



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

INSTITUTO INTERAMERICANO DE TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DEL AGUA

**EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DE
REJILLAS PLUVIALES MEDIANTE EXPERIMENTACIÓN
FÍSICA, PARA DISEÑO DE SUDS**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA**

PRESENTA:

ING. ABEL SANTIAGO FUENTES

TUTOR ACADÉMICO

DR. HUMBERTO SALINAS TAPIA

TUTORES ADJUNTOS

DR. JUAN ANTONIO GARCÍA ARAGÓN

DR. CALOS DÍAZ DELGADO



Toluca, Estado de México, Diciembre 2023

RESUMEN

La carencia de información conduce a la asignación de coeficientes de descarga inapropiados a las rejillas pluviales durante la etapa de diseño de sistemas de drenaje pluvial, y actualmente en el diseño de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS). Parte del problema de las inundaciones radica en la baja eficiencia de las rejillas pluviales en la captación de los escurrimientos de las calles, lo que resulta en inundaciones cada vez más intensas y pérdidas económicas significativas. Por esta razón, es crucial llevar a cabo investigaciones que involucren diversos tipos de rejillas con el fin de encontrar la geometría óptima para la captación de agua pluvial en distintos escenarios de funcionamiento. Esto permitiría eliminar del diseño aquellas rejillas o tapas que no cumplan con los requisitos necesarios.

En esta investigación, se trabajaron cuatro escenarios de funcionamiento de la tapa de concreto y de una rejilla de fierro fundido, y bajo estas condiciones se llevó a cabo una campaña experimental. Los escenarios incluyeron los fenómenos de sumidero libre, sumidero ahogado, surgencia ahogada y surgencia libre. Los experimentos se realizaron en un modelo físico construido en el laboratorio de modelos hidráulicos del IITCA, con una escala de longitud de 1:6, representando una calle en San Juan Jalpa, San Felipe del Progreso, México, con su respectivo pozo de visita en el centro. Se construyeron a escala la tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido. Se llevaron a cabo los experimentos con los diferentes escenarios para determinar los coeficientes de descarga, las curvas de eficiencia, el caudal de surgencia, la presión, entre otros parámetros.

Los datos experimentales se validaron mediante simulaciones en el modelo numérico IBER, utilizando su módulo de drenaje urbano. Se simularon los cuatro escenarios con las dimensiones del modelo físico, y también se realizaron simulaciones con las dimensiones del prototipo. Para esto, se escaló la información experimental, incluyendo el tirante, el caudal y la rugosidad de Manning. Los resultados proporcionaron los coeficientes de descarga para diferentes fenómenos observados en el brocal sin tapa, brocal con tapa de concreto y brocal con rejilla de fierro fundido.

Los resultados demostraron que para el fenómeno de sumidero es decir de captación de flujo que escurre por la calle, las tapas de concreto, comúnmente utilizadas en los pozos de visita de los sistemas de drenaje, no son eficientes para la captación de agua pluvial, dado que presentaron una eficiencia entre el 2-10%. En contraste, las rejillas presentaron una eficiencia entre el 18 y 40%, variando según la velocidad del flujo en la calle. Este efecto de reducción de la eficiencia se reflejó en los coeficientes de descarga, con valores de 0.11 para el brocal y 0.62 para la rejilla, demostrando que las tapas de concreto no son adecuadas para esta función.

Las simulaciones con las dimensiones del prototipo confirmaron los resultados experimentales, respaldando la idea de que los modelos de simulación son herramientas ideales para estudiar el comportamiento de diversos fenómenos hidráulicos, siempre y cuando se realice una validación con datos experimentales.

ABSTRACT

The lack of information leads to the improper assignment of discharge coefficients to storm grates during the design phase of stormwater drainage systems, especially in the design of Sustainable Urban Drainage Systems (SUDS). A significant part of the flooding problem lies in the low efficiency of storm grates in capturing runoff from streets, resulting in increasingly severe floods and significant economic losses. Therefore, it is crucial to conduct research involving various types of grates to find the optimal geometry for capturing rainwater under different operating scenarios. This would enable the elimination of grates or covers from the design that do not meet the necessary requirements.

In this study, four operating scenarios of concrete covers and cast-iron grates were investigated, and under these conditions, an experimental campaign was conducted. The scenarios included the phenomena of free inlet, submerged inlet, submerged outlet, and free outlet. Experiments were carried out in a physical model constructed in the hydraulic modeling laboratory of IITCA, at a scale of 1:6, representing a street in San Juan Jalpa, San Felipe del Progreso, Mexico, with its corresponding manhole in the center. The concrete cover and cast-iron grate were scaled models. Experiments were conducted with different scenarios to determine discharge coefficients, efficiency curves, surge flow rates, pressure, among other parameters.

Experimental data were validated through simulations in the numerical model IBER, using its urban drainage module. The four scenarios were simulated with the dimensions of the physical model, and simulations were also performed with prototype dimensions. For this purpose, experimental data, including water depth, flow rate, and Manning's roughness, were scaled. The results provided discharge coefficients for different phenomena observed in the uncovered inlet, concrete-covered inlet, and cast iron-grated inlet.

The results demonstrated that, for the phenomenon of inlet, i.e., capturing flow from the street, concrete covers commonly used in drainage system manholes are not efficient for capturing rainwater, as they exhibited an efficiency between 2-10%. In contrast, the grates showed an efficiency between 18 and 40%, varying with the flow velocity in the street. This reduction in

efficiency was reflected in the discharge coefficients, with values of 0.11 for the cover and 0.62 for the grate, proving that concrete covers are not suitable for this function.

Simulations with prototype dimensions confirmed the experimental results, supporting the idea that simulation models are ideal tools for studying the behavior of various hydraulic phenomena, provided there is validation with experimental data.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	3
1.2 Justificación	10
1.3 Hipótesis.....	11
1.4 Objetivos	12
 CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	15
2.1 Drenajes pluviales	16
2.2 Pozos de visita.....	16
2.2.1 Tapas de los pozos de visita	22
2.3 Bocas de tormenta.....	23
2.3.1 Eficiencia de captación de una boca de tormenta.....	26
2.4 Modelos físicos	30
2.4.1 Teorema de Pi de Buckingham.....	31
2.4.2 Flujo uniforme en canales.....	34
2.4.3 Vertedor triangular	38
2.4.4 Vertedor tipo embudo.....	39
2.4.5 Ecuaciones para obtener el caudal que descarga el brocal de un pozo de visita para cuatro diferentes escenarios.	45
2.4.6 Ecuaciones para obtener el caudal que descarga un vertedor y un orificio	47
2.5 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	49
2.5.1 Modelo hidrodinámico bidimensional, IBER.....	49
2.6 Métodos de análisis estadístico	53
2.6.1 Medidas de tendencia central a partir de datos no agrupados.....	53
2.6.2 Medidas de dispersión	55
2.6.3 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	56
2.6.4 Error absoluto medio (MAE).....	57
2.6.5 Objetivos de un análisis de correlación	57
2.6.6 Coeficiente de determinación	58

CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS	59
3.1 Búsqueda y análisis de la información	60
3.2 Modelo físico.....	62
3.2.1 Diseño del modelo físico	62
3.2.2 Construcción del modelo físico	71
3.2.3 Construcción de las curvas de descarga de los vertedores.....	78
3.3 Experimentación en el modelo físico	82
3.3.1 Escenario 1. Sumidero libre.	83
3.3.2 Escenario 2. Sumidero ahogado.....	85
3.3.3 Escenario 3. Surgencia ahogada.	87
3.3.4 Escenario 4. Surgencia libre.	89
3.4 Modelación en el Modelo numérico IBER.....	91
3.4.1 Preproceso en IBER.....	91
3.4.2 Proceso en IBER	96
3.4.3 Postproceso en IBER	96
CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....	99
4.1 Modelo físico.....	100
4.1.1 Curvas de aforo de los vertedores	100
4.1.2 Resultados de los experimentos para el Escenario 1	103
4.1.3 Resultados obtenidos de los experimentos en condiciones del Escenario 2	111
4.1.4 Resultados obtenidos de los experimentos en condiciones del Escenario 3.	118
4.1.5 Resultados obtenidos de los experimentos en condiciones del Escenario 4.	144
4.1.6 Resultados escalados a prototipo	152
4.2 Resultados obtenidos en el modelo IBER	162
4.2.1 Resultados de la simulación en IBER, en condiciones del Escenario 1.	162
4.2.2 Resultados de la simulación en IBER, para los diferentes casos del Escenario 2.....	178
4.2.3 Resultados de la simulación en IBER, en condiciones del Escenario 3.	193

4.2.4 Resultados de la simulación en IBER, en condiciones del Escenario 4: Surgencia Libre.	208
4.2.5 Resultados de la simulación del prototipo en IBER	226
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS	235
5.1 Análisis de resultados obtenidos en el modelo físico	236
5.1.1 Análisis de los resultados del escenario 1: sumidero libre en el brocal sin tapa	236
5.1.2 Análisis de los resultados del escenario 2	238
5.1.3 Análisis de los resultados del escenario 3: surgencia ahogada.....	244
5.1.4 Análisis de los resultados del escenario 4: surgencia libre.....	251
5.1.5 Resumen de los coeficientes de descarga	254
5.2 Análisis de resultados obtenidos en el modelo numérico IBER	257
5.2.1 Comparación de resultados obtenidos en el modelo numérico IBER contra los datos experimentales del escenario 1.	257
5.2.2 Comparación de resultados obtenidos en el modelo numérico IBER contra los datos experimentales del escenario 2.	260
5.2.3 Comparación de resultados obtenidos en el modelo numérico IBER contra los datos experimentales del escenario 3.	263
5.2.4 Comparación de resultados obtenidos en el modelo numérico IBER contra los datos experimentales del escenario 4.	266
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	269
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	275
Anexo A	283

