0.36</b>	0.18
<b>Longitud</b>	24	12	<b>4.8</b>	2.4

**Fuente:** Autores



**Tabla 3.3:** Comparación de magnitudes de interés entre prototipo y modelo físico en diferentes posibles escalas. (continuación.)

<b>ZONA O CÁMARA DE SEPARACIÓN S=0.47%</b>				
<b>Altura</b>	2	1	<b>0.4</b>	0.2
<b>Ancho</b>	2	1	<b>0.4</b>	0.2
<b>Longitud</b>	2.95	1.48	<b>0.59</b>	0.3
<b>ORIFICIO – VERTEDERO DE DERIVACIÓN S=0.47%</b>				
<b>Altura</b>	0.6	0.3	<b>0.12</b>	0.06
<b>Ancho</b>	0.5	0.25	<b>0.1</b>	0.05
<b>Longitud</b>	1.9	0.95	<b>0.38</b>	0.19
<b>COLECTOR EXISTENTE-SALIDA (CAUDAL DE DESCARGA DIRECTA) S=0.47%</b>				
<b>Altura</b>	2	1	<b>0.4</b>	0.2
<b>Ancho</b>	2	1	<b>0.4</b>	0.2
<b>Longitud</b>	10	5	<b>2</b>	1
<b>UMBRAL O DIQUE TRAPEZOIDAL</b>				
<b>Altura</b>	0.55	0.28	<b>0.11</b>	0.06
<b>Ancho</b>	2	1	<b>0.4</b>	0.2
<b>Longitud</b>	2	1	<b>0.4</b>	0.2
<b>COLECTOR PROYECTADO-SALIDA (CAUDAL PARA TRATAMIENTO) S=1.0%</b>				
<b>Altura</b>	1.2	0.6	<b>0.24</b>	0.12
<b>Ancho</b>	1.2	0.6	<b>0.24</b>	0.12
<b>Longitud</b>	15.65	7.83	<b>3.13</b>	1.57

**Fuente:** Autores

La escala 1:02 se descarta debido a que el caudal máximo del colector de ingreso (920.47 l/s) sobre pasa la capacidad de impulsión del laboratorio (800 l/s), sus longitudes son relativamente grandes lo que incurrirían en demanda innecesaria de material, espacio y presupuesto.

En el caso de la escala 1:10, si bien los caudales de operación se reducen considerablemente, las dimensiones del modelo no permitirían un adecuado desarrollo y estudio de los modelos a representar; teniendo calados inferiores a los recomendados para considerar despreciables los efectos de la viscosidad.

Por su parte la escala 1:5, presenta dimensiones que permiten: el desarrollo del fenómeno hidráulico con facilidades para su observación y estudio, adaptabilidad del modelo resultante a las estructuras de abastecimiento y espacio físico. Además, el rango de caudales de operación del modelo concuerda con capacidad de abastecimiento y la sensibilidad de los instrumentos de medición existentes.

Finalmente, para la construcción del modelo de separador de caudales se eligió como adecuada la escala de reducción 1:5, al mostrar mayores prestaciones en su operación y estudio del fenómeno.

De acuerdo con la ley de similitud de Froude, a la cual se rige el modelo, las magnitudes en modelo y prototipo guardan su relación en función de la escala seleccionada. La **Tabla 3.4** detalla las relaciones para este caso.

**Tabla 3.4:** Magnitudes derivadas según la ley de similitud de Froude.

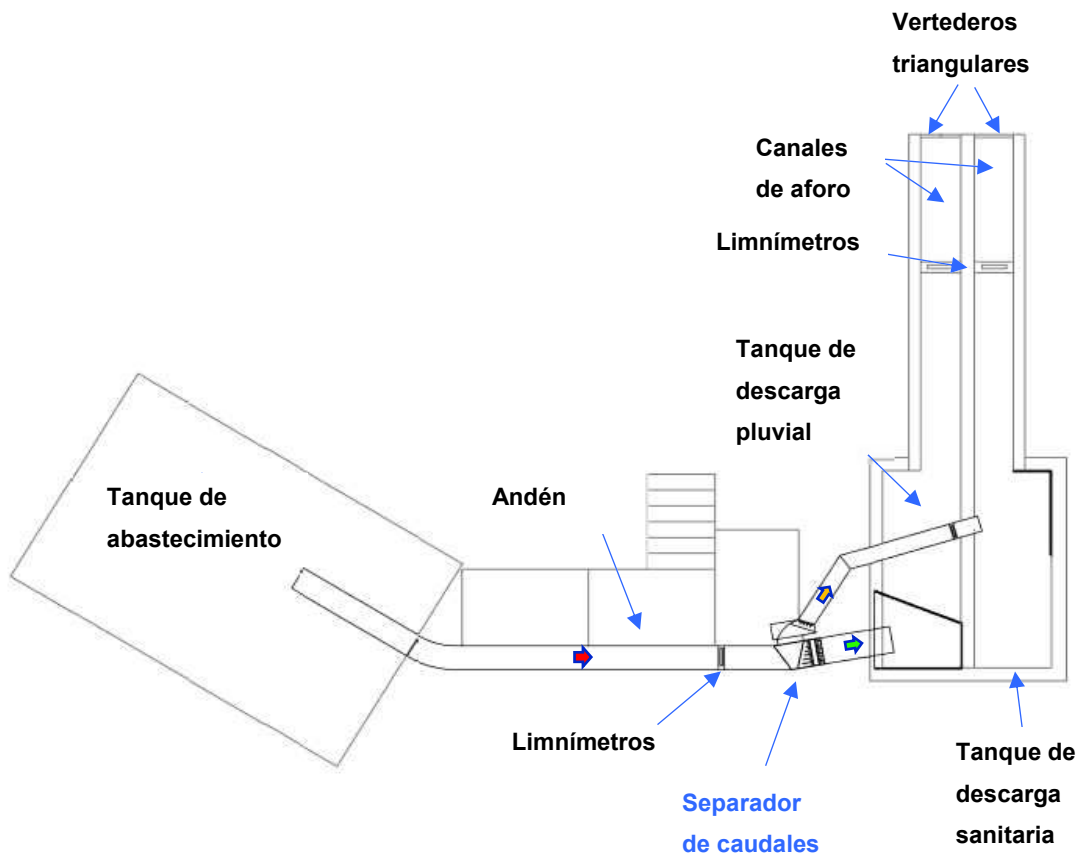
MAGNITUDES	DIMENSIÓN	ESCALA	VALOR EN PROTOTIPO	VALOR MODELO
<b>Geométricas:</b>				
Longitudes	m	5	1	0.2
Área	m <sup>2</sup>	25	1	0.04
<b>Cinemáticas:</b>				
Velocidad	m/s	5 <sup>1/2</sup>	1	0.447
Caudal	m <sup>3</sup> /s	5 <sup>5/2</sup>	10	0.179
Tiempo	s	5 <sup>1/2</sup>	1	0.447
<b>Dinámicas:</b>				
Fuerza	N	5 <sup>3</sup>	10	0.08
Energía	J	5 <sup>4</sup>	10	0.016

**Fuente:** Autores

### 3.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO FÍSICO.

Adicional a las estructuras identificadas como necesarias para la representación de los fenómenos hidráulicos (colectores de ingreso y de salida, cámara de separación donde se ubican el umbral y orificio de derivación). El modelo físico se compone por elementos que posibilitan su abastecimiento hidráulico, así como, la observación, estudio de las características del flujo y medición de las magnitudes representativas como calados y caudales. En la **Figura 3-6** se observa la ubicación de los elementos que componen el modelo físico.

**Figura 3-6:** Esquema general y elementos del modelo físico



**Fuente:** Autores

Estos elementos se pueden agrupar en tres zonas:

- Zona de ingreso al modelo hidráulico.
- Modelo del Separador de Caudales
- Zona de descarga, aforo y restitución

El modelo cuenta, además, con una estructura metálica de soporte, un andén que facilita la observación y unas pantallas auxiliares para la descarga cuya función es evitar salpicaduras o chorros fuera de los tanques de descarga.

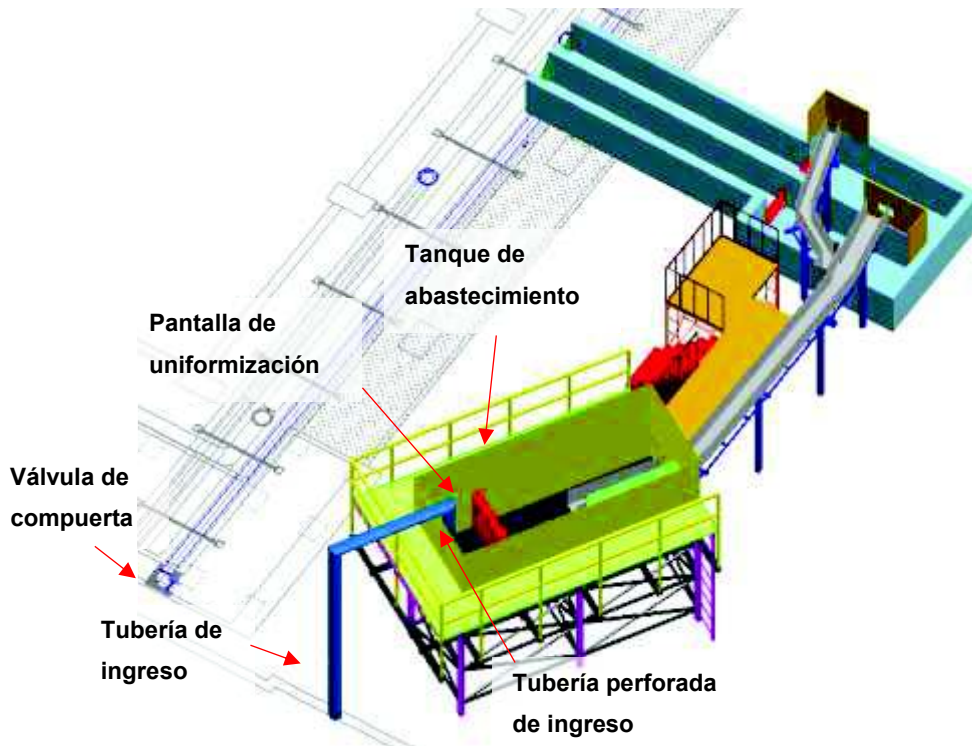
### 3.4.1 ZONA DE INGRESO DEL MODELO HIDRÁULICO

#### Tanque de Abastecimiento

El modelo se acopla a un tanque de abastecimiento metálico existente en el laboratorio del CIERHI (2.2 m de alto x 2 m ancho x 4.8m de largo). Los elementos complementarios al tanque son:

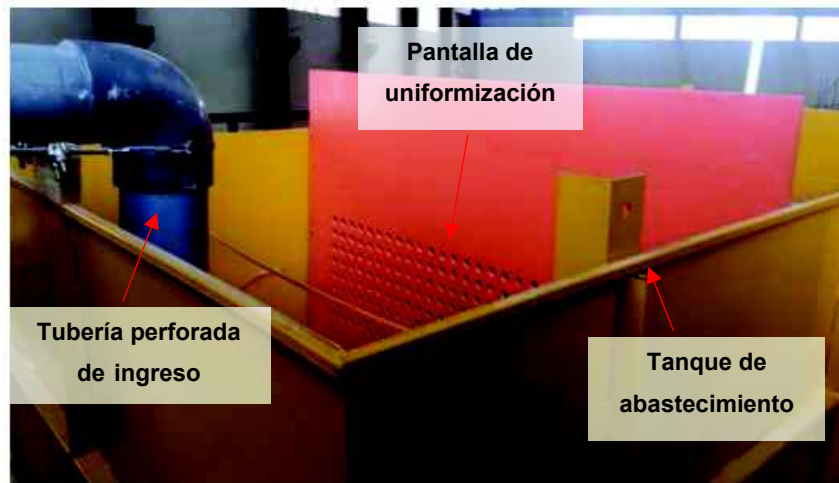
- Tubería  $\Phi$  300 mm y válvula de compuerta articulado al sistema de abastecimiento de agua del laboratorio.
- Tubería perforada de ingreso
- Pantalla de uniformización de flujo

**Figura 3-7:** Esquema 3D del modelo físico. Ubicación de los elementos que componen la zona de ingreso.



**Fuente:** Autores

**Fotografía 3-1:** Elementos de la zona de ingreso.



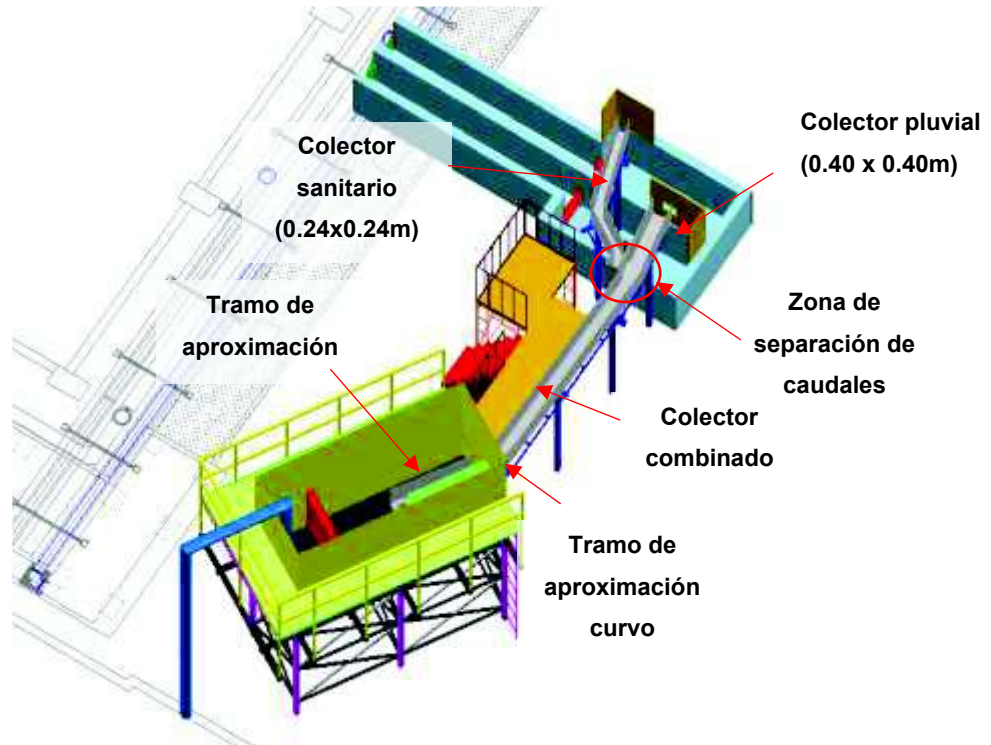
### 3.4.2 MODELO DEL SEPARADOR DE CAUDALES

El modelo cuya denominación en prototipo es pozo PE36A, tiene un área aproximada de construcción de 17.8 m<sup>2</sup> que incluyen el andén (sin contar con el área del tanque, canales de salida y aforo).

El modelo del separador de caudales propiamente fue construido en acrílico de 6 mm, exceptuando las partes removibles como los umbrales, dicho está conformado por los siguientes elementos:

1. Tramo de aproximación y colector combinado.
2. Zona de separación de caudales en cuyo interior se dispone de la transición de secciones descrita, con un orificio-vertedero lateral.
3. Umbral o dique de direccionamiento de flujo.
4. Cámara o pozo de inspección previo al colector sanitario.
5. Plataforma de inspección en el interior del pozo.
6. Tramos de salida, que a su vez corresponden al colector sanitario, a continuación de la cámara de inspección y el colector pluvial que se descarga a continuación del umbral de direccionamiento.

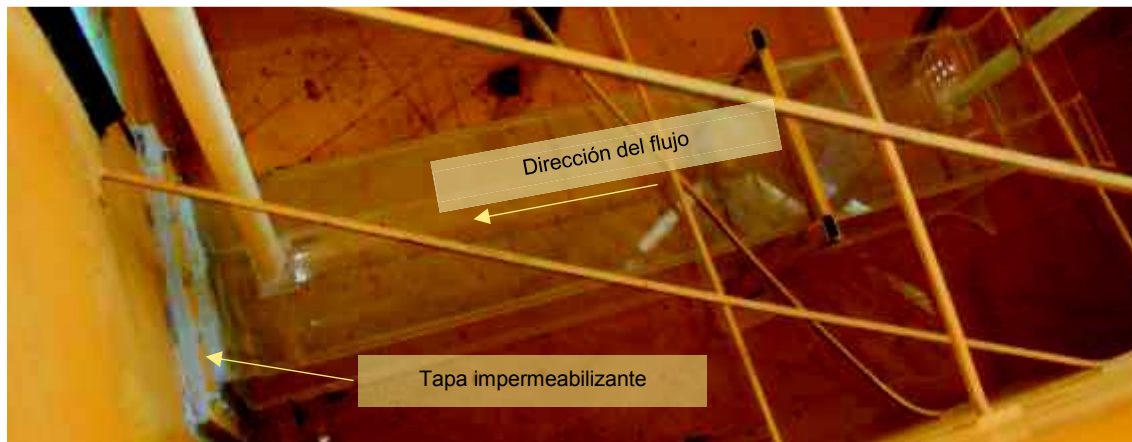
**Figura 3-8:** Esquema 3D del modelo físico. Ubicación de los elementos que componen el modelo de separador de caudales.



**Fuente:** Autores

El tramo de aproximación al interior del tanque de abastecimiento tiene una longitud de 2.0m, de sección 0.36 m x 0.36 m, coincidente con la sección del colector combinado con el cual empatará por medio de una sección curva de radios interno y externo de 1.07 m y 1.43 m, respectivamente.

**Fotografía 3-2:** Tramo de aproximación interno



Se denomina en modelo colector combinado a su equivalente en prototipo identificado como colector existente de ingreso, el cual tiene una longitud de 4.80 m de longitud con una sección de 0.36 m ancho x 0.40 m de alto y una pendiente longitudinal de 2.82%.

En todos los casos la cinta en color púrpura delimita el alto de las secciones en relación con los límites constructivos. Las paredes de los canales son mayores a las dimensiones escaladas del prototipo con la finalidad de facilitar medición de calados y evitar el derrame de agua por salpicaduras. En el colector combinado la cinta delimita un alto de 0.36 m.

**Fotografía 3-3:** Tamo de aproximación curvo

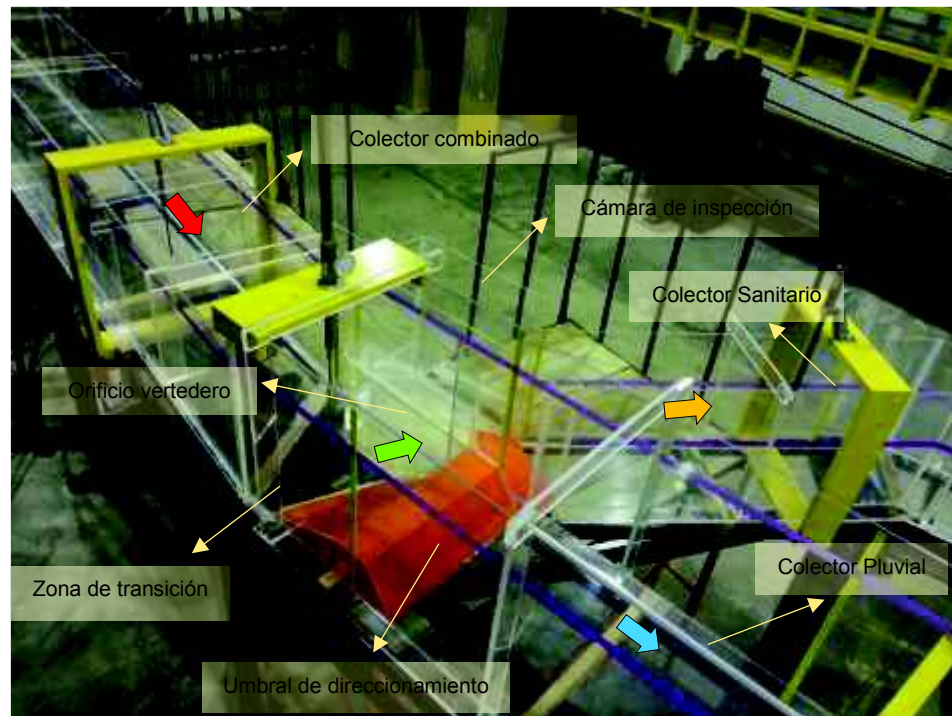


Al final del colector combinado, se encuentra el separador de caudales propiamente dicho. En esta zona se da un cambio de dirección en el eje de  $10^\circ$ , de pendiente longitudinal de 2.82% a 0.47% y un ensanchamiento de sección de 0.36m x 0.36m a 0.40 m x 0.40m al inicio del colector pluvial. El umbral de direccionamiento de flujo y el orificio -vertedero lateral situados aguas abajo del cambio de sección cumplen el objetivo de derivar parte del caudal que fluye por el colector combinado hacia el colector sanitario.

En la **Fotografía 3-4** muestra una vista general de la zona de separación, se puede observar en ella los elementos descritos.

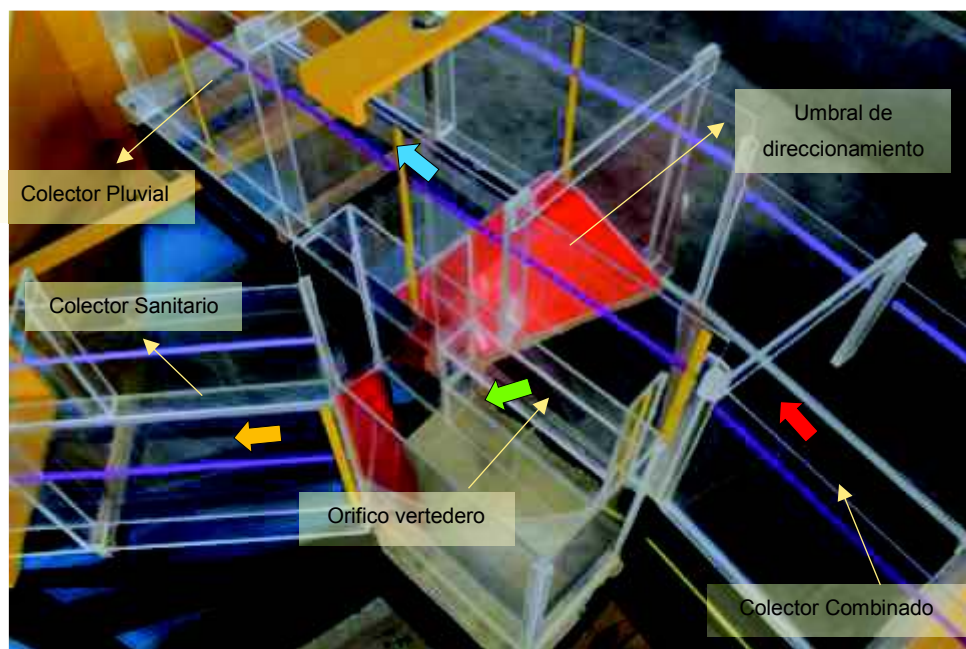


**Fotografía 3-4:** Perspectiva de la zona de separación con sus elementos.



El orificio-vertedero descarga en el pozo de revisión PE36A de donde el separador toma su nombre y, donde nace el colector sanitario de sección 0.24 m x 0.24m. El pozo cuenta con una plataforma de revisión de altura 0.12 m y un umbral de 3 cm cuya finalidad es la creación de un colchón de agua.

**Fotografía 3-5:** Vista posterior de la zona de separación y sus elementos.





### 3.4.3 ZONA DE DESCARGA, AFORO Y RESTITUCIÓN

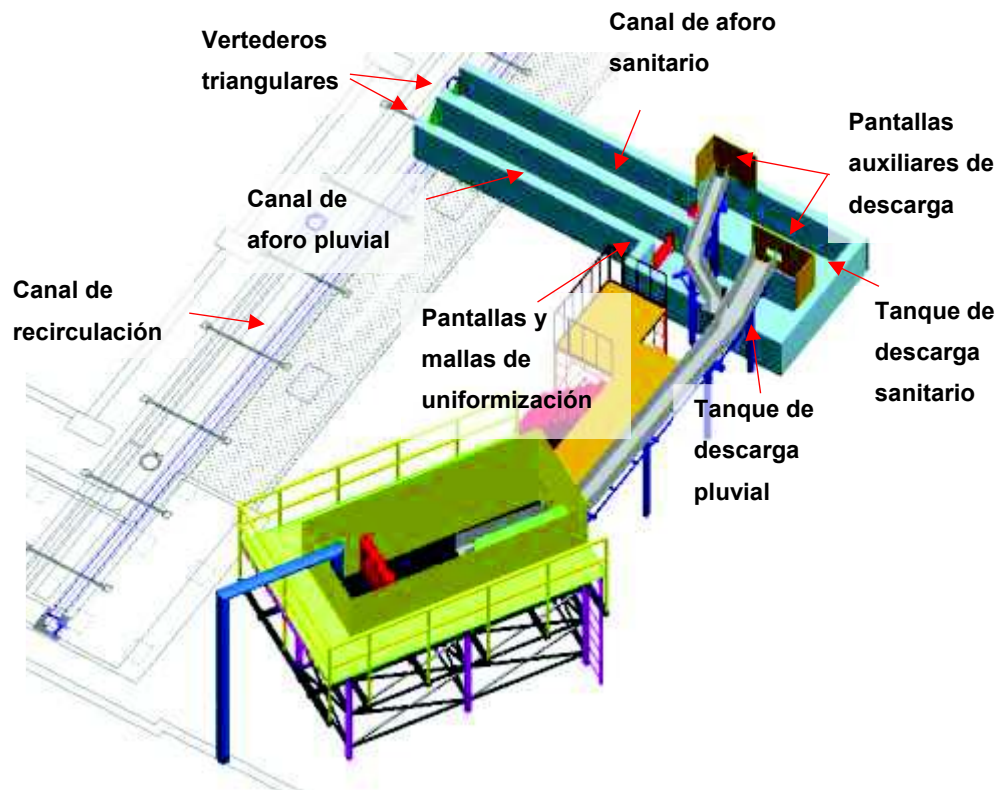
#### Tanques de descarga y canales de aforo

Se utilizan tanques y canales diferenciados para la descarga y aforo del caudal sanitario y pluvial. Estas estructuras de hormigón y mampostería fueron construidas previamente en el laboratorio del CIERHI.

A la salida de los tanques de descarga se colocó pantallas con perforaciones circulares de 2,5 cm de diámetro y mallas de uniformización, ambas con la finalidad de estabilizar el flujo y garantizar una adecuada medición de los caudales. La medición se la realizó a través de vertederos triangulares con un ángulo de 90° y limnímetros. Luego de lo cual, el flujo al canal de recirculación general.

Las pantallas auxiliares de descarga evitan pérdidas y la caída de chorros fuera de los tanques de descarga.

**Fotografía 3-6:** Esquema 3D del modelo físico. Ubicación de los elementos que componen la zona de descarga, aforo y restitución.

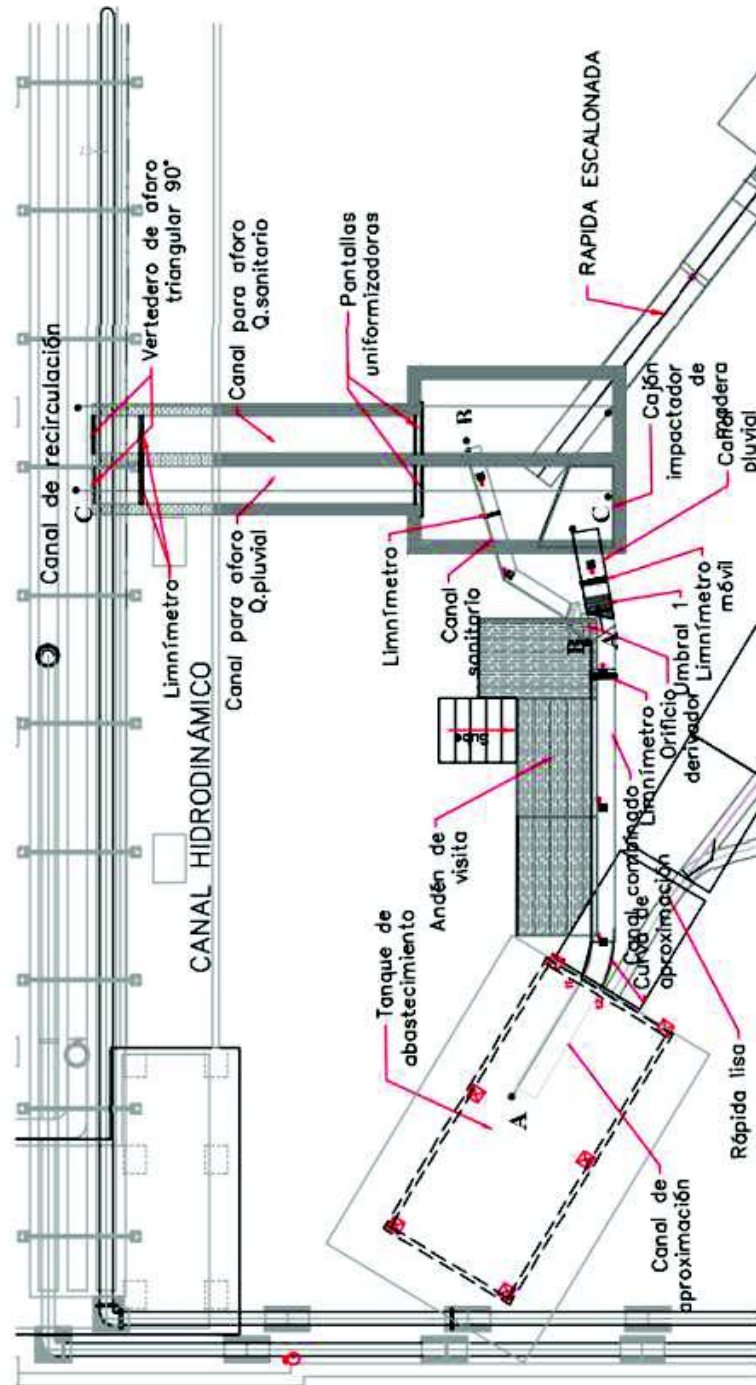


Fuente: Autores

### 3.5 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO FÍSICO A ESCALA 1:5

Los elementos que componen la totalidad del modelo físico se encuentran identificados en la Figura 3-9, Figura 3-10, Figura 3-11.

**Figura 3-9:** Esquema en planta del modelo físico de separador de caudales con sus elementos

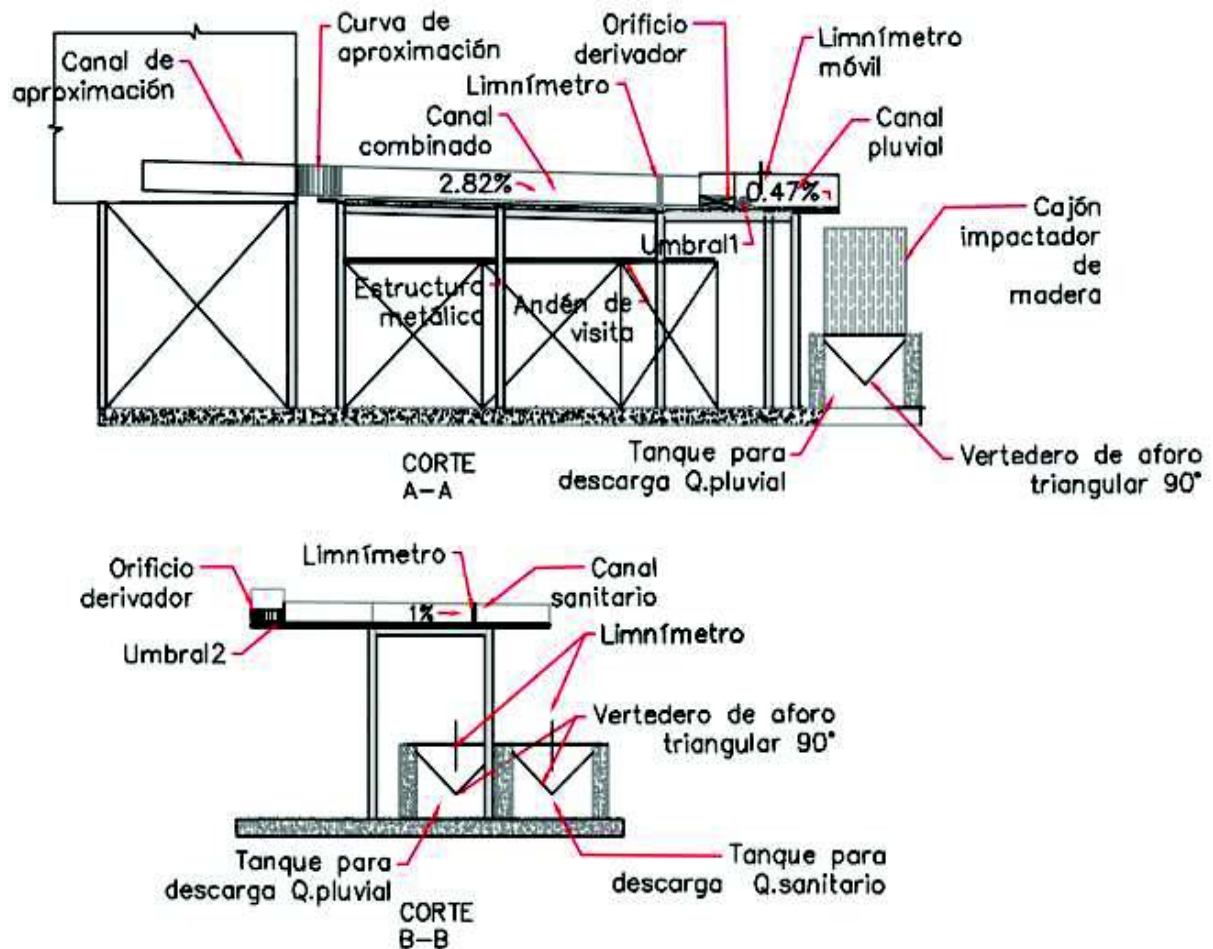


Fuente: Autores

La Figura 3-10 superior corresponde a la vista lateral del modelo, en ella se evidencia el canal combinado, el canal pluvial y el tanque de descarga. Así como la ubicación de los limnómetros.