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Características geométricas de las rejillas número 1, 2 y 3.	9
Tabla 1-2 Valores de coeficientes de descarga cuando se considera de vertedero y orificio calibrados experimentalmente (C_w y C_o) para diferentes tipos de rejillas.	10
Tabla 2-1 Productos adimensionales dependientes (modificado de Echavez, 1996)	33
Tabla 2-2 Productos adimensionales independientes (modificado de Echavez, 1996)	34
Tabla 2-3 Características de flujo y escalas de semejanza (Echavez, 1996).....	35
Tabla 2-4 Elementos geométricos de la sección rectangular (Sotelo, 2002).....	36
Tabla 2-5 Elementos geométricos de la sección circular (Sotelo, 2002).....	37
Tabla 2-6 Coeficientes de rugosidad n de Manning (CONAGUA, 2015).....	38
Tabla 2-7 Ventajas e inconvenientes de utilizar CFD (Fernández, 2012).....	50
Tabla 3-1 Características de flujo y escalas de semejanza.....	65
Tabla 3-2 Caudal que transporta el colector a tubo lleno considerando $D = 0.6$ m.....	65
Tabla 3-3 Gastos para diferentes tirantes normales en la calle.	66
Tabla 3-4 Caudales y tirantes a escala que se pueden presentar en el modelo.....	66
Tabla 3-5 Capacidad de descarga del vertedor triangular 1.....	79
Tabla 3-6 Capacidad de descarga del vertedor triangular 2.....	79
Tabla 4-1 Datos experimentales del aforo del vertedor 1.....	102
Tabla 4-2 Datos experimentales del aforo del vertedor 2.....	104
Tabla 4-3 Datos experimentales escalados al prototipo para condiciones del escenario 1 y brocal sin tapa.	153
Tabla 4-4 Datos experimentales escalados a prototipo para condiciones del escenario 1 y tapa de concreto.....	153
Tabla 4-5 Datos experimentales escalados a prototipo para la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 1.....	154
Tabla 4-6 Datos experimentales escalados a prototipo para el brocal sin tapa en condiciones del escenario 2.....	155
Tabla 4-7 Datos experimentales escalados a prototipo para la tapa de concreto en condiciones del escenario 2.....	156
Tabla 4-8 Datos experimentales escalados a prototipo para condiciones del escenario 2 y rejilla de fierro fundido.....	157
Tabla 4-9 Datos experimentales escalados a prototipo para condiciones del escenario 3 y brocal sin tapa.	158
Tabla 4-10 Datos experimentales escalados al prototipo para condiciones del escenario 3 y tapa de concreto.....	159
Tabla 4-11 Datos experimentales escalados a prototipo para condiciones del escenario 3 y la rejilla de fierro fundido.....	159
Tabla 4-12 Datos experimentales escalados al prototipo para condiciones del escenario 4 y brocal sin tapa.	160

<i>Tabla 4-13 Datos experimentales escalados al prototipo para condiciones del escenario 4 y tapa de concreto.</i>	<i>161</i>
<i>Tabla 4-14 Datos experimentales escalados a prototipo para condiciones del escenario 4 y rejilla de fierro fundido.</i>	<i>162</i>
<i>Tabla 4-15 Condiciones para la simulación del sumidero libre con el brocal sin tapa.</i>	<i>163</i>
<i>Tabla 4-16 Condiciones para la simulación del sumidero libre con tapa de concreto.</i>	<i>168</i>
<i>Tabla 4-17 Condiciones para la simulación del sumidero libre con tapa de fierro fundido..</i>	<i>173</i>
<i>Tabla 4-18 Condiciones para la simulación del sumidero ahogado en el brocal sin tapa. ...</i>	<i>178</i>
<i>Tabla 4-19 Condiciones para la simulación del sumidero ahogado en la tapa de concreto.</i>	<i>183</i>
<i>Tabla 4-20 Condiciones para la simulación del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>189</i>
<i>Tabla 4-21 Condiciones para la simulación de surgencia ahogada en el brocal sin tapa.....</i>	<i>194</i>
<i>Tabla 4-22 Condiciones para la simulación de la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto</i>	<i>199</i>
<i>Tabla 4-23 Condiciones para la simulación de surgencia con descarga ahogada de la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>204</i>
<i>Tabla 4-24 Condiciones para la simulación de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.</i>	<i>215</i>
<i>Tabla 4-25 Condiciones para la simulación de surgencia con descarga libre de la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>221</i>
<i>Tabla 4-26 Datos empleado para la simulación del prototipo en IBER.....</i>	<i>226</i>
<i>Tabla 5-1 Resumen de los resultados del escenario 1, Sumidero libre</i>	<i>240</i>
<i>Tabla 5-2 Resumen de los resultados del escenario 2, Sumidero ahogado.....</i>	<i>243</i>
<i>Tabla 5-3 Resumen de los resultados del escenario 3.</i>	<i>249</i>
<i>Tabla 5-4 Resumen de los resultados del escenario 4: surgencia libre.....</i>	<i>253</i>
<i>Tabla 5-5 Coeficientes de descarga para el brocal sin tapa</i>	<i>254</i>
<i>Tabla 5-6 Coeficientes de descarga para la tapa de concreto</i>	<i>255</i>
<i>Tabla 5-7 Coeficientes de descarga para la rejilla de fierro fundido</i>	<i>256</i>
<i>Tabla 5-8 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 1.</i>	<i>257</i>
<i>Tabla 5-9 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 1.</i>	<i>258</i>
<i>Tabla 5-10 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, de la tapa de concreto en condiciones del escenario 1.....</i>	<i>258</i>
<i>Tabla 5-11 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER, de la tapa de concreto en condiciones del escenario 1.....</i>	<i>259</i>
<i>Tabla 5-12 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 1.....</i>	<i>259</i>
<i>Tabla 5-13 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER, de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 1.....</i>	<i>260</i>
<i>Tabla 5-14 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 2.</i>	<i>260</i>

<i>Tabla 5-15 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER,</i> <i>del brocal sin tapa en condiciones del escenario 2.....</i>	<i>261</i>
<i>Tabla 5-16 Comparación de caudales del modelo físico vs IBER,</i> <i>de la tapa de concreto en condiciones del escenario 2.....</i>	<i>261</i>
<i>Tabla 5-17 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER,</i> <i>de la tapa de concreto en condiciones del escenario 2.....</i>	<i>262</i>
<i>Tabla 5-18 Comparación de caudales del modelo físico vs IBER,</i> <i>de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 2.....</i>	<i>262</i>
<i>Tabla 5-19 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER,</i> <i>de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 2.....</i>	<i>263</i>
<i>Tabla 5-20 Comparación de caudales del modelo físico vs IBER,</i> <i>del brocal sin tapa en condiciones del escenario 3.....</i>	<i>263</i>
<i>Tabla 5-21 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER,</i> <i>del brocal sin tapa en condiciones del escenario 3.....</i>	<i>264</i>
<i>Tabla 5-22 Comparación de caudales del modelo físico vs IBER,</i> <i>de la tapa de concreto en condiciones del escenario 3.....</i>	<i>264</i>
<i>Tabla 5-23 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER,</i> <i>de la tapa de concreto en condiciones del escenario 3.....</i>	<i>265</i>
<i>Tabla 5-24 Comparación de caudales del modelo físico vs IBER,</i> <i>de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 3.....</i>	<i>265</i>
<i>Tabla 5-25 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER,</i> <i>de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 3.....</i>	<i>266</i>
<i>Tabla 5-26 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER,</i> <i>del brocal sin tapa en condiciones del escenario 4.....</i>	<i>266</i>
<i>Tabla 5-27 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER,</i> <i>del brocal sin tapa en condiciones del escenario 4.....</i>	<i>267</i>
<i>Tabla 5-28 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER,</i> <i>de la tapa de concreto en condiciones del escenario 4.....</i>	<i>267</i>
<i>Tabla 5-29 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER,</i> <i>de la tapa de concreto en condiciones del escenario 4.....</i>	<i>267</i>
<i>Tabla 5-30 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER,</i> <i>de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 4.....</i>	<i>268</i>
<i>Tabla 5-31 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER,</i> <i>de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 4.....</i>	<i>268</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1-1. Rejillas para drenaje pluvial Fuente: Lee et al. (2012).</i>	7
<i>Figura 1-2. Comportamiento del flujo para dos condiciones de análisis; a) Sumidero sin tapa, b) Surgencia sin tapa. Modificado de Rubinato (2015).</i>	8
<i>Figura 1-3. Valores de Curvas características de los sumideros 1, 2 y 3 Fuente: Morales (2016).</i>	9
<i>Figura 1-4. Tipos de rejillas modeladas. Fuente: Rubinato et al. (2018).</i>	10
<i>Figura 2-1 Sistema de drenaje combinado (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	16
<i>Figura 2-2 Diagrama de un pozo de visita común (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	17
<i>Figura 2-3 Pozo de visita tipo especial (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	18
<i>Figura 2-4 Pozo tipo caja (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	19
<i>Figura 2-5 Pozo tipo caja (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	20
<i>Figura 2-6 Pozo con caída (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	21
<i>Figura 2-7 Pozo con caída adosada (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	22
<i>Figura 2-8 Pozo con caída escalonada (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	23
<i>Figura 2-9 Coladera de piso (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	24
<i>Figura 2-10 Coladera de banquetta (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	24
<i>Figura 2-11 Coladera de piso/banqueta (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	25
<i>Figura 2-12 Coladera de ranura o longitudinal (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	25
<i>Figura 2-13 Definición de la altura d (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	27
<i>Figura 2-14 Rejillas P-50 y P-50 x 100 (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	28
<i>Figura 2-15 Rejillas P-30 (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	28
<i>Figura 2-16. Comparación de rendimiento entre las distintas bocas de tormenta (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	29
<i>Figura 2-17 Comparación de la captación con respecto del flujo (Extraído de CONAGUA, 2015)</i>	30
<i>Figura 2-18 Vertedor triangular (Modificado de Sotelo, 2007)</i>	38
<i>Figura 2-19 Vertedor de embudo de la presa Montecillo (Arreguin y Alcocer, 2011)</i>	40
<i>Figura 2-20 Casos del funcionamiento de un vertedor de embudo (Arreguin y Alcocer, 2011)</i>	42
<i>Figura 2-21 Funcionamiento de un vertedor de embudo (Arreguin y Alcocer, 2011)</i>	43
<i>Figura 2-22 Funcionamiento de un vertedor de embudo, (USB, 1960)</i>	44
<i>Figura 2-23 Funcionamiento de un vertedor de embudo, (USB, 1960)</i>	45
<i>Figura 2-24. Etapas de la ranura de Preissmann a) flujo en lámina; b) flujo en presión; c) flujo en presión negativa (Sanz et al., 2022).</i>	52
<i>Figura 3-1. Contenido de las diferentes etapas empleadas en el desarrollo de la investigación.</i>	60
<i>Figura 3-2 Semejanza geométrica; a) modelo del prototipo, b) modelo a escala.</i>	64
<i>Figura 3-3 Perfiles de flujo para $Q=53.2$ l/s, con los cuales se determinó la altura de los muros del modelo físico.</i>	67

Figura 3-4 Diseño en planta del modelo físico.....	67
Figura 3-5 Corte C-C' del modelo físico.....	68
Figura 3-6 Tapa de concreto de pozo de visita común (extraído de https://goo.su/BTiQzh1).....	68
Figura 3-7 Modelo físico de la tapa de concreto.....	70
Figura 3-8 Brocal con tapa de FoFo para pozo de visita, (extraído de https://goo.su/BmMI37).....	70
Figura 3-9 Modelo de brocal y rejilla de fierro fundido en Revit.....	71
Figura 3-10 Modelo físico de la rejilla de fierro fundido.....	71
Figura 3-11 Construcción del tanque de entrada del agua.....	72
- Figura 3-12 Cimbrado y armado de la losa que simula la calle.....	72
Figura 3-13 Colado de la losa del modelo físico.....	73
Figura 3-14 Construcción de muros del modelo físico.....	73
Figura 3-15 Vertedores triangulares en el modelo físico.....	74
Figura 3-16 Pulido de muros y tanques del modelo físico.....	74
Figura 3-17 Instalación de la tubería de alimentación de agua para el modelo físico.....	75
Figura 3-18 Instalación de tubería y cople para captación del caudal.....	76
Figura 3-19 Conexión para la alimentación en caso de surgencia en el modelo físico.....	76
Figura 3-20 Piezómetro instalado en el modelo físico.....	77
Figura 3-21 Limnómetro instalado en el modelo físico.....	77
Figura 3-22 Uniformizador instalado aguas abajo en el modelo físico.....	78
Figura 3-23 Vertedor triangular con $\theta=90^\circ$ del canal principal (vertedor triangular 1).....	79
Figura 3-24 Medición del volumen de agua descargado contra tiempo del vertedor 2; (a) Bote de plástico de 19 litros, (b) Tambo de plástico de 220 litros.....	80
Figura 3-25 Aforo del vertedor triangular con ángulo de abertura $\theta=60^\circ$ (vertedor triangular 2).....	81
Figura 3-26 Aforo con probeta de un litro.....	81
Figura 3-27 Aforo con cubeta de 19 litros.....	82
Figura 3-28 Árbol de experimentos.....	83
Figura 3-29 Sumidero libre, escenario 1.....	84
Figura 3-30. Diagrama de funcionamiento del modelo físico para el escenario 1.....	85
Figura 3-31. Puntos alrededor del pozo donde se tomaron las lecturas de tirante.....	85
Figura 3-32 Sumidero ahogado, escenario 2.....	86
Figura 3-33. Diagrama de funcionamiento del modelo físico para el escenario 2.....	87
Figura 3-34 Surgencia ahogada, escenario 3.....	88
Figura 3-35 Diagrama de funcionamiento del modelo físico para el escenario 3.....	89
Figura 3-36 Surgencia libre, escenario 4.....	90
Figura 3-37 Diagrama de funcionamiento del modelo físico para el escenario 4.....	90
Figura 3-38 Malla y dimensiones del modelo en IBER (vista en planta).....	92
Figura 3-39 Condición interna (compuerta) en IBER para el escenario 1.....	93
Figura 3-40 Condición interna (compuerta) en IBER para los escenarios 2 y 3.....	93
Figura 3-41 Perfil hidráulico de calibración para un caudal de 8.9 l/s.....	94

<i>Figura 3-42 Perfil hidráulico de calibración para un caudal de 11.2 l/s</i>	<i>95</i>
<i>Figura 3-43 Perfil hidráulico de calibración para un caudal de 20 l/s</i>	<i>96</i>
<i>Figura 4-1 Curva de descarga del vertedor triangular 1 ($\theta=90^\circ$).</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4-2 Curva de descarga del vertedor 2 ($\theta=60^\circ$).</i>	<i>103</i>
<i>Figura 4-3 Variación del Caudal captado respecto al tirante sobre la calle, para sumidero libre en el brocal sin tapa.</i>	<i>105</i>
<i>Figura 4-4 Eficiencia de captación del orificio sin tapa, considerando sumidero libre.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 4-5 Coeficiente de descarga para sumidero libre en brocal sin tapa.</i>	<i>106</i>
<i>Figura 4-6 Variación del Caudal captado (Q_e) respecto al tirante sobre la calle (h_s), para sumidero libre con tapa de concreto.</i>	<i>107</i>
<i>Figura 4-7 Eficiencia de captación, sumidero libre en la tapa de concreto</i>	<i>108</i>
<i>Figura 4-8 Coeficiente de descarga para sumidero libre en la tapa de concreto.</i>	<i>108</i>
<i>Figura 4-9 Variación del Caudal captado (Q_e) respecto al tirante sobre la calle (h_s), para sumidero libre en la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>109</i>
<i>Figura 4-10 Eficiencia de captación, sumidero libre en la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4-11 Coeficiente de descarga para sumidero libre en la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>110</i>
<i>Figura 4-12 Variación del Caudal captado (Q_e) respecto al tirante sobre la calle (h_s), para sumidero ahogado sin tapa</i>	<i>111</i>
<i>Figura 4-13 Eficiencia de captación para sumidero ahogado del brocal sin tapa.</i>	<i>112</i>
<i>Figura 4-14 Coeficiente de descarga para sumidero ahogado del brocal sin tapa.</i>	<i>113</i>
<i>Figura 4-15 Comportamiento del caudal captado (Q_e) respecto al tirante en la calle (h_s) de la tapa de concreto para sumidero ahogado.</i>	<i>114</i>
<i>Figura 4-16 Eficiencia de captación para flujo con remanso de la tapa de concreto.</i>	<i>114</i>
<i>Figura 4-17 Coeficiente de descarga de la tapa de concreto para sumidero ahogado.</i>	<i>115</i>
<i>Figura 4-18 Variación del Caudal captado (Q_e) respecto al tirante sobre la calle (h_s) para sumidero ahogado con rejilla de fierro fundido.</i>	<i>116</i>
<i>Figura 4-19 Eficiencia de captación de la rejilla de fierro fundido para sumidero ahogado.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4-20 Coeficiente de descarga para sumidero ahogado de la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>117</i>
<i>Figura 4-21 Variación del Caudal captado (Q_e) respecto a la altura de la surgencia (h_f), para surgencia ahogada en el brocal sin tapa.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 4-22 Comportamiento del caudal descargado por en función de la carga de presión en la tubería (P) y la altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada, con caudal de inundación de 8 l/s y brocal sin tapa.</i>	<i>119</i>
<i>Figura 4-23 Comportamiento del caudal descargado por en función de la carga de presión en la tubería (P) y la altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada, con un caudal de inundación de 18.9 l/s y descarga del brocal sin tapa.</i>	<i>120</i>
<i>Figura 4-24 Comparación del caudal descargado en surgencia (Q_e) en función de la carga de presión en la tubería (P) para los caudales de ahogamiento de 8 y 20 l/s.</i>	<i>121</i>

Figura 4-25 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia brocal sin tapa, caudal de inundación en la calle de 20 l/s.	121
Figura 4-26 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia para el brocal sin tapa, con caudal de inundación en la calle de 8 l/s.	122
Figura 4-27 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (h_c) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 0.56 l/s.	123
Figura 4-28 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (h_c) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 2.03 l/s.	124
Figura 4-29 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (h_c) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 6.74 l/s.	125
Figura 4-30 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (h_c) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 9.81 l/s.	126
Figura 4-31 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (h_c) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 15.54 l/s.	127
Figura 4-32 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (h_c) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 18.9 l/s.	128
Figura 4-33 Zonas de desplazamiento de la tapa de concreto para diferentes cargas de presión y diferentes caudales de ahogamiento.	129
Figura 4-34 Tapa de concreto en el escenario de surgencia ahogada para la tapa de concreto. a) Tapa fija, b) Tapa flotando dentro del brocal, c) Tapa desplazada.	130
Figura 4-35 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 0.57 l/s.	130
Figura 4-36 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 2.03 l/s.	131
Figura 4-37 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 6.74 l/s.	132
Figura 4-38 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 9.81 l/s.	132
Figura 4-39 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 15.5 l/s.	133
Figura 4-40 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 18.9 l/s.	134
Figura 4-41 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada con rejilla de fierro fundido y caudal de inundación de 0.86 l/s.	135

<i>Figura 4-42 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada con rejilla de fierro fundido y caudal de inundación de 2.56 l/s.</i>	<i>136</i>
<i>Figura 4-43 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada con rejilla de fierro fundido y caudal de inundación de 6.34 l/s.</i>	<i>137</i>
<i>Figura 4-44 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada con rejilla de fierro fundido y caudal de inundación de 12.5 l/s.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 4-45 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada con rejilla de fierro fundido y caudal de inundación de 20 l/s.</i>	<i>139</i>
<i>Figura 4-46 Zonas de desplazamiento de la rejilla de fierro fundido para diferentes cargas de presión y diferentes caudales de ahogamiento.</i>	<i>140</i>
<i>Figura 4-47 Rejilla de fierro fundido en surgencia libre, a) rejilla fija, b) rejilla abriendo.</i>	<i>141</i>
<i>Figura 4-48 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia con la rejilla de fierro fundido, con un caudal en la calle de 0.86 l/s.</i>	<i>141</i>
<i>Figura 4-49 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia con la rejilla de fierro fundido, con caudal en la calle de 2.56 l/s.</i>	<i>142</i>
<i>Figura 4-50 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia con rejilla de fierro fundido, con un caudal en la calle de 6.33 l/s.</i>	<i>142</i>
<i>Figura 4-51 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia con la rejilla de fierro fundido, con un caudal en la calle de 12.5 l/s.</i>	<i>143</i>
<i>Figura 4-52 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia con la rejilla de fierro fundido, con un caudal en la calle de 20 l/s.</i>	<i>144</i>
<i>Figura 4-53 Variación del caudal de surgencia (Q_e) respecto a la altura de la surgencia (h_f), para surgencia con descarga libre en el brocal sin tapa.</i>	<i>145</i>
<i>Figura 4-54 Coeficiente de descarga para surgencia libre en del brocal sin tapa.</i>	<i>145</i>
<i>Figura 4-55 Variación del caudal de surgencia (Q_e) respecto a la altura total de la surgencia (h_f), para surgencia con descarga libre en el brocal con tapa de concreto.</i>	<i>146</i>
<i>Figura 4-56 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia libre, con tapa de concreto.</i>	<i>147</i>
<i>Figura 4-57 Zonas de desplazamiento de la tapa de concreto para diferentes cargas de presión, para surgencia libre.</i>	<i>148</i>
<i>Figura 4-58 Coeficiente de descarga en surgencia libre con tapa de concreto.</i>	<i>148</i>
<i>Figura 4-59 Variación del caudal de surgencia (Q_e) respecto a la altura de la surgencia (h_f), para surgencia con descarga libre en la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>149</i>