En el caso de **Figura 3-10** inferior, se evidencia el canal sanitario desde el orificio derivador hasta el tanque para la descarga, se incluye además elementos de medición como vertederos y limnómetros.

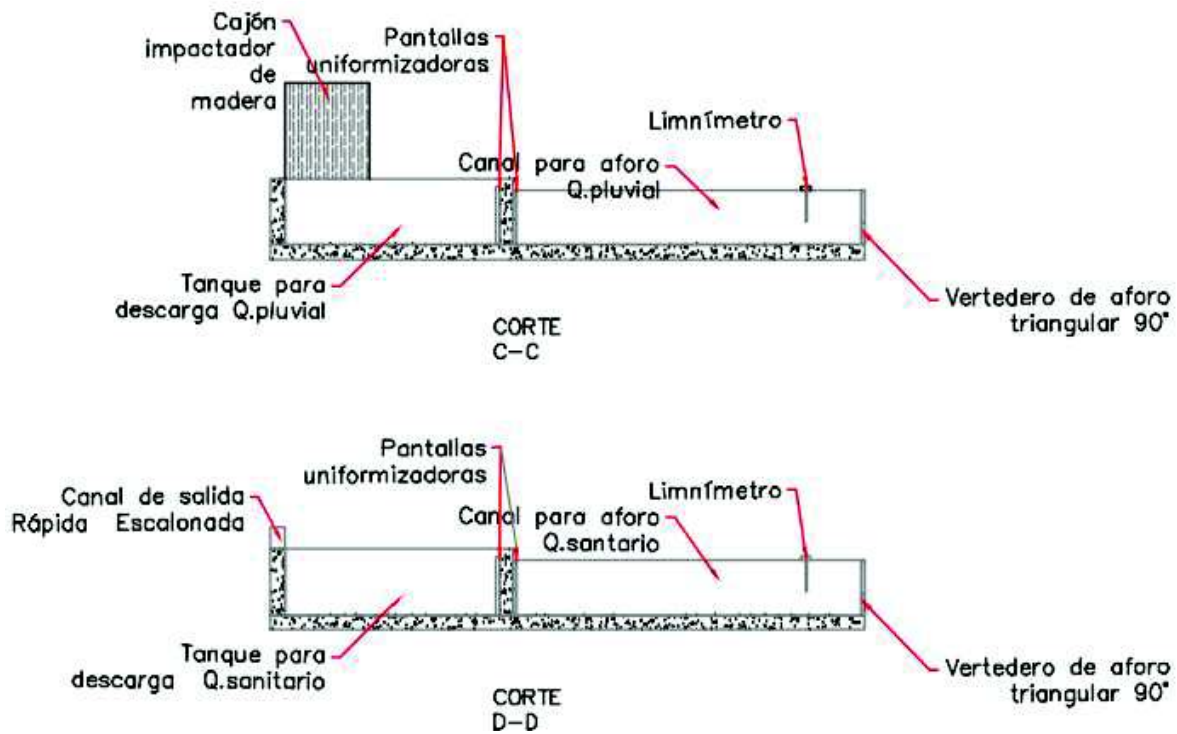
**Figura 3-10:** Cortes A-A, B-B del modelo físico con sus elementos.



**Fuente:** Autores

En **Figura 3-11** se observa los tanques de descarga y la ubicación de elementos de uniformización, aforo y medición al interior de los canales.

**Figura 3-11:** Cortes C-C, D-D Ubicación de los elementos del modelo físico



Fuente: Autores

### 3.5.1 CONFORMACIÓN DE ELEMENTOS EN ACRÍLICO

Exceptuando el tanque de ingreso, los tanques de descarga y canales de aforo existentes previamente el laboratorio del CIERHI, todos los elementos clasificados por zonas y ubicados en la **Figura 3-9**, **Figura 3-10** y **Figura 3-11**, fueron contruidos y montados según se describe de manera cronológica a continuación:

Se inicia con la elaboración de los planos del modelo a partir de los existentes del prototipo. Al ser la escala del modelo 1:5, todas las dimensiones se reducen a una quinta parte de sus similares. Entonces, se planifica la conformación del modelo por piezas por facilidad constructiva de montaje. La impresión de plantillas a la escala real de modelo contribuyó en ahorro del material y tiempo en la conformación de los colectores. Para los elementos curvos de acrílico se elaboran moldes auxiliares en madera ó yeso.

Cada plantilla sirve de guía para el trazo de las piezas en las planchas de acrílico. Luego, se corta las planchas en piezas mediante herramienta especializada para el



tipo de material. Los bordes deben ser uniformes y sin imperfecciones para asegurar un buen acople.

**Fotografía 3-7:** Corte, pegado, secado y control de las piezas de acrílico que componen los colectores del modelo del separador de caudales.



Para la conformación de las secciones curvas presentes en el tramo de aproximación y umbral de derivación, se elaboran moldes de madera o yeso, y se calientan las piezas de acrílico en un horno a  $105^{\circ}\text{C}$  para volver al acrílico maleable, se las enfría y se las prensa sobre el molde.

**Fotografía 3-8:** Calentamiento moldeado y prensa de las piezas que componen las secciones curvas del modelo de separador de caudales.



### 3.5.2 REPLANTEO

Como punto de partida previo al montaje del modelo físico se realizó el replanteo de puntos, vértices y ejes principales necesarios para una correcta ubicación de cada elemento.

**Fotografía 3-9:** Replanteo de puntos y trazado de ejes para la implantación del modelo físico.



### 3.5.3 ESTRUCTURA METÁLICA Y ZONA DE OBSERVACIÓN

Se requiere una estructura metálica rígida que brinde soporte, estabilidad y firmeza al modelo para su correcto funcionamiento y estudio. Pies y cabezas de columnas, columnas, vigas, rieles comprenden la estructura metálica.

La zona de observación la conforman andamios, tablonés de madera y pasamanos.

En la **Fotografía 3-10** se muestra el corte, esmerilado y soldado de los elementos que conforman la estructura metálica y el montaje de la misma.

**Fotografía 3-10:** Corte, esmerilado, soldado y nivelado de la estructura metálica de soporte del separador de caudales.







### 3.5.4 MONTAJE DE LOS ELEMENTOS DE ACRÍLICO

Los elementos de acrílico se colocan y pegan entre sí, siguiendo el replanteo de los ejes, sobre durmientes de madera apoyados en los rieles metálicas. Los durmientes a diferentes alturas permiten ubicar los canales con la pendiente correspondiente. La ubicación y los niveles son verificados mediante el nivel topográfico y una estación total.

Se inicia con un corte en el tanque de abastecimiento (0.36m x 0.40m) y el recubrimiento de sus bordes para evitar fugas y daños en el acrílico del canal de aproximación, el cual inicia al interior del tanque de abastecimiento. **Fotografía 3-11.**



**Fotografía 3-11:** Perforación del tanque de abastecimiento y sellado del contorno.



**Fotografía 3-12:** Montaje del canal de aproximación.



Se unen las piezas de los colectores constituyendo tramos de los mismos para facilitar su pegado y montaje sobre la estructura metálica.

**Fotografía 3-13:** Montaje del colector combinado.



**Fotografía 3-14:** Montaje de los colectores pluvial y sanitario y ubicación de las estructuras adicionales del separador de caudales.



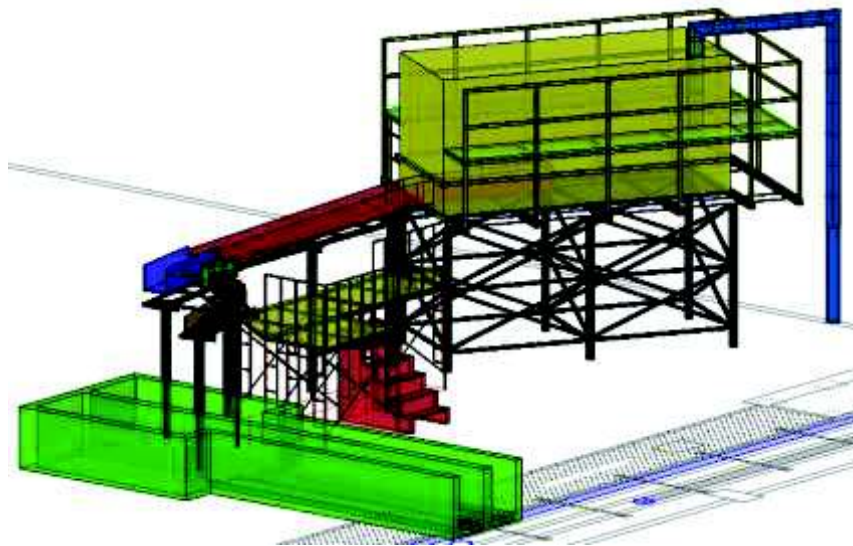


Una vez finalizado el montaje de los elementos en acrílico, se colocan umbrales, pantallas auxiliares de descarga, pantallas uniformizadoras e instrumentos fijos y móviles de medición (limnímetros). La **Fotografía 3-15** muestra el modelo físico de separador de caudales una vez finalizada la etapa de construcción en su diseño original.

**Fotografía 3-15:** Modelo físico del separador de caudales.



**Figura 3-12:** Esquema 3D del modelo físico de separado de caudales



**Fuente:** Autores

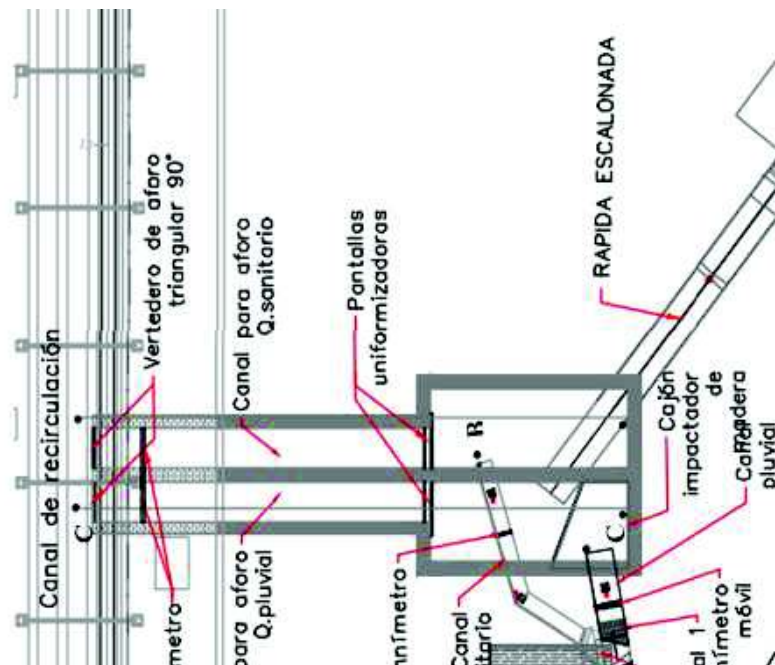
### 3.6 INSTRUMENTACIÓN DEL MODELO FÍSICO

#### 3.6.1 MEDIDORES DE CAUDALES

Vertederos triangulares de pared delgada  $\theta = 90^\circ$

Para el aforo de los caudales de descarga, se utilizó dos vertederos triangulares de pared delgada con ángulo en el vértice  $\theta = 90^\circ$ , simétricos con respecto al eje vertical. De iguales dimensiones, se ubican uno en cada canal de aforo, posterior a los tanques de descarga.

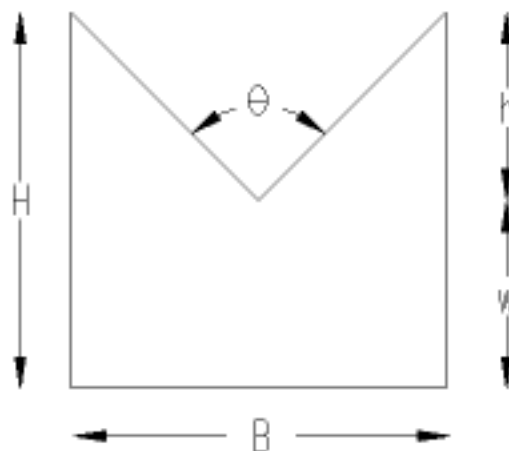
**Figura 3-13:** Ubicación de los vertederos triangulares



**Fuente:** Autores

Los vertederos se construyeron en tabla triplex de 18 mm de espesor, siendo sellados, pintados y lacados para evitar desgaste prematuro por el contacto con agua. Los caudales descargados por el separador se encuentran dentro del rango recomendado para estos instrumentos de medición, inferiores a 300 lt/s (Sotelo, 1997). La **Figura 3-14** muestra el esquema de las dimensiones del vertedero y la **Tabla 3.5** el valor de las mismas.

**Figura 3-14:**Esquema de los vertederos de aforo pluvial y sanitario.



**Fuente:** Autores

**Tabla 3.5:** Dimensiones de los vertederos de aforo pluvial y sanitario

<b>VERTEDERO DE AFORO, SEPARADOR PE36A</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>VERTEDERO PLUVIAL</b>		
Ubicación	-	Al final del canal de descarga del caudal pluvial
Ancho (B)	m	0.60
Altura (H)	m	0.60
w	m	0.30
θ	°	90
<b>VERTEDERO SANITARIO</b>		
Ubicación	-	Al final del canal de descarga del caudal sanitario
Ancho (B)	m	0.60
Altura (H)	m	0.60
w	m	0.30
θ	°	90

**Fuente:** Autores

**Fotografía 3-16:** Vista frontal vertederos de aforo (triangulares 90°)



**Fotografía 3-17:** Aforo para determinación de la curva experimental de descarga.



### 3.6.2 LIMNÍMETROS

Dentro del modelo físico se instalaron un total de cinco limnímetros. Uno fijo por cada colector combinado, sanitario; y uno móvil en el colector pluvial-zona de separación. Además, dos que trabajan en conjunto con los vertederos para el aforo de los caudales separados. Los limnímetros medirán los calados en las diferentes secciones con una precisión de 0.1mm.

**Fotografía 3-18:** limnímetros en el modelo físico



### 3.6.3 REGLAS, CINTAS Y PROBETAS

#### Reglas y cintas

Con las cintas y reglas se toman medidas auxiliares de calados y longitudes relevantes en el funcionamiento del separador. Se trabaja con una precisión de 1 mm.

**Fotografía 3-1:** Cintas y reglas graduadas en milímetros y centímetros.



**Fuente:** [www.ferreteriauniversitas.com](http://www.ferreteriauniversitas.com)

#### Probetas

La probeta es un instrumento de medición de volumen, se la utilizó en la campaña de aforo para la calibración de los vertederos. El tipo de probeta en este caso tiene capacidad de un litro y precisión de 1 ml.

**Fotografía 3-2:** Probeta de 1 litro de capacidad



### 3.7 CALIBRACIÓN

Los modelos físicos deben ser validados mediante un análisis que compruebe que el fenómeno hidráulico en prototipo será adecuadamente representado en modelo. A continuación, se presenta la comprobación de la similitud geométrica, así como la similitud restringida de Froude en el modelo físico construido para esta investigación.

Se realizó la calibración de la curva de descarga de los vertederos, instalados en los canales de aforo para comprobar su funcionamiento acorde al diseño teórico. Una vez calibradas las estructuras de medición, se verificó la continuidad del modelo.

#### 3.7.1 CALIBRACIÓN DE LOS VERTEDEROS

Las curvas experimentales que se obtienen al aforar los vertederos permiten verificar el comportamiento de descarga que estos tienen una vez construidos, en relación con el comportamiento que se espera según la ecuación de descarga teórica planteada en su diseño; una vez procesada la información y constatada la coherencia de comportamiento teórico y físico se obtiene una sola curva de descarga experimental que pueda ser utilizada para la medición de los caudales.

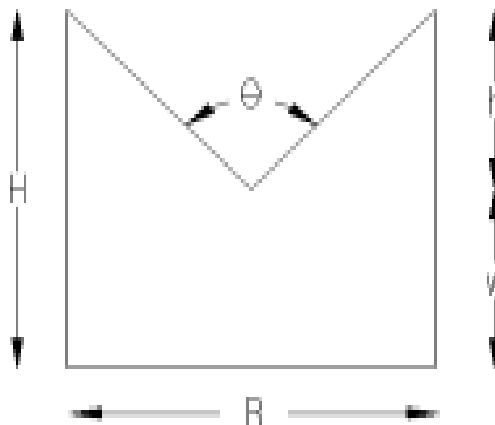
##### 3.7.1.1 CURVA DE DESCARGA DE LOS VERTEDEROS TRIANGULARES $\Theta = 90$ UBICADOS A LA SALIDA DEL SEPARADOR

El modelo físico del separador se implantó en el laboratorio de manera que aproveche la infraestructura existente, como son: el tanque de abastecimiento, tanques de descarga y canales de aforo equipados, lo que disminuyó formidablemente los costos de construcción.

Los vertederos ubicados en cada canal de aforo a la salida del separador tienen la misma geometría; triangulares y  $\Theta = 90$ , siguiendo el esquema de la **Figura 3-15** La Tabla 3.6 muestra las diferentes dimensiones.



**Figura 3-15:** Esquema de los vertederos de aforo pluvial y sanitario.



**Fuente:** Autores

**Tabla 3.6:** Dimensiones de los vertederos de aforo pluvial y sanitario

<b>VERTEDERO DE AFORO, SEPARADOR PE36A</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>VERTEDERO PLUVIAL</b>		
Ubicación	-	Al final del canal de descarga del caudal pluvial
Ancho (B)	m	0.60
Altura (H)	m	0.60
Espesor (e)	m	0.018
w	m	0.30
θ	°	90
<b>VERTEDERO SANITARIO</b>		
Ubicación	-	Al final del canal de descarga del caudal sanitario
Ancho (B)	m	0.60
Altura (H)	m	0.60
Espesor (e)	m	0.018
w	m	0.30
θ	°	90

**Fuente:** Autores

Siendo estos vertederos triangulares de sección simétrica, la ecuación de descarga teórica (Sotelo, 1997), se describe a continuación:

$$Q = C * h^{\frac{5}{2}} \quad \text{Ec. (3-3)}$$

Donde:

Q: caudal [m<sup>3</sup>/s].

C: Coeficiente de descarga [ ].

h: carga de agua sobre el vertedero [m].

Existen diferentes ecuaciones experimentales para determinar el coeficiente C el cual depende del ángulo  $\theta$ . Cuando  $\theta = 90^\circ$  se tiene (Sotelo, 1997)

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \mu \quad \text{Ec. (3-4)}$$

Donde:

$\mu$ : coeficiente experimental de descarga, considera la contracción de la lámina de agua sobre el vertedero.

g: aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Por las características geométricas del vertedero y la magnitud del gasto circulante, el coeficiente experimental de descarga  $\mu$  fue calculado mediante la fórmula de la Universidad Católica de Chile **Ec. (3-5)** y según la fórmula de Hegly, puesto que en los dos casos se encuentra dentro de los parámetros de aplicabilidad.

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * \mu * K \quad \text{Ec. (3-5)}$$

Donde:

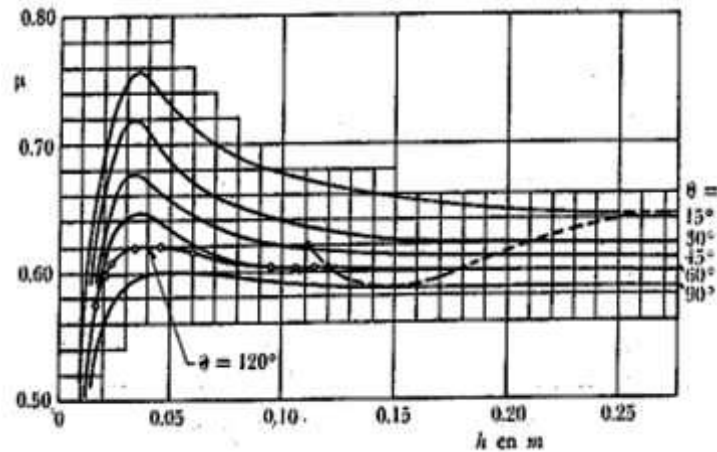
g: aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

$\theta$ : Ángulo de apertura del vertedero [°]

$\mu$ : coeficiente experimental de gasto en función de h y  $\theta$  [ ].

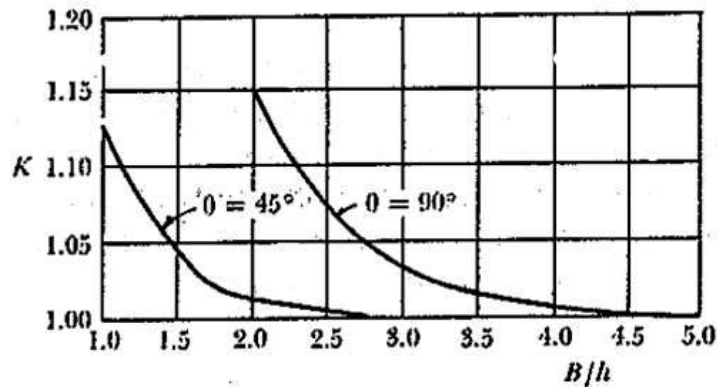
K: coeficiente experimental en función de  $\theta$  y B/h [ ].

**Figura 3-16:** Valores del coeficiente experimental de gasto  $\mu$  en función de  $h$  y  $\theta$ .



Fuente: (Sotelo, 1997)

**Figura 3-17:** Valores de  $K$  para la fórmula de la Universidad de Chile



Fuente: (Sotelo, 1997)

**Tabla 3.7:** Cálculos descarga del vertedero según la fórmula de la U. de Chile

DESCARGA VERTEDERO - FÓRMULA DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE					
$h$ (m)	$\mu$	$B/h$	$K$	$C$	$Q$ (l/s)
0.05	0.600	12.00	1.000	1.42	0.79
0.10	0.592	6.00	1.000	1.40	4.42
0.15	0.589	4.00	1.015	1.41	12.31
0.20	0.589	3.00	1.039	1.45	25.86
0.23	0.589	2.56	1.048	1.46	38.74

Fuente: Autores

Mediante la ecuación de Hegly **Ec. (3-11)** se obtiene un valor del coeficiente experimental de gasto que remplazado en la **Ec. (3-3)** obtenemos el gasto para cada altura. El rango de aplicación de h para esta fórmula oscila entre 0.10 y 0.50 metros. La Tabla 3.8 muestra el caudal de descarga para cada altura sobre el vértice del vertedero (h) asumida.

$$\mu = \left[ 0.5812 + \frac{0.0037}{h} \right] * \left\{ 1 + \left[ \frac{h^2}{B+(h+w)} \right]^2 \right\} \quad \text{Ec. (3-6)}$$

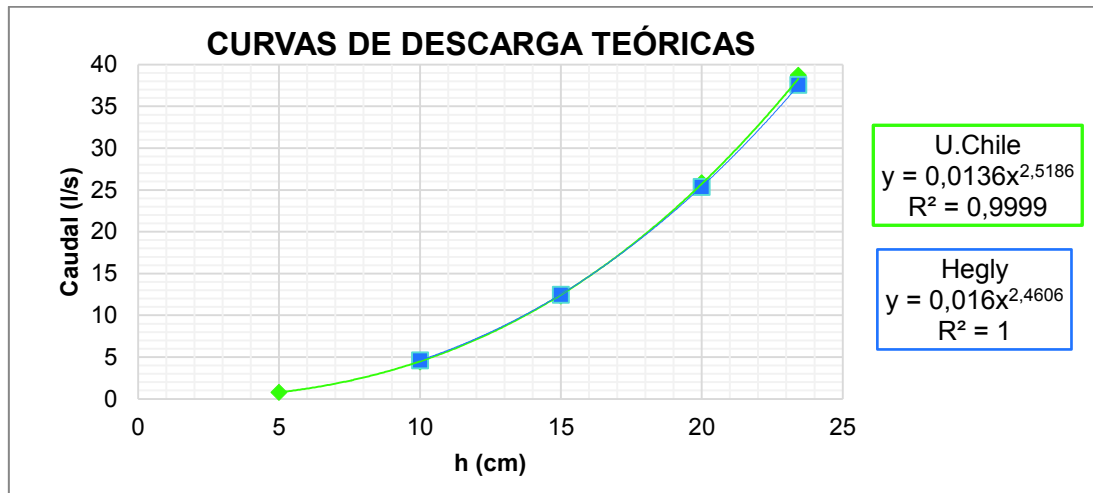
**Tabla 3.8:** Cálculos descarga vertedero según la fórmula de Hegly

<b>DESCARGA VERTEDERO- FÓRMULA DE HEGLY</b>		
<b>h (m)</b>	<b>C</b>	<b>Q (l/s)</b>
0.10	1.46	4.62
0.15	1.43	12.49
0.20	1.42	25.39
0.23	1.41	37.57

**Fuente:** Autores

El Gráfico 3-1 muestra las curvas de descarga teóricas para el vertedero triangular en el canal de aforo a la salida del separador, según los datos de la Tabla 3.7 y Tabla 3.8 respectivamente.

Se realizó una campaña de aforo para la determinación de la curva de descarga experimental. Inicialmente se registró la altura del limnómetro y posterior a ello se aforó volumétricamente el caudal de descarga para cada altura asociada. Se evidencia la campaña de aforo en la Fotografía 3-3.

**Gráfico 3-1:** Curvas de descarga teóricas - vertedero triangular.**Fuente:** Autores

La carga de agua sobre el vertedero (h) se la obtuvo restando a la medida registrada en el limnómetro su respectiva altura cero ( $h_0$ ). En la Tabla 3.9 se muestra el valor de la altura cero para los liminímetros ubicados en el canal de aforo pluvial y sanitario respectivamente.

**Tabla 3.9:** Altura cero de los liminímetros ubicados en el canal de aforo

Vertedero	Lectura "cero" $h_0$ (cm)
Pluvial	29.44
Sanitario	20.58

**Fuente:** Autores**Fotografía 3-3:** Campaña de aforo para la calibración de vertederos

Se aforó tres veces para cada altura registrada, con lo que se obtuvo un caudal de descarga promedio. La Tabla 3.10 muestra un resumen del registro de la campaña de aforo. El registro completo se encuentra en el **ANEXO 1**.

**Tabla 3.10:** Registro campaña de aforo de calibración de vertederos.

No.	Carga sobre el vertedero	Caudal aforado volumétricamente
	$h_{\text{promedio}}$ (cm)	$Q_{\text{promedio}}$ (l/s)
1	8,32	3,12
2	10,84	5,92
3	13,42	10,11
4	15,02	14,20
5	21,01	31,27

**Fuente:** Autores

La curva de descarga experimental está dada por la **Ec. (2-41)**. En el **Gráfico 3-2** se muestra el comportamiento de las diferentes curvas de descarga.

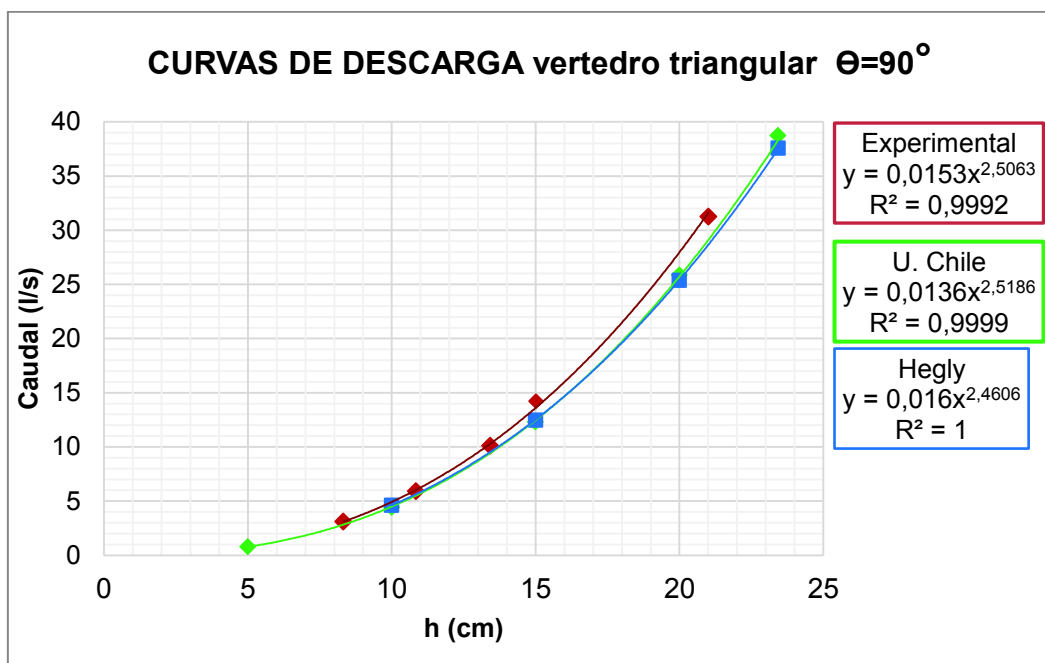
$$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063} \quad \text{Ec. (3-7)}$$

Donde

Q: caudal [l/s]

h: altura de agua sobre el vertedero [cm]

Se evidencia que los valores experimentales obtenidos durante la campaña de aforo se aproximan a resultados provenientes de las ecuaciones teóricas de Hegly y la Universidad de Chile. La ecuación experimental muestra un coeficiente de determinación "R<sup>2</sup>" cercano a la unidad lo que indica correlación potencial adecuada entre las variables, altura (h) y caudal (Q).

**Gráfico 3-2:** Curvas de descarga del vertedero teóricas y experimentales

**Fuente:** Autores

En la **Tabla 3.11** se presenta una comparación entre los valores de caudal obtenidos para una misma carga sobre el vertedero utilizando las diferentes ecuaciones. Así como una variación porcentual entre los resultados experimentales y teóricos.

**Tabla 3.11:** Comparación de curvas de descarga para el vertedero triangular  $\Theta=90^\circ$

h (cm)	Hegly	U. Chile	Curva experimental	Respecto a Hegly	Respecto a U. Chile	Teóricas
	$Q_{teórico}$ (l/s)	$Q_{teórico}$ (l/s)	$Q_{experimental}$ (l/s)	Desviación (%)	Desviación (%)	Desviación Med. (%)
5,00	-	0,79	0,86	-	9,04%	9,04%
10,00	4,62	4,42	4,91	6,20%	11,00%	8,60%
15,00	12,49	12,31	13,56	8,63%	10,20%	9,41%
20,00	25,39	25,86	27,89	9,86%	7,85%	8,86%
23,43	37,57	38,74	41,47	10,38%	7,04%	8,71%

**Fuente:** Autores

Para pequeñas cargas sobre el vertedero, los resultados de la curva experimental muestran una desviación menor respecto a los obtenidos con Hegly que con la Universidad de Chile. En cargas mayores ocurre lo contrario.

La ecuación de la U. de Chile no considera la incidencia de  $w$  (altura del vértice del vertedero con respecto al fondo del canal) en la descarga sobre el vertedero. Cuando se trabaja bajo un patrón de flujo con cargas menores esta incidencia se torna significativa. El decrecimiento de la desviación para cargas mayores se puede relacionar con el incremento de coeficiente  $K$  dentro de esta ecuación.

Existe una desviación menor al 10 % cuando se comparan los valores de descarga experimentales con los teóricos promedios. Además, su coeficiente  $R^2$  muestra una correlación adecuada entre la variable. Por lo que se considera apropiado el uso de la ecuación experimental en la determinación de los caudales derivados por el modelo del separador de caudales.

### **3.7.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO DEL SEPARADOR**

La calibración es un proceso mediante el cual se analiza, verifica y se ajusta al modelo, de tal forma que, este represente el comportamiento hidráulico que se desea estudiar en el prototipo. En conformidad con la teoría de la semejanza mecánica expuesta en apartado 2.1.6.4 y la similitud dinámica, 2.1.8, el modelo del separador PE36A es calibrado cuando se verifique el cumplimiento de la similitud geometría y la similitud restringida de Froude y un comportamiento adecuado frente a los efectos de escala.

#### **3.7.2.1 VERIFICACIÓN DE LA SIMILITUD GEOMÉTRICA**

Para verificar el cumplimiento de la similitud geométrica se realiza el levantamiento topográfico del modelo, con estación total cuya precisión es de 2 segundos con una tolerancia de 1 mm y mediante el uso del nivel topográfico de precisión 1mm. En los cuadros siguientes se muestra la comparación entre las dimensiones en planta y en elevación registradas en los modelos construidos con las dimensiones correspondientes de las estructuras en prototipo.



**Tabla 3.12** Comparación de dimensiones entre el diseño del modelo a partir de prototipo y modelo físico construido.

<b>ESTRUCTURA DE SEPARACIÓN DE CAUDALES PE36A</b>				
<b>ESTRUCTURA</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>DISEÑO MODELO</b>	<b>CONSTRUCCIÓN MODELO</b>	<b>DESVIACIÓN</b>
<b>COLECTOR COMBINADO</b>				
Longitud, tramo de aproximación	m	4.800	4.797	-0.06%
Ancho interno	m	0.360	0.361	0.28%
Alto interno	m	0.400	0.400	0.00%
<b>ZONA DE SEPARACIÓN/ DERIVACIÓN</b>				
Longitud	m	0.590	0.592	0.34%
Ancho interno	m	0.400	0.402	0.50%
Alto interno	m	0.500	0.500	0.00%
<b>ORIFICIO - VERTEDERO</b>				
Longitud	m	0.380	0.379	-0.26%
Ancho interno	m	0.100	0.101	1.00%
Alto interno	m	0.120	0.120	0.00%
<b>UMBRAL DE DIRECCIONAMIENTO</b>				
Longitud mayor	m	0.400	0.399	-0.25%
Ancho	m	0.400	0.402	0.50%
Alto	m	0.110	0.111	0.91%
<b>COLECTOR SANITARIO</b>				
Longitud	m	3.130	3.132	0.06%
Ancho interno	m	0.240	0.239	-0.42%
Alto interno	m	0.400	0.400	0.00%
<b>COLECTOR PLUVIAL</b>				
Longitud	m	1.000	1.010	1.00%
Ancho interno	m	0.400	0.402	0.50%
Alto interno	m	0.500	0.500	0.00%

Fuente: Autores

La comparación en la tabla anterior muestra que las desviaciones en dimensiones de los elementos que componen el separador son del orden del  $\pm 1\%$ , lo que se considera aceptable.