<i>Figura 4-60 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia libre, par rejilla de fierro fundido.</i>	150
<i>Figura 4-61 Zonas de desplazamiento de la tapa de concreto para diferentes cargas de presión, para surgencia libre en la rejilla de fierro fundido.</i>	151
<i>Figura 4-62 Coeficiente de descarga para la rejilla de fierro fundido en surgencia libre.</i>	151
<i>Figura 4-63 Mapa del Calado (tirante) del Escenario 1 con brocal sin tapa.</i>	164
<i>Figura 4-64 Mapa de la Cota de agua del Escenario 1 con brocal sin tapa.</i>	164
<i>Figura 4-65 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') del del sumidero libre en el brocal sin tapa.</i>	165
<i>Figura 4-66 Perfil de flujo transversal (corte B-B') del sumidero libre en el brocal sin tapa.</i>	165
<i>Figura 4-67 Comportamiento del Número de Froude del sumidero libre en el brocal sin tapa.</i>	166
<i>Figura 4-68 Caudal específico del sumidero libre en el brocal sin tapa.</i>	166
<i>Figura 4-69 Caudal específico de entrada y salida del sumidero libre en el brocal sin tapa.</i>	167
<i>Figura 4-70 Mapa de velocidad del sumidero libre en el brocal sin tapa.</i>	167
<i>Figura 4-71 Mapa del Calado (tirante) del Escenario 1 con tapa de concreto.</i>	169
<i>Figura 4-72 Mapa de la Cota de agua del Escenario 1 con tapa de concreto.</i>	169
<i>Figura 4-73 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A'), del sumidero libre con tapa de concreto.</i>	170
<i>Figura 4-74 Perfil de flujo transversal (corte B-B'), del sumidero libre con tapa de concreto.</i>	170
<i>Figura 4-75 Mapa del Número de Froude del del sumidero libre con tapa de concreto.</i>	171
<i>Figura 4-76 Mapa del caudal específico del del sumidero libre con tapa de concreto.</i>	171
<i>Figura 4-77 Caudal específico de entrada y salida del sumidero libre con tapa de concreto.</i>	172
<i>Figura 4-78 Mapa de velocidad del sumidero libre con tapa de concreto.</i>	172
<i>Figura 4-79 Mapa del Calado (tirante) del sumidero libre con la rejilla de fierro fundido.</i>	174
<i>Figura 4-80 Mapa de la Cota del agua del sumidero libre con la rejilla de fierro fundido.</i>	174
<i>Figura 4-81 Perfil de fujo longitudinal (corte A-A') del sumidero libre con la rejilla de fierro fundido.</i>	175
<i>Figura 4-82 Perfil de flujo transversal (corte B-B') del sumidero libre con rejilla de fierro fundido.</i>	175
<i>Figura 4-83 Mapa del Número de Froude del sumidero libre con rejilla de fierro fundido.</i>	176
<i>Figura 4-84 Mapa del caudal específico del Escenario 1 con la rejilla de fierro fundido.</i>	176
<i>Figura 4-85 Caudal específico de entrada y salida del Escenario 1 con la rejilla de fierro fundido.</i>	177

<i>Figura 4-86 Mapa de velocidad del sumidero libre con la rejilla de fierro fundido.....</i>	<i>177</i>
<i>Figura 4-87 Mapa del Calado (tirante) del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.</i>	<i>179</i>
<i>Figura 4-88 Mapa del caudal específico del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.....</i>	<i>179</i>
<i>Figura 4-89 Caudal específico de entrada y salida del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.....</i>	<i>180</i>
<i>Figura 4-90 Mapa de la Cota de agua del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.</i>	<i>180</i>
<i>Figura 4-91 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.....</i>	<i>181</i>
<i>Figura 4-92 Perfil de flujo transversal (corte B-B') del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.....</i>	<i>182</i>
<i>Figura 4-93 Mapa del Número de Froude del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.</i>	<i>182</i>
<i>Figura 4-94 Mapa de velocidad del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.</i>	<i>183</i>
<i>Figura 4-95 Mapa del Calado (tirante) del sumidero ahogado en la tapa de concreto.....</i>	<i>184</i>
<i>Figura 4-96 Mapa de la Cota de agua del sumidero ahogado en la tapa de concreto.</i>	<i>184</i>
<i>Figura 4-97 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') del sumidero ahogado en la tapa de concreto.....</i>	<i>185</i>
<i>Figura 4-98 Perfil de flujo transversal (corte B-B') del sumidero ahogado en la tapa de concreto.....</i>	<i>186</i>
<i>Figura 4-99 Comportamiento del Número de Froude del sumidero ahogado en la tapa de concreto.....</i>	<i>186</i>
<i>Figura 4-100 Mapa del caudal específico del sumidero ahogado en la tapa de concreto.</i>	<i>187</i>
<i>Figura 4-101 Caudal específico de entrada y salida del sumidero ahogado en la tapa de concreto.....</i>	<i>187</i>
<i>Figura 4-102 Mapa de velocidad del sumidero ahogado en la tapa de concreto.</i>	<i>188</i>
<i>Figura 4-103 Mapa del Calado (tirante) del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.....</i>	<i>188</i>
<i>Figura 4-104 Mapa de la Cota del agua del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.....</i>	<i>189</i>
<i>Figura 4-105 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.....</i>	<i>190</i>
<i>Figura 4-106 Perfil de flujo transversal (corte B-B') del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.....</i>	<i>191</i>
<i>Figura 4-107 Mapa del caudal específico del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.....</i>	<i>191</i>
<i>Figura 4-108 Caudal específico de entrada y salida del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.....</i>	<i>192</i>
<i>Figura 4-109 Mapa del Número de Froude del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.....</i>	<i>192</i>
<i>Figura 4-110 Mapa de velocidad del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>193</i>
<i>Figura 4-111 Mapa del Calado (tirante) de surgencia ahogado en el brocal sin tapa.....</i>	<i>194</i>
<i>Figura 4-112 Mapa de la Cota de agua de surgencia ahogado en el brocal sin tapa.</i>	<i>195</i>
<i>Figura 4-113 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') de surgencia ahogado en el brocal sin tapa.....</i>	<i>195</i>

<i>Figura 4-114 Perfil de flujo transversal (corte B-B') de surgencia ahogado en el brocal sin tapa</i>	196
<i>Figura 4-115 Mapa del caudal específico de surgencia ahogado en el brocal sin tapa</i>	196
<i>Figura 4-116 Comparación del caudal específico de entrada y salida de la surgencia con descarga ahogada del brocal sin tapa</i>	197
<i>Figura 4-117 Comportamiento del Número de Froude de la surgencia con descarga ahogada del brocal sin tapa</i>	198
<i>Figura 4-118 Mapa de velocidad de la surgencia con descarga ahogada del brocal sin tapa</i>	198
<i>Figura 4-119 Comportamiento del tirante en la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto</i>	199
<i>Figura 4-120 Mapa de la cota del agua en la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto</i>	200
<i>Figura 4-121 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') para un caudal de 21.83 l/s en la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto</i>	201
<i>Figura 4-122 Perfil de flujo transversal (corte B-B') para un caudal de 21.83 l/s en la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto</i>	201
<i>Figura 4-123 Comportamiento del Número de Froude de la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto</i>	202
<i>Figura 4-124 Mapa del caudal específico de la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto</i>	202
<i>Figura 4-125 Comparación del caudal específico de entrada y salida de la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto</i>	203
<i>Figura 4-126 Mapa de velocidad de la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto</i>	203
<i>Figura 4-127 Mapa del Calado de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido</i>	205
<i>Figura 4-128 Mapa de la Cota del agua de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido</i>	205
<i>Figura 4-129 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') para un caudal de 23.12 l/s de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido</i>	206
<i>Figura 4-130 Perfil de flujo longitudinal (corte B-B') para un caudal de 23.12 l/s de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido</i>	206
<i>Figura 4-131 Comportamiento del caudal específico de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido</i>	207
<i>Figura 4-132 Caudal específico de entrada y salida de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido</i>	208
<i>Figura 4-133 Comportamiento del Número de Froude de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido</i>	208

<i>Figura 4-134 Mapa de velocidad de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de fierro fundido</i>	<i>209</i>
<i>Figura 4-136 Mapa de la Cota de agua de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.</i>	<i>211</i>
<i>Figura 4-137 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') para un caudal de 5.75 l/s de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.</i>	<i>212</i>
<i>Figura 4-138 Perfil de flujo transversal (corte B-B') para un caudal de 5.75 l/s de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa</i>	<i>212</i>
<i>Figura 4-139 Comportamiento del Número de Froude de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.</i>	<i>213</i>
<i>Figura 4-140 Mapa del caudal específico con descarga libre en el brocal sin tapa.</i>	<i>213</i>
<i>Figura 4-141 Caudal específico de surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.</i>	<i>214</i>
<i>Figura 4-142 Mapa de velocidad del de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.</i>	<i>215</i>
<i>Figura 4-143 Comportamiento del tirante en la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.</i>	<i>216</i>
<i>Figura 4-144 Mapa de la cota del agua en la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.</i>	<i>216</i>
<i>Figura 4-145 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.</i>	<i>217</i>
<i>Figura 4-146 Perfil de flujo transversal (corte B-B') de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.</i>	<i>218</i>
<i>Figura 4-147 Comportamiento del Número de Froude de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto</i>	<i>218</i>
<i>Figura 4-148 Caudal específico de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.</i>	<i>219</i>
<i>Figura 4-149 Caudal específico de surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.</i>	<i>220</i>
<i>Figura 4-150 Mapa de velocidad de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.</i>	<i>220</i>
<i>Figura 4-151 Mapa del Calado (tirante) de la surgencia con descarga libre de la rejilla de fierro fundido</i>	<i>221</i>
<i>Figura 4-152 Comportamiento de la Cota del agua para la surgencia con descarga libre de la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>222</i>
<i>Figura 4-153 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') para un caudal de 5.43 l/s, de la surgencia con descarga libre de la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>223</i>
<i>Figura 4-154 Perfil de flujo transversal (corte B-B') para un caudal de 5.43 l/s, de la surgencia con descarga libre de la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>223</i>
<i>Figura 4-155 Comportamiento del número de Froude de la surgencia con descarga libre en la rejilla de fierro fundido</i>	<i>224</i>

<i>Figura 4-156 Caudal específico de la surgencia con descarga libre de la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>224</i>
<i>Figura 4-157 Caudal específico de surgencia con descarga libre en la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>225</i>
<i>Figura 4-158 Mapa de velocidad de la surgencia con descarga libre de la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>225</i>
<i>Figura 4-159 Mapa de calado (tirante) del brocal sin tapa con dimensiones del prototipo, trabajando como sumidero libre.</i>	<i>227</i>
<i>Figura 4-160 Comportamiento del número de Froude del brocal sin tapa con dimensiones del prototipo, trabajando como sumidero libre.</i>	<i>227</i>
<i>Figura 4-161 Mapa del caudal específico del brocal sin tapa con dimensiones del prototipo, trabajando como sumidero libre.</i>	<i>228</i>
<i>Figura 4-162 Perfil de flujo para un caudal de 1.77 m³/s del brocal sin tapa con dimensiones del prototipo, trabajando como sumidero libre.</i>	<i>228</i>
<i>Figura 4-163 Caudal específico de entrada y salida en la calle con dimensiones del prototipo.</i>	<i>229</i>
<i>Figura 4-164 Mapa de velocidad el brocal sin tapa con dimensiones del prototipo, trabajando como sumidero libre.</i>	<i>229</i>
<i>Figura 4-165 Mapa de calado (tirante) de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.</i>	<i>230</i>
<i>Figura 4-166 Comportamiento del número de Froude de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.</i>	<i>231</i>
<i>Figura 4-167 Mapa de caudal específico de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.</i>	<i>231</i>
<i>Figura 4-168 Perfil de flujo para un caudal de 0.123 m³/s, de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.</i>	<i>232</i>
<i>Figura 4-169 Caudal específico de surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.</i>	<i>233</i>
<i>Figura 4-170 Comportamiento de la velocidad en la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.</i>	<i>233</i>
<i>Figura 5-1 Comparativa del caudal captado por el del brocal sin tapa, la rejilla de fierro fundido y la tapa de concreto en condiciones del escenario 1.</i>	<i>236</i>
<i>Figura 5-2 Comparativa de la eficiencia del brocal sin tapa, la rejilla de fierro fundido y la tapa de concreto en condiciones del escenario 1.</i>	<i>237</i>
<i>Figura 5-3 Comparativa de los coeficientes de descarga del brocal sin tapa, la rejilla de fierro fundido y la tapa de concreto en condiciones del escenario 1.</i>	<i>238</i>
<i>Figura 5-4 Comparativa del caudal captado por el brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido trabajando como sumidero ahogado.</i>	<i>241</i>
<i>Figura 5-5 Comparativa de la eficiencia de captación del brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido trabajando como sumidero ahogado.</i>	<i>241</i>
<i>Figura 5-6 Comparativa de los coeficientes de descarga del brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido trabajando como sumidero ahogado. ...</i>	<i>242</i>

<i>Figura 5-7 Comparativa de los coeficientes de descarga para surgencia ahogada del brocal sin tapa para diferentes caudales de ahogamiento.</i>	<i>244</i>
<i>Figura 5-8 Comparativa de los coeficientes de descarga para surgencia ahogada de la tapa de concreto para diferentes caudales de ahogamiento.....</i>	<i>245</i>
<i>Figura 5-9 Comparativa de los coeficientes de descarga para surgencia ahogada de la rejilla de fierro fundido para diferentes caudales de ahogamiento.</i>	<i>246</i>
<i>Figura 5-10 Comparativa de los coeficientes de descarga en surgencia ahogada del brocal sin tapa, la tapa de concreto y de la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>247</i>
<i>Figura 5-11 Comparativa de la presión en surgencia ahogada con un caudal en la calle de 20 l/s de la tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido.</i>	<i>248</i>
<i>Figura 5-12 Comparativa de Coeficientes de descarga para surgencia libre, del brocal sin tapa, la tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido.....</i>	<i>251</i>
<i>Figura 5-13 Comparativa presión piezométrica de la tapa de concreto y la rejilla fierro fundido trabajando en surgencia libre.....</i>	<i>252</i>

NOMENCLATURA

A	es el área, en m^2
A_u	área útil de captación del sumidero, en m^2
A_{int}	área de captación, en m^2
A_M	área del brocal, en m^2
B	Ancho del canal, en m
$\tilde{C}$	coeficiente de descarga para vertedores de embudo
C_i	coeficiente de descarga
$C_{d,o}$	coeficiente de descarga del orificio
$C_{d,v}$	coeficiente de descarga del vertedero
D	diámetro, en m
D_M	diámetro del brocal del pozo de visita, en m
E	módulo de elasticidad, $\frac{kg}{ms^2}$
E_f	eficiencia de ingreso
f	tasa de infiltración, en m/h
F	fuerza de arrastre o sustentación, en N
g	aceleración de la gravedad, en m/s^2
h	Carga hidráulica sobre el vertedor, en m; tirante, en m
H	carga hidráulica, en m
h_o	tirante aguas arriba del vertedor de embudo menos y_s , en m
H_o	carga total aguas arriba del vertedor de embudo menos y_s , en m; carga hidráulica sobre el vertedor de embudo, en m
H_e	carga hidráulica, en m
H_v	carga hidráulica, en m
$\bar{h}_s$	tirante aguas arriba del vertedor de embudo, en m
$\bar{H}_s$	carga total aguas arriba del vertedor de embudo, en m
h_L	pérdidas totales, en m
H'_T	carga hidráulica total, en m
$\bar{h}_v$	tirante en la descarga, en m
h_v	carga de vaporización, en m
h_s	carga hidráulica, en m

h_p	tirante medido desde la base de la tubería al centro del brocal, en m
k	rugosidad, adimensional
l	longitud, en m
L_{ce}	longitud de cresta del vertedor de embudo, en m
L_{int}	longitud de captación (perímetro), en m
L_p	longitud del prototipo
L_m	longitud correspondiente en el modelo físico
L_e	longitud equivalente, adimensional
n	coeficiente de rugosidad de Manning; frecuencia en Hz.
P	altura del vertedor, en m
P	representa la presión en el colector, en kgf/m^2
q	magnitud dimensional
q_x y q_y	componentes en dirección x y y , del caudal unitario, en m^2/s
$ q $	es el módulo del gasto unitario, en m^2/s
Q_c	caudal en la calle, en m^3/s
Q_{cu}	flujo total de escurrimiento, en m^3/s
Q_e	caudal de intercambio en m^3/s
Q_i	flujo interceptado, en m^3/s
Q_m	caudal en el modelo físico, en m^3/s
Q_p	caudal en el prototipo, en m^3/s
r	rango de la matriz de los exponentes
R	intensidad de precipitación, en m/h
R_s	radio del vertedor de embudo, en m
R_{ve}	Radio de la circunferencia del vertedor de embudo, en m.
R_h	radio hidráulico, en m.
S_0	pendiente del canal, en $\frac{m}{m}$
S_y	pendiente longitudinal de la calle, en $\frac{m}{m}$
S_x	pendiente transversal de la calle, en $\frac{m}{m}$
U	velocidad media, en m/s .
V	velocidad, en m/s
w	distancia del fondo del canal al inicio del vertedor, en m

y	tirante del escurrimiento antes del sumidero, en m
y_s	distancia vertical del origen de la cresta al vertedor, en m
Z_b	cota del fondo, en m
Z_{crest}	diferencia de altura desde la parte inferior de la tubería hasta el nivel de la superficie, en m

Letras griegas

γ_e	peso específico, adimensional
Δp	incremento de presión, N/m ²
θ	ángulo de abertura del vertedor triangular, en ° (grados)
μ	coeficiente de gasto, adimensional
μ	viscosidad dinámica, en $\frac{kg}{ms}$
μ_e	viscosidad dinámica, adimensional
ν	viscosidad cinemática, en $\frac{m^2}{s}$
π	número adimensional
ρ	densidad, en $\frac{kg}{m^3}$
ρ_e	densidad equivalente, adimensional
σ	tensión superficial, en $\frac{kg}{s^2}$
τ	esfuerzo cortante, N/m ²

ACRÓNIMOS

1D = modelo en una dimensión

2D = modelo en dos dimensiones

3D = modelo en tres dimensiones

CFD = Dinámica de Fluidos Computacional

CONAGUA = Comisión Nacional del Agua

HEC-RAS = Hydrologic Engineering Center- River Analysis System (Centro de Ingeniería Hidrológica - Sistema de Análisis de Ríos)

IITCA = Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua.

MAPAS = Manual de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario

LSPIV = Large Scale Particle Image Velocimetry (Velocimetría de Imágenes de Partícula a Gran Escala)

SPSS = Statistical Package for the Social Sciences

SUDS = Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible

SWMM = Storm Water Management Model (Modelo de gestión de aguas pluviales)

USBR = United States Bureau of Reclamation

UVP = Ultrasonic Doppler Velocity Profiler

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Introducción

Los coeficientes de descarga o de gasto, se emplean en las ecuaciones que sirven para obtener el caudal que descarga un orificio, en este trabajo se idealiza el brocal de un pozo de visita común como un orificio, en el cual se coloca una tapa de concreto o una rejilla de fierro fundido, de acuerdo con el MAPAS (2015) y para conocer el caudal que entra al pozo de visita (funcionamiento conocido como sumidero) se emplean las ecuaciones de vertedor, cuando ya se tiene una inundación, se habla de una descarga ahogada y se emplean las ecuaciones de orificio. Si el agua, en lugar de ingresar a los colectores, sale a la calle, también es importante conocer qué caudal se está enviando a la calle (trabajando a surgencia o funcionando como fuente), ese caudal puede generar una inundación o incrementar una existente, el caudal se obtiene empleando la ecuación de orificio para descarga libre y ahogada, en ambas condiciones el sistema está trabajando a presión, es importante conocer esa presión y como afecta al coeficiente de descarga. Al no conocer estos coeficientes, no se tiene certeza del caudal descargado, además dichos coeficientes de descarga no se pueden considerar constantes.

Para obtener los coeficientes de descarga del brocal sin tapa, tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido, se elaboraron los modelos físicos a escala de la tapa y la rejilla y para poder realizar los experimentos con ellas, se construyó un modelo físico de una calle con su respectivo pozo de visita al centro de la misma, a escala longitudinal 1:6. Para su construcción se utilizó un espacio del laboratorio de modelos hidráulicos del IITCA y durante la campaña de experimentación se obtuvieron los datos necesarios, los cuales una vez interpretados, se obtuvieron los coeficientes de descarga, curvas de eficiencia y las presiones debidas a la surgencia.

En el modelo numérico IBER se realizó un modelo de simulación considerando las dimensiones del modelo físico. Los datos con los que se alimentó dicho modelo son los obtenidos mediante la campaña de experimentación en el modelo físico, para realizar las simulaciones se emplearon las funciones de sumidero y fuente, que vienen incorporadas en su módulo de drenaje urbano, con estas simulaciones se validaron los coeficientes obtenidos con los datos experimentales.

Las curvas de diseño, coeficientes de descarga y curvas de eficiencia de la tapa y rejilla analizadas, es información básica para realizar proyectos de drenaje pluvial de forma integral, considerando los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), esta información se

implementará en el software Chaak (Becerril, 2020), Modelo numérico enfocado al diseño y simulación de sistemas de drenaje sostenible, el cual fue creado por investigadores del IITCA.

1.1 Antecedentes

El problema de las inundaciones es muy complejo y la solución requiere de esfuerzos multidisciplinarios (Yan *et al.*, 2020). En las urbes el sistema de drenaje se diseña para que evacue el escurrimiento rápidamente hacia la salida de la cuenca urbana (Bertoni y Maza, 2004). La principal función de una calle es facilitar el movimiento del tráfico vehicular y peatonal. Sin embargo, durante un episodio de lluvia, las calles deben recoger y conducir la concentración de agua precipitada; pero si el sistema de drenaje de la calle no está diseñado de manera adecuada se pueden alcanzar tirantes de agua y caudales significativos, hasta un punto en donde no se puede transitar (Mur, 2002).

En las ciudades pequeñas con pocas calles pavimentadas, terrenos baldíos intercalados y con casas generalmente provistas de fondos de tierra o jardines, la lluvia encuentra una gran proporción de suelos permeables con relación a las impermeables (techos, pavimentos). El agua que escurre como resultado de la lluvia de determinada intensidad, sobre un área en esas condiciones es muy inferior, a la que se produce sobre una ciudad densamente urbanizada donde prácticamente el 100% de su superficie es impermeable (Bertoni y Maza, 2004).