**Tabla 3.13:** Comparación de elevaciones entre el diseño del modelo a partir de prototipo y modelo físico construido.

<b>ELEVACIONES MEDIDAS EN MODELO DEL SEPARADOR PE36A</b>				
<b>DIMENSIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>DISEÑO</b>	<b>CONSTRUCCIÓN</b>	<b>DESVIACIÓN</b>
<b>CANAL COLECTOR COMBINADO</b>				
Cota Inicio Curva	m	2.620	2.620	0.00%
Cota Final Curva	m	2.598	2.597	0.02%
Cota Inicio Combinado	m	2.598	2.597	0.02%
Cota Final Combinado	m	2.462	2.461	0.05%
<b>CANAL COLECTOR PLUVIAL</b>				
Cota Inicio Pluvial	m	2.462	2.461	0.05%
Cota Final Pluvial	m	2.455	2.453	0.07%
<b>POZO DE REVISIÓN/ INSPECCIÓN</b>				
Cota Fondo Pozo	m	2.313	2.311	0.07%
<b>CANAL COLECTOR PLUVIAL</b>				
Cota Inicio Sanitario	m	2.313	2.311	0.07%
Cota Final Sanitario	m	2.281	2.279	0.10%

**Fuente:** Autores

Se observa que las desviaciones en la cota de implantación son del orden de  $\pm 1\%$ , lo que se considera aceptable.

Las tablas comparativas muestran que las diferencias en dimensiones y elevaciones previstas para los elementos del modelo del separador se encuentran en el orden del 1%, lo cual se considera aceptable; verificándose así que la similitud geométrica se cumple.

### 3.7.2.2 VERIFICACIÓN DE LA SIMILITUD RESTRINGIDA DE FROUDE

El flujo en el separador de caudales es un flujo a superficie libre; la fuerza preponderante que rige el movimiento es la gravedad. Por lo tanto, el criterio de similitud que se utiliza entre modelo y prototipo es el de Froude. En ese sentido, los efectos de la viscosidad y la tensión superficial deben ser despreciables en el modelo como lo serían en prototipo.

Para ello se deben cumplir las relaciones descritas a continuación:

La igualdad de los números de Froude; en modelo y en prototipo las fuerzas inerciales y gravitacionales guardan la misma relación.

$$Fr_{\text{Modelo}} = Fr_{\text{Prototipo}} \quad \text{Ec. (3-8)}$$

Los números de Reynolds entre modelo y prototipo se relacionan mediante la escala del modelo:

$$Re_{\text{Modelo}} = \frac{Re_{\text{Prototipo}}}{e^{3/2}} \quad \text{Ec. (3-9)}$$

En cuanto a los coeficientes de pérdida entre modelo y prototipo deben guardar la relación:

$$\lambda_{\text{Modelo}} = \lambda_{\text{Prototipo}} \quad \text{Ec. (3-10)}$$

En la **Tabla 3.14** y la **Tabla 3.15** se presentan los valores de los números adimensionales de Froude, Reynolds y la comparación del coeficiente de fricción entre modelo del separador y prototipo. Tomando en cuenta que el modelo fue construido en acrílico (rugosidad absoluta: 0.0015 mm) y que el material previsto para la construcción es hormigón (rugosidad absoluta: 0.20 mm).

Los números de Reynolds del modelo en todos los casos son menores a los del prototipo y tienden a guardar la relación establecida por la escala. Al mismo tiempo, en ambos casos son suficientemente elevados para que el flujo sea turbulento. Por lo tanto, las fuerzas de viscosidad en el modelo pueden ser despreciadas. Los números de Froude entre modelo y prototipo tienen un buen ajuste, considerándose semejantes entre ellos.

**Tabla 3.14:** Comparación de números de Reynolds y Froude para modelo y prototipo

Prueba	Caudal		Número de Reynolds		Número de Froude	
	Modelo l/s	Prototipo m <sup>3</sup> /s	Modelo	Prototipo	Modelo	Prototipo
A-1	9.585	0.536	9,64E+04	1,08E+06	3,32	3,32
A-2	10.668	0.596	1,06E+05	1,19E+06	3,14	3,14
A-3	47.979	2.682	3,93E+05	4,40E+06	2,63	2,63
A-4	60.867	3.403	4,75E+05	5,31E+06	2,57	2,57
A-5	93.062	5.202	6,72E+05	7,51E+06	2,73	2,73

Fuente: Autores

**Tabla 3.15:** Comparación coeficientes de fricción  $\lambda$  para modelo y prototipo

Prueba	Caudal		Coeficiente de Fricción ( $\lambda$ )		
	Modelo l/s	Prototipo m <sup>3</sup> /s	Modelo	Prototipo	Desviación %
A-1	9.585	0.536	0,0182	0,0177	2,7%
A-2	10.668	0.596	0,0178	0,0173	2,9%
A-3	47.979	2.682	0,0138	0,0141	1,9%
A-4	60.867	3.403	0,0133	0,0137	2,7%
A-5	93.062	5.202	0,0126	0,0132	5,4%

Fuente: Autores

En cuanto a los coeficientes de pérdida entre modelo y prototipo tienen valores similares. En vista de que los tramos de estudio son relativamente cortos y que la desviación no supera el 5.5% con respecto a los valores obtenidos para el modelo, se considera que el modelo representa adecuadamente el fenómeno. Los calados en el rango de caudales analizados se encuentran entre 1,9 y 9,7 cm cumpliendo con la recomendación de la literatura para reducir los efectos de escala causados por fuerzas viscosas.

Para evaluar el efecto conjunto de la tensión superficial y la viscosidad Ranga Raju propone:

$$Re^{0.2}We^{0.6} > 900 \quad \text{Ec. (3-11)}$$

Donde:

Re: Número de Reynolds

We; Número de Weber

A continuación, se presentan los cálculos para la obtención de la relación de Ranga Raju, considerando como longitud representativa el radio hidráulico.

Se observa que los valores para la expresión  $Re^{0.2}We^{0.6}$  en los caudales bajos (A-1, A-2) son menores a 900, por lo que la recomendación no se cumple en estos casos. Sin embargo, las pruebas A-1 y A-2 cumplen con la recomendación de calados mayores a 2 cm. En el caso de las pruebas A-3, A-4, A-5 el número de Ranga Raju es mayor a 900.

**Tabla 3.16** :Numeros de Reynolds, Weber y Ranga Raju para diferentes caudales en el modelo del separador.

Prueba	Radio Hidráulico (m)	Num. Reynolds	Núm. Weber	N. Ranga Raju
A-1	0,0169	96426,8	471,55	398,98
A-2	0,0187	106248,4	519,02	430,90
A-3	0,0472	393439,9	2819,96	1545,69
A-4	0,0535	475175,6	3623,32	1865,67
A-5	0,0631	671549,7	6140,49	2743,70

**Fuente:** Autores

Para el cálculo del número de Reynolds se tomó como longitud característica el diámetro hidráulico, en el caso del número de weber el radio hidráulico.

### 3.8 PLAN DE PRUEBAS

Para el análisis del comportamiento hidráulico del separador, según el diseño original, se planificó el número de pruebas y el caudal a modelar en cada una de ellas. Facilitando el estudio y la representación del todo el rango de operación de la estructura.

**Tabla 3.17.** Plan de pruebas modelo físico del separador PE36A

<b>MODELO FÍSICO ESTRUCTURA PE36A</b>			
<b>Prueba</b>	<b>Caudal Combinado</b>		<b>Observaciones</b>
	<b>Prototipo (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Modelo (l/s)</b>	
A-1	0.536	9.585	Caudal sanitario, en épocas de estiaje
A-2	0.596	10.668	Caudal máximo que deriva el umbral sin que exista derivación hacia el pluvial
A-3	2.682	47.979	Caudal sanitario que debería ser derivado en su totalidad por el canal pluvial
A-4	3.403	60.867	Caudal intermedio
A-5	5.202	93.062	Caudal máximo combinado

**Fuente:** Autores

Los valores para las pruebas A-1, A-3, A-5 corresponden a caudales de diseño del separador, descritos en el Estudio del Proyecto: Caupicho, Quebrada, Evaluación y Diseños complementarios, Interceptores Parroquia Turubamba (Socasi, 2012).

Las pruebas A-2 y A-4 son caudales intermedios definidos que complementan y facilitan el estudio del comportamiento del separador.

El caso de la prueba A-5 representa al caudal máximo de diseño del separador 5.207 m<sup>3</sup>/s (Socasi, 2012).

### 3.9 CONCLUSIONES

El modelo físico de separador de caudales se construyó a una escala de reducción 1:5 en relación con el prototipo, en él se planificaron plan pruebas que responde a

los caudales mínimos y máximos de diseño, y a condiciones intermedias de funcionamiento.

En ausencia de estructuras de aforo al ingreso de modelo no se realiza una comprobación de la continuidad. El caudal total de ingreso es medido como la sumatoria caudales derivados a los canales de aforo, los cuales cuentan cada uno con un vertedero triangular simétrico al eje con  $\Theta=90^\circ$ . Para que la medición sea veraz se realizó pruebas de estanqueidad en el modelo y tanques de descarga. Además, las paredes de los colectores se proyectaron a una altura que impida la pérdida del fluido por salpicaduras o sobre elevaciones.

El modelo físico del separador de caudales cumple con la similitud geométrica, ya que las dimensiones de los elementos y su cota de ubicación tienen desviaciones similares e inferiores al 1%.

Se cumple que los números de Froude para modelo son iguales a Froude prototipo, además, siguiendo la relación de los números de Reynolds, el modelo del separador de caudales es hidráulicamente más liso que su prototipo. Los coeficientes de pérdida presentan variaciones desde un 2% a un 5 %, siendo mayor para el caudal máximo. Por lo que se verifica el cumplimiento de la similitud restringida de Froude.

En cuanto a los efectos de escala para las fuerzas viscosas y de tensión superficial, la recomendación de Ranga Raju se cumple para los caudales altos, y para caudales bajos cumple la recomendación de calados mayores a 2 cm, logrando representar adecuadamente el fenómeno hidráulico.

## CAPÍTULO 4

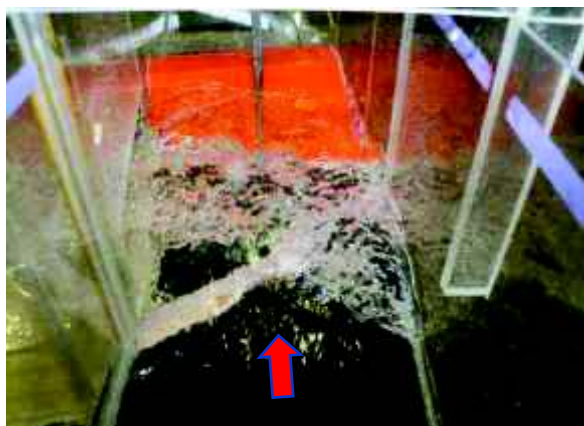
### EXPERIMENTOS REALIZADOS EN EL MODELO FISICO CON DISEÑO ORIGINAL

#### 4.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS

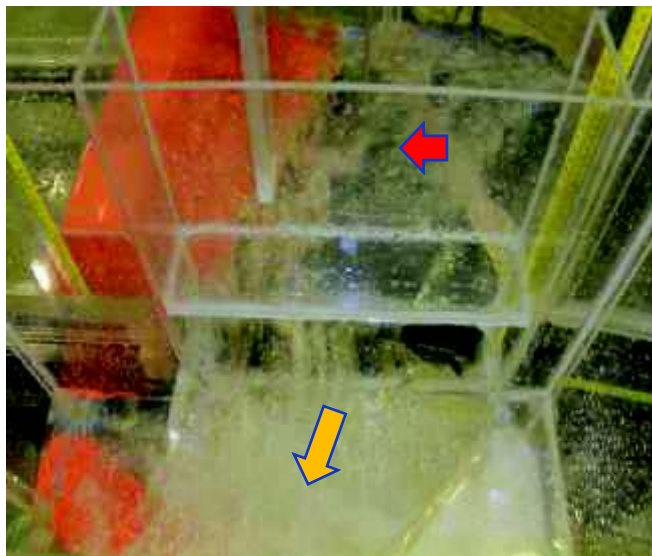
##### PRUEBA EXPERIMENTAL A-1

En la prueba A-1, el caudal aforado fue **9.585 l/s**, en prototipo **0.536 m<sup>3</sup>/s**, que corresponde al caudal en tiempo seco, es decir, el caudal sanitario.

**Fotografía 4-1:** Prueba A-1. Vista superior paralela al eje, comportamiento del flujo en el separador de caudales.

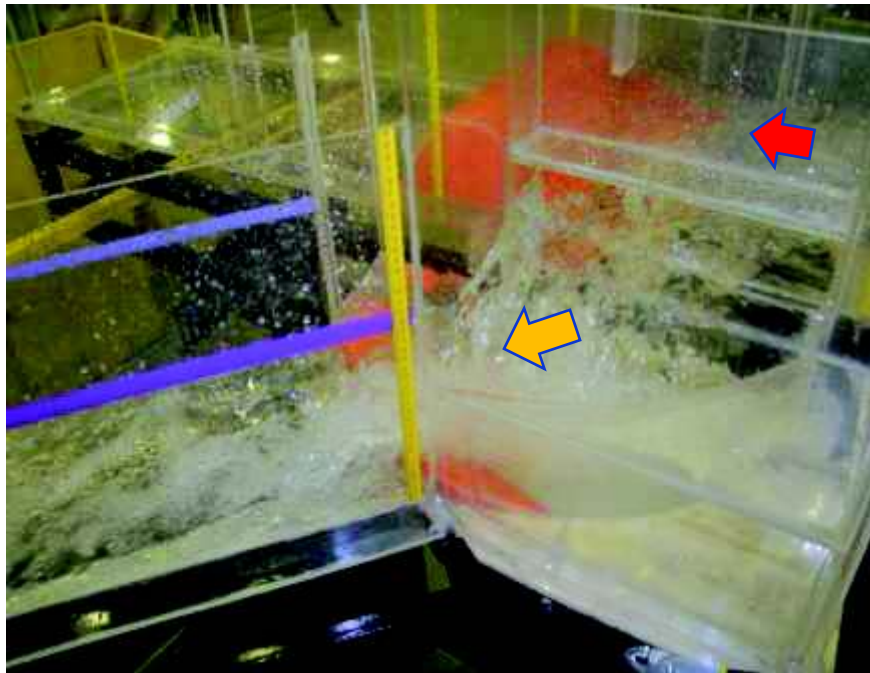


**Fotografía 4-2:** Prueba A-1. Vista superior del orificio de derivación, comportamiento del flujo en el separador de caudales.





**Fotografía 4-3:** Prueba 1. Vista superior lateral izquierda, comportamiento del flujo en el separador de caudales.



**Principales observaciones:**

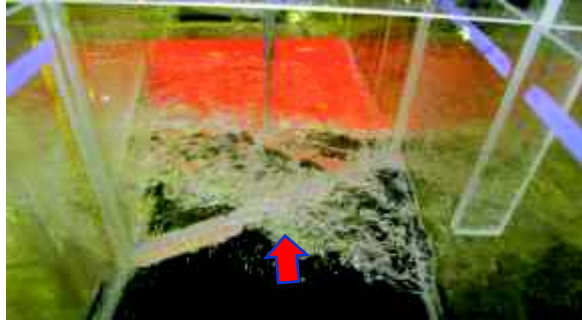
- Se observa que el flujo de aproximación se encuentra en régimen super crítico. Se evidencia ondas en la proximidad al umbral de direccionamiento. Fotografía 4-1.
- El umbral de direccionamiento de flujo cumple su objetivo de desviar todo el caudal sanitario, conduciéndolo por completo al orificio de derivación lateral, sin paso de agua hacia el colector pluvial. Fotografía 4-1.
- De la longitud total de 38 cm del orificio lateral, entre 26 y 28 cm tienen presencia de vertido de agua (longitud efectiva), siendo mayor el calado en la proximidad del umbral de direccionamiento y sin que sea útil la totalidad de la longitud del orificio. No se observa presencia de agua en la plataforma para uso operativo al fondo del pozo de revisión. Fotografía 4-3 y Fotografía 4-3.

**PRUEBA EXPERIMENTAL A-2**

La prueba A-2 se realizó con un caudal combinado de ingreso de **10.668 l/s**, equivalente a **0.596 m<sup>3</sup>/s** en prototipo. En esta prueba se modeló el caudal máximo

con el cual el canal pluvial no presenta circulación de agua, siendo inminente el vertido hacia el canal pluvial.

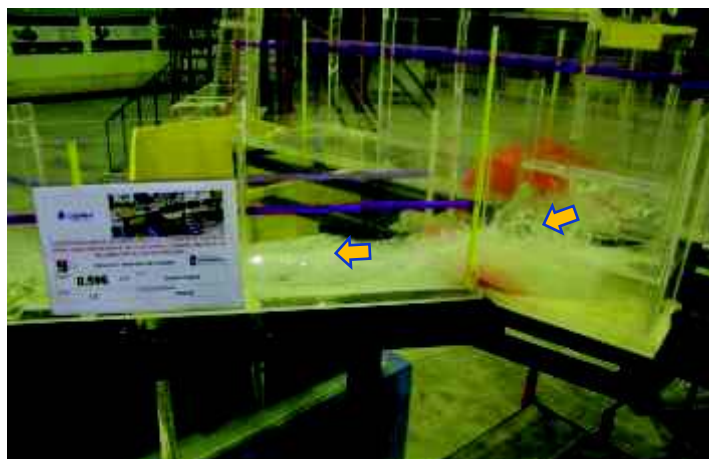
**Fotografía 4-4:** Prueba A-2. Vista superior paralela al eje, comportamiento del flujo en el separador de caudales



**Fotografía 4-5:** Prueba A-2. Vista superior umbral de direccionamiento y canal pluvial.



**Fotografía 4-6:** Prueba 2. Vista superior lateral izquierda, comportamiento del flujo en el separador de caudales.



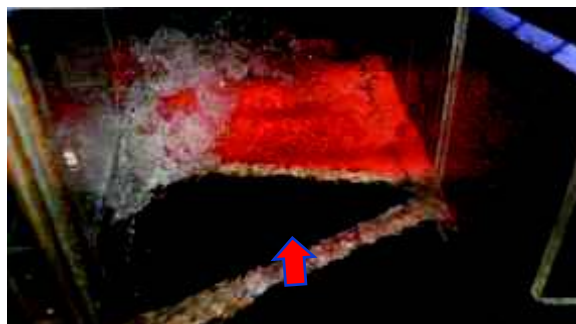
### Principales observaciones:

- Se observa que el máximo caudal combinado que puede retener el umbral de direccionamiento, sin que exista vertido hacia el canal pluvial, es  $0.596 \text{ m}^3/\text{s}$  en prototipo. El flujo en el canal pluvial es inexistente. Fotografía 4-4, **Fotografía 4-5.**
- Se da un embalsamiento en la zona aguas arriba del umbral de direccionamiento, como consecuencia del choque del flujo supercrítico de aproximación contra la estructura, disipando su energía y produciendo a la vez ondas de flujo en dirección opuesta, permitiendo así una acumulación de agua en dicha zona y la descarga de la totalidad del caudal hacia el canal sanitario. **Fotografía 4-6.**
- De la longitud total de 38 cm del orificio lateral, entre 25 y 27 cm tienen presencia de vertido de agua (longitud efectiva), siendo mayor el calado en la proximidad del umbral de direccionamiento de flujo y sin llenar la totalidad de la sección del orificio. Se observa presencia de agua en la plataforma para uso operario al fondo del pozo de revisión. **Fotografía 4-6.**

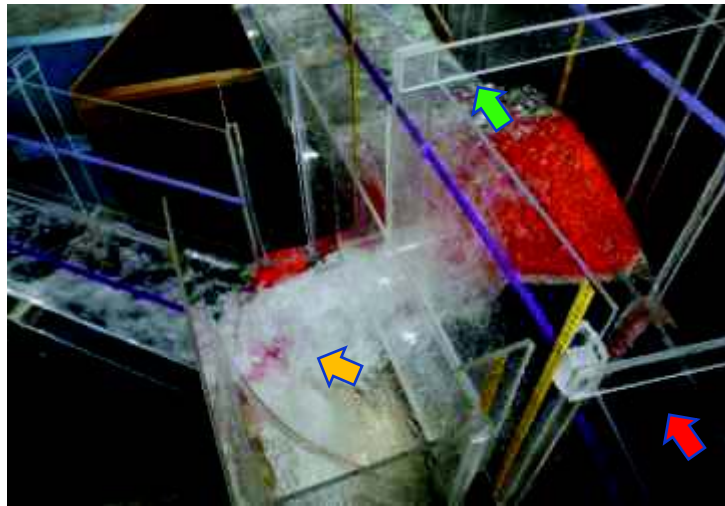
### PRUEBA EXPERIMENTAL A-3

La Prueba A-3 se realizó con un caudal combinado de  **$47.979 \text{ l/s}$**  al ingreso de la estructura, equivalente en prototipo de  **$2.680 \text{ m}^3/\text{s}$** , según el diseño original, este caudal sería el máximo caudal derivable por el orificio cuando circule el caudal máximo de diseño por el canal combinado ( $5.207 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Se lo describirá a continuación como un caudal en condiciones medias.

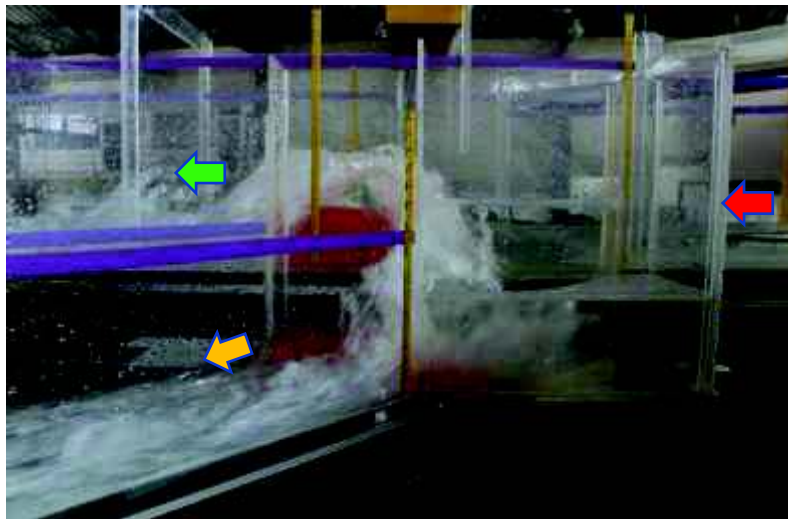
**Fotografía 4-7:** Prueba A-3. Vista superior umbral de derivación y orificio derivador, comportamiento del flujo en el separador de caudales.



**Fotografía 4-8:** Prueba A-3. Vista lateral zona de separación, comportamiento del flujo en el separador de caudales.



**Fotografía 4-9:** Prueba A-3. Vista lateral zona de separación, comportamiento del flujo en el separador de caudales.



**Principales observaciones:**

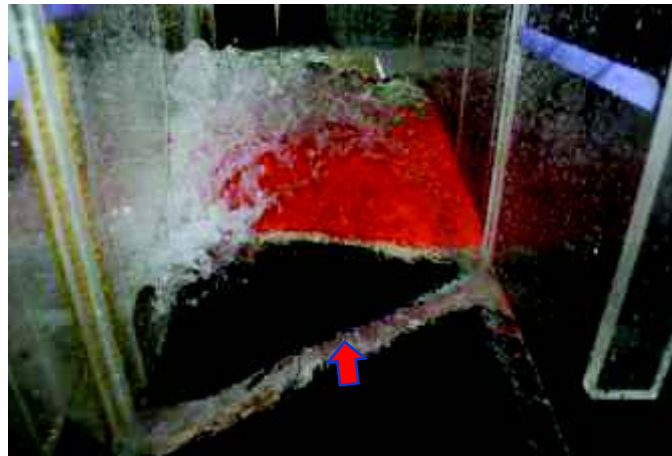
- De los 47.979 l/s que ingresaron por canal combinado, 41.472 l/s se derivan hacia el canal pluvial y 6.507 l/s hacia el canal sanitario, 86.44% y 13.56% respectivamente.
- Se aprecia un impacto directo del flujo en la zona izquierda del canal combinado contra la arista interior del orificio vertedero, producto del cual se da la derivación del caudal hacia el canal sanitario.

- De la longitud total de 38 cm del orificio lateral, entre 14 y 16 cm tienen presencia de vertido de agua (longitud efectiva), siendo mayor el calado en la proximidad del umbral de direccionamiento de flujo y casi llenando la totalidad de la sección del orificio en la zona cercana a la arista. Ver **Fotografía 4-8** y **Fotografía 4-9**. Se observa presencia de agua en la plataforma para uso operario al fondo del pozo de revisión. **Fotografía 4-9**

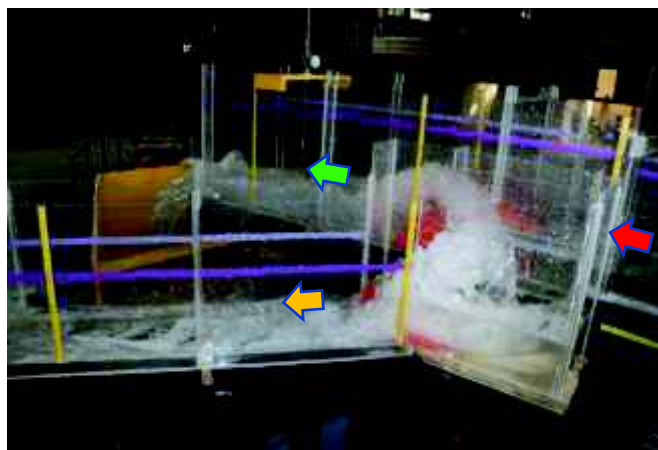
#### PRUEBA EXPERIMENTAL A-4

La prueba 4 se realizó con un caudal combinado de 60.867 l/s al ingreso de la estructura, con su equivalente en prototipo de 3.402 m<sup>3</sup>/s. Este caudal responde a condiciones medias de funcionamiento del colector combinado.

**Fotografía 4-10:** Prueba A-4. Vista superior canal combinado, comportamiento del flujo en el separador de caudales.

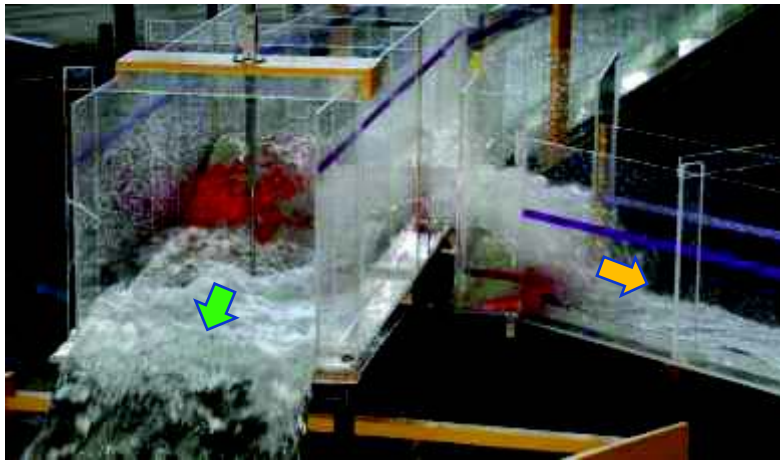


**Fotografía 4-11:** Prueba a-4. Vista lateral izquierda, comportamiento del flujo en el separador de caudales





**Fotografía 4-12:** Prueba 4. Vista frontal, comportamiento del flujo en el separador de caudales.



**Principales observaciones:**

- De los 60.867 l/s que transporta el canal combinado, 52.900 l/s se derivan hacia el canal pluvial y 7.967 l/s hacia el canal sanitario, 86.91% y 13.09% respectivamente.
- La perturbación del flujo que se observa en el flujo aguas arriba y sobre el umbral de direccionamiento, se debe al choque de éste con la arista interna del orificio vertedero, fenómeno responsable a su vez, del caudal derivado hacia el canal sanitario. Ver en la
- Fotografía 4-10 y **Fotografía 4-11**. Evidenciándose de esta manera y por segunda ocasión, que la separación de los caudales se debe al choque en la arista interna del orificio vertedero, y no como consecuencia al trabajo conjunto umbral-orificio.

De la longitud total de 38 cm del orificio lateral, entre 4 y 6 cm tienen presencia de vertido de agua (longitud efectiva), siendo mayor el calado en la proximidad del umbral de direccionamiento de flujo y llenando la totalidad de la sección del orificio en la zona cercana a la arista (12 cm). Se observa una lámina intermitente de agua sobre la plataforma para uso operario al fondo del pozo de revisión, de 1 a 2 cm.

**Fotografía 4-11.**

En la descarga del orificio derivador se da una sobrelevación hacia el margen derecho del ingreso del canal sanitario. **Fotografía 4-12**

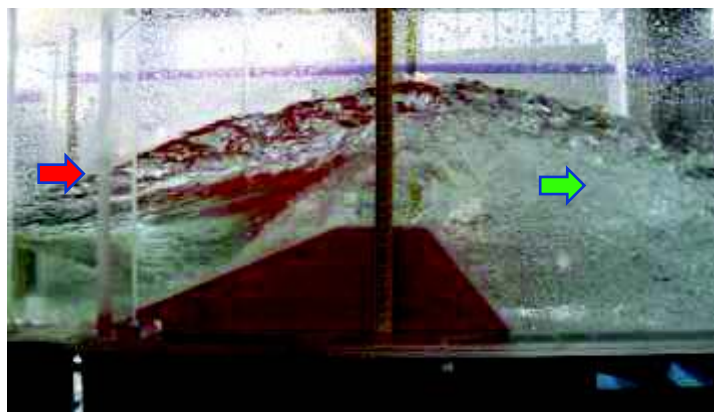
## PRUEBA EXPERIMENTAL A-5

La Prueba 5 se realizó con un caudal combinado de **93.062 l/s** al ingreso de la estructura, con su equivalente en prototipo de **5.202 m<sup>3</sup>/s**, muy aproximado al caudal máximo de diseño **5.207 m<sup>3</sup>/s**.

**Fotografía 4-13:** Prueba A-5, Vista superior, comportamiento del flujo.



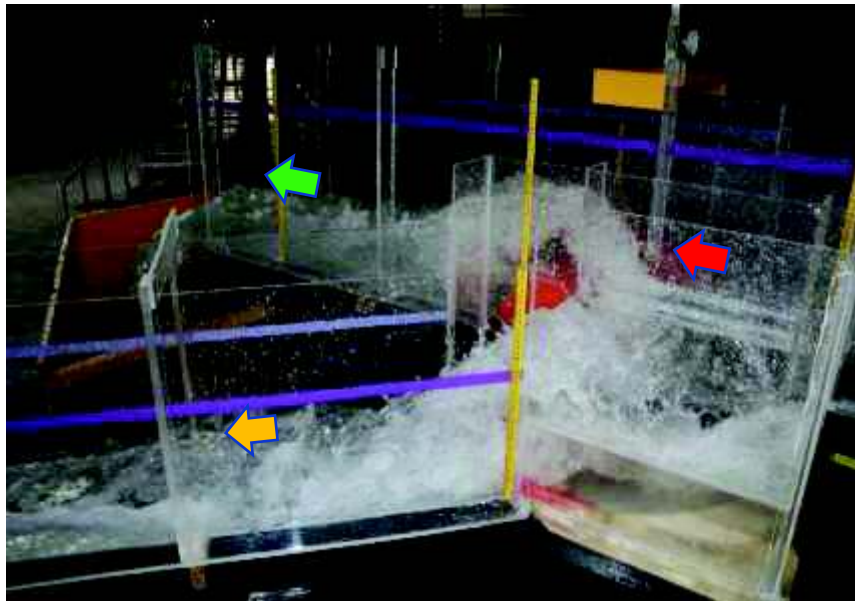
**Fotografía 4-14:** Prueba A-5, Vista lateral derecha. Umbral de derivación comportamiento del flujo.