Los impactos de la urbanización sobre el ciclo del agua son numerosos. Chocat (1997) destaca cinco impactos: la impermeabilización del suelo, la aceleración de los escurrimientos, la construcción de obstáculos al escurrimiento, el entubamiento de los cauces, arroyos y ríos en áreas urbanas y la contaminación de los medios receptores. Los tres primeros tienen una influencia significativa sobre el aumento de la frecuencia de las inundaciones en los medios urbanos y dependen del aumento de la población (Bertoni y Maza, 2004).

Tucci (1994) analizó la variación del coeficiente de escurrimiento entre áreas rurales y urbanas, concluyendo que, para sectores con urbanización media esta variación puede llegar a valores del orden del 200%, lo que provoca caudales extraordinarios que rebasan la capacidad de los colectores.

Introducción

De acuerdo con Dolz y Gómez (1994), la capacidad de un colector está ligada a sus dimensiones y a la velocidad con que se desplaza el agua. La elevada densidad urbana, limita en gran medida las dimensiones de un nuevo colector, por ejemplo, el 50% de las inundaciones de alcantarillado en el Reino Unido son atribuibles únicamente a la superación de su capacidad (Dawson *et al.*, 2008). Además, en mayoría de las ciudades predominan los sistemas de drenaje combinados donde se juntan drenaje sanitario y drenaje pluvial. Lorenzetti (2012) reporta que el tipo de alcantarillado más utilizado a nivel de América Latina es el combinado, esto debido al poco presupuesto con el que cuentan los gobiernos para la construcción de sistemas de drenaje.

Así, la mayoría de las grandes ciudades del mundo desarrollado que construyeron sus sistemas de alcantarillado en el siglo pasado y principios de éste, han tenido y tienen graves problemas con los desbordamientos de los alcantarillados, esto es ciudades como: Chicago, Boston, Nashville, París, Londres, Hamburgo, Bruselas, Rotterdam, Copenhague, ciudades que tienen extensos programas de control de los desbordamientos de los alcantarillados combinados (Giraldo, 2000; Mark *et al.*, 2004). El cambio climático es otro factor que ha exacerbado el problema de las inundaciones urbanas (Schreider *et al.*, 2000; Falconer *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2012; Jiang *et al.*, 2018).

Durante un evento de inundación, las dos principales variables de interés son: el tirante y la velocidad del agua. Los tirantes se usan comúnmente para elaborar mapas de riesgo de inundaciones y para evaluar los costos de daños por inundaciones con base en una curva de daño (Dawson *et al.*, 2008). Las velocidades permiten la creación de mapas de riesgo de inundación donde éste se clasifica como bajo, moderado y alto en función de la unidad de descarga producto de la profundidad y la velocidad (Leandro *et al.*, 2009).

De acuerdo con Bertoni (2004), el proceso de gestión del escurrimiento pluvial está actualmente sufriendo un significativo redireccionamiento, que puede ser considerado una verdadera revolución. Esto está evidenciado por un nuevo énfasis en el deseo de detener o almacenar la lluvia, mediante la implementación de Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS). Esta clase de soluciones aplicadas a urbanizaciones tiene frecuentemente efectos benéficos acumulados por la atenuación del caudal pico y del escurrimiento total. Si se implementan tácticamente en una cuenca se reducirían las principales inversiones de obras requeridas para la

protección contra los peligros de inundación en las zonas bajas. Inglaterra y China trabajan en programas para la implementación de ciudades esponja (Rubinato *et al.*, 2019).

La filosofía de los sistemas urbanos de drenaje sostenibles consiste en maximizar los beneficios y minimizar los impactos negativos de la escorrentía de aguas superficiales de las áreas desarrolladas. El enfoque de los SUDS implica reducir la velocidad y cantidad del escurrimiento superficial en entornos urbanos, teniendo como objetivo minimizar el riesgo de inundación aguas abajo y reducir la contaminación ocasionada por dicha escorrentía (Charlesworth *et al.*, 2003). Se emplean diferentes técnicas como la cosecha de lluvia e infiltración, para provocar un régimen subcrítico en el flujo que permita captar un mayor caudal, ya que en régimen supercrítico debido a la velocidad, el agua no es captada por los SUDS (Charlesworth *et al.*, 2003).

El alcance y la frecuencia de las inundaciones urbanas en las grandes ciudades de los países en desarrollo sirven como casos de estudio para la modelación del drenaje urbano con un enfoque dual, es decir, se simula el drenaje en 1D y las manchas de inundación en 2D, ya que los datos de inundaciones están disponibles y el impacto de los planes de mitigación se pueden evaluar de inmediato (Mark *et al.*, 2004).

Los investigadores Djordjevic *et al.* (1999), fueron los pioneros en trabajar con modelos duales, antes de la publicación de su trabajo se analizaban los sistemas por separado. Dentro de los modelos duales se puede considerar dos, 1D/1D y 1D/2D, según la hidrodinámica en la superficie se modela con ecuaciones unidimensionales o bidimensionales. Los modelos 1D/1D suponen una opción computacionalmente menos costosa que los 1D/2D, pero el 1D/2D representa mejor el fenómeno y es más fácil de calibrar. Posteriormente, Djordjević *et al.* (2013), modelaron por primera vez el flujo experimentalmente en un modelo físico a escala real; además lo simularon en un modelo 3D, sus resultados son un gran aporte para comprender las interacciones entre los sistemas de drenaje superficiales y subterráneos, también conocido como sistema dual (1D/2D).

En la última década, diferentes grupos de investigación desarrollaron un modelo dual (1D/2D) que consiste en analizar el flujo superficial en 2D y flujo en los colectores en 1D y su interacción que es la parte más compleja, pero aún quedan aspectos por resolver (Djordjević *et al.*, 2005; Leandro *et al.*, 2009; Concha y Gómez 2009; Lee *et al.*, 2013; Aragón, 2013; Djordjević *et al.*,

Introducción

2013; Bazin *et al.*, 2014; Jahanbazi y Egger, 2014; Chen *et al.*, 2015; Fraga, 2015; Martins *et al.*, 2017; Sañudo *et al.*, 2020).

Bates y Roo (2000) desarrollaron el modelo LISFLOOD-FP que combina una aproximación unidimensional para el cálculo del flujo en calles y bidimensional para el cálculo del flujo en llanuras de inundación. Este modelo fue empleado en Neal *et al.* (2009), para analizar las inundaciones que tuvieron lugar en una cuenca del Reino Unido en el año 2005 con buenos resultados.

Vaca (2016) articula un modelo de alcantarilla 1D (SWMM) con uno modelo superficial 2D (FLO-2D). El programa FLO-2D es un modelo que basa su cálculo en la conservación del volumen, donde el avance de una onda creciente es controlado por las características topográficas, como la rugosidad de la superficie, para la evaluación de una cuenca urbana en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Uno de los modelos más utilizado en la gestión de aguas pluviales es el SWMM (Storm Water Management Model), el cual utiliza para el diseño de redes de alcantarillado en 1D; sin embargo, debido al aumento de las inundaciones urbanas y al colapso de los distintos drenajes, es importante el uso conjunto con un modelo que permita el análisis superficial y para ello se han desarrollado diversos acoplamientos, por ejemplo, con el modelo IBER (Sañudo, 2020).

Djordjević *et al.* (2005), desarrollaron el software SIPSON para simular las condiciones de flujo cuando se excede la capacidad hidráulica de un sistema de alcantarillado, el flujo de la tubería está presurizado, el agua sale del sistema de tuberías hacia las calles y las entradas no pueden capturar toda la escorrentía.

Sin embargo, la interacción de flujo es un proceso hidráulico bastante complejo por lo que, se debe revisar la precisión del modelado (Wang *et al.*, 2018), principalmente en el intercambio de flujo superficial y del drenaje, situación que aún se continúa estudiando y desarrollando planteamientos para entender mejor el fenómeno y determinar los parámetros que permita integrarse a los modelos de simulación.

El elemento principal en la interacción entre el flujo superficial y flujo en los colectores es la rejilla del pozo de visita en un sistema de drenaje combinado.

A pesar de ser un elemento clave que puede ser diseñado de forma teórica, es importante realizar experimentación para determinar las curvas de funcionamiento ante diferentes condiciones de operación. Gómez y Russo (2010), determinaron expresiones matemáticas de forma experimental que permiten estimar la eficiencia hidráulica de rejillas convencionales sobre la base de su geometría, para cualquier condición de flujo en cunetas uniformes.

Lee *et al.* (2012), consideran que las fórmulas para obtener los coeficientes de descarga, son diferentes dependiendo de los diferentes grupos de investigadores, ellos trabajaron con un modelo físico con una escala de longitud 1:10 y con dos tipos de rejillas (Figura 1-1), obteniendo coeficientes de descarga para funcionamiento como vertedor de 0.48 y para orificio de 0.57 para ambas rejillas. Se determinó que los coeficientes son iguales para ambas rejillas debido a que sus diferencias eran insignificantes.

Por su parte, Pérez (2015), experimentó con diferentes tipos de rejillas, no sólo buscando la que captara más agua por su geometría. También buscó una alta eficiencia por su arreglo; con la finalidad de diseñar la rejilla ideal para evitar que se obstruya con la basura. En sus resultados obtuvo como se puede suponer, los peores resultados en las condiciones más adversas que implican pendientes más elevadas y los máximos caudales disponibles, consiguiendo rendimientos del orden del 100 % para las situaciones menos exigentes y un amplio abanico de posibilidades, desde el 15 % al 53 % de eficiencia para las condiciones más extremas.

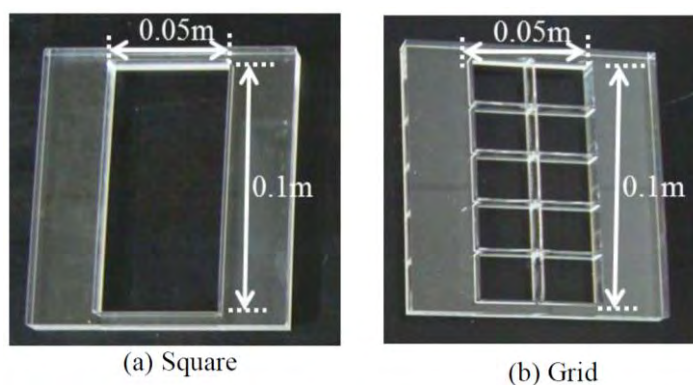


Figura 1-1. Rejillas para drenaje pluvial Fuente: Lee et al. (2012).

Rubinato (2015), presenta los experimentos realizados en un modelo a escala, para sumidero y surgencia del sistema de alcantarillado hacia la calle (Figura 1-2), mediante los cuales determinaron que las ecuaciones de vertedor y orificio se pueden utilizar para cuantificar el

Introducción

caudal que capta funcionando como sumidero y que descarga trabajando a surgencia. Para un escenario de sumidero trabajando como vertedor se obtiene un coeficiente de descarga de 0.57 con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.98$ y para el caso de surgencia obtuvo un coeficiente de descarga de 0.0883 con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.98$. Coeficientes para el orificio sin tapa y con un diámetro de 24 cm.



a)



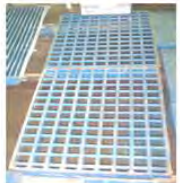
b)

Figura 1-2. Comportamiento del flujo para dos condiciones de análisis; a) Sumidero sin tapa, b) Surgencia sin tapa. Modificado de Rubinato (2015).

Morales (2016), realizó experimentos con diferentes tipos de rejillas (Tabla 1-1) las cuales se pueden diferenciar por su área útil, con ellas obtuvo las siguientes características para tres tipos de rejillas trabajando como sumidero (Figura 1-3) en la figura se observa que lógicamente la que capta más agua es la que tiene la mayor área útil.

Rubinato *et al.* (2018), experimentaron en un modelo a escala y con diez diferentes tipos de rejillas (Figura 1-4). Cuantificaron las condiciones de flujo a través del área útil de cada una, en condiciones de flujo superficial, en estado estacionario somero. Realizaron ochenta experimentos, obtuvieron coeficientes de descarga para su funcionamiento como vertedor y orificio. Los coeficientes de descarga funcionando como vertedor están en el rango de 0.115 a 0.372 y los coeficientes de descarga como orificio en un rango de 0.349 a 2.038 (Tabla 1-2). Sus resultados mostraron una concordancia entre el flujo observado experimentalmente y lo modelado numéricamente.

Tabla 1-1 Características geométricas de las rejillas número 1, 2 y 3.

Nº	Fotografía	Ancho [m]	Largo [m]	Perímetro Útil [m]	Área Útil [m²]	Proveedor	Obs.
1		0.7	1.0	2.4	0.524	DOH	Con ventana lateral
2		0.7	2.0	3.4	1.048	DOH	2 sumideros tipo 1
3		0.4	1.0	1.8	0.32	SERVIU	

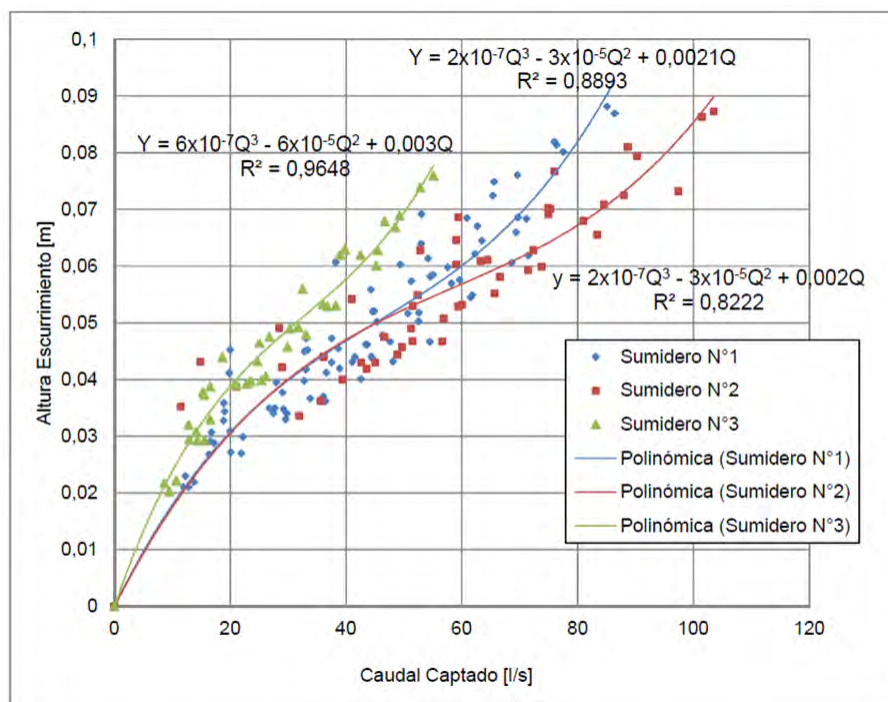


Figura 1-3. Valores de Curvas características de los sumideros 1, 2 y 3 Fuente: Morales (2016).

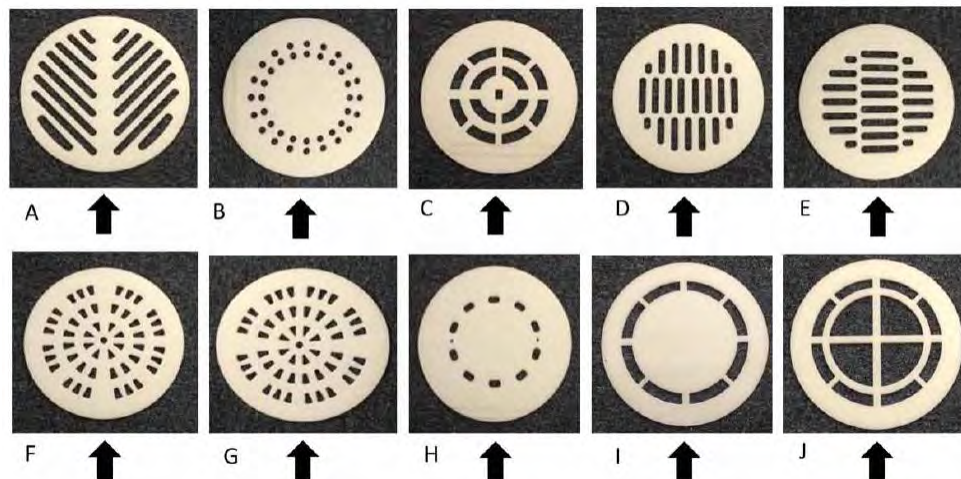


Figura 1-4. Tipos de rejillas modeladas. Fuente: Rubinato et al. (2018).

Tabla 1-2 Valores de coeficientes de descarga cuando se considera de vertedero y orificio calibrados experimentalmente (C_w y C_o) para diferentes tipos de rejillas.

Tipo de rejilla	C_w	R^2	C_o	R^2
A	0.115	0.984	0.448	0.987
B	0.208	0.951	1.546	0.974
C	0.194	0.985	0.657	0.991
D	0.115	0.957	0.552	0.950
E	0.135	0.995	0.606	0.998
F	0.204	0.981	1.115	0.994
G	0.157	0.995	1.222	0.976
H	0.372	0.966	2.038	0.967
I	0.264	0.989	0.969	0.989
J	0.168	0.969	0.349	0.978

Fuente: Rubinato et al. (2018).

1.2 Justificación

La interacción de flujos es un proceso hidrodinámico bastante complejo y aún no se ha estudiado completamente, por tal motivo, se debe continuar haciendo investigación en el campo de la interacción de flujo entre el sistema de drenaje mayor (sobre la calle) y el sistema de drenaje menor (mediante los colectores) considerando todas las variables que representen el fenómeno en un evento de inundación (Schmitt *et al.*, 2004). En la práctica, se ha vuelto común abordar el

modelado de la interacción del flujo de los colectores del alcantarillado hacia la superficie de la calle y viceversa, como un sistema compuesto de dos sistemas; flujo de alcantarillado de superficie 2D y de flujo de alcantarillado en los colectores 1D (Seyoum et al., 2012; Lee et al., 2013; Chen *et al.*, 2015; Leandro *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2017).

Este trabajo toma en cuenta la tapa de concreto y una rejilla de fierro fundido que son las más empleadas en los alcantarillados combinados (sanitario y pluvial). Se experimentó en un modelo físico que consta de un colector, un pozo de visita y la calle. Diseñado para obtener sus curvas de funcionamiento de la tapa y rejilla las cuales se pueden cambiar en el modelo, para ello, se graficaron diferentes relaciones entre las siguientes variables: Caudal total en la calle, caudal captado por la tapa, caudal descargado mediante surgencia por la tapa hacia la calle, tirante en la calle y la presión piezométrica en el caso de surgencia.

La importancia de este trabajo se fundamenta en que, es información que el profesionista que se dedica al diseño de sistemas de drenaje pluvial debe tomar en cuenta, para optimar el diseño y buscar la mejor solución. La información de los coeficientes y curvas de funcionamiento posteriormente se implementará en el modelo numérico enfocado al diseño y simulación de sistemas de drenaje sostenible, Chaak (Becerril, 2020), creado en el IITCA.

Hoy en día no se cuenta con la información para las tapas que se analizan en este trabajo. Por otra parte, el fenómeno de surgencia descargando con las tapas de pozos de visita (de fierro fundido y concreto), no se ha estudiado lo suficiente y los sistemas de drenaje combinado en temporada de lluvias trabajan con carga hidráulica, lógicamente los sistemas de drenaje no se diseñan para que trabajen a presión, sólo deben trabajar a superficie libre. Considerando que es importante conocer a que presión están trabajando las tuberías y así poder prevenir posibles fallas de las mismas.

1.3 Hipótesis

El coeficiente de gasto y la eficiencia de los orificios en las tapas de pozos de visita dependen de la variación del tirante del flujo en la superficie que se presenta aguas arriba del sumidero y de la carga hidráulica en caso de la presencia del fenómeno de surgencia en un sistema de alcantarillado.

1.4 Objetivos

General

Determinar las curvas de funcionamiento y eficiencia de los orificios presentes en las tapas convencionales instaladas en los sistemas de alcantarillado bajo diferentes condiciones de operación, mediante la modelación tanto física como numérica, con la finalidad de alimentar los modelos de simulación de diseño de un sistema de drenaje pluvial urbano.

Específicos

- 1) Analizar y clasificar la información, referente al diseño de rejillas pluviales, modelos de simulación dual, para establecer el marco teórico con respecto al diseño de las rejillas pluviales.
- 2) Construir un modelo físico a escala de un pozo de visita del drenaje pluvial urbano, para obtener los coeficientes de gasto y las curvas de eficiencia de la tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido, bajo diferentes condiciones de operación.
- 3) Medir la carga hidráulica sobre la tapa y rejilla del modelo físico e identificar los puntos de máxima presión, cuando se presenta el fenómeno de surgencia para conocer el valor máximo de presión que provoca el desplazamiento de la tapa y abertura de la rejilla, así como su efecto en el coeficiente de gasto.
- 4) Simular el modelo físico en el modelo numérico IBER, calibrándolo con las curvas de diseño obtenidas mediante experimentación para su empleo en el análisis de una red de drenaje pluvial urbana.