**Fotografía 4-15:** Prueba A-5, Vista superior orificio de derivación ingreso al canal sanitario



**Fotografía 4-16:** Prueba A-5. Vista lateral izquierda, comportamiento del flujo en la zona de separación.



**Principales observaciones:**

- De los 93.062 l/s que transporta el canal combinado, 78.740 l/s se derivan hacia el canal pluvial y 14.322 l/s hacia el canal sanitario, 84.61% y 15.39% respectivamente.
- Se observa una perturbación en el flujo aguas arriba y sobre el umbral de direccionamiento, producida por el choque del flujo con la arista interna del orificio vertedero, fenómeno responsable a su vez, del caudal derivado hacia el canal sanitario. **Fotografía 4-13.**
- Hacia el margen derecho el umbral de direccionamiento de flujo no se presentan perturbaciones importantes, pues el flujo sigue la geometría definida por los contornos de los canales y el umbral, aguas abajo se da una introducción de aire formándose vórtices y burbujas. **Fotografía 4-13,** y **Fotografía 4-15.**
- Se evidencia por tercera ocasión que la separación de los caudales se debe al choque en la arista interna del orificio vertedero, y no como consecuencia al trabajo conjunto umbral-orificio. **Fotografía 4-13, Fotografía 4-16 y, Fotografía 4-16.**



- De la longitud total de 38 cm del orificio lateral, entre 3 y 6 cm tienen presencia de vertido de agua (longitud efectiva), siendo mayor el calado en la proximidad del umbral de direccionamiento de flujo y llenando la totalidad de la sección del orificio en la zona cercana a la arista (12 cm). Se observa una lámina intermitente de agua sobre la plataforma para uso operario al fondo del pozo de revisión, de 2.5 a 3 cm. **Fotografía 4-16.**

#### 4.1.2 CAUDALES SEPARADOS

Los valores de los caudales separados al ejecutar el plan de pruebas al modelo físico del separador con diseño original se describen en **la Tabla 4.1.**

El caudal combinado corresponde al caudal de aproximación al separador, el caudal sanitario el que será conducido hacia el tratamiento y el caudal pluvial el que se descargue al cauce.

**Tabla 4.1:** Caudales en el separador durante la ejecución del plan de pruebas diseño original

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES PE36A						
Prueba	Qc (ingreso) l/s	Qvs (salida) l/s	Qvp (salida) l/s	% Sanitario	% Pluvial	Observaciones
A-1	9,59	9,59	0,00	100,00	0,00	Caudal sanitario
A-2	10,67	10,67	0,00	100,00	0,00	Caudal máximo sin que exista derivación hacia el pluvial
A-3	47,98	6,51	41,47	13,56	86,44	Caudal a ser derivado en su totalidad al canal sanitario
A-4	60,87	7,97	52,90	13,09	86,92	Caudal intermedio
A-5	93,06	14,32	78,74	15,39	84,61	Caudal máximo

**Fuente:** Autores

Escalando a prototipo los valores de la **Tabla 4.1**, se presenta a continuación la **Tabla 4.2**.

**Tabla 4.2:** Caudales en el separador durante la ejecución del plan de pruebas diseño original, escalados a prototipo.

<b>PROTOTIPO DEL SEPARADOR DECAUDALES PE36A</b>						
<b>Prueba</b>	<b>Qc (ingreso) m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Qvs (salida) m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Qvp (salida) m<sup>3</sup>/s</b>	<b>% Sanitario</b>	<b>% Pluvial</b>	<b>Observaciones</b>
A-1	0,536	0,536	0,000	100,00	0,00	Caudal sanitario
A-2	0,596	0,596	0,000	100,00	0,00	Caudal máximo que deriva el umbral
A-3	2,682	0,364	2,318	13,56	86,44	Caudal que debería ser derivado en su totalidad
A-4	3,402	0,445	2,957	13,09	86,92	Caudal intermedio
A-5	5,202	0,801	4,402	15,39	84,61	Caudal máximo combinado,

**Fuente:** Autores

La **Tabla 4.3** presenta el porcentaje de separación esperado según los diseños originales de la estructura (Socasi, 2012). El caudal mínimo se relaciona con la prueba A-1 y el máximo con A-5.

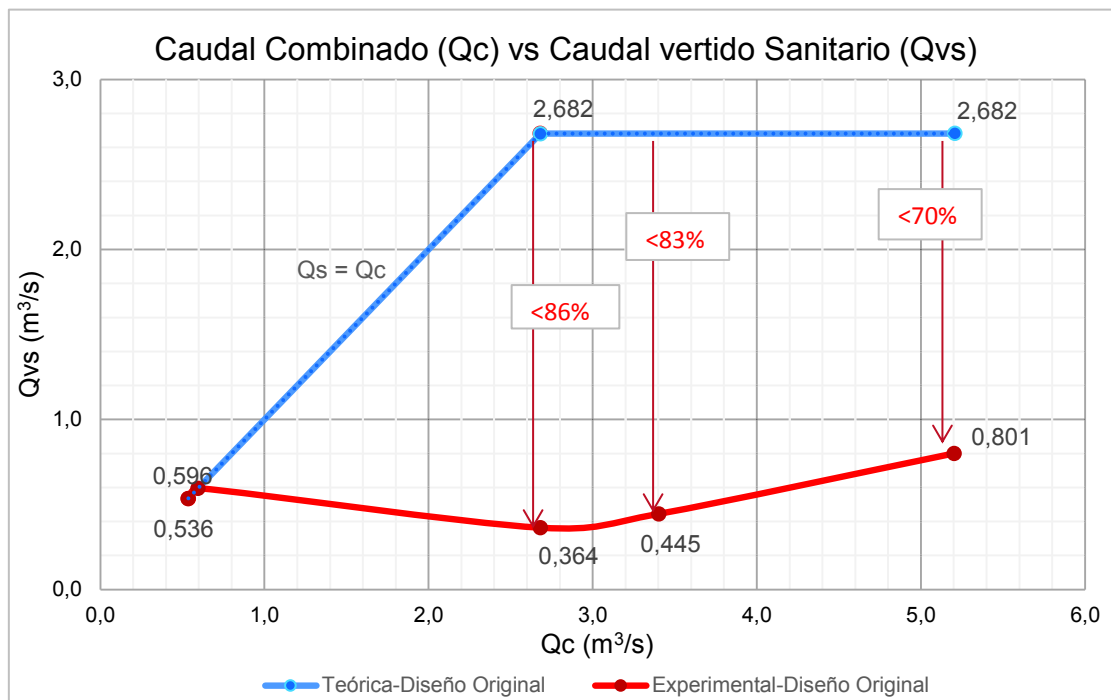
**Tabla 4.3 :** Caudales de diseño y separación para el separador PE36A

<b>CAUDALES DE DISEÑO ORIGINALES SEPARADOR PE36A</b>						
<b>Caudal</b>	<b>Qc (ingreso) m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Qvs (salida) m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Qvp (salida) m<sup>3</sup>/s</b>	<b>% Sanitario</b>	<b>% Pluvial</b>	<b>Observaciones</b>
Mín.	0,536	0,563	0	100	0	Caudal sanitario en estiaje
Máx.	5,207	2,68	2,53	51,5	48,5	Caudal máximo combinado

**Fuente:** Autores

En la **Figura 4-1** se presenta la curva de derivación teórica y experimental para el modelo del separador con diseño original.

**Figura 4-1:** Curva de derivación  $Q_c$  vs  $Q_{vs}$ . Escala de caudal: Prototipo



**Fuente:** Autores

Existe un déficit de derivación como caudal sanitario para caudales combinados mayores a 0.596 m<sup>3</sup>/s como se muestra en la **Figura 4-1** y se detalla en la **Tabla 4.4**.

**Tabla 4.4:** Caudales teóricos vs caudales experimentales

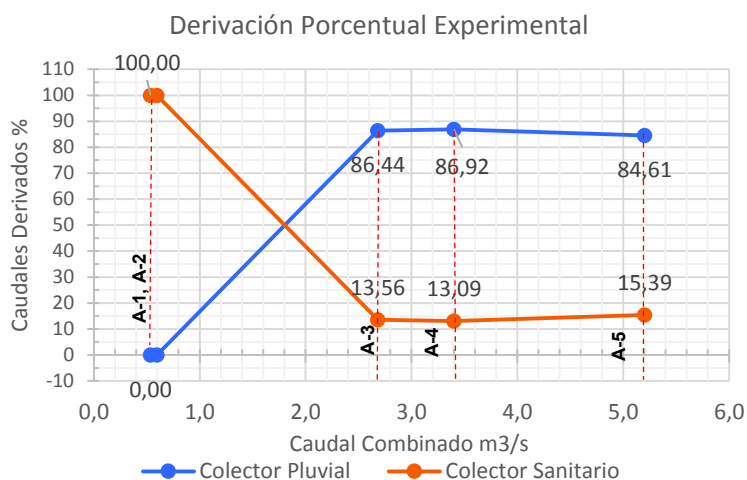
CAUDALES TEÓRICOS vs EXPERIMENTALES					
Prueba	Experimental		Teórico	Qvs (exp. - teo.)	% Deficit Qvs
	Qc	Qvs	Qvs		
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
A-1	0,536	0,536	0,536	0,00	0,00%
A-2	0,596	0,596	0,596	0,00	0,00%
A-3	2,682	0,364	2,682	-2,32	86,44%
A-4	3,402	0,445	2,682	-2,24	83,40%
A-5	5,202	0,801	2,682	-1,88	70,15%

**Fuente:** Autores

## 4.2 Conclusiones

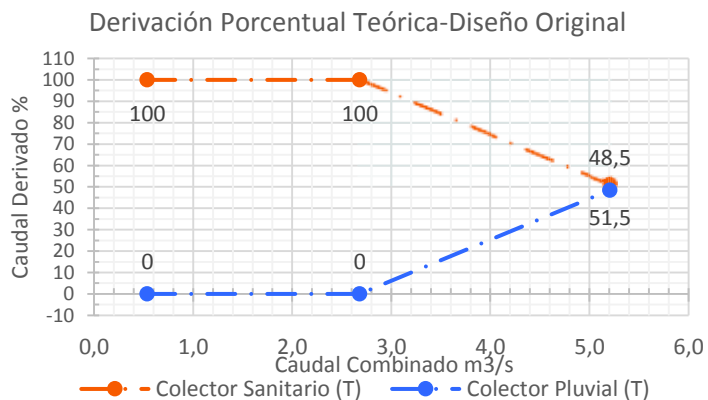
De la ejecución del plan de pruebas en el modelo físico se concluye que los objetivos de derivación previstos según el diseño original se cumplen de forma parcial e insuficiente. Se presenta un exceso de derivación hacia el colector pluvial para el rango comprendido entre (A-2: 0.59 m<sup>3</sup>/s – A-5: 5.20 m<sup>3</sup>/s). El inicio del vertido se encuentra próximo al valor del caudal sanitario en tiempo seco (A1: 0.536 m<sup>3</sup>/s), lo que conllevaría que el río reciba descargas con altas cargas de contaminantes de manera frecuente.

**Gráfico 4-1:** Derivación porcentual experimental- modelo con diseño original



Fuente: Autores

**Gráfico 4-2:** Derivación porcentual teórica- diseño original

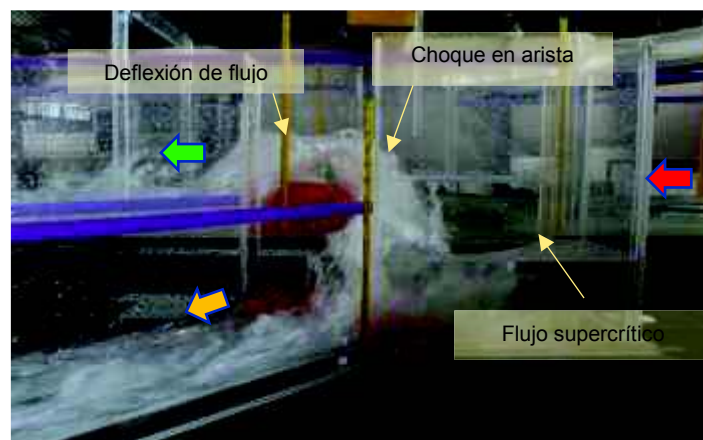


Fuente: Autores

El modelo con el diseño original presenta un comportamiento hidráulico que limita el cumplimiento de los objetivos de derivación y compromete la estabilidad de la estructura. Los problemas evidenciados se detallan a continuación:

- El umbral de derivación actúa como un deflector; por su geometría constituye un obstáculo insuficiente para el cambio de dirección del flujo en caudales medios-altos (Pruebas: A-3, A-4, A-5). Para aumentar la eficiencia en la derivación es necesario cambiar el tipo de régimen de aproximación de super crítico a sub crítico.
- La derivación de caudal hacia el canal sanitario para caudales medios-altos se produce por el choque del flujo con la arista del orificio lateral y no como resultado del trabajo conjunto umbral de derivación-vertedero. Este comportamiento crea zonas con presiones en las paredes del colector no previstas, que a lo largo del tiempo comprometen la estabilidad de la estructura.
- Debido a que el caudal que se deriva hacia el colector sanitario es inferior al esperado la sección del oficio derivador se encuentra subutilizada.
- Se evidencian sobreelevaciones en la zona de separación.
- El umbral de fondo al ingreso del colector sanitario dificulta la auto limpieza propiciando la creación de zonas de acumulación de sedimentos.
- Para caudales altos (Pruebas A-4, A-5) la plataforma de uso operativo presenta una lámina intermitente de fluido, requiriendo limpiezas regulares.

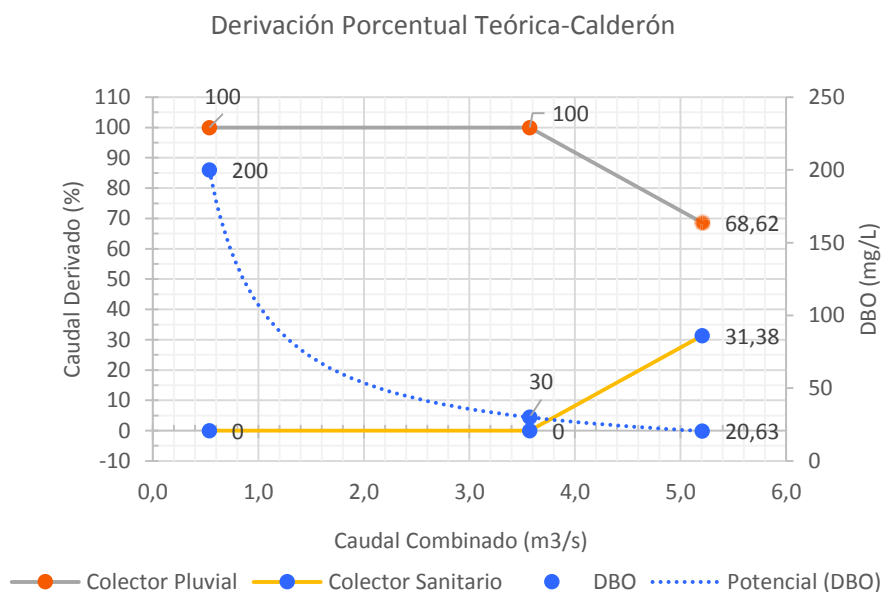
**Fotografía 4-1:** Comportamiento del flujo en el separador de caudales, vista lateral zona de separación. Prueba A-3: Caudal combinado 2.68 m<sup>3</sup>/s.



Las modificaciones deben considerar una solución para los problemas anteriormente expuestos. Se resalta la importancia de trabajar sobre la geometría del umbral y orificio de derivación.

A la luz de los resultados de estudios sanitarios específicos y en cumplimiento de la normativa ambiental vigente, se considera que la optimización debe tomar en cuenta los porcentajes de derivación propuestos en (Calderón, 2017).

**Gráfico 4-3:** Derivación porcentual teórica propuesta por Calderón.



## CAPÍTULO 5

### MODELO FÍSICO CON DISEÑO MODIFICADO

#### 5.1 INTRODUCCIÓN

El diseño original de la estructura cumple de manera insuficiente con la derivación de caudales esperada. Las siguientes propuestas de modificación se adaptaron al modelo físico del diseño original y tuvieron como objetivo optimizar el comportamiento hidráulico del separador de caudales.

La fundamentación teórica explicada en el numeral **2.1.3** es la base sobre la cual se propone una solución que integre el enfoque sanitario al comportamiento hidráulico. Esta relación asocia una cantidad de DBO determinada para cada caudal combinado respectivamente, a través de una curva de derivación teórica.

La curva de derivación teórica planteada por Calderón en el **Gráfico 2-1** es la justificación teórica que permite la solución de la problemática sanitaria a través de la optimización hidráulica. De esta manera las propuestas de modificación planteadas a continuación pretenden que la curva de derivación experimental se aproxime a la curva de derivación teórica.

Se propusieron modificaciones preliminares, las cuales fueron evaluadas en modelo numérico tridimensional por investigadores del CIERHI en el software ANSYS.

Una vez calibrado y validado el modelo numérico, se procedió a evaluar las propuestas de modificación preliminares, eliminando las opciones que no cumplían con un funcionamiento hidráulico adecuado y que estaban alejadas de la separación de caudales esperada.

Las modificaciones a continuación descritas fueron las opciones que presentaron un funcionamiento hidráulico aceptable en el modelo numérico, razón por la cual se las adaptó al modelo físico.

## 5.2 DESCRIPCIÓN DE LAS MODIFICACIONES

### 5.2.1 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M-2

A continuación, se describen las modificaciones geométricas ejecutadas sobre el modelo físico original según la propuesta M-2, así como la funcionalidad de cada modificación:

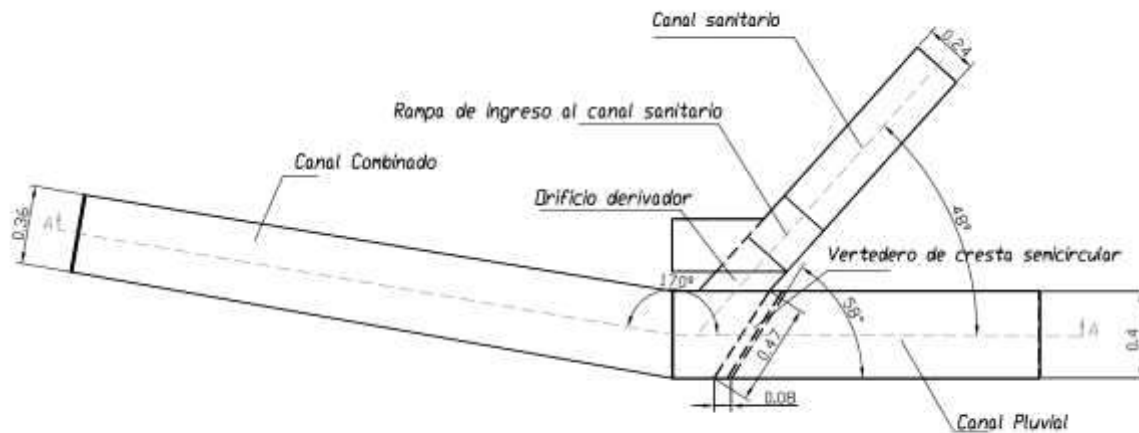
**Tabla 5.1:** Funcionalidad de cada modificación

	<b>Modificación</b>	<b>Funcionalidad</b>
1	Implementación de un vertedero de cresta semicircular con una altura total hasta la cresta de 27 cm, inclinado en planta 58° con respecto al eje del canal pluvial medidos en sentido anti-horario.	Asegurar el embalsamiento necesario para poder derivar por el orificio vertedero los 63.92 l/s (Prototipo: 3.573 m <sup>3</sup> /s) del caso teórico; así como la adecuada aireación en el vertido que evite presiones negativas en las estructuras.
2	Alineación en planta de las paredes del canal sanitario hasta la intersección con el canal combinado.	Evitar los choques de flujo contra la arista interna del orificio y plataforma de revisión.
3	Incremento del área de la sección del orificio derivador, de 12cm de altura por 38 cm de ancho, a 15 cm de altura por 32 cm de ancho.	La alineación mencionada en la modificación 2 condiciona la longitud del orificio, razón por la cual se debe variar la altura para alcanzar el porcentaje de derivación adecuado.
4	Extensión horizontal de la base del orificio vertedero en su salida, hasta el inicio de la rampa que tiene una inclinación de 26° con una posición ortogonal al eje	Permite el descenso uniforme del flujo hacia el fondo del canal sanitario, ayudando así a que los flujos turbulentos y con ondas cruzadas se reduzcan.
5	Conservación del nivel de la plataforma de revisión a 35 cm medidos desde el fondo del pozo de revisión.	Evitar inundaciones en esta zona en épocas de lluvia intensa.
6	Retiro del umbral de la zona de ingreso al canal sanitario.	Evitar cualquier dificultad para la auto limpieza de sedimentos en el pozo de revisión.

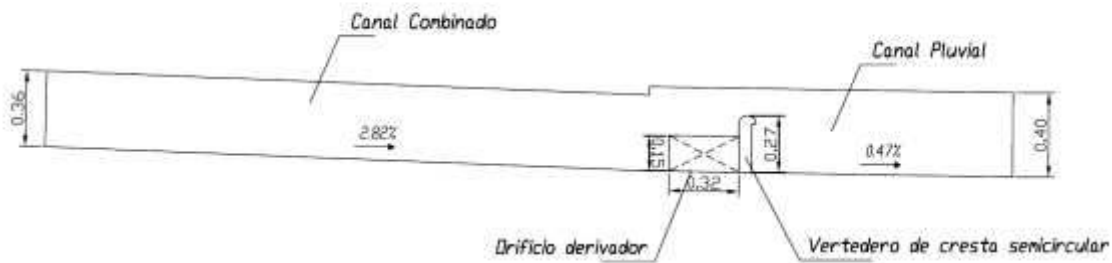
**Fuente:** Autores



**Figura 5-1:** Esquemas de la configuración geométrica M2



VISTA EN PLANTA



CORTE A-A

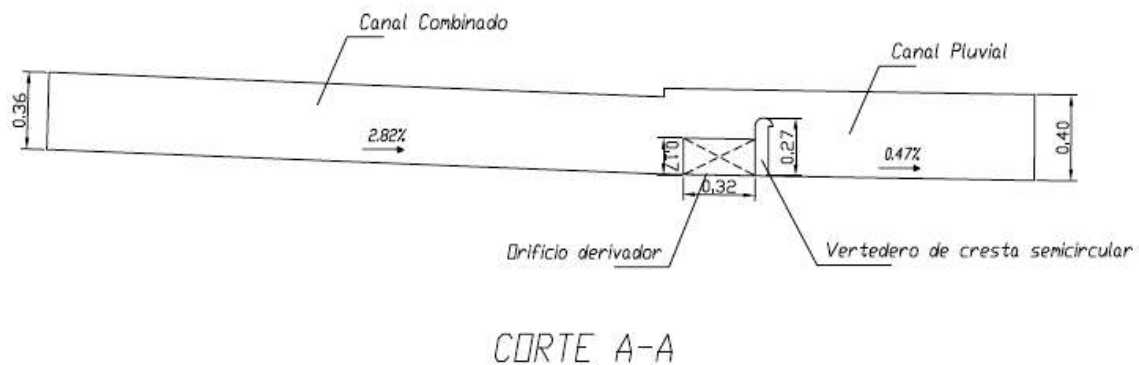
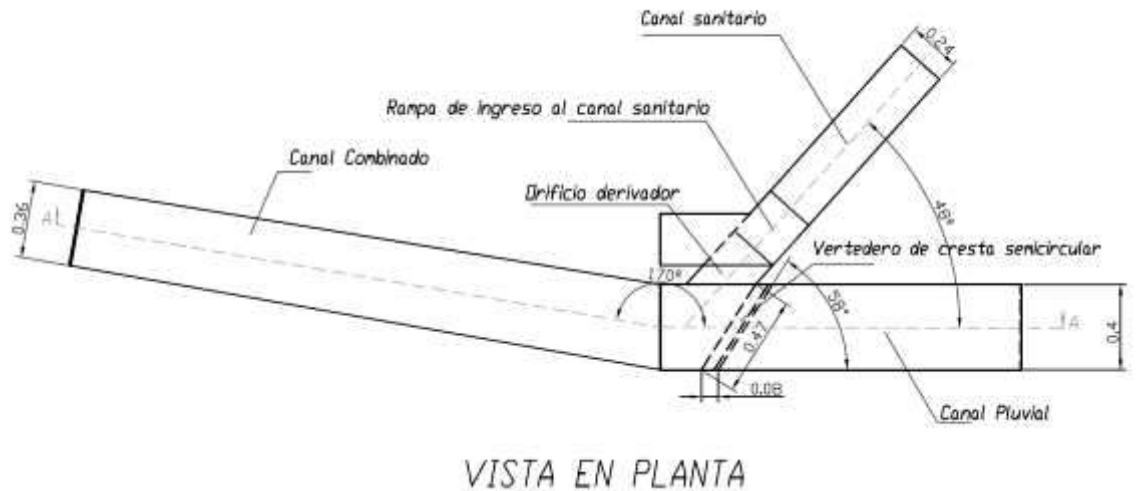
**Fuente:** Autores

### 5.2.2 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M-3

La modificación M-3 conserva la configuración geométrica de la propuesta de modificación M-2, con la diferencia de que se amplía el orificio vertedero a una sección de 17 cm de altura por 32 cm de ancho con la finalidad de aumentar los valores de caudales derivados y así ajustar los valores que componen la curva experimental a aquellos dados por la curva de derivación teórica de caudales propuesta por Calderón.

En la **Figura 5-2** se muestra un esquema de la modificación M-3 con las dimensiones y cambios incorporados en su geometría.

**Figura 5-2:** Esquemas de la configuración geométrica M-3



**Fuente:** Autores

### 5.3 PLAN DE PRUEBAS

Para el análisis experimental del funcionamiento hidráulico de las modificaciones planteadas al diseño original de la estructura, se elegirá de entre los siguientes escenarios a los más representativos en cada caso, según sea el requerimiento específico:

### 5.3.1.1 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M-2

Una vez ejecutadas las modificaciones mencionadas, se determina un plan de pruebas, el cual contempla tres ensayos experimentales, con los cuales se puede verificar el cumplimiento de los objetivos de derivación requeridos:

La prueba B-1 representa el caudal máximo combinado que este modelo modificado puede derivar completamente hacia el canal sanitario. La prueba B-2 representa el caudal combinado límite de vertido, con el cual se alcanza la dilución requerida para lograr el límite máximo de DBO, antes del vertido hacia el canal pluvial . La prueba B-3 representa el caudal máximo de diseño.

En la **Tabla 5.2** se resumen los caudales que caracteriza a cada una de las pruebas.

**Tabla 5.2:** Plan de pruebas para la propuesta de modificación M2

<b>Pruebas</b>	<b>Qc. modelo l/s</b>	<b>Qc. prototipo m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Observaciones</b>
B-1	42.23	2.361	<b>Q máximo antes del vertido</b>
B-2	63.90	3.572	<b>Q límite de vertido en DBO</b>
B-3	93.05	5.201	<b>Q Máximo de Diseño</b>

**Fuente:** Autores

### 5.3.1.2 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M-3

Para el análisis del comportamiento hidráulico del separador de caudales PE36A se presenta un plan de pruebas que responde a caudales de diseño y a condiciones de funcionamiento de la estructura, y tienen como finalidad alcanzar los objetivos técnicos propuestos para la fase de verificación del diseño definitivo.

Es así que el valor de caudal para las pruebas C-1, C-3 y C-5 provienen de los datos de diseño proporcionados por la EPMAPS; en el caso de la prueba C-2 se elige el valor de su caudal con el fin de modelar condiciones de funcionamiento intermedios entre el caudal mínimo o sanitario y el caudal límite de vertido; en el caso de la prueba C-4 se modela el caudal que define el límite del grado de

contaminación en el vertido pluvial, como resultado del enfoque sanitario ya explicado anteriormente en el inciso 2.1.3

**Tabla 5.3** Plan de pruebas para la propuesta de modificación M-3 (Modificación Definitiva)

<b>Pruebas</b>	<b>Qc modelo l/s</b>	<b>Qc prototipo m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Observaciones</b>
C-1	9.58	0.536	<b>Q sanitario</b>
C-2	26.08	1.458	<b>Q intermedio</b>
C-3	48.11	2.689	<b>Q máximo antes del vertido</b>
C-4	63.92	3.573	<b>Q límite de vertido en DBO</b>
C-5	93.01	5.199	<b>Q máximo de diseño</b>

**Fuente:** Autores

## CAPÍTULO 6

### EXPERIMENTOS REALIZADOS EN EL MODELO FISICO CON MODIFICACIONES

#### 6.1 RESULTADOS OBTENIDOS

##### 6.1.1 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M-2

A continuación, se realiza una descripción de las características principales del flujo en las pruebas ejecutadas en el separador de caudales PE36A con la propuesta de modificación M-2

##### 6.1.1.1 PRUEBA EXPERIMENTAL B-1

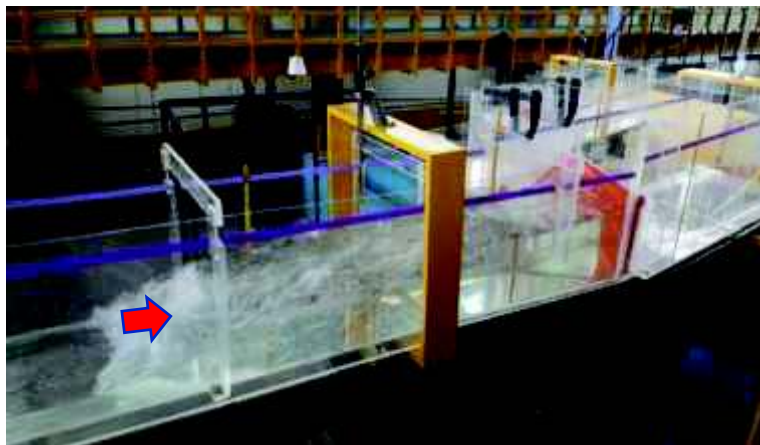
Se ejecuta la prueba B-1 con el máximo caudal combinado con el cual no existe vertido hacia el canal pluvial, siendo éste 42.23 l/s en modelo (Prototipo: 2.361 m<sup>3</sup>/s), valor encontrado experimentalmente.

**Fotografía 6-1:** Prueba B-1 Vista lateral Izquierda zona de separación



La **Fotografía 6-2** muestra la vista derecha de la zona de separación, se evidencia la formación del resalto hidráulico aguas arriba de la zona de separación.

**Fotografía 6-2:** Prueba B-1 Vista lateral derecha. Formación del resalto hidráulico en el canal combinado.



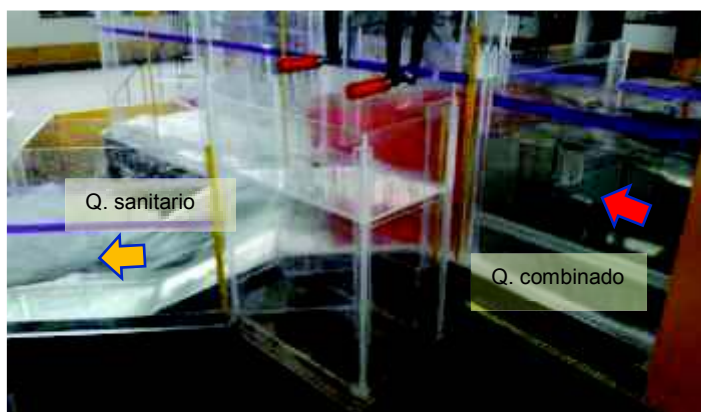
**Principales características:**

Se ejecuta la prueba B-1 con el máximo caudal combinado con el cual no existe vertido hacia el canal pluvial, siendo éste 42.23 l/s en modelo (Prototipo: 2.361 m<sup>3</sup>/s), valor encontrado experimentalmente. Se da el cambio de régimen de flujo aguas arriba del separador mediante la formación del resalto hidráulico, como se observa en la **Fotografía 6-2**.

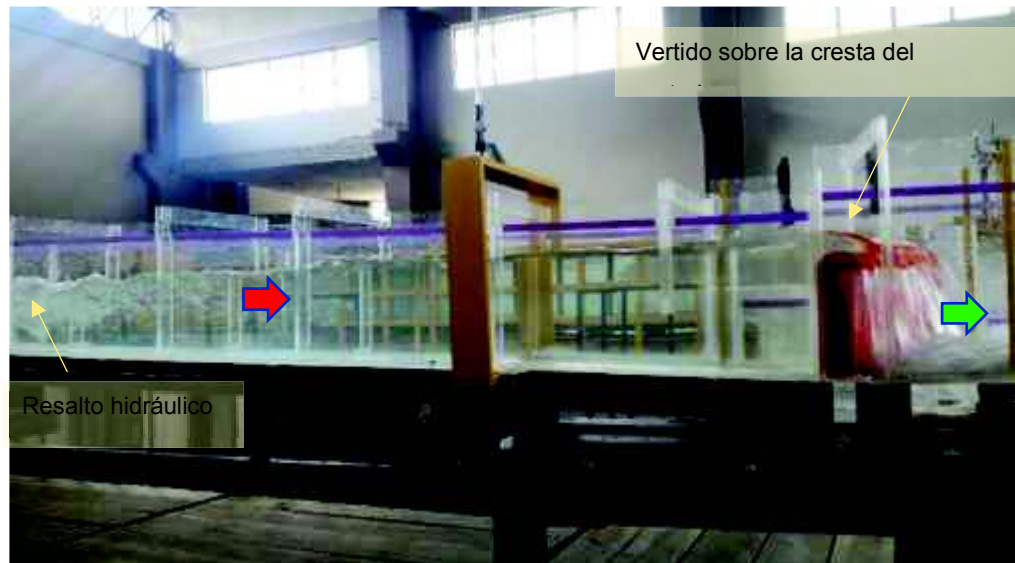
**6.1.1.2 PRUEBA EXPERIMENTAL B-2**

Se ejecuta la prueba B-2 con el caudal combinado con el cual, según Calderón, se alcanza la dilución del caudal sanitario hasta lograr que su calidad sea la del máximo límite de vertido, siendo éste 63.90 l/s en modelo.

**Fotografía 6-3:** Prueba B-2 Vista lateral izquierda. Comportamiento de flujo en la zona de separación.



**Fotografía 6-4:** Prueba B-2 Vista lateral derecha. Formación del resalto hidráulico en el canal combinado y vertido hacia el canal pluvial.



#### **Principales características:**

De los 63.90 l/s en modelo (Prototipo: 3.572 m<sup>3</sup>/s), 53.89 l/s se derivan hacia el canal sanitario y 10.01 l/s hacia el canal pluvial.

Según la curva de derivación teórica propuesta por Calderón, la totalidad del caudal combinado debería derivarse hacia el canal sanitario, siendo el caudal pluvial igual a cero, pero esto no se alcanza en lo experimental, como se observa en la **Fotografía 6-4**.

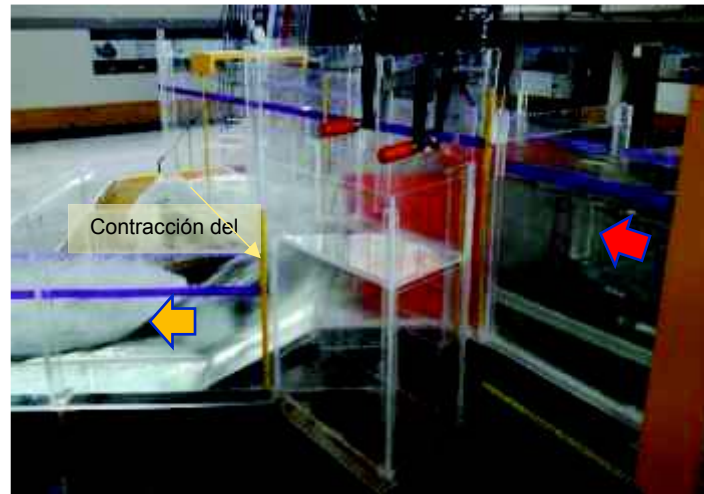
Se da una mayor contracción del flujo a la salida del orificio derivador hacia el margen derecho en comparación con el margen izquierdo.

El flujo sobre la cresta del vertedero tiene un calado constante y se aproxima a los límites de construcción, es decir al techo del colector.

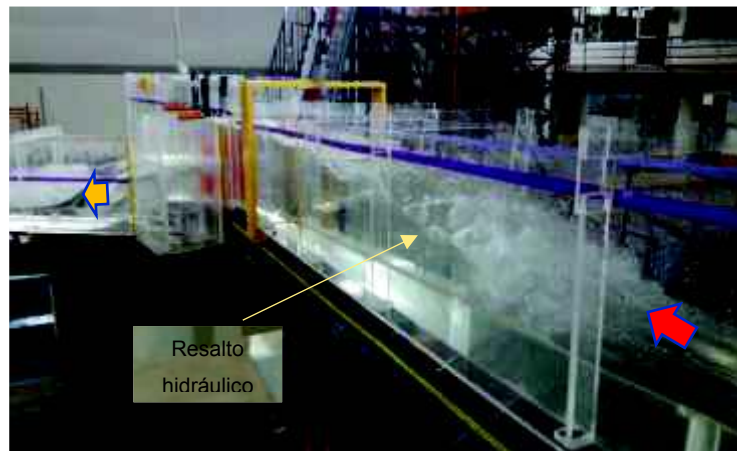
#### **6.1.1.3 PRUEBA EXPERIMENTAL B-3**

Se ejecuta la prueba B-3 con el máximo caudal de diseño según las memorias técnicas, siendo éste 93.05 l/s en modelo.

**Fotografía 6-5:** Prueba B-3 Vista lateral izquierda. Comportamiento de flujo en la zona de separación.



**Fotografía 6-6:** Prueba B-3 Vista lateral izquierda. Formación del resalto hidráulico en el canal combinado.



**Fotografía 6-7:** Prueba B-3 Vista lateral derecha. Umbral de direccionamiento y vertido hacia el canal pluvial.





**Principales características:**

De los 93.05 l/s en modelo (Prototipo: 5.201 m<sup>3</sup>/s), 62.01 l/s se derivan hacia el canal sanitario y 31.03 l/s hacia el canal pluvial. Según la curva de derivación teórica propuesta por Calderón, 63.92 l/s deberían derivarse hacia el canal sanitario, siendo el caudal pluvial 29.22 l/s, pero esto no se alcanza en lo experimental, como se observa en la **Fotografía 6-5**. Se forma un resalto hidráulico en el canal combinado, como se observa en la **Fotografía 6-6**.

El calado en la proximidad al separador supera de forma intermitente los límites constructivos representados por la cinta en púrpura. La lamina inferior del flujo de vertido hacia el canal pluvial se adhiere al perfil del vertedero de cresta semicircular como se observa en la **Fotografía 6-7**. En cuanto a la descarga hacia el canal sanitario, se presenta una contracción de flujo hacia el margen derecho en la salida del orificio derivador y una sobre elevación importante hacia el margen izquierdo.

**6.1.1.4 CAUDALES SEPARADOS**

El comportamiento cualitativo del flujo presenta un cambio de régimen de supercrítico a subcrítico debido a la presencia del vertedero de cresta semicircular; el flujo a la salida del orificio ocupa la totalidad de su ancho, ya sea cuando trabaja como vertedero para caudales bajos o como orificio propiamente dicho para caudales altos, provocando contracciones del flujo en su salida. El flujo ingresa al canal sanitario desde la rampa de ingreso, evitando así que su descenso sea brusco.

La geometría del vertedero de cresta semicircular ayuda a que exista una adecuada aireación del fluido en el vertido hacia el canal pluvial, evitando así presiones negativas.

El resumen cuantitativo de las pruebas ejecutadas en el modelo del separador de caudales con las modificaciones de la propuesta M-2 se muestra en la **Tabla 6.1**.

**Tabla 6.1:** Resultados de las pruebas sobre el modelo físico una vez realizadas las modificaciones correspondientes a la propuesta M-2

<b>CAUDALES SEPARADOS EN EL MODELO FÍSICO MODIFICADO SEGÚN LA PROPUESTA M-2 PARA EL SEPARADOR PE36A</b>					
<b>Prueba</b>	<b>Caudal</b>	<b>Unidad</b>	<b>Modelo</b>	<b>Prototipo</b>	<b>% Derivado</b>
B-1	Q. Combinado	l/s	42,23	2360,73	
	Q. Vertido sanitario	l/s	42,23	2360,73	100%
	Q. Vertido pluvial	l/s	0,00	0,00	0%
B-2	Q. Combinado	l/s	63,90	3571,96	
	Q. Vertido sanitario	l/s	53,89	3012,19	84%
	Q. Vertido Pluvial	l/s	10,01	559,77	16%
B-3	Q. Combinado	l/s	93,05	5201,41	
	Q. Vertido Sanitario	l/s	62,01	3466,66	67%
	Q. Vertido Pluvial	l/s	31,03	1734,74	33%

**Fuente:** Autores

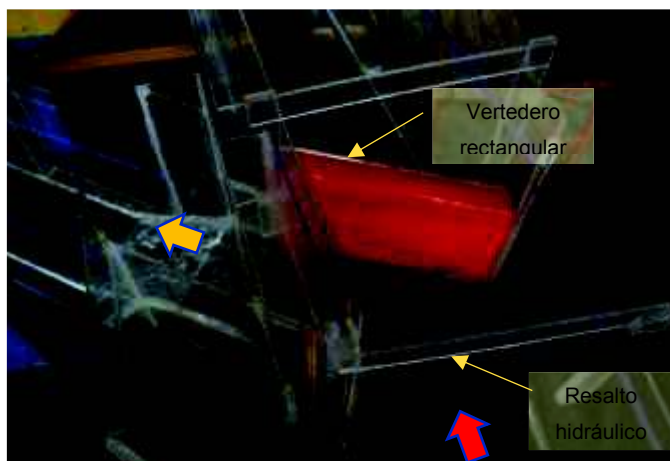
### 6.1.2 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M3

A continuación, se realiza una descripción de las características principales del flujo en la estructura separadora de caudales PE36A con las modificaciones correspondientes a la propuesta de modificación M-3.

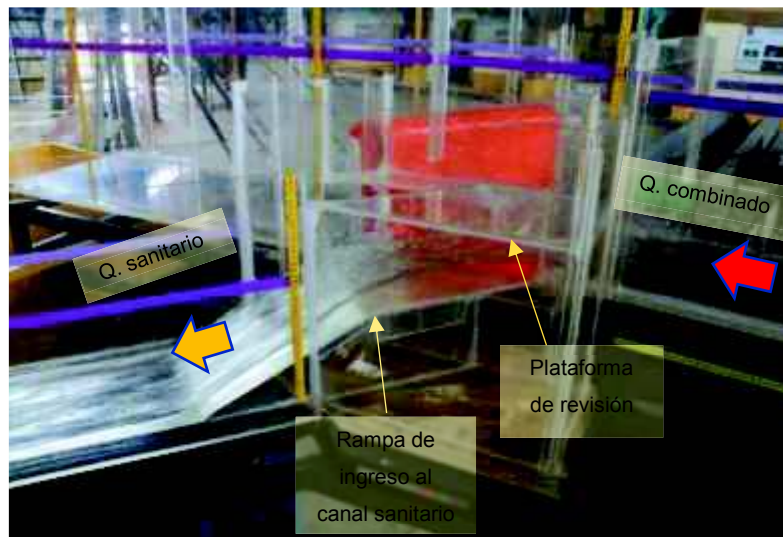
#### 6.1.2.1 PRUEBA EXPERIMENTAL C-1

Se ejecuta la prueba C-1 con el mínimo caudal circulante en el sistema, es decir con el caudal sanitario, siendo éste 9.58 l/s en modelo (Prototipo: 0.536 m<sup>3</sup>/s).

**Fotografía 6-8:** Prueba C-1. Vista superior del comportamiento del flujo en el separador de caudales con modificación definitiva



**Fotografía 6-9:** Prueba C-1. Comparación de la Vista superior lateral izquierda del comportamiento del flujo en el separador de caudales. (Superior). Modificación definitiva.



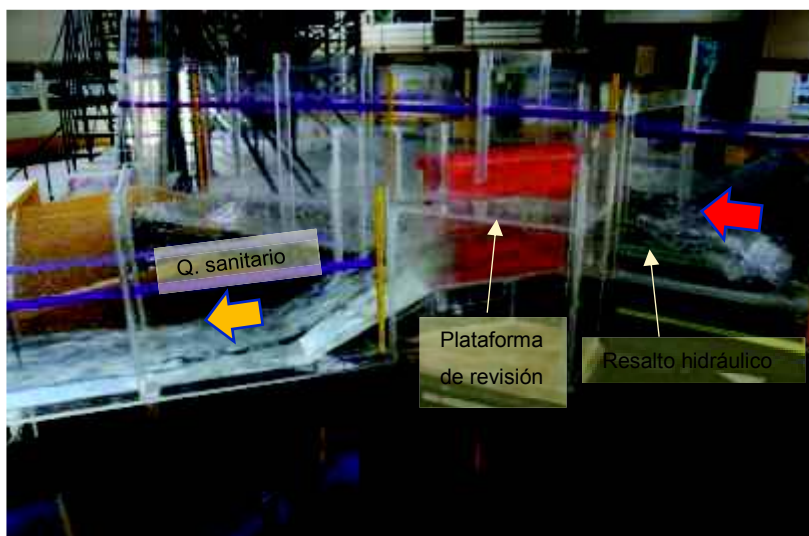
#### **Principales características:**

El caudal ensayado en esta prueba corresponde al que circula por el canal combinado en épocas de estiaje, es decir al flujo sanitario. La totalidad del mismo se deriva hacia el canal sanitario, cumpliendo así con lo esperado. Se tiene un flujo de aproximación en régimen supercrítico, formándose aguas arriba del vertedero de derivación un resalto hidráulico de aproximadamente 34 cm de longitud, fenómeno que facilita el ingreso ordenado y uniforme del flujo hacia el canal sanitario, como se puede ver en la **Fotografía 6-8**. El flujo cambia de dirección y vierte a lo largo de toda la longitud del orificio derivador, con un calado uniforme que llega hasta un tercio de la altura del orificio, a diferencia del fenómeno presente en el diseño original, donde el flujo era desordenado y el vertido se daba en el orificio con longitud efectiva de máximo 73 % de la longitud total del orificio. En el canal combinado el flujo se encuentra en régimen supercrítico, en donde no se evidencia perturbaciones ni ondas cruzadas. No existe humedad en la plataforma de revisión, como se puede ver en la parte inferior de la **Fotografía 6-9**.

#### **6.1.2.2 PRUEBA EXPERIMENTAL C-2**

La prueba C-2 modela condiciones intermedias de operación del separador de caudales. Se escogió así un caudal de 26.08 l/s (1.458 m<sup>3</sup>/s en prototipo), garantizando así que con este caudal no existirá derivación hacia el canal pluvial.

**Fotografía 6-10:** Prueba C-2. Vista lateral izquierda del comportamiento del flujo



**Fotografía 6-11:** Prueba C-2. Vista superior del comportamiento del flujo.



**Fotografía 6-12:** Prueba C-2. Vista lateral derecha, resalto hidráulico y vertedero de cresta semicircular.



### Principales características:

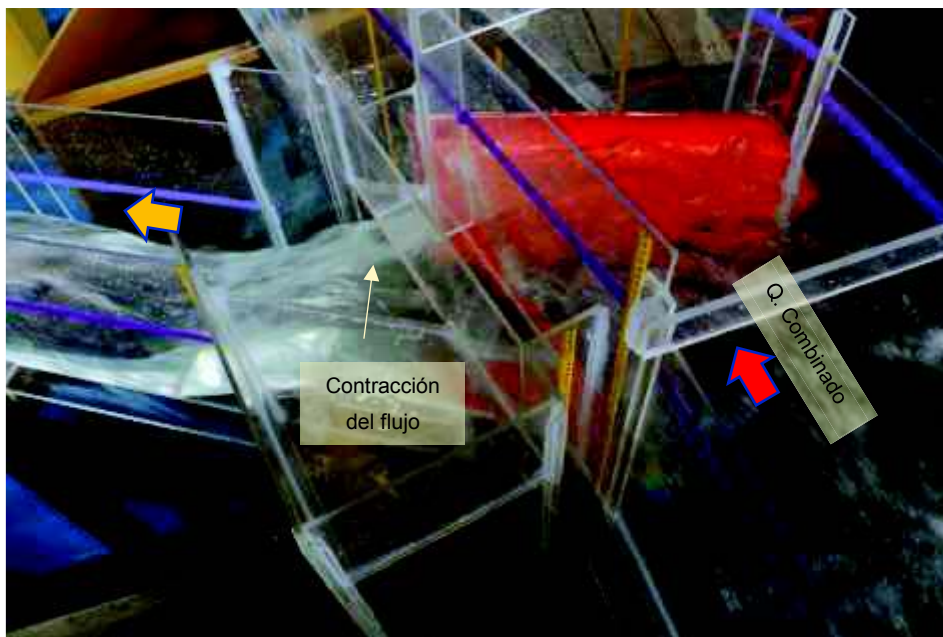
El cambio de régimen de flujo de supercrítico a subcrítico se desarrolla en las cercanías de la zona de derivación, con la presencia de un resalto hidráulico, como se observa en la **Fotografía 6-12**. El calado del agua llega hasta los dos tercios de la altura del vertedero donde el flujo cambia de dirección y circula por el orificio derivador con un calado que oscila entre 8 y 9 cm a lo largo de toda la longitud.

El flujo uniforme ingresa de manera controlada al canal sanitario, al descender por la rampa el flujo se acelera y retoma el régimen supercrítico. No existe presencia de vórtices, tampoco presencia de agua en la plataforma de revisión, tal como consta en la **Fotografía 6-11**.

#### 6.1.2.3 PRUEBA EXPERIMENTAL C-3

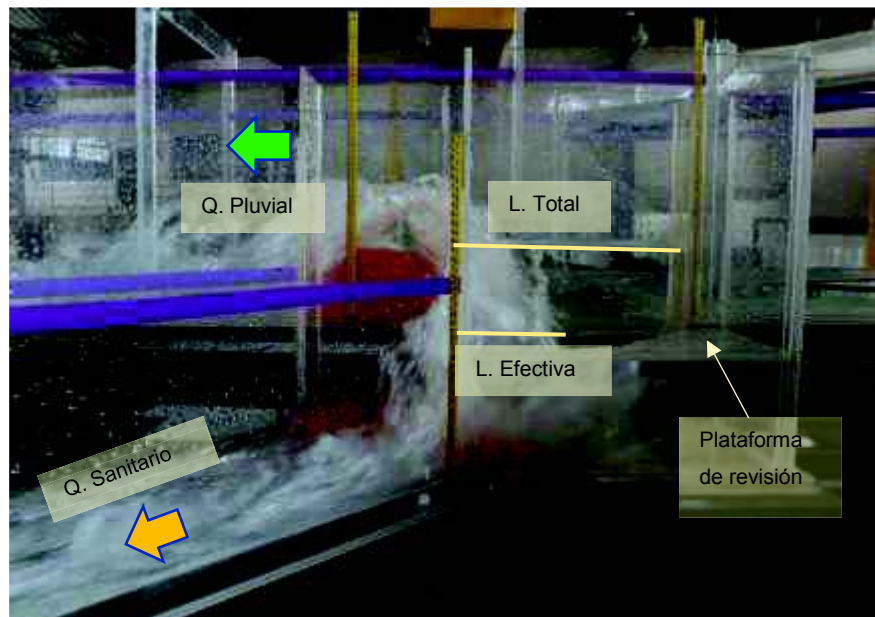
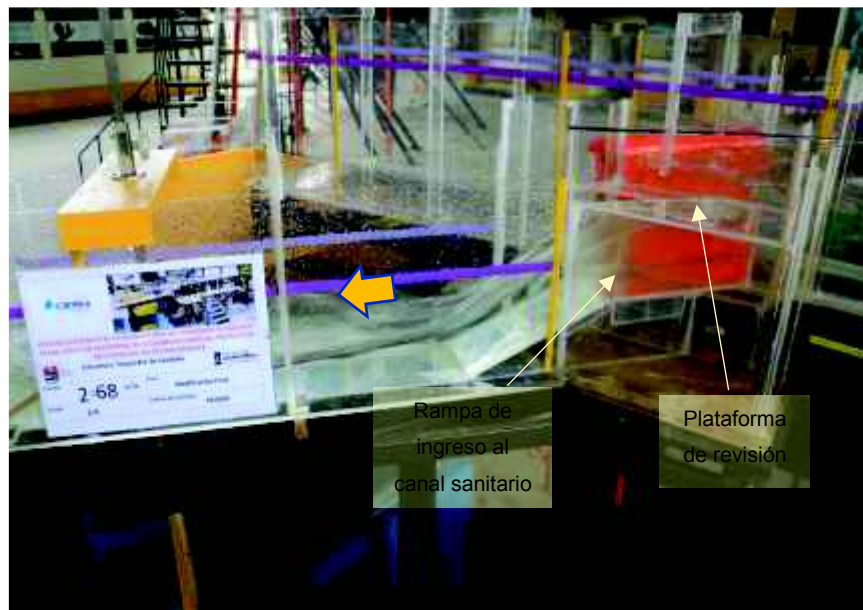
La prueba C-3 modela el caudal máximo límite previo al vertido hacia el canal pluvial, siendo su valor determinado experimentalmente igual a 48.11 l/s en modelo (Prototipo: 2.68 m<sup>3</sup>/s) y comprobando que sea mayor al caudal de derivación sanitario según los diseños originales planteados por la EPMAPS (47.97 l/s)

**Fotografía 6-13:** Prueba C3. Vista superior del comportamiento del flujo





**Fotografía 6-14:** Prueba C3, Vista Lateral, comportamiento del flujo en el separador de caudales. (Superior) Modificación definitiva. (Inferior) Diseño original. Prueba A-3  $.Q=47.97\text{l/s}$



### Principales características:

El resalto hidráulico se desarrolla en el canal combinado desde aproximadamente 1.45 m aguas arriba del vertedero de cresta semicircular; por lo cual el flujo en la zona de separación se encuentra ya en régimen subcrítico. El caldo aguas arriba del vertedero oscila entre los 24 y 27 cm sin producirse vertido hacia el canal pluvial, como se ve en la prueba C-3 modela el caudal máximo límite previo al vertido hacia

el canal pluvial, siendo su valor determinado experimentalmente igual a 48.11 l/s en modelo (Prototipo: 2.68 m<sup>3</sup>/s) y comprobando que sea mayor al caudal de derivación sanitario según los diseños originales planteados por la EPMAPS (47.97 l/s) **Fotografía 6-13**

Gracias al régimen del flujo, a la ubicación y a la alineación del umbral: no existen perturbaciones en el ingreso del caudal por el orificio derivador, entonces circula la totalidad del caudal de 48.11 l/s, presentando una contracción mayor hacia la margen derecha.

El comportamiento descrito contrasta con lo ocurrido en diseño original, como se puede observar en la parte inferior de la **Fotografía 6-14** donde con un mismo caudal, el flujo se encuentra en régimen supercrítico y pasa sobre el umbral hacia el canal pluvial, como en un deflector y derivando únicamente un caudal de 6.51 l/s hacia el canal sanitario, producto únicamente del choque del flujo con la arista interna del orificio.

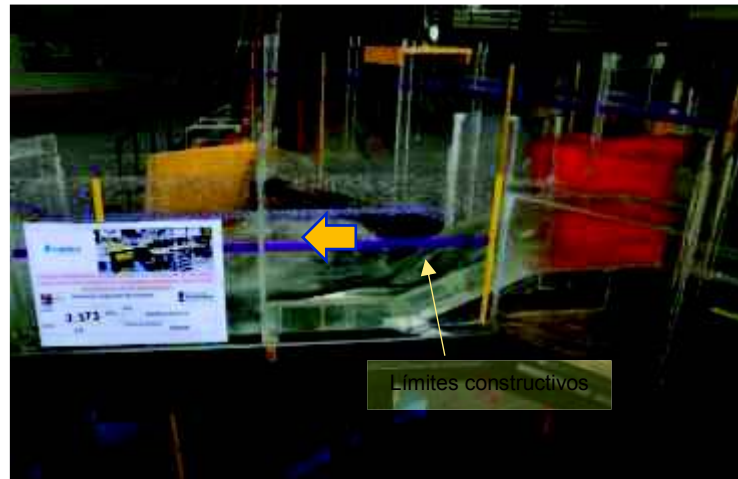
La rampa inclinada y la proyección del canal sanitario hasta el orificio mejoran las condiciones de descarga, evitando, además, el desgaste del hormigón por la caída del caudal sanitario y la creación de posibles zonas de acumulación de sedimentos.

Sin embargo, al elevar la cota de fondo del pozo de revisión con la rampa de ingreso al canal sanitario el flujo se aproxima a los límites constructivos marcados con la cinta en púrpura, para la cual se prevé un incremento en las dimensiones del canal sanitario en las cercanías al pozo de revisión, de manera que, no existan problemas hidráulicos.

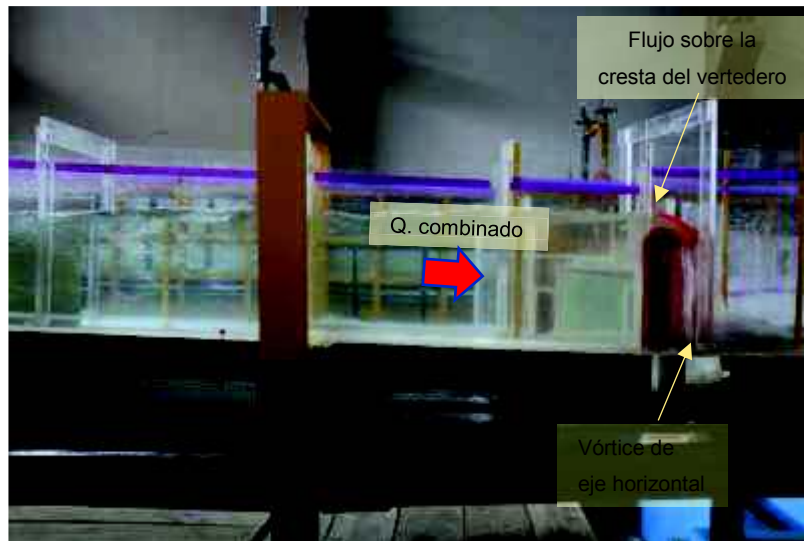
#### **6.1.2.4 PRUEBA EXPERIMENTAL C-4**

La prueba se realizó con un caudal combinado de 63.92 l/s (Prototipo: 3.573 m<sup>3</sup>/s) que corresponde al caudal máximo antes del vertido hacia el canal pluvial propuesto por Calderón.

**Fotografía 6-15:** Prueba C-4. Vista lateral izquierda del comportamiento del flujo en el separador, descarga hacia el canal sanitario.



**Fotografía 6-16:** Prueba C-4. Vista lateral derecha, vertido hacia el canal pluvial, zona de embalsamiento.



### Principales características:

Los resultados muestran que, de los 63.94 l/s modelados, 6.73 l/s son vertidos hacia el canal pluvial y 57.21 l/s hacia el canal sanitario, es decir 11% y 89% respectivamente.

El flujo en el canal combinado es supercrítico, mientras que el flujo de aproximación al vertedero de cresta semicircular está en régimen subcrítico, formándose un resalto hidráulico de 2.08 m de longitud. La lámina de vertido hacia el canal pluvial se adhiere a la cresta semicircular y a su vez mantiene una carga constante a lo



largo de toda su longitud, provocando adicionalmente aireación en la descarga debido a su peculiar geometría. Se forma un vórtice de eje horizontal de entre 3 y 5 cm de diámetro junto a la arista comprendida entre la parte posterior del vertedero y el canal pluvial, donde el alcance del chorro de vertido en la dirección del flujo varía entre 10 y 12 cm tal como se puede observar en la **Fotografía 6-16**.

El orificio descarga a lo largo y ancho de toda su sección, presentando una contracción de flujo a la salida de su margen derecho. El calado sobre la rampa de ingreso al canal sanitario fluctúa entre los límites constructivos, es decir hasta rozar con el techo del colector sanitario. La plataforma de revisión no presenta humedad, como se observa en la prueba se realizó con un caudal combinado de 63.92 l/s (Prototipo: 3.573 m<sup>3</sup>/s) que corresponde al caudal máximo antes del vertido hacia el canal pluvial propuesto por Calderón. **Fotografía 6-15**

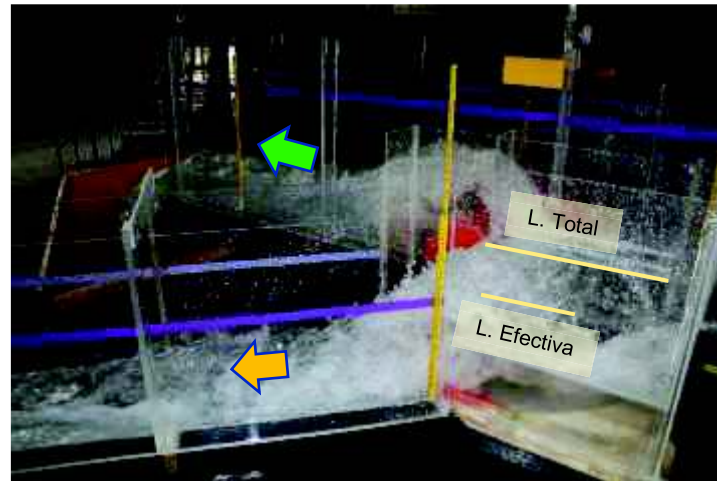
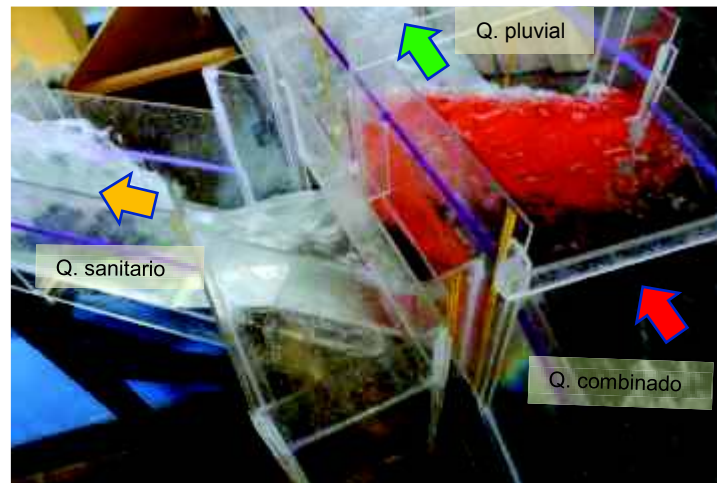
#### 6.1.2.5 PRUEBA EXPERIMENTAL C-5

Según lo previsto en el plan de pruebas, el caudal para la prueba C5 es el caudal de diseño 93.15 l/s (Prototipo: 5.207 m<sup>3</sup>/s), sin embargo, por lo complicado de lograr un caudal exacto debido a la sensibilidad de la válvula de entrada del modelo, el caudal modelado fue 93.01 l/s (5.199 m<sup>3</sup>/s en prototipo), siendo la diferencia menor al 0.5%, por lo cual su influencia es despreciable en el comportamiento hidráulico de la estructura para el caudal máximo de diseño. A continuación, se describen las características cualitativas determinadas en la prueba:

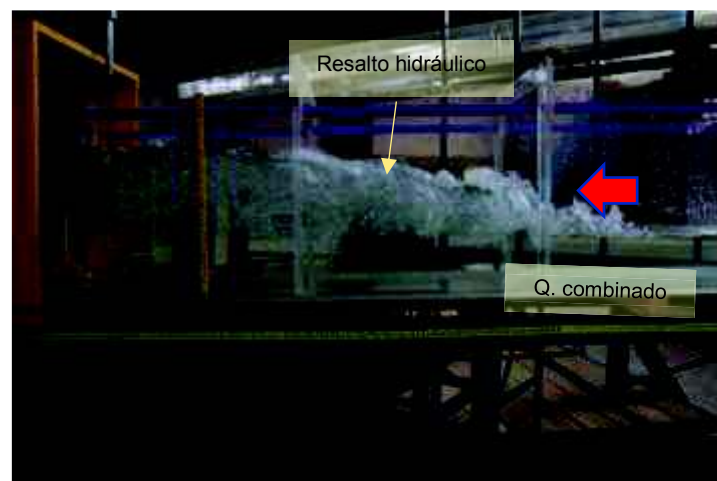
**Fotografía 6-17:** Prueba C-5. Vista lateral izquierda. Descarga del flujo hacia el canal sanitario.



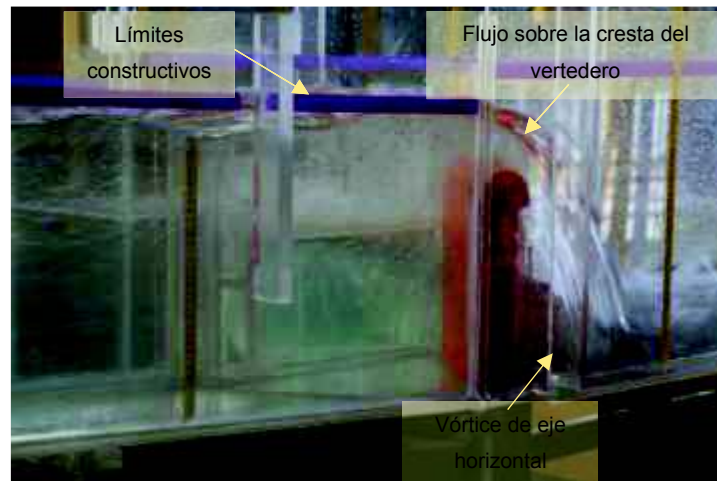
**Fotografía 6-18:** Prueba C-5. Vista en planta. Comportamiento del flujo en el separador (superior) modificación M-3 (inferior) Prueba A-5  $Q = 93.62$  l/s



**Fotografía 6-19:** Prueba C5. Vista lateral izquierda. formación del resalto hidráulico en el canal combinado



**Fotografía 6-20:** Prueba C5. Vista lateral derecha. Vertido sobre el vertedero de cresta semicircular.



**Fotografía 6-21:** Prueba C5. Vista frontal. Comportamiento del flujo en el separador de caudales PE36A



### Principales características:

Los resultados muestran que, de los 93.01 l/s modelados, 25.31 l/s son vertidos hacia el canal pluvial y 67.70 l/s hacia el canal sanitario, es decir 27% y 73% respectivamente.

El flujo en el canal combinado es supercrítico, mientras que el flujo de aproximación al vertedero de cresta semicircular está en régimen subcrítico, formándose un resalto hidráulico de 2.20 m de longitud. **Fotografía 6-19.**

La lámina de vertido hacia el canal pluvial se adhiere a la cresta semicircular y a su vez mantiene una carga constante a lo largo de toda su longitud, alcanzando de manera intermitente los límites constructivos representados por la cinta en púrpura. Razón por la cual, se anticipa la necesidad aumentar la altura de la sección del canal combinado una longitud suficiente que evite que se dé flujo a presión.

Adicionalmente, se provoca la aireación en la descarga debido a su peculiar geometría; se forma un vórtice de eje horizontal de entre 10 y 12 cm de diámetro junto a la arista comprendida entre la parte posterior del vertedero y el canal pluvial, donde el alcance del chorro de vertido en la dirección del flujo varía entre 19 y 22 cm tal como se puede observar en la **Fotografía 6-20**.

El orificio descarga a lo largo y ancho de toda su sección, presentando una contracción de flujo a la salida de su margen derecho con calados de entre 8.5 y 9 cm, en contraste con calados de hasta 20 cm medidos desde la rampa de ingreso al canal sanitario y que sobrepasa al inicio los límites constructivos, es decir hasta rozar con el techo en los puntos de rebose hacia el margen izquierdo. No existe humedad en la plataforma de revisión, como se observa en la **Fotografía 6-18**.

#### **6.1.2.6 CAUDALES SEPARADOS**

El comportamiento cualitativo del flujo presenta un cambio de régimen de supercrítico a subcrítico debido a la presencia del vertedero de cresta semicircular; el flujo a la salida del orificio ocupa la totalidad de su ancho, ya sea cuando trabaja como vertedero para caudales bajos o como orificio propiamente dicho para caudales altos, provocando contracciones del flujo en su salida. El flujo ingresa al canal sanitario desde la rampa de ingreso, evitando así que su descenso sea brusco. La geometría del vertedero de cresta semicircular ayuda a que exista una adecuada aireación del fluido en el vertido hacia el canal pluvial, evitando así presiones negativas.

En la **Tabla 6.2** se muestran los resultados de la fase de experimentación realizada con la propuesta de modificación M-3.

**Tabla 6.2 :** Resultados de las pruebas sobre el modelo físico una vez realizadas las modificaciones correspondientes a la propuesta M-3

<b>MODELO FÍSICO SEPARADOR PE36A</b>					
<b>Prueba</b>	<b>Caudal</b>	<b>Unidad</b>	<b>Modelo</b>	<b>Prototipo</b>	<b>% Derivado</b>
C-1	Q. Combinado	l/s	9.58	535.80	
	Q. Vertido sanitario	l/s	9.58	535.80	100%
	Q. Vertido pluvial	l/s	0	0.00	0.00%
C-2	Q. Combinado	l/s	26.08	1457.65	
	Q. Vertido sanitario	l/s	26.08	1457.65	100%
	Q. Vertido Pluvial	l/s	0	0.00	0.00%
C-3	Q. Combinado	l/s	48.11	2689.43	
	Q. Vertido Sanitario	l/s	48.11	2689.43	100%
	Q. Vertido Pluvial	l/s	0	0.00	0.00%
C-4	Q. Combinado	l/s	63.94	3574.49	
	Q. Vertido Sanitario	l/s	57.21	3198.40	89%
	Q. Vertido Pluvial	l/s	6.73	376.09	11%
C-5	Q. Combinado	l/s	93.01	5199.41	
	Q. Vertido Sanitario	l/s	67.70	3784.53	73%
	Q. Vertido Pluvial	l/s	25.31	1414.88	27%

**Fuente:** Autores

## 6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.2.1 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M-2

El caudal a partir del cual inicia el vertido hacia el canal pluvial (42.23 l/s), es inferior al caudal límite de vertido propuesto por Calderón (63.92 l/s).

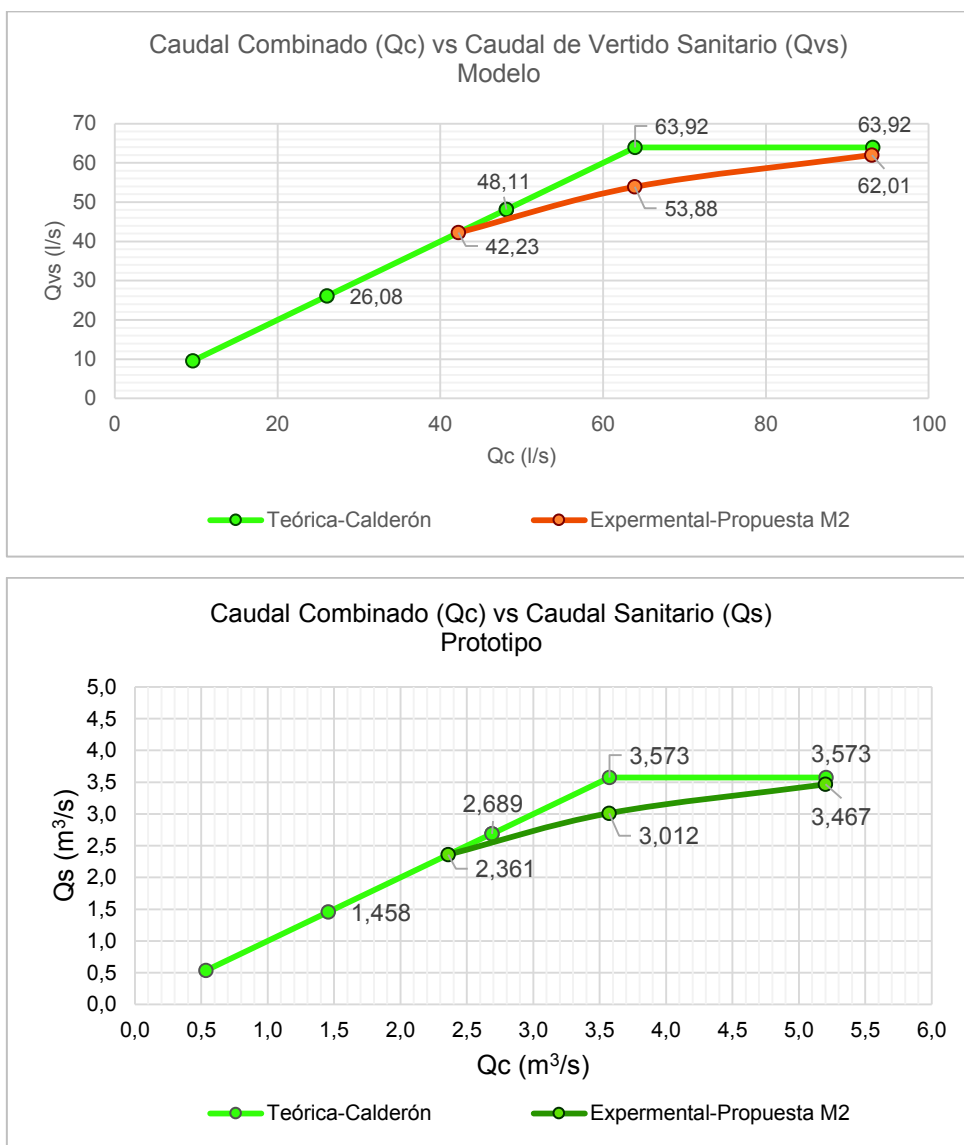
En el **Gráfico 6-1** se observa la curva de separación de caudales obtenida de la experimentación física de la propuesta de modificación M-2 la cual, para todo el rango de caudales, se encuentra por debajo de la curva de derivación teórica propuesta por Calderón, lo que significa que la derivación hacia el canal pluvial inicia con un valor mayor de carga orgánica de DBO/L, por lo cual el vertido hacia el canal pluvial infringiría el límite calculado según lo recomendado por la norma vigente, para un amplio rango de caudales.

Los resultados obtenidos en esta modificación son útiles para la propuesta M-3, pues para lograr una curva de derivación óptima es necesario limitar el rango de caudales en el que se incumple con los límites de vertido, sobre todo con los

caudales pertenecientes al rango ubicado entre los ensayados en las pruebas B-1 y B-2.

Se puntualiza además que, para la modificación definitiva, el caudal que debe ser derivado hacia el canal sanitario no debe ser inferior a 47.97 l/s el mismo que fue establecido según los diseños originales; por lo tanto, se evidencia la necesidad de un incremento en la capacidad de descarga del orificio vertedero para la propuesta M-3.

**Gráfico 6-1:** Curvas de derivación de caudales (caudal combinado vs caudal de vertido sanitario) para la modificación M-2, derivación teórica y diseño original.  
**Superior:** modelo. **Inferior:** prototipo.



Fuente: Autores

### 6.2.2 PROPUESTA DE MODIFICACIÓN M-3

Para las pruebas C1, C2 y C3 el comportamiento hidráulico se da conforme a lo esperado, pues se deriva la totalidad del caudal combinado hacia el canal sanitario, siendo la prueba C3 aquella que representa el caudal previo al inicio del vertido hacia el canal pluvial en el modelo (48.11 l/s).

Para la prueba C4 se simula el caudal de 63.92 l/s con el cual según Calderón se alcanza una dilución entre caudales de origen sanitario y pluvial de tal manera que la calidad del agua combinada sea de 30 mgDBO/l (Límite calculado para el vertido directo sobre cuerpos hídricos); en esta prueba el caudal vertido hacia el colector pluvial es de 6.73 l/s, cuando lo estipulado teóricamente es de 0 L/s.

En la prueba C5 se simula el caudal máximo de diseño (93.01 l/s), en la cual el caudal vertido hacia el colector pluvial es de 25.31 l/s y el caudal derivado hacia el canal sanitario (67.70 l/s) es mayor al contemplado según la curva de derivación teórica propuesta por Calderón (63.92 l/s).

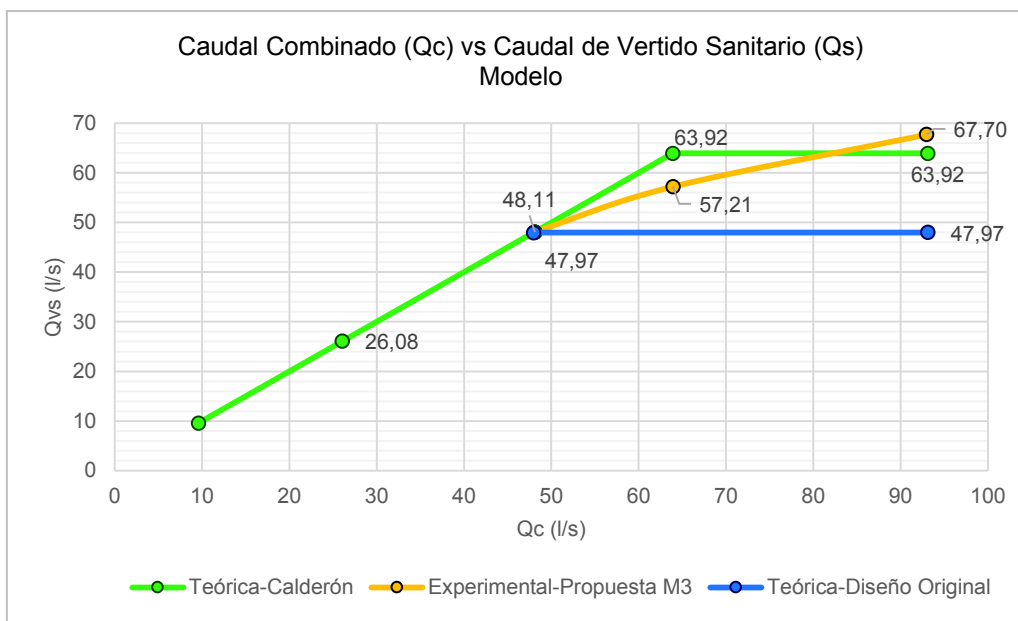
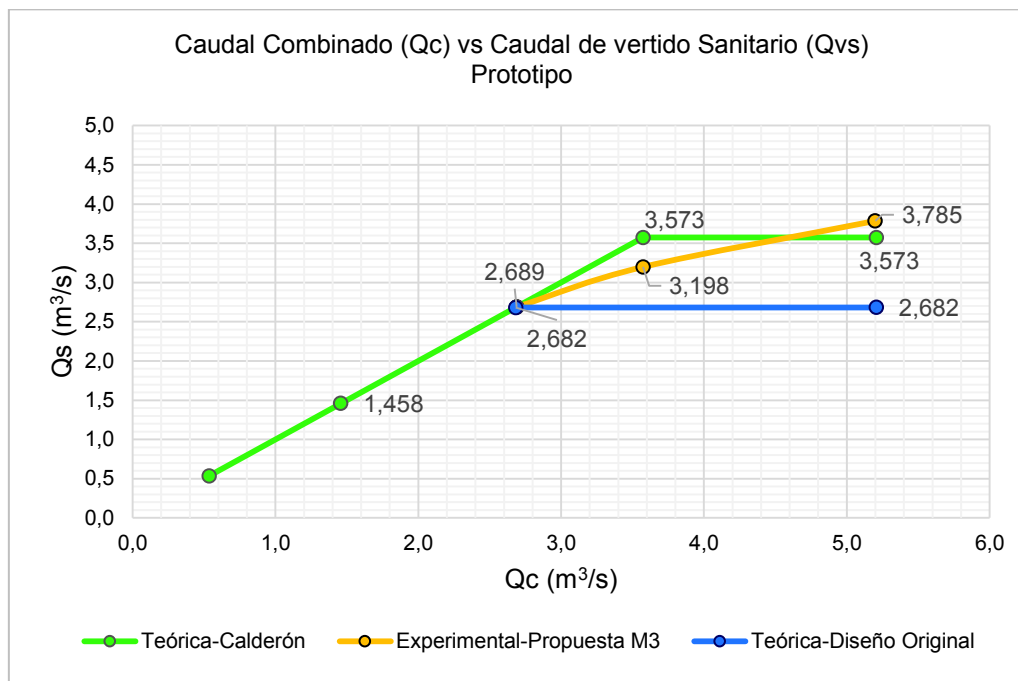
Para comprender con mayor exactitud el comportamiento, el Gráfico 6-2 muestra las curvas de derivación del separador PE36A con la modificación M-3. Adicionalmente, en la **Tabla 6.3** se resume una comparación entre los caudales experimentales y los teóricos.

**Tabla 6.3:** Caudales en teóricos vs. Caudales en modelo físico del separador PE36A modificación M-3.

CAUDALES TEÓRICOS vs. MODELO FÍSICO					
Prueba	Experimental		Teórico	Qvs (experimental- teórico)	% Excesos Q sanitario
	Qc	Qvs	Qvs		
	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	%
<b>C-1</b>	0,536	0,536	0,536	0,000	0,00%
<b>C-2</b>	1,458	1,458	1,458	0,000	0,00%
<b>C-3</b>	2,689	2,689	2,689	0,000	0,00%
<b>C-4</b>	3,574	3,198	3,573	-0,375	-10,48%
<b>C-5</b>	5,199	3,785	3,573	0,212	5,92%

Fuente: Autores

**Gráfico 6-2:** Curvas de derivación de caudales (caudal combinado vs caudal sanitario) para la modificación M-3, derivación teórica y diseño original. **Superior:** modelo. **Inferior:** prototipo.



Fuente: Autores



### 6.3 CONCLUSIONES

Tanto en la propuesta de modificación M-2 como en la M-3 se observa que a medida que el caudal combinado aumenta, el caudal derivado hacia el canal sanitario también lo hace, ya que la carga de agua sobre el orificio es mayor. Se comprueba que mantener un caudal sanitario constante a partir del punto límite de vertido no es factible, por lo tanto, se aceptarán como resultados adecuados a aquellos cuya curva de derivación experimental se acerque a la curva de derivación teórica propuesta por Calderón, ya que un ajuste perfecto no es factible.

El caudal a partir del cual inicia el vertido hacia el canal pluvial (Modelo: 48.11 l/s Prototipo: 2.361 m<sup>3</sup>/s según la prueba B-1) es inferior al caudal límite de vertido propuesto por Calderón (Modelo: 63.92 l/s Prototipo: 3.573 m<sup>3</sup>/s), lo que significa que la derivación hacia el canal pluvial inicia con un valor mayor de carga orgánica de DBO/L, por lo cual el vertido hacia el canal pluvial infringiría el límite calculado según lo recomendado por la norma vigente, para un amplio rango de caudales. Por lo tanto, no se acepta a la modificación M-2 como la definitiva.

El caudal de la prueba C-3 corresponde al máximo que puede derivar el separador de caudales hacia el canal sanitario, antes que inicie el vertido hacia el canal pluvial. Su valor de 48.11 l/s (Prototipo: 2.689 m<sup>3</sup>/s) es ligeramente mayor al caudal que se sugiere debería ser derivado hacia el canal sanitario, según el diseño original propuesto por la EPMAPS, siendo su valor 47.97 l/s (Prototipo: 2.680 m<sup>3</sup>/s), cumpliendo de esta manera la separación de caudales esperada por los diseñadores. De la misma manera, el caudal de la prueba C4 63.92 l/s (Prototipo: 3.574 m<sup>3</sup>/s) estaría cumpliendo con las expectativas de diseño de la EPMAPS, aunque esté por debajo de lo estimado como diseño teórico propuesto por Calderón.

En la prueba C5 se simula el caudal máximo de diseño (Modelo: 93.01 l/s Prototipo: 5.202 m<sup>3</sup>/s), en la cual el caudal derivado hacia el canal sanitario (67.70 l/s) es mayor al contemplado según la curva de derivación teórica (63.92 l/s), por lo tanto, no sería conveniente tener un orificio de mayores dimensiones a las de ésta modificación, pues podría provocar una sobrecarga en el canal sanitario y por ende de la planta de tratamiento.

Consecuentemente, se acepta a la propuesta M-3 como la propuesta de optimización, debido a que además de cumplir con los objetivos de derivación de los diseñadores de la EPMAPS, es la propuesta que más se acerca al comportamiento teórico planteado por Calderón.

La configuración geométrica de la propuesta M-3 optimiza el comportamiento hidráulico, debido a que la altura del vertedero genera un resalto hidráulico que convierte a la energía cinética en calado incrementando así el área efectiva del orificio. Además, se reducen los choques bruscos del flujo contra la estructura, producto de la alineación del vertedero con las paredes del canal sanitario y la adición de una rampa en la extensión de la salida del orificio.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

Una vez concluido el proyecto de investigación, se alcanzaron los objetivos general y específico, puesto que se construyó el modelo físico de los diseños originales del separador de caudales PE36A a una escala 1:5, el cual fue ensayado mediante un plan de pruebas establecido en función del rango de caudales para el cual fue diseñado el sistema. El análisis cuantitativo y cualitativo de los diseños originales permitió el planteamiento de propuestas de optimización, de las cuales se escogió como propuesta definitiva a la que además de presentar el mejor comportamiento hidráulico, optimiza la derivación de caudales.

Del análisis teórico de la memoria técnica se concluye que el diseño del separador de caudales fue concebido bajo la hipótesis y ecuaciones de la hidráulica básica, considerando un flujo unidimensional al interior de la estructura. Además, las dimensiones propuestas para las estructuras de derivación se relacionan con la profundidad hidráulica en régimen de aproximación supercrítico, pero no con el comportamiento del flujo en este tipo de régimen.

La memoria técnica en la cual se encuentra el diseño original del separador de caudales PE36A indica que la separación de caudales se debe producir cuando el caudal combinado alcance un valor cinco veces mayor al caudal sanitario, criterio generalmente aceptado en ausencia de datos específicos sobre la calidad del agua de los efluentes urbanos. La propuesta de optimización desarrollada en esta tesis fundamenta la separación de caudales en el estudio sanitario desarrollado por Calderón, debido a que en su investigación se plantea un balance de masas de la dilución que se produce entre el caudal combinado y caudal sanitario, partiendo de datos específicos de efluentes urbanos para la zona en estudio.

Del análisis cuantitativo de los números representativos que caracterizan al flujo en modelo y prototipo, se obtiene que: el modelo es hidráulicamente más liso que el prototipo puesto que los coeficientes de fricción en modelo y prototipo son similares y los números de Reynolds en modelo son proporcionalmente menores a los

números de Reynolds en prototipo; además los números de Froude en modelo y prototipo son iguales. De esta manera se concluye que las fuerzas gravitacionales son las que predominan en la dinámica del fenómeno, verificando así que el modelo del separador PE36A cumple con la similitud restringida de Froude.

La evaluación en modelo físico de los diseños originales demuestra que el separador de caudales PE36A cumple de forma parcial e insuficiente los objetivos de derivación. Lo anterior se evidencia en que el caudal efectivamente separado (caudal sanitario) en modelo físico es menor hasta en un 86% del caudal separado esperado por los diseñadores. Además, el comportamiento hidráulico del flujo compromete el tiempo de vida útil de la estructura, tal y como se explica en las conclusiones parciales del Capítulo 4.

A pesar de que en las memorias técnicas se muestran calados supercríticos para el flujo de aproximación en el canal combinado, la concepción de los diseños originales no consideran que la sección de control para un flujo supercrítico se encuentra aguas arriba mas no aguas abajo; esto se ve reflejado en el inadecuado funcionamiento del conjunto umbral-orificio derivador, puesto que como el umbral no representa un obstáculo para la inercia del flujo, el área efectiva del orificio se ve drásticamente reducida lo cual determina la ineficiencia del separador de caudales. Es así que éste cumple de manera satisfactoria su propósito únicamente para caudales bajos, mientras que, para caudales medios y altos la derivación se produce como resultado del choque del flujo en la margen izquierda contra la arista viva en la pared del colector, la cual constituye el orificio, mas no como un efecto del trabajo en conjunto con el umbral.

Las modificaciones propuestas y evaluadas experimentalmente (M-2) y (M-3) corrigen el inapropiado funcionamiento hidráulico del diseño original. Se selecciona la modificación (M-3) como propuesta de optimización definitiva por la aproximación que presenta su curva de derivación a la curva teórica propuesta por (Calderón,2017).

La curva teórica sugiere una derivación constante hacia la PATR a partir de (3.57 m<sup>3</sup>/s). Sin embargo, experimentalmente ocurre que medida que aumenta el caudal

combinado, aumenta la carga sobre el orificio derivador y, a mayor carga sobre el orificio, mayor caudal derivado. En consecuencia, la derivación real no puede ser constante, razón por la cual la curva de derivación experimental siempre difiere de la teórica.

La geometría de la propuesta de optimización favorece al funcionamiento hidráulico del separador de caudales en los siguientes aspectos:

- Cambio de régimen del flujo de aproximación de supercrítico a subcrítico, como consecuencia de la presencia del vertedero como estructura de control y la subsecuente formación del resalto hidráulico aguas arriba del mismo en el canal combinado.
- Eliminación del choque brusco del flujo en la arista viva del orificio derivador en el canal combinado y de la deflexión sobre el umbral hacia el canal pluvial para todo el rango de caudales de operación, dando lugar a un flujo ordenado, la nueva ubicación, geometría y alineación del vertedero y orificio posibilitan dicho fenómeno.
- Eliminación del choque frontal del flujo contra las paredes internas del pozo de revisión y plataforma de inspección debido al cambio en la geometría y en la alineación a la salida del orificio vertedero, así como la presencia de la rampa en el inicio del canal sanitario.
- Eliminación de vórtices y choques del flujo en el fondo del pozo de revisión debido a las modificaciones geométricas, principalmente la presencia de la rampa de ingreso al canal sanitario.
- Imposibilidad del ingreso de flujos en la zona sobre la plataforma de revisión para todo el rango de operación de caudales del sistema, debido a los cambios de la geometría en la zona de separación y a que ésta fue elevada en su cota.
- Facilidad para la evacuación de sólidos y sedimentos presentes en el flujo debido a la eliminación de las zonas muertas presentes en el diseño original.
- Favorecimiento en el desempeño hidráulico en el vertido hacia el canal pluvial debido a la geometría de la cresta semicircular del vertedero, la cual permite que la lámina inferior del flujo se adhiera al contorno de la estructura,

evitando así la presencia de presiones negativas y el subsecuente desgaste del material utilizado en prototipo.

- Favorecimiento para la aireación del flujo en la descarga hacia el canal pluvial una vez que éste sobrepasa el vertedero, debido al ensanchamiento de su cresta en relación con su base.

Los ábacos adimensionales, realizados a partir de la experimentación, caracterizan cuantitativamente el funcionamiento del separador de caudales y por lo tanto generalizan su comportamiento para estructuras con características similares, permitiendo así su predimensionamiento tal y como se explica en el numeral 7.2. Los ábacos demuestran que, una vez que empieza el vertido hacia el canal pluvial, el porcentaje de derivación ( $Q_{vs}/Q_c$ ) aumenta cuando el número de Froude se reduce, esto quiere decir que la factibilidad de derivación en el separador de caudales aumenta con un flujo de aproximación subcrítico; esta es la razón por la cual se justifica la altura del vertedero de cresta semicircular, el cual obliga a que el flujo cambie de régimen, aun así y dentro del rango de aplicación de ésta investigación, a medida que el caudal combinado aumenta, el flujo presenta una tendencia hacia su condición supercrítica, esta es la razón por la que, mientras mayor sea el caudal combinado (mayor carga sobre el orificio), el porcentaje de derivación será menor, lo que se traduce en un menor coeficiente de descarga.

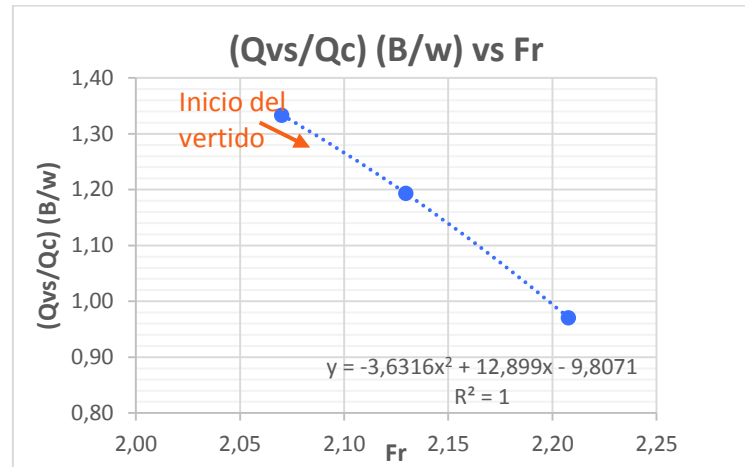
## 7.2 RECOMENDACIONES PARA EL DIMENSIONAMIENTO

Los ábacos adimensionales que se presentan a continuación se realizaron en base a los resultados experimentales obtenidos. Mediante su uso se pueden definir dimensiones del vertedero, orificio lateral. Tomando en cuenta la configuración de la geometría definitiva.

Inicialmente, el diseñador debe verificar si su caso de estudio se ajusta al rango de aplicación de las recomendaciones descritas a continuación. Una vez conocidos los datos de caudal combinado ( $Q_c$ ), caudal vertido al colector sanitario ( $Q_{vs}$ ), el ancho del colector combinado  $B$ , el número de Froude del flujo de aproximación. Se verifica en **Gráfico 7-1** si al ingresar los datos conocidos se obtiene la relación de

separación de caudales ( $Q_{vs}/Q_c$ ) deseada. Para el cálculo, se establece por experimentación que el parámetro ( $B/w$ ) debe mantener la relación  $w=3B/4$ .

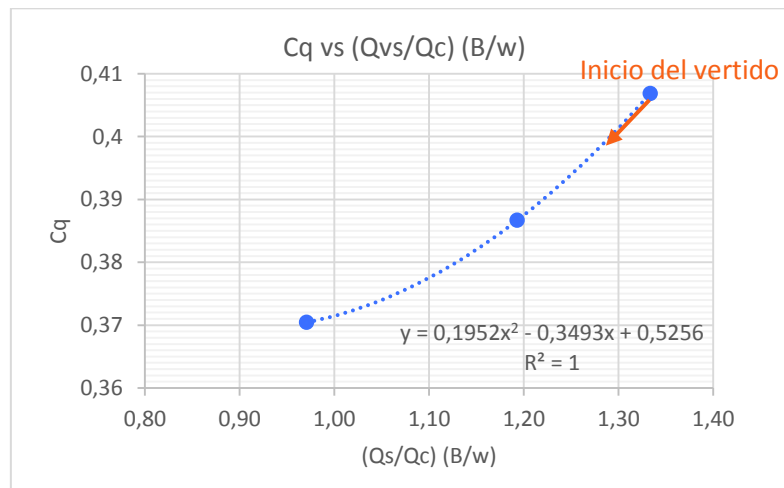
**Gráfico 7-1:** Relación entre parámetros adimensionales ( $Q_{vs}/Q_c$ ) ( $B/w$ ) vs  $Fr$



**Fuente:** Autores

Verificada la relación de caudales y establecida la relación entre el ancho del colector combinado y la altura del vertedero, se determina el coeficiente de descarga del orificio lateral ( $C_q$ ). En el **Gráfico 7-2** se representa la relación de los parámetros ( $C_q$ ), ( $Q_{vs}/Q_c$ ), ( $B/w$ .)

**Gráfico 7-2:** Relación entre parámetros adimensionales ( $C_q$ ) vs ( $Q_{vs}/Q_c$ ) ( $B/w$ )

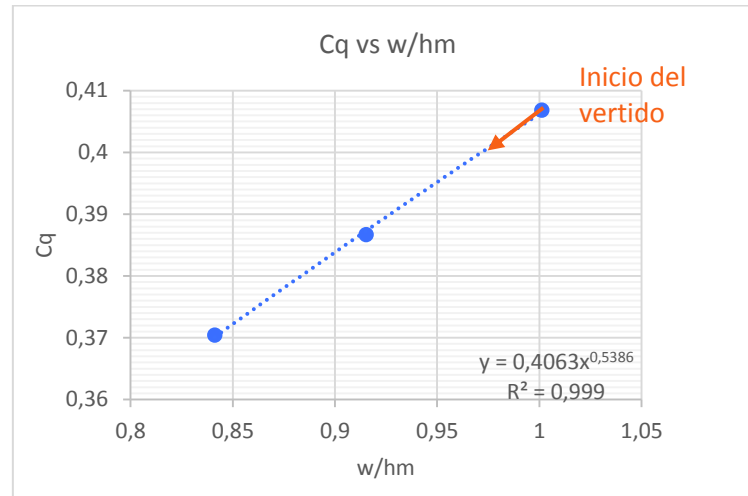


**Fuente:** Autores

Obtenido el coeficiente de descarga ( $C_q$ ) y definida la altura del vertedero ( $w$ ); se estima el calado de aproximación en régimen subcrítico ( $h_m$ ) mediante el ábaco

del **Gráfico 7-3**. Con el valor de  $(hm)$  se obtiene el subcrítico en la zona de derivación.

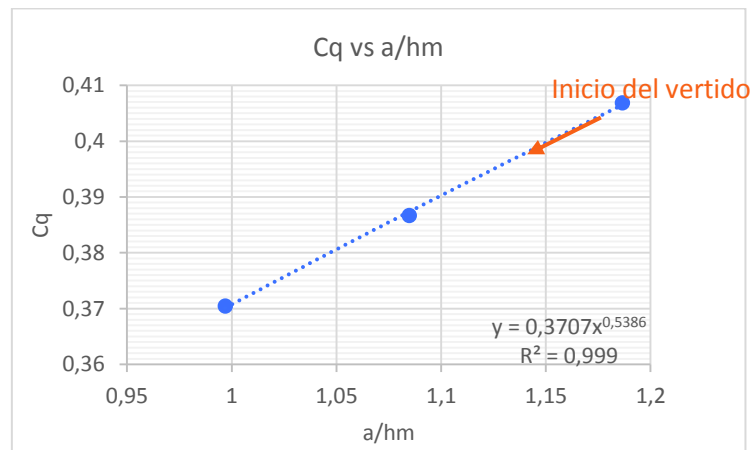
**Gráfico 7-3** : Relación entre parámetros adimensionales ( $Cq$ ) vs  $(w/hm)$



**Fuente:** Autores

Finalmente, el diseñador obtiene el ancho ( $a$ ) del orificio derivador de sección rectangular a partir del Gráfico 7-4. El alto ( $b$ ) se determina según la relación:  **$a = 1.88 b$** . Dicha relación obedece a la geometría optimizada resultado de la experimentación.

**Gráfico 7-4:** Relación entre parámetros adimensionales ( $Cq$ ) vs  $(a/hm)$



**Fuente:** Autores

El análisis dimensional permite la secuencial relación entre los ábacos y sus parámetros lo que conlleva que cada elemento aporte al cumplimiento de los objetivos de derivación propuestos por el diseñador.



## REFERENCIAS

- Asamblea Nacional Constituyente. (2008). Constitución de la República del Ecuador. Montecristi, Ecuador: Asamblea Nacional.*
- Calderón, D. (2017). Modelación física de separadores de caudales hacia colectores pluvial y sanitario para alcantarillados combinados usados en ciudades andinas. Caso de la descontaminación y recuperación del río Machángara. Universidad de Buenos Aires.*
- Castro, M., Hidalgo, X., & Poveda, R. (2003). Sobre la modelación hidráulica en obras de saneamiento (p. 22). Guayaquil-Ecuador: X Congreso Bolivariano de Ingeniería Sanitaria, Asociación Ecuatoriana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AEISA).*
- Chow, V. Te. (1999). Hidráulica de canales abiertos (Primera Ed). Santafé de Bogota-Colombia: McGraw-Hill.*
- Gómez, L., Torres, M., Calderón, A., & Mayorga, L. (2014). Intercepción y Tratamiento de las Aguas Residuales en el Sur de Quito, y su Efecto Hidrológico en Quebradas. En Una Perspectiva Internacional sobre Recursos Hídricos y Medio Ambiente (p. 11). Quito-Ecuador: EWRI-ASCE, 7mo. Congreso Internacional.*
- Gómez Ávila, L. A., Torres Guerrón, M. C., Landazuri Flores, A. C., & Mayorga Andrade, L. F. (2014). Programa para la Descontaminación de los Ríos de Quito. Quito-Ecuador.*
- Guhl, E., Montes, P., & Encalada, G. (2010, junio). El agua de los Andes. Comunidad Andina, 42.*
- Hidalgo, M. (2007). Introducción a la teoría de modelos hidráulicos y aplicaciones básicas. Quito: Departamento de Hidráulica de la Escuela Politécnica Nacional.*
- Kobus, H. (1980). Modelación Hidráulica (Segunda Ed). Berlin-Alemania: German*

*Association for Water Resources and Land Improvement.*

*Loucks, D., & Van Beek, E. (2005). Water Resources Systems Planning and Management (Primera Ed). Paris-Francia: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).*

*Mateos, C. (2000). La modelación física en las obras hidráulicas. En Ingeniería del agua (Vol. 7, p. 55). <https://doi.org/10.4995/ia.2000.2837>*

*Ortega, P. (2015). Simulación numérica de una estructura separadora de caudales con metodología CFD, aplicando el paquete computacional ANSYS CFX 15.0. Escuela Politécnica Nacional.*

*Ortega, P., Hidalgo, X., Castro, M., Casa, E., Hermosa, D., & Venegas, W. (2017). Experimental and Numerical Optimization Model of Flow Separation Structures for Combined Sewage System For Andean Cities (p. 9). Kuala Lumpur-Malaysia: 37th IAHR World Congress.*

*Secretaria Ambiental del Distrito Metropolitano de Quito. (2016). Atlas Ambiental (p. 312). Quito-Ecuador: Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.*

*SGIT. (2014). Manual de Recomendaciones para el Diseño de Tanques de Tormenta. Madrid-España: Subdirección General de Infraestructuras y Tecnología.*

*Socasi, C. (2012). Estudio del Proyecto: Caupicho, Quebrada, Evaluación y Diseños Complementarios, Interceptores, Parroquia Turubamba (p. 29). Quito-Ecuador: Empresa Pública Municipal de Agua Potable y Saneamiento (EPMAPS).*

*Sotelo, G. (1997). Hidráulica General. (Grupo Noriega, Ed.) (Tercera Ed). México D.F.-México: Limusa S.A.*

*Vergara, M. (1993). Técnicas de Modelación Hidráulica. (E. García, L. Castañeda, & Ja. Rodriguez, Eds.) (Segunda Ed). México, D.F.-México: Alfaomega, S.A.*

**ANEXO No. 1**  
**REGISTO DE DATOS DURANTE LAS CAMPAÑAS DE AFORO**  
**VERTEDEROS PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS**  
**VERTEDEROS**

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**  
**REGISTRO DE DATOS PARA LA CALIBRACIÓN DE VERTEDEROS DE LOS**  
**MODELOS FÍSICOS**

MODELO FÍSICO DEL  
 SEPARADOR DE

NOMBRE:

CAUDALES

HORA:

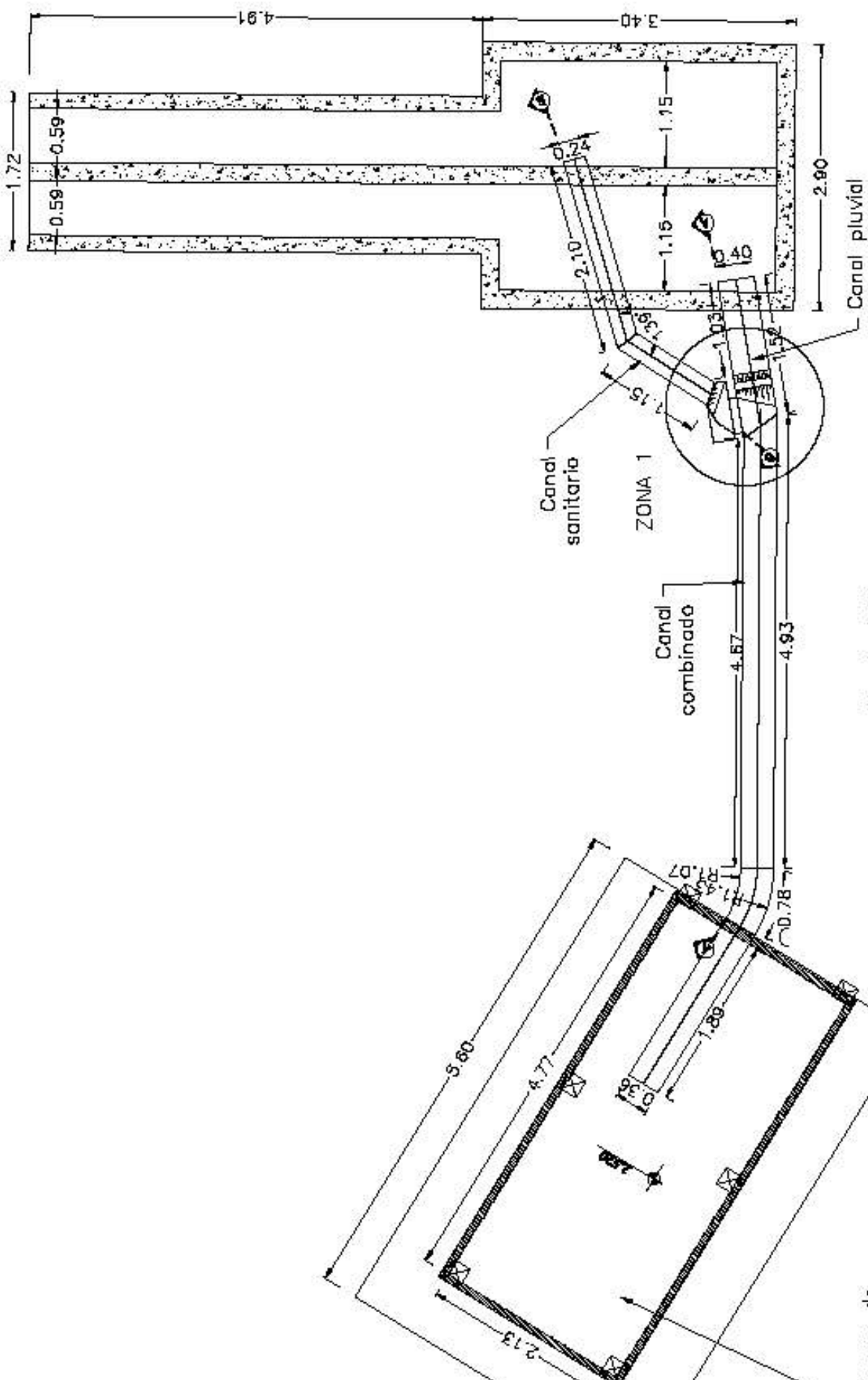
4:00 p.m.

FECHA:

15/12/2016

<b>VERTEDERO TRIANGULAR DE PARED DELGADA CON ÁNGULO EN EL VÉRTICE DE 90°</b>					
Lectura cero vertedero: $h_0$ (cm) = 20,58					
No.	$h_{\text{medido}}$ (cm)	Carga sobre el vertedero $h$ (cm) = $h_{\text{medido}} - h_0$	Volumen $V$ (l)	Tiempo $t$ (s)	Caudal $Q$ (l/s)
1	28,90	8,32	6,80	2,16	3,15
	28,90	8,32	6,72	2,11	3,18
	28,90	8,32	6,25	2,06	3,03
2	31,42	10,84	10,52	1,76	5,98
	31,42	10,84	10,23	1,74	5,88
	31,42	10,84	9,70	1,64	5,91
3	34,00	13,42	18,92	1,88	10,06
	34,00	13,42	17,38	1,67	10,41
	34,00	13,42	16,36	1,66	9,86
4	35,60	15,02	18,51	1,33	13,92
	35,60	15,02	17,55	1,24	14,15
	35,60	15,02	19,91	1,37	14,53
5	41,59	21,01	27,53	0,87	31,64
	41,59	21,01	32,49	1,02	31,85
	41,59	21,01	41,52	1,37	30,31

**ANEXO No. 2**  
**PLANOS DEL MODELO FÍSICO DEL SEPARADOR DE**  
**CAUDALES CON DISEÑO ORIGINAL**



Escala 1:50

SIMBOLOGIA	
	COLUMNAS
	SECCION DE CORTE
	MILIMETRO

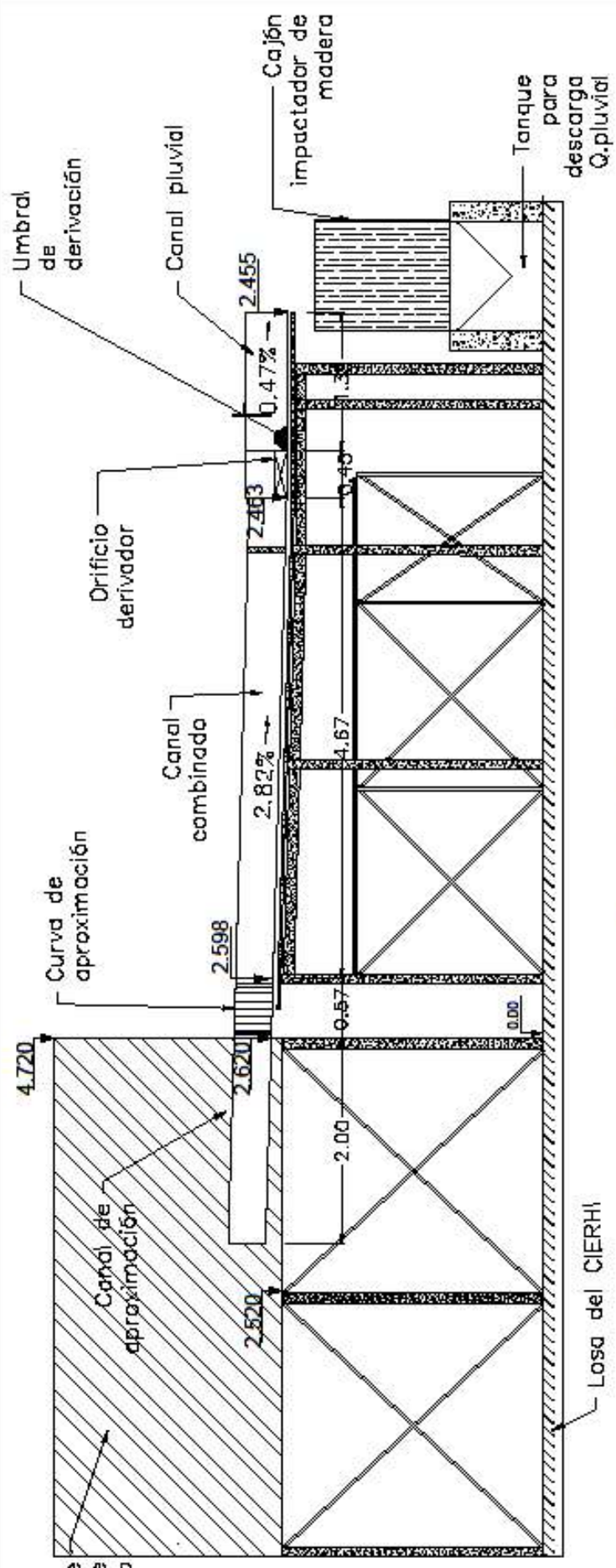
banque de pastecimineto

FORMATO:

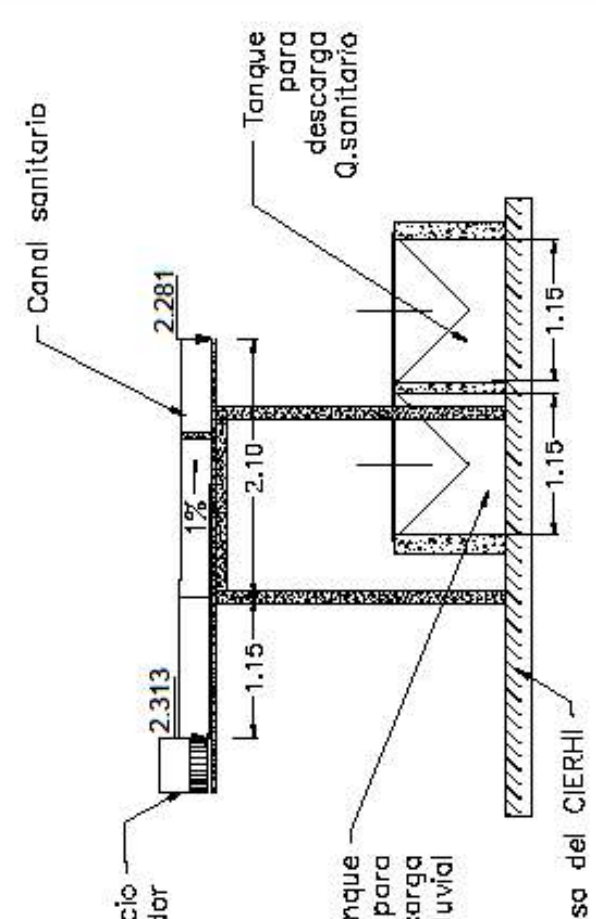
ESCALA:

PROYECTO: MODELACION FISICA DE SEPARADOR DE CAUDALES PESADA

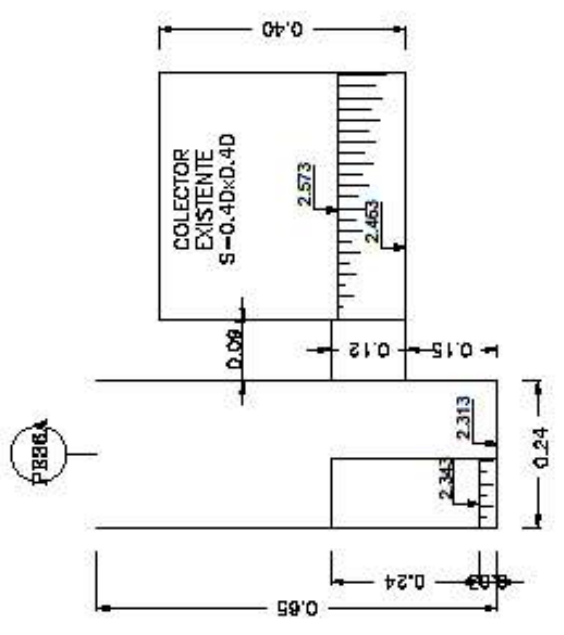




**SECCION A-A**  
Escala 1:50



**SECCION B-B**  
Escala 1:50



**SECCION C-C**  
Escala 1:10

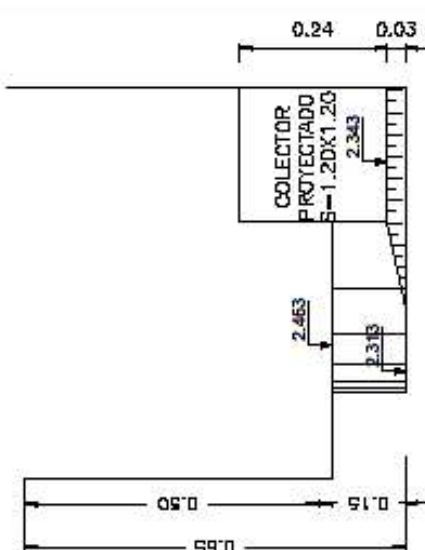
SIMBOLÓGIA	
☒	COLUMNAS
⊕	SECCION DE CORTE
+	LINHEIRO

FORMATO:

ESCALA:

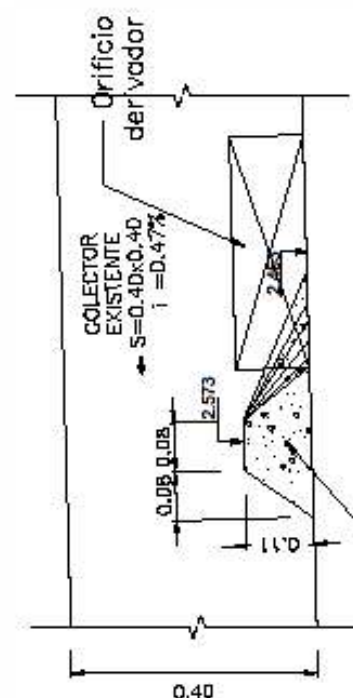
PROYECTO: MODIFICACION FISICA DE SEPARADOR DE CAUDALES PESADA





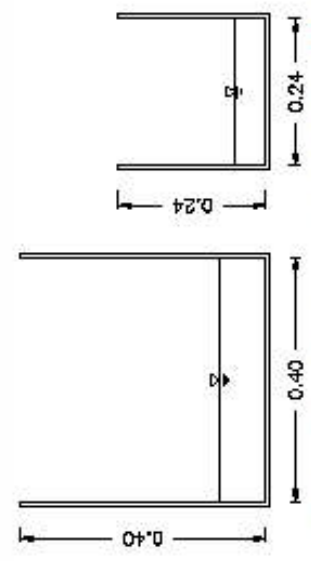
**SECCION D-D**

Escala 1:10



**SECCION E-E**

Escala 1:10



**SECCION F-F**

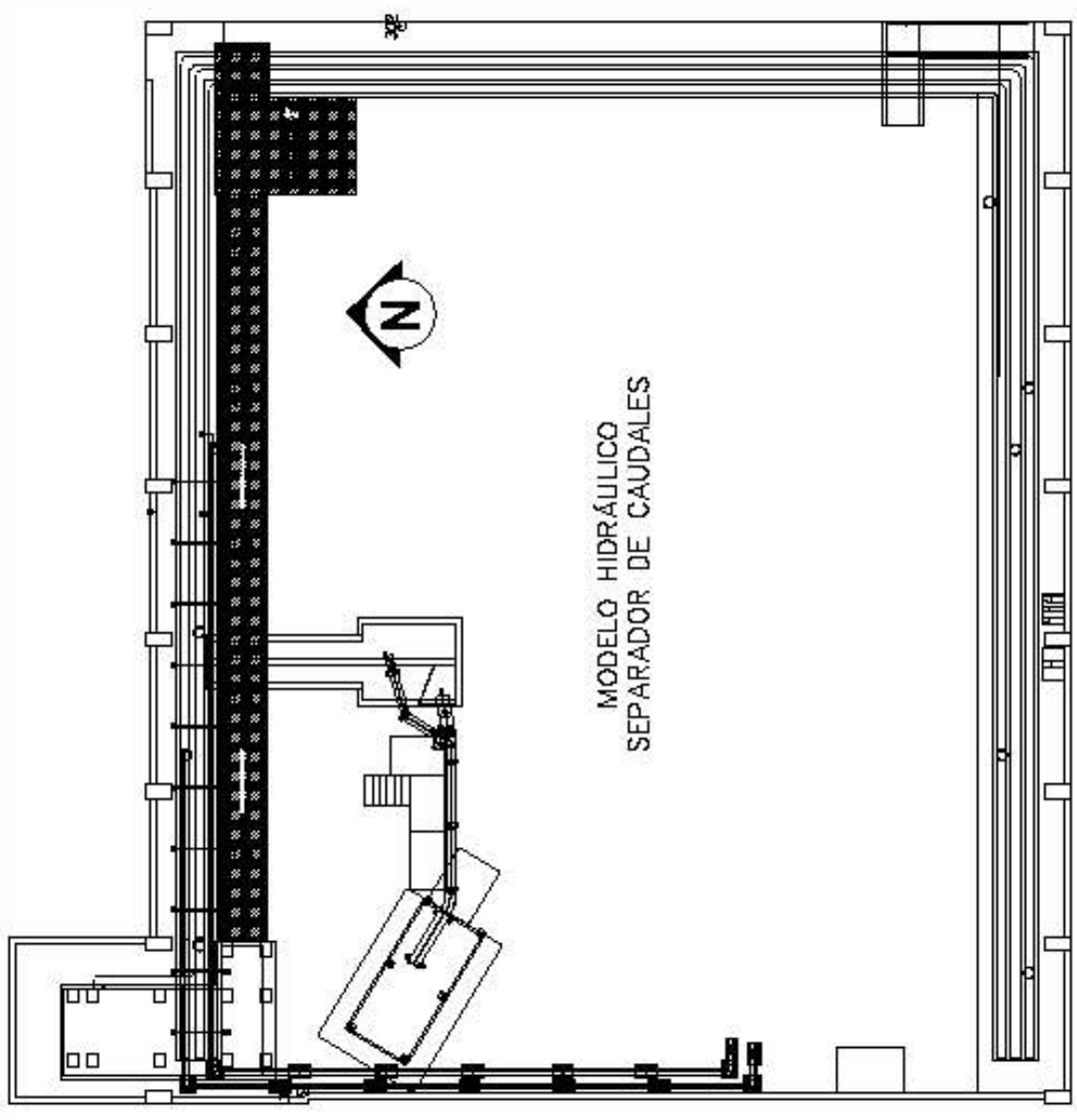
Escala 1:10

**SECCION G-G**

Escala 1:10

**SECCION H-H**

Escala 1:10



**MODELO HIDRÁULICO  
SEPARADOR DE CAUDALES**

Escala 1:200

COORDENADAS Y GOTAS DE UBICACION			
Punto	Norte	Este	Data
301	200.036	97.625	3.000
302	198.798	132.404	3.000
303	185.587	97.632	3.000

SIMBOLOGÍA	
	COLUMNAS
	SECCION DE CORTE
	MILIMETRO

**ANEXO No. 3**  
**REGISTRO DE DATOS DURANTE LA EJECUCION DEL PLAN**  
**DE PRUEBA EN EL MODELO CON DISEÑO ORIGINAL**

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**  
**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS LIMNÍMETROS**

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE

NOMBRE: CAUDALES

HORA: 16:40

FECHA: 19/12/2016

ESCALA:

No. Prueba: Prueba 1

1: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$$

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario	Totales
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm) =	29,44	20,58	
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm) =	0,00	33,64	
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	0,00	9,58	9,58
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	0,00	0,536	0,536

<b>TRAMO COMBINADO</b>			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =		19,22	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid} - h_0$	Observaciones
1	21,06	1,84	El calado es constante (flujo uniforme) a una distancia de 3.00 m medidos desde el separador hacia aguas arriba.
<b>TRAMO PLUVIAL</b>			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =		16,25	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid} - h_0$	Observaciones
1	21,84	5,59	Ya que no existe vertido hacia el canal pluvial, éste dato nos entrega el calado alcanzado aguas arriba del umbral.
<b>TRAMO SANITARIO</b>			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =		0,68	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid} - h_0$	Observaciones
1	4,78	4,1	
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>			
El objetivo de esta prueba fue modelar el caudal mínimo de diseño (0.536 m <sup>3</sup> /s)			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS  
(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS CINTAS DE MEDIDA**

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE

NOMBRE: CAUDALES

HORA: 16:40

FECHA: 19/12/2016

No. Prueba: 1

ESCALA: 1: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$
-------------------------------

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	0,00	33,64
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s)=	0,00	9,58
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s)=	0,00	0,54

CINTAS DE MEDIDA			
No.	Altura de agua $h_{medido}$ (cm)	Ubicación	Observaciones
1	1,9	Canal Combinado	El calado es constante (flujo uniforme) a una distancia de 3.00 m medidos desde el separador hacia aguas arriba.
2	4-4.2	Canal Sanitario	Flujo muy inestable en la salida del separador. Tiende a estabilizarse en la proximidad a la sección final del canal.
3			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS LIMNÍMETROS**

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE

NOMBRE: CAUDALES

HORA: 17:20

FECHA: 19/12/2016

ESCALA:

No. Prueba: Prueba 2

1: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$
-------------------------------

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario	Totales
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58	
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	0,00	34,21	
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	0,00	10,67	10,67
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s)=	0,00	0,60	0,596

TRAMO COMBINADO			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =		19,22	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid}-h_0$	Observaciones
1	21,19	1,97	El calado es constante (flujo uniforme) a una distancia de 2.20 m medidos desde el separador hacia aguas arriba.
TRAMO PLUVIAL			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =		16,25	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid}-h_0$	Observaciones
1	22,47	6,22	Ya que no existe vertido hacia el canal pluvial, éste dato nos entrega el calado alcanzado aguas arriba del umbral.
TRAMO SANITARIO			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =		0,68	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid}-h_0$	Observaciones
1	5,25	4,57	
OBSERVACIONES GENERALES			
El objetivo de modelar este caudal fue encontrar el caudal límite en el cual el canal pluvial aún no trabaja.			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS  
(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS CINTAS DE MEDIDA**

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE

CAUDALES

NOMBRE:

HORA:

17:20

FECHA: 19/12/2016

Prueba

ESCALA:

No. Prueba:

2

1: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$
-------------------------------

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	0,00	34,21
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	0,00	10,67
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	0,00	0,60

**CINTAS DE MEDIDA**

No.	Altura de agua $h_{medido}$ (cm)	Ubicación	Observaciones
1	2.1-2.2	Canal Combinado	El calado es constante (flujo uniforme) a una distancia de 2.20 m medidos desde el separador hacia aguas arriba.
2	4.5-4.7	Canal Sanitario	Flujo muy inestable en la salida del separador. Tiende a estabilizarse en la proximidad a la sección final del canal.

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**  
**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS LIMNÍMETROS**

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE

NOMBRE: CAUDALES

HORA: 10:15

FECHA: 21/12/2016

ESCALA

No. Prueba: Prueba 3

1: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$$

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario	Totales
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58	
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	52,87	31,77	
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	41,472	6,507	47,98
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	2,32	0,36	2,682

<b>TRAMO COMBINADO</b>			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =		19,22	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid}-h_0$	Observaciones
1	25,3	6,08	El calado es constante (flujo uniforme) a una distancia de 1.05 m medidos desde el separador hacia aguas arriba.
<b>TRAMO PLUVIAL</b>			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) aguas arriba del umbral =		16,25	
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) sobre el umbral=		27,26	
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) aguas abajo del umbral=		16,12	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid}-h_0$	Observaciones
1	26,01	9,76	Este dato nos entrega el calado alcanzado aguas arriba del umbral. La desviación del caudal sanitario se debe al choque del flujo en la arista del orificio lateral. El nivel de agua sobre la plataforma de revisión 0.7 a 1 cm.
2	38,44	11,18	Este dato nos entrega el máximo calado alcanzado sobre del umbral, que se ubica en la parte media en dirección transversal al flujo.
3	20,91	4,79	Este dato nos entrega el calado alcanzado aguas abajo del umbral.
<b>TRAMO SANITARIO</b>			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =		0,68	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid}-h_0$	Observaciones
1	3,55	2,87	
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>			
El objetivo de esta prueba fue modelar el caudal de diseño del orificio (2.68 m <sup>3</sup> /s)			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS**  
**(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS CINTAS DE MEDIDA**

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE

CAUDALES

NOMBRE:

HORA:

10:15

FECHA:

21/12/2016

No.

Prueba

ESCALA

Prueba:

3

1:

5

Ecuación experimental - Curva de descarga de  
 vertederos:

$$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$$

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	52,87	31,77
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	41,47	6,51
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	2,32	0,36

CINTAS DE MEDIDA				
No.	Altura de agua $h_{medido}$ (cm)		Ubicación	Observaciones
1	6.5-7		Canal Combinado	El calado es constante (flujo uniforme) a una distancia de 1.05 m medidos desde el separador hacia aguas arriba.
2	12.0-13.5		Canal Pluvial (sobre el umbral)	Mayor elevación del flujo en la parte media del umbral
3	4.5-	6.5	Canal Pluvial (después del umbral)	Flujo muy inestable en la salida del separador.
4	2.8-3.2		Canal Sanitario	Flujo muy inestable en la salida del separador. Tiende a estabilizarse en la proximidad a la sección final del canal.



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**  
**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS LIMNÍMETROS**

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE  
 CAUDALES

NOMBRE: CAUDALES

HORA: 15:20

FECHA: 21/12/2016

No. \_\_\_\_\_

ESCALA \_\_\_\_\_

Prueba: Prueba 4

1: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de  
 vertederos:

$$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$$

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario	Totales
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58	
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	55,26	32,71	
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	52,90	7,96	60,87
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s)=	2,96	0,45	3,403

TRAMO COMBINADO			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =		19,22	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid}-h_0$	Observaciones
1	26,46	7,24	El calado es constante (flujo uniforme) a una distancia de 0.7 m medidos desde el separador hacia aguas arriba.
TRAMO PLUVIAL			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) aguas arriba del umbral =		16,25	
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) sobre el umbral=		27,26	
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) aguas abajo del umbral=		16,12	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid}-h_0$	Observaciones
1	27,19	10,94	Este dato nos entrega el calado alcanzado aguas arriba del umbral. La desviación del caudal sanitario se debe al choque del flujo en la arista del orificio lateral. El nivel de agua sobre la plataforma de revisión 1.5 a 2.5 cm.
2	39,21	11,95	Este dato nos entrega el máximo calado alcanzado sobre del umbral, que se ubica en la parte media en dirección transversal al flujo.
3	24,15	8,03	Este dato nos entrega el calado alcanzado aguas abajo del umbral.
TRAMO SANITARIO			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =		0,68	
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid}-h_0$	Observaciones
1	3,84	3,16	
OBSERVACIONES GENERALES			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS  
(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS CINTAS DE MEDIDA**

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE  
CAUDALES

NOMBRE:

HORA: 15:20  
No. Prueba  
Prueba: 4

FECHA: 21/12/2016

ESCALA  
1: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de  
vertederos:

$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$
-------------------------------

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	52,26	32,71
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	38,82	7,96
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	2,17	0,45

CINTAS DE MEDIDA				
No.	Altura de agua $h_{medido}$ (cm)		Ubicación	Observaciones
1	7.5-8.5		Canal Combinado	El calado es constante (flujo uniforme) a una distancia de 0.7 m medidos desde el separador hacia aguas arriba.
2	12-14.0		Canal Pluvial (sobre el umbral)	Flujo muy inestable
3	8.5-	9.5	Canal Pluvial (después del umbral)	Flujo muy inestable
4	2.8-3.2		Canal Sanitario	Flujo muy inestable

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS LIMNÍMETROS**

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE

NOMBRE: CAUDALES

HORA: 11:30

FECHA: 21/12/2016

ESCALA

No. Prueba: Prueba 5

1: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$
-------------------------------

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario	Totales
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58	
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	59,70	35,91	
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	78,74	14,32	93,06
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	4,40	0,80	5,202

TRAMO COMBINADO			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =			19,22
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid} - h_0$	Observaciones
1	28,4	9,18	El calado es constante (flujo uniforme) a una distancia de 0.9 m medidos desde el separador hacia aguas arriba.
TRAMO PLUVIAL			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) aguas arriba del umbral =			16,25
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) sobre el umbral=			27,26
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) aguas abajo del umbral=			16,12
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid} - h_0$	Observaciones
1	29,8	13,55	Este dato nos entrega el calado alcanzado aguas arriba del umbral. La desviación del caudal sanitario se debe al choque del flujo en la arista del orificio lateral. El nivel de agua sobre la plataforma de revisión 2.5 a 2.9 cm.
2	41,1	13,84	Este dato nos entrega el máximo calado alcanzado sobre del umbral, que se ubica en la parte media en dirección transversal al flujo.
3	23,65	7,53	Este dato nos entrega el calado alcanzado aguas abajo del umbral.
TRAMO SANITARIO			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =			0,68
No.	$h_{medido}$ (cm)	$h_{medid} - h_0$	Observaciones
1	5,85	5,17	
OBSERVACIONES GENERALES			
El objetivo de esta prueba fue modelar el caudal máximo de diseño del separador (5.207 m3/s)			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS**  
**(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS CINTAS DE MEDIDA**  
**MODELO FÍSICO SEPARADOR DE**

NOMBRE: CAUDALES

HORA: 11:30

FECHA: 21/12/2016

No.

ESCALA

Prueba: Prueba 5

1: 5

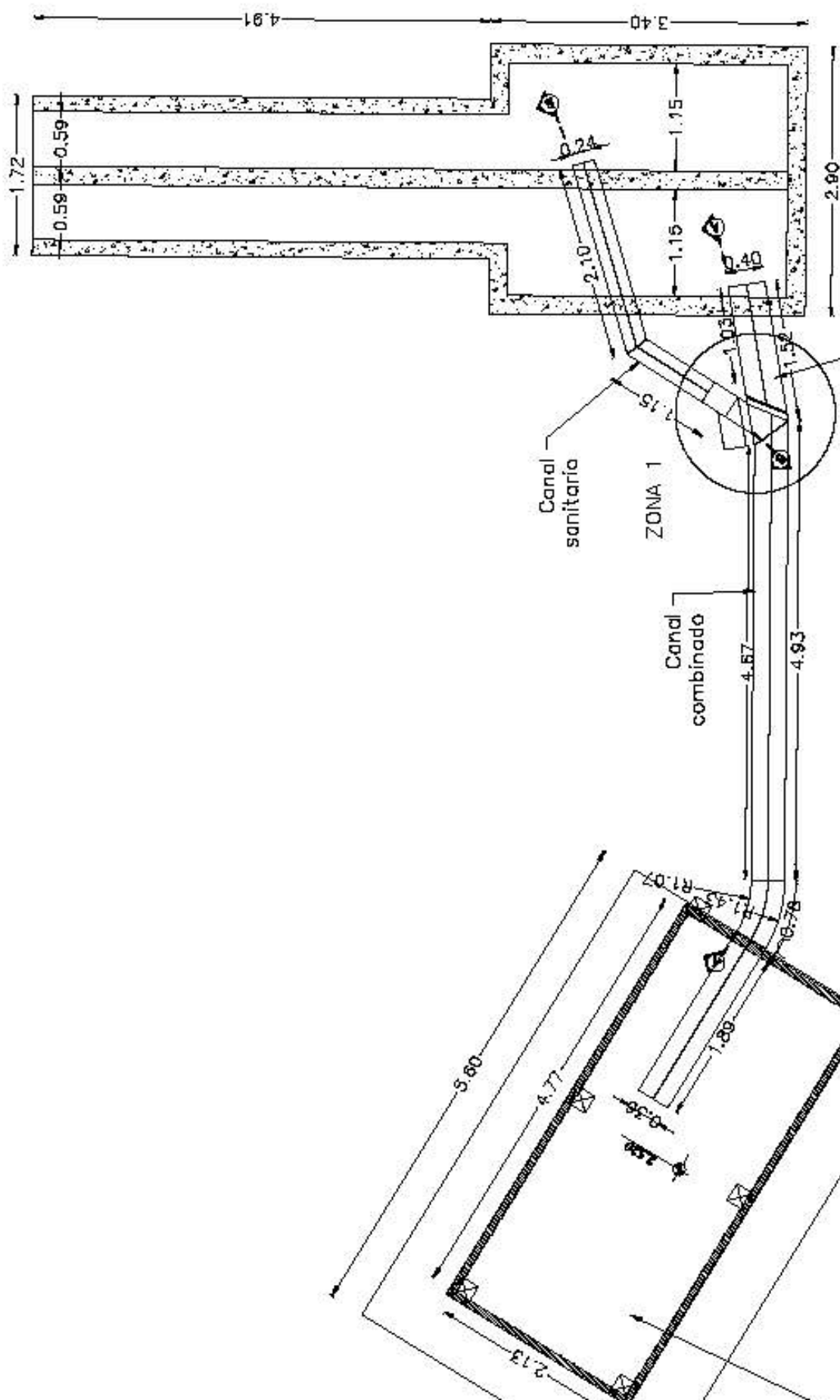
Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$$

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	52,87	31,77
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	41,47	6,51
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	2,32	0,36

CINTAS DE MEDIDA				
No.	Altura de agua $h_{medido}$ (cm)		Ubicación	Observaciones
1	10.0-10.5		Canal Combinado	El calado es constante (flujo uniforme) a una distancia de 0.9 m medidos desde el separador hacia aguas arriba.
2	14.2-15.9		Canal Pluvial (sobre el umbral)	Flujo muy inestable
3	8.2-	10.7	Canal Pluvial (después del umbral)	Flujo muy inestable
4	4.4-4.8		Canal Sanitario	Flujo muy inestable

**ANEXO No. 4**  
**PLANOS DEL MODELO FÍSICO DEL SEPARADOR DE**  
**CAUDALES CON LA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN**



Escola 1:50

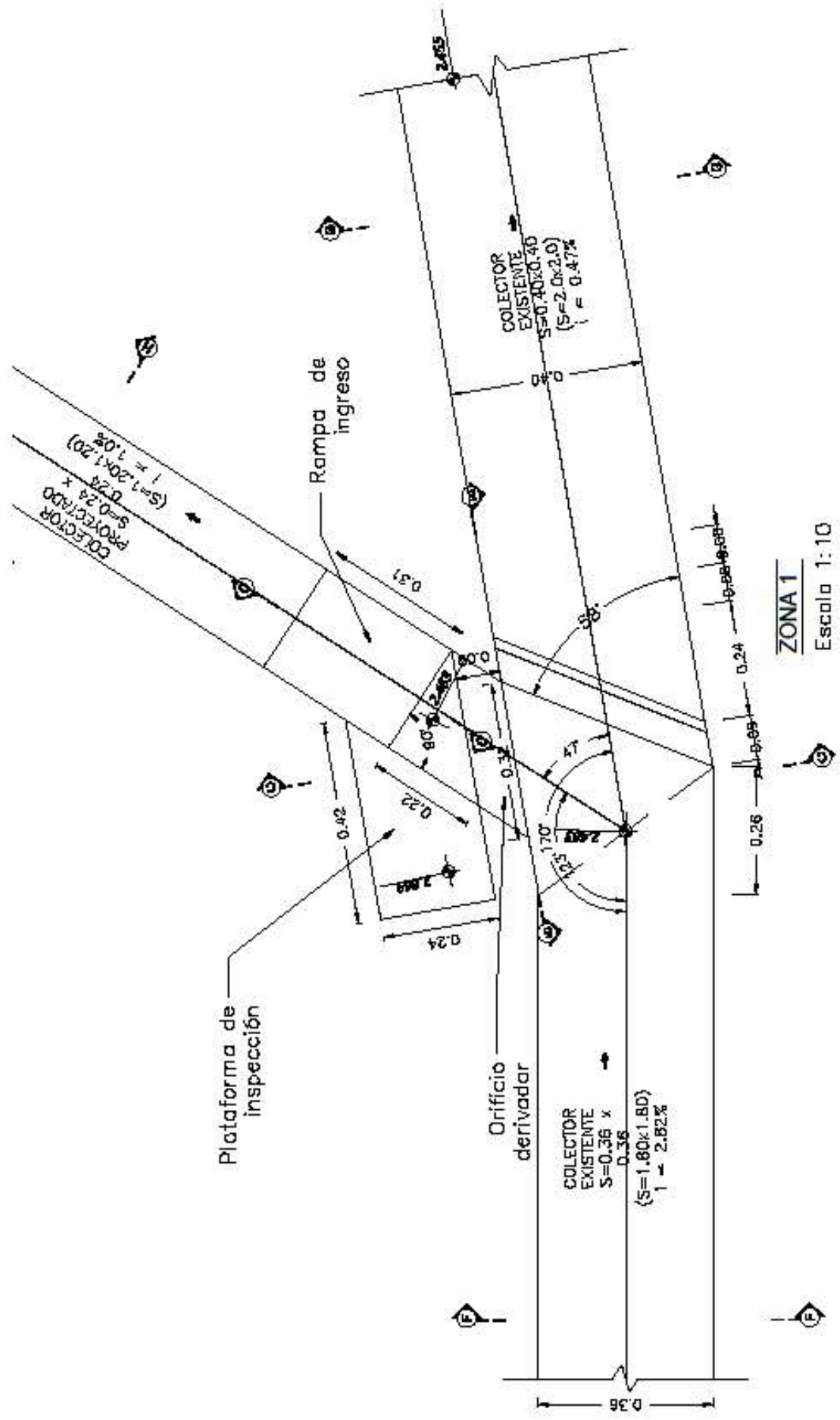
tanque de  
biostecimineto

SIMBOLOGIA	
	COLUMNAS
	RECCION DE CORTE
	LUMINMETRO

FORMATO:

ESCALA:  
INDICADA

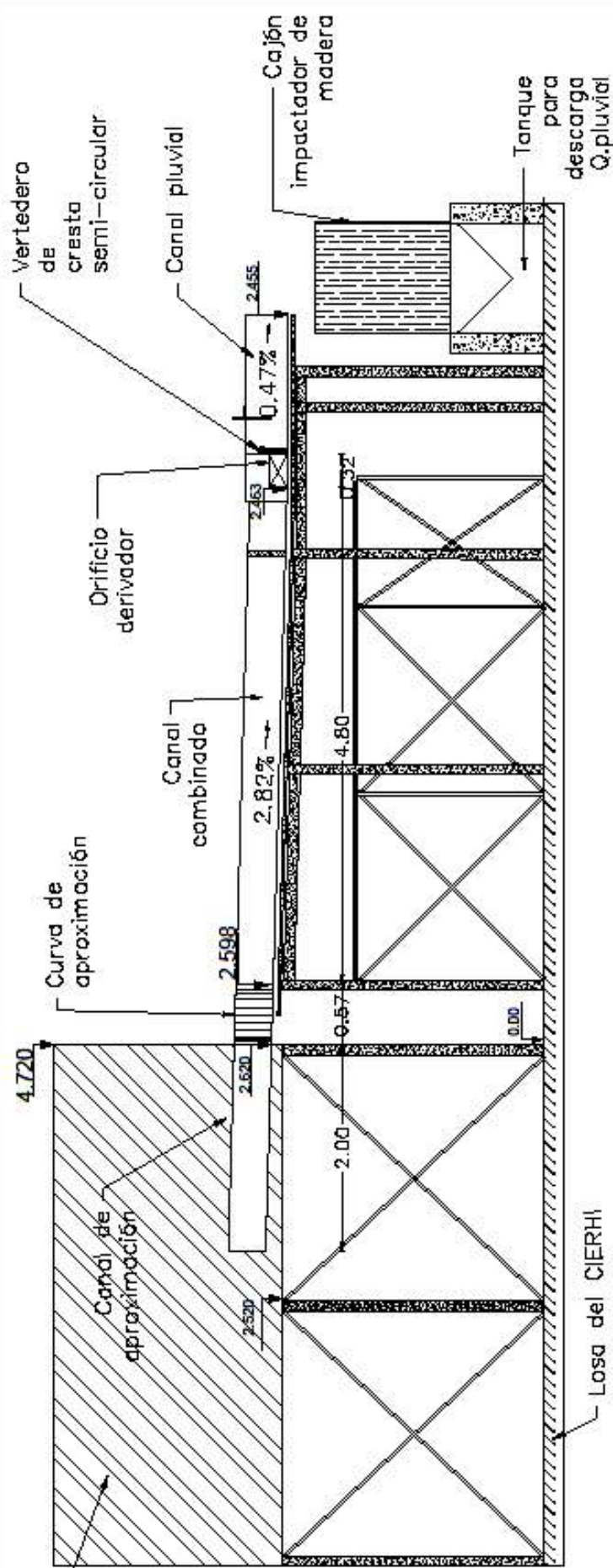
PROYECTO:  
MODELACION FISICA DE SEPARADOR DE CAUDALES PESADA



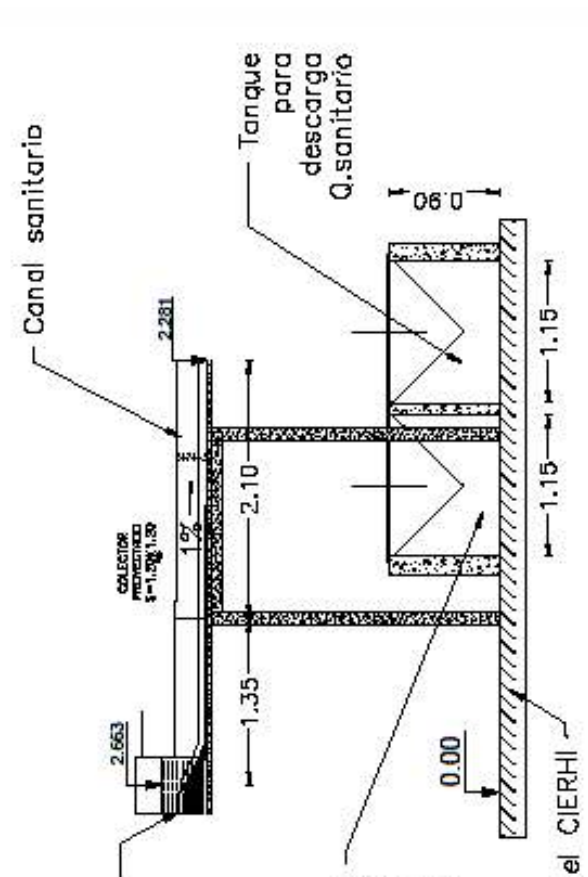
ZONA 1  
Escala 1:10

SIMBOLOGÍA	
	COLUMNAS
	SECCION DE CORTE
	LINNEIRO

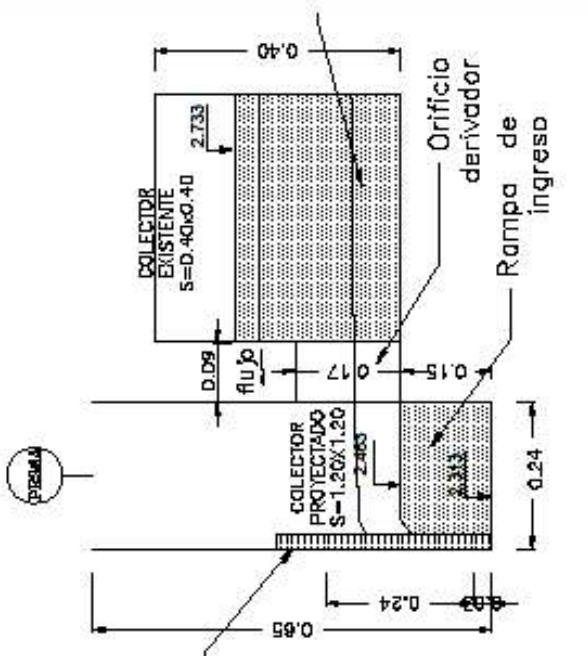




**SECCION A-A**  
Escala 1:50



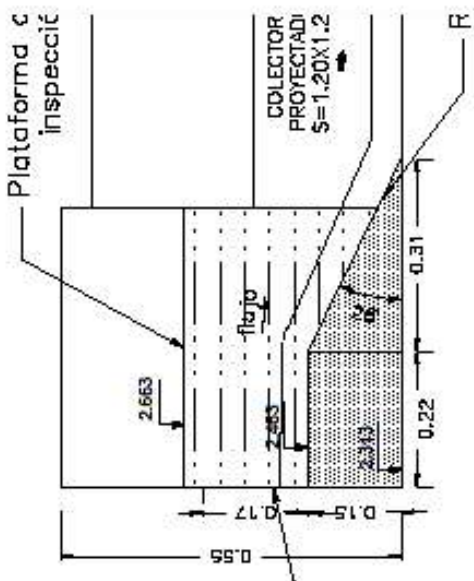
**SECCION B-B**  
Escala 1:50



**SECCION C-C**  
Escala 1:10

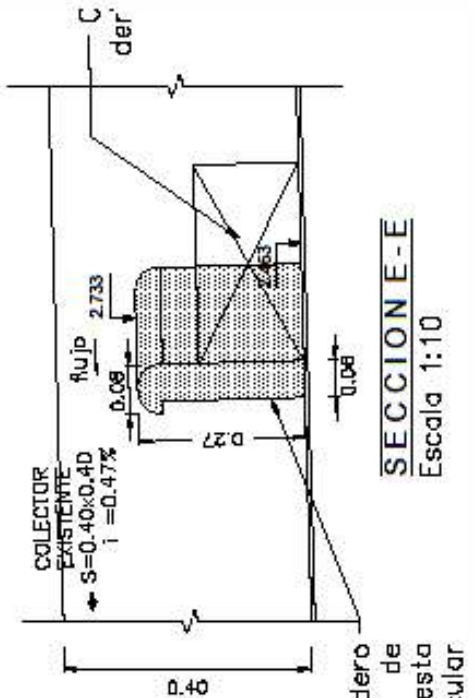
SIMBOLOGIA	
☒	COLUMINAS
◆	SECCION DE CORTE
+	LINIMETRO





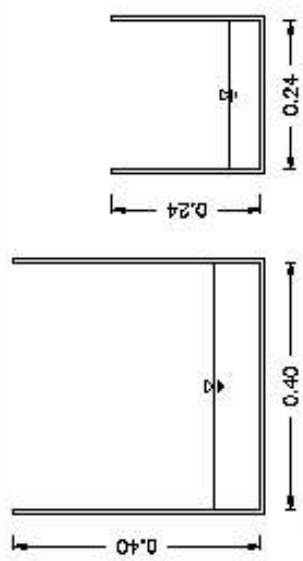
**SECCION D-D**

Escala 1:10



**SECCION E-E**

Escala 1:10



**SECCION F-F**

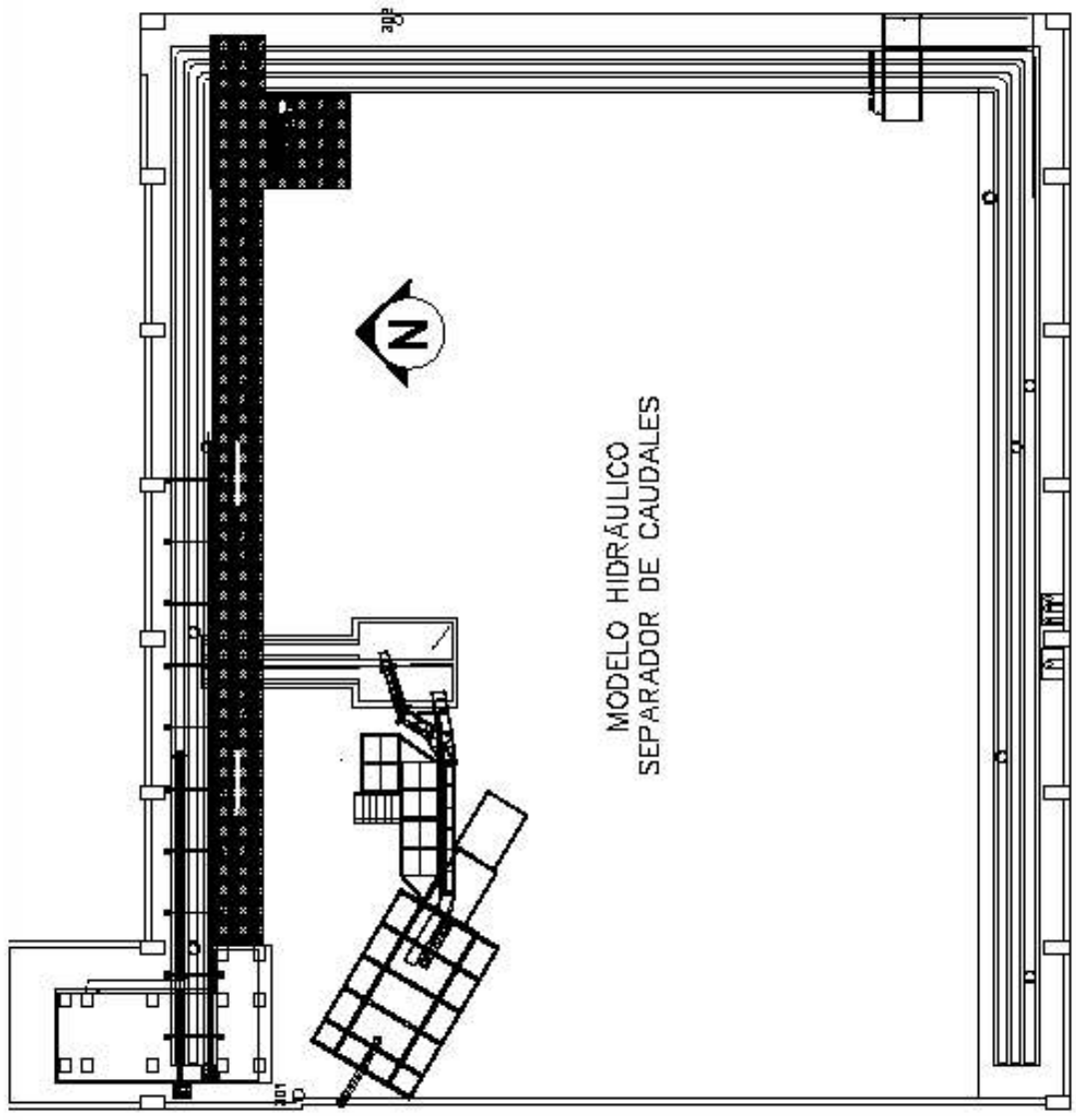
Escala 1:10

**SECCION G-G**

Escala 1:10

**SECCION H-H**

Escala 1:10



**MODELO HIDRAULICO  
SEPARADOR DE CAUDALES**

Escala 1:200

COORDENADAS Y COTAS DE UBICACION				
Punto	Norte	Este	Cota	Ubicación
301	200.038	97.625	3.000	CIERHI
302	196.788	132.404	3.000	CIERHI
303	185.587	97.632	3.000	CIERHI

SIMBOLOGIA	
☒	COLUMNAS
⊕	SECCION DE CORTE
-	LINIMETRO

**ANEXO No. 5**  
**REGISTRO DE DATOS DURANTE LA EJECUCION DEL PLAN**  
**DE PRUEBAS EN EL MODELO LA PROPUESTA DE**  
**OPTIMIZACIÓN**

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS  
(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS LIMNÍMETROS  
MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES (MODIFICACIÓN FINAL)**

NOMBRE:

HORA: 11:00FECHA: 1/2/2017

No.

Prueba: Prueba C- 1ESCALA: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$
-------------------------------

		Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: h0 (cm)=		29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: hlim (cm)=		29,44	33,64
Caudal medido en modelo: Qm (l/s) =		0,00	9,58
Caudal en prototipo: QP (m3/s) =		0,000	0,536
<b>TRAMO COMBINADO</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		19,17	<b>Calado (cm)</b>
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	
1	21,06	El calado se mide a 2.35 m hacia aguas arriba del umbral. El flujo se encuentra en régimen supercrítico	
			<b>1,89</b>
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		16,26	<b>Calado (cm)</b>
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	
2	24,02	Se forma un resalto hidráulico en las cercanías al umbral derivador, el flujo cambia a régimen subcrítico. El valor del calado se lo mide aguas abajo del resalto.	
			<b>7,76</b>
<b>ZONA DEL SEPARADOR PROPIAMENTE DICHO</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		16,26	<b>Calado (cm)</b>
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	
1	24,02	El resalto se da en la zona del separador, inicia a 34 cm medidos desde el umbral hacia aguas arriba, la franja donde sucede el resalto es paralela a la alineación del umbral. El vertido sucede por toda la longitud del orificio.	
			<b>7,76</b>
<b>TRAMO PLUVIAL</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		-----	<b>Calado (cm)</b>
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	
1	-----	No existe vertido hacia el canal pluvial.	
			-----
<b>TRAMO SANITARIO</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		25,97	<b>Calado (cm)</b>
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	
1	27,99	Se mide el calado en el canal sanitario a 0.90 m aguas abajo de la zona de separador. No hay presencia de ondas cruzadas ni perturbaciones de flujo.	
			<b>2,02</b>
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>			
Coincide el calado del régimen subcrítico con el calado del separador, debido a que el resalto se da sobre el separador			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS  
(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS CINTAS DE MEDIDA**

NOMBRE: MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES (MODIFICACIÓN FINAL)  
 HORA: 11:00 FECHA: 1/2/2017  
 No. Prueba  
 Prueba: C-1 ESCALA: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

<b><math>Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}</math></b>
---

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	29,44	33,64
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	0,00	9,58
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	0,00	0,536

<b>CINTAS DE MEDIDA</b>			
<b>No.</b>	<b>Altura de agua hmedido (cm)</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Observaciones</b>
1	1,9	Canal Combinado	Régimen supercrítico, medición registrada a 2.60 m aguas arriba del umbral derivador
2	2-2.5	Canal Sanitario	La medida del calado con cinta se registra a 0.90 m hacia aguas abajo de la zona de separación. El flujo de ingreso al canal sanitario es uniforme y su calado es aproximadamente un tercio de la altura del orificio derivador.
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS**  
**(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS LIMNÍMETROS**

MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES (MODIFICACIÓN FINAL)

NOMBRE:

HORA: 12:30

FECHA: 2/2/2017

No.

Prueba: Prueba C-2

ESCALA: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$$

		Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: h0 (cm) =		29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: hlim (cm) =		29,44	40,05
Caudal medido en modelo: Qm (l/s) =		0,00	26,08
Caudal en prototipo: QP (m3/s) =		0,00	1,458
<b>TRAMO COMBINADO</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		19,17	Calado (cm)
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	<b>4,04</b>
1	23,21	Flujo se encuentra en régimen supercrítico. El registro fue tomado a 2.25 m aguas arriba del umbral derivador	
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		16,26	Calado (cm)
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	<b>15,14</b>
2	31,4	El inicio del resalto hidráulico se da a 0.97 m desde el umbral hacia aguas arriba. El dato de calado se lo toma a 0.72 m del umbral derivador en régimen subcrítico.	
<b>ZONA DEL SEPARADOR PROPIAMENTE DICHO</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		16,26	Calado (cm)
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	<b>15,14</b>
1	31,4		
<b>TRAMO PLUVIAL</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		-----	Calado (cm)
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	-----
1	-----	No existe vertido hacia el canal pluvial.	
<b>TRAMO SANITARIO</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		25,97	Calado (cm)
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	<b>4,49</b>
1	30,46	El calado se mide a 0.9m hacia aguas abajo de la zona de separación. El orificio tiene una descarga libre con una contracción mayor hacia la margen derecha (11 cm) siendo mayor el calado de la margen izquierda en 3 cm (14cm) La plataforma de inspección no presenta humedad.	
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS  
(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS CINTAS DE MEDIDA**

NOMBRE: MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES (MODIFICACIÓN FINAL)

HORA: 12:30

FECHA: 2/2/2017

Prueba

No. Prueba: C-2

ESCALA: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

<b><math>Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}</math></b>
---

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	29,44	40,05
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	0,00	26,08
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	0,00	1,458

<b>CINTAS DE MEDIDA</b>			
<b>No.</b>	<b>Altura de agua hmedido (cm)</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Observaciones</b>
1	4-4.4	Canal Combinado-Régimen Supercrítico	Régimen supercrítico, medición registrada a 2.60 m aguas arriba del umbral derivador.
2	14-15.5	Canal Combinado-Régimen Subcrítico	La medida del calado con cinta es registrada a 0.20 m hacia aguas arriba del umbral derivador.
3	15-16.5	Separador	Lectura del calado en la zona de separación
4	4-5	Canal Sanitario	El calado se mide a 0.9m hacia aguas abajo de la zona de separación. El orificio tiene una descarga libre con una contracción mayor hacia la margen derecha (11 cm) siendo mayor el calado de la margen izquierda en 3 cm (14cm) La plataforma de inspección no presenta humedad.
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS**  
**(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS LIMNÍMETROS**

NOMBRE: MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES (MODIFICACIÓN FINAL)  
 HORA: 9:00 FECHA: 2/2/2017  
 No. Prueba: Prueba C-3 ESCALA: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$$

		Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm) =	29,44		20,58
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm) =	29,44		45,44
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	0,00		48,11
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	0,00		2,689
<b>TRAMO COMBINADO</b>			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =	26,18		Calado (cm)
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	
1	33,7	Régimen supercrítico. El registro fue tomado a 2.25 m aguas arriba del umbral derivador	
			<b>7,52</b>
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =	19,17		Calado (cm)
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	
2	39,43	El inicio del resalto hidráulico se da a 1.45m desde el umbral derivador. En el punto de medición el flujo se encuentra en régimen sub crítico. El dato de calado se lo toma a 0.72 m del umbral derivador en régimen subcrítico.	
			<b>20,26</b>
<b>ZONA DEL SEPARADOR PROPIAMENTE DICHO</b>			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =	16,26		Calado (cm)
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	
1	43,23	El flujo ingresa por toda la longitud del orificio presentando una mayor contracción hacia el extremo derecho.	
			<b>26,97</b>
<b>TRAMO PLUVIAL</b>			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =	-----		Calado (cm)
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	
1	-----	No existe vertido hacia el canal pluvial	
			-----
<b>TRAMO SANITARIO</b>			
Lectura cero limnómetro $h_0$ (cm) =	25,97		Calado (cm)
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>	
1	33,47	El calado se mide a 0.9m hacia aguas abajo de la zona de separación. La plataforma de visita no presenta humedad. En la rampa de ingreso hacia el canal sanitario el flujo en la margen izquierda alcanza un calado de 12 a 14 cm, para el margen derecho de hasta 7 cm	
			<b>7,5</b>
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS  
(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS CINTAS DE MEDIDA**

NOMBRE: MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES (MODIFICACIÓN FINAL)  
 HORA: 9:00 Prueba FECHA: 2/2/2017  
 No. Prueba: C-3 ESCALA: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$
-------------------------------

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: $h_0$ (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: $h_{lim}$ (cm)=	29,44	45,44
Caudal medido en modelo: $Q_m$ (l/s) =	0,00	48,11
Caudal en prototipo: $Q_P$ (m <sup>3</sup> /s) =	0,00	2,689

<b>CINTAS DE MEDIDA</b>			
No.	Altura de agua hmedido (cm)	Ubicación	Observaciones
1	7.5-8	Canal Combinado-Régimen Supercrítico	Régimen Supercrítico, medición registrada a 2.60 m aguas arriba del umbral derivador.
2	25-27	Separador	La lectura representa el calado aguas arriba del umbral, por lo que el vertido hacia el canal pluvial es inminente sin llegar a ocurrir.
3	6.5-7.5	Canal Sanitario	La medida del calado con cinta es registrada a 0.9m de la zona de separación. A la salida del orificio se presenta una contracción mayor hacia la margen izquierda.
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>			
No existe registro para el calado del Canal Combinado-Régimen Subcrítico, porque aún no se estabiliza el resalto hidráulico en la zona de la cinta			



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS (CIERHI)**  
**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS LIMNÍMETROS**  
**MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES (MODIFICACIÓN FINAL)**

NOMBRE:

HORA:

No. Prueba:

15:00

Prueba C-4

FECHA: 2/2/2017

ESCALA: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

$$Q = 0.0153 \cdot h^{2.5063}$$

Vertedero Pluvial		Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: h0 (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: hlim (cm)=	40,78	47,22
Caudal medido en modelo: Qm (l/s) =	6,73	57,21
Caudal en prototipo: QP (m3/s) =	0,376	3,198
<b>TRAMO COMBINADO</b>		
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		26,18
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>
1	35,1	El flujo se encuentra en régimen supercrítico. El registro fue tomado a 2.25 m aguas arriba del umbral derivador
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		19,17
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>
2	45,25	El resalto hidráulico se da a 2.08 m desde el umbral derivador hacia aguas arriba. El dato de calado se lo toma a 0.72 m del umbral derivador en régimen subcrítico.
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		16,26
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>
1	45,76	
<b>TRAMO PLUVIAL</b>		
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		-----
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>
1	-----	No existe registro de limnómetro debido a la inestabilidad del flujo
<b>TRAMO SANITARIO</b>		
Lectura cero limnómetro h0 (cm) =		25,95
<b>No.</b>	<b>hmedido (cm)</b>	<b>Observaciones</b>
1	33,54	El calado se mide a 0.9m hacia aguas abajo de la zona de separación. En la rampa de ingreso hacia el canal sanitario se aprecia una elevación hacia la margen izquierda que fluctúa entre 18 a 20cm, la lámina inferior se adhiere completamente al perfil de la rampa
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>		

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS  
(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS CINTAS DE MEDIDA**

NOMBRE: MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES (MODIFICACIÓN FINAL)  
 HORA: 15:00 FECHA: 2/2/2017  
 No. Prueba  
 Prueba: C-4 ESCALA: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos: **Q = 0.0153\*h<sup>2.5063</sup>**

	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: h0 (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: hlim (cm)=	40,78	47,22
Caudal medido en modelo: Qm (l/s) =	6,73	57,21
Caudal en prototipo: QP (m <sup>3</sup> /s) =	0,376	3,198

CINTAS DE MEDIDA			
No.	Altura de agua hmedido (cm)	Ubicación	Observaciones
1	8.5-10	Canal Combinado-Régimen Supercrítico	Régimen Supercrítico, medición registrada a 2.60 m aguas arriba del umbral derivador.
2	25-26.5	Canal combinado-Régimen Subcrítico	El valor registrado representa el calado a 1m aguas arriba del umbral derivador.
3	3-4	Canal Pluvial	La lectura representa el calado en el canal pluvial. El vertido sobre la cresta del separador se da de una manera controlada; la lámina de agua se adhiere completamente al perfil semi circular existiendo aireación bajo la misma. Luego de la caída se da una macro turbulencia.
4	28-29.5	Separador	El dato representa el calado en la zona de separación. En la descarga del orificio hacia el canal sanitario se da una contracción de flujo en los dos extremos del orificio; siendo esta menor hacia el extremo izquierdo alcanzando calados de 19 a 21 cm
OBSERVACIONES GENERALES			
No existe registro para el calado del Canal Sanitario, debido a la inestabilidad del flujo			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS  
(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS LIMNÍMETROS**

NOMBRE: MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES (MODIFICACIÓN FINAL)  
 HORA: 17:00 FECHA: 1/2/2017  
 No. Prueba: Prueba C-5 ESCALA: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos: **Q = 0.0153\*h<sup>2.5063</sup>**

		Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: h0 (cm)=		29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: hlim (cm)=		48,68	49,07
Caudal medido en modelo: Qm (l/s) =		25,31	67,70
Caudal en prototipo: QP (m3/s) =		1,415	3,785
<b>TRAMO COMBINADO</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm)		26,18	Calado (cm)
=			
No.	hmedido (cm)	Observaciones	11,18
1	37,36	Régimen supercrítico. El registro fue tomado a 2.25 m aguas arriba del umbral derivador.	
Lectura cero limnómetro h0 (cm)		19,17	Calado (cm)
=			
No.	hmedido (cm)	Observaciones	29,39
2	48,56	El dato de calado se lo toma a 0.72 m del umbral derivador en régimen subcrítico. El resalto hidráulico se da a 2.20 metros medidos desde el umbral derivador.	
<b>ZONA DEL SEPARADOR PROPIAMENTE DICHO</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm)		16,26	Calado (cm)
=			
No.	hmedido (cm)	Observaciones	32,1
1	48,36		
<b>TRAMO PLUVIAL</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm)		-----	Calado (cm)
=			
No.	hmedido (cm)	Observaciones	-----
1	-----	No existe registro de limnómetro debido a la inestabilidad del flujo	
<b>TRAMO SANITARIO</b>			
Lectura cero limnómetro h0 (cm)		0,6	Calado (cm)
=			
No.	hmedido (cm)	Observaciones	14,5
1	15,1	No existe humedad en la plataforma de revisión. El flujo presenta una sobre elevación hacia la margen izquierda de la rampa de ingreso la cual oscila entre 32-35 cm	
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>			

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS EN RECURSOS HÍDRICOS  
(CIERHI)**

**REGISTRO DE DATOS: LECTURAS CINTAS DE MEDIDA**

NOMBRE: MODELO FÍSICO SEPARADOR DE CAUDALES (MODIFICACIÓN FINAL)  
 HORA: 17:00 Prueba FECHA: 1/2/2017  
 No. Prueba: C-5 ESCALA: 5

Ecuación experimental - Curva de descarga de vertederos:

	<b>Q = 0.0153*h<sup>2.5063</sup></b>	
	Vertedero Pluvial	Vertedero Sanitario
Lectura cero limnómetro: h <sub>0</sub> (cm)=	29,44	20,58
Lectura medida limnómetro: h <sub>lim</sub> (cm)=	48,68	49,07
Caudal medido en modelo: Q <sub>m</sub> (l/s) =	25,31	67,700
Caudal en prototipo: Q <sub>P</sub> (m <sup>3</sup> /s) =	1,41	3,785

**CINTAS DE MEDIDA**

No.	Altura de agua h <sub>medido</sub> (cm)	Ubicación	Observaciones
1	11-12.5	Canal Combinado- Régimen Supercrítico	Flujo uniforme en régimen Supercrítico, medición registrada a 2.60 m aguas arriba del umbral derivador.
2	27-29.5	Canal combinado-Régimen Subcrítico	El valor registrado representa el calado en régimen sub crítico a 1m aguas arriba del umbral derivador.
3	3.5-5	Canal Pluvial	El calado medido se registra a la salida del canal pluvial. La carga de agua sobre la cresta del umbral es uniforme en toda su longitud. No existe sobre elevaciones en las márgenes del canal pluvial. Existe aireación bajo la lámina de vertido y un vórtice de eje horizontal en la base del umbral.
4	32-33.5	Separador	El dato representa el calado en la zona de separación. El flujo a la salida del orificio presenta contracción en su arista derecha con calados fluctuantes entre 8 a 9.5 cm. Hacia la margen izquierda prácticamente no existe contracción del flujo con calados máximos de 20cm.
<b>OBSERVACIONES GENERALES</b>			
No existe registro para el calado del Canal Sanitario, debido a la inestabilidad del flujo			