Este trabajo presenta la información en 5 capítulos y su contenido se encuentra organizado de la siguiente forma: En el primer capítulo se presenta la información antecedente, planteamiento del problema, hipótesis, objetivos y justificación; en el segundo capítulo contiene el marco teórico con información relacionada con este trabajo referente a, drenajes pluviales, los SUDS, tipos de pozos de visita, bocas de tormenta, Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y

métodos estadísticos. En el capítulo tres, referente a Materiales y Métodos contiene el proceso de experimentación en el modelo físico y la Dinámica de Fluidos Computacional en IBER; el capítulo cuatro contiene los resultados obtenidos en el modelo físico y en el software IBER; en el capítulo cinco se lleva a cabo la discusión de los resultados y finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta la teoría referente a Drenajes pluviales, Pozos de visita, Bocas de tormenta, Modelos físicos, Dinámica de fluidos computacional y de los Métodos de análisis estadístico, teoría que soporta los métodos y ecuaciones empleadas en el diseño del modelo físico, experimentación y simulación en el modelo numérico IBER. Toda esta información es producto de la recopilación de información y se concentra en este Marco teórico.

2.1 Drenajes pluviales

En México se tienen sistemas de drenaje combinado por lo que el drenaje pluvial es un aporte adicional de masa de agua que se conduce hacia la parte baja de la cuenca mediante los colectores (Figura 2-1). Lo ideal es tener un sistema independiente de drenaje pluvial y aun así no es garantía de evitar las inundaciones debido a que depende de las consideraciones en el diseño.

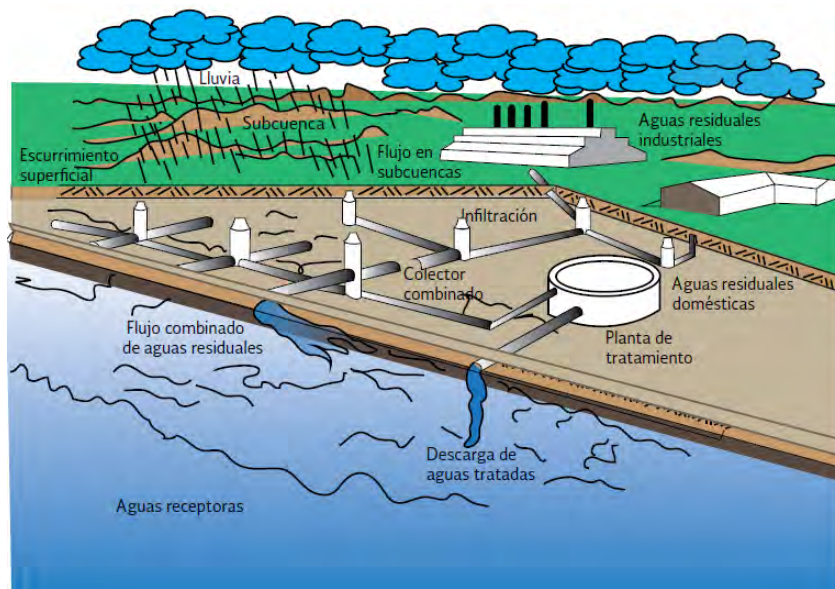


Figura 2-1 Sistema de drenaje combinado (Extraído de CONAGUA, 2015)

2.2 Pozos de visita

Los pozos de visita son estructuras que permiten la inspección, ventilación y limpieza de la red de drenaje. Su existencia en las redes de alcantarillado es fundamental. Estas infraestructuras se ubican al inicio de las atarjeas, en puntos donde la tubería cambia de diámetro, dirección o

pendiente y también donde requiere la conexión con otras atarjeas, subcolectores o colectores (CONAGUA, 2015).

Los pozos de visita se pueden clasificar según la función y dimensiones de las tuberías:

- a) **Pozos de visita tipo común.** Estos pozos están formados por una chimenea de forma cilíndrica en la parte interior y troncocónica en la parte superior. Los pozos de visita comunes tienen un diámetro interior de 1.2 m, se utilizan con una tubería de hasta 610 mm de diámetro y permiten una deflexión máxima en la tubería de 90 grados como se muestra en la Figura 2-2 (CONAGUA, 2015).

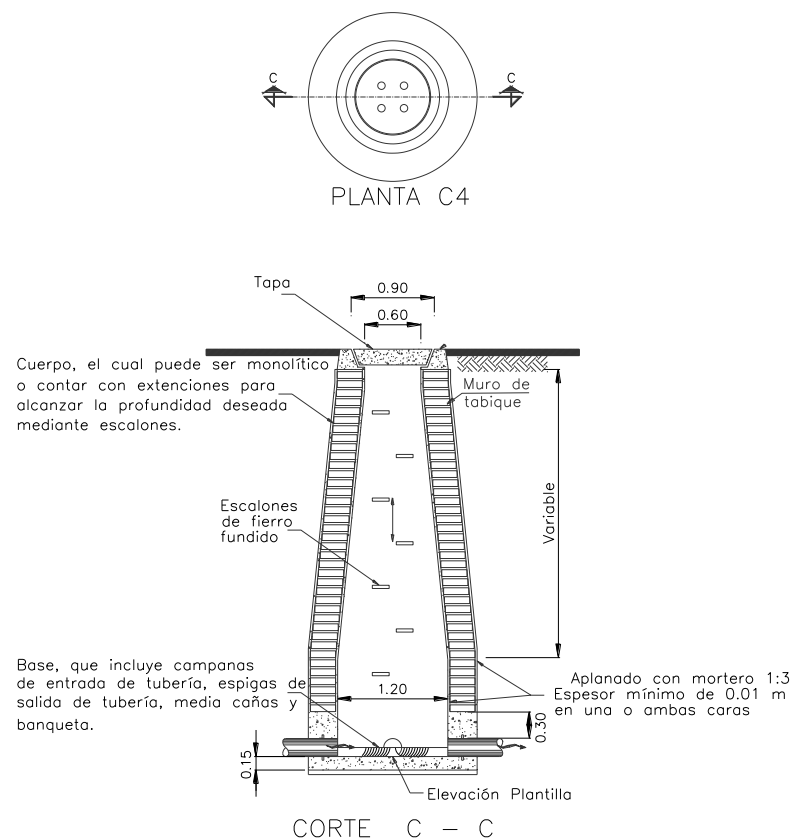


Figura 2-2 Diagrama de un pozo de visita común (Extraído de CONAGUA, 2015)

- b) **Pozos de visita tipo especial.** Es similar al pozo de visita común, pero de dimensiones mayores existen dos tipos de pozos especiales.

- **Pozos de visita tipo especial Tipo 1** (Figura 2-3). Presenta un diámetro interior de 1.5 m, se utiliza con tuberías de 0.76 a 1.07 m de diámetro, con entronques a 90 grados de tuberías de hasta 0.3 m y permite una deflexión máxima en la tubería de 45 grados (CONAGUA, 2015).
- **Pozos de visita tipo especial Tipo 2.** presenta 2.0 m de diámetro interior, se usa con diámetros de 1.22 m y entronques a 90 grados con tuberías de hasta 0.3 m y permite una deflexión máxima en la tubería de 45 grados (CONAGUA, 2015).

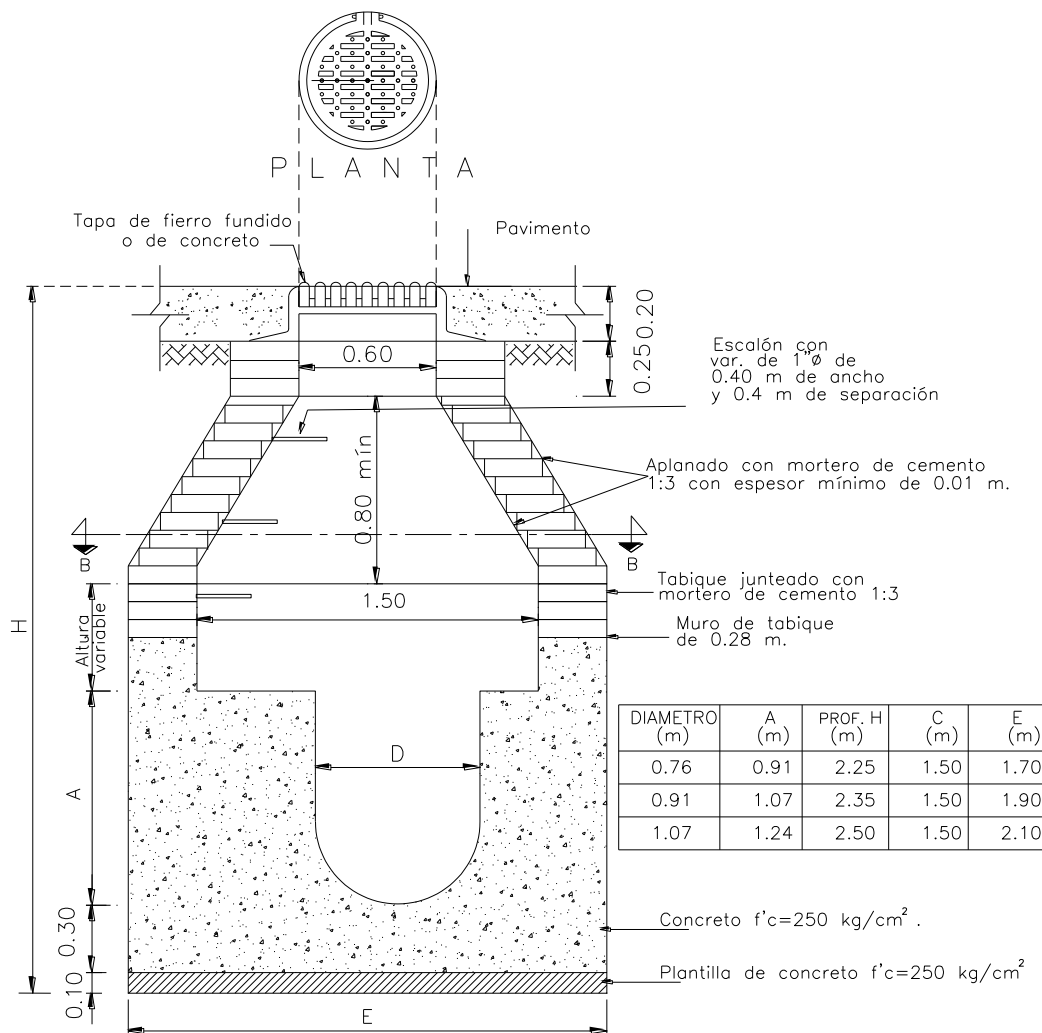


Figura 2-3 Pozo de visita tipo especial (Extraído de CONAGUA, 2015)

- c) **Pozos tipo caja.** De acuerdo con CONAGUA (2015), los pozos caja están formados por el conjunto de una caja de concreto reforzado y una chimenea de tabique similar a la de

los pozos de comunes y especiales. Estos pozos no permiten deflexiones en las tuberías y existen tres tipos de pozos caja: Tipo 1: se utiliza en tuberías de 0.76 a 1.07 m de diámetro, con entronques a 45 grados hasta de 0.60 m de diámetro. Tipo 2: se usa en tuberías de 0.76 a 1.22 m de diámetro, en entronques a 45 grados hasta 0.76 m de diámetro. Tipo 3: se utiliza en tuberías con diámetro de 1.52 a 1.83 m, con entronques a 45 grados hasta de 0.76 m de diámetro (Figura 2-4)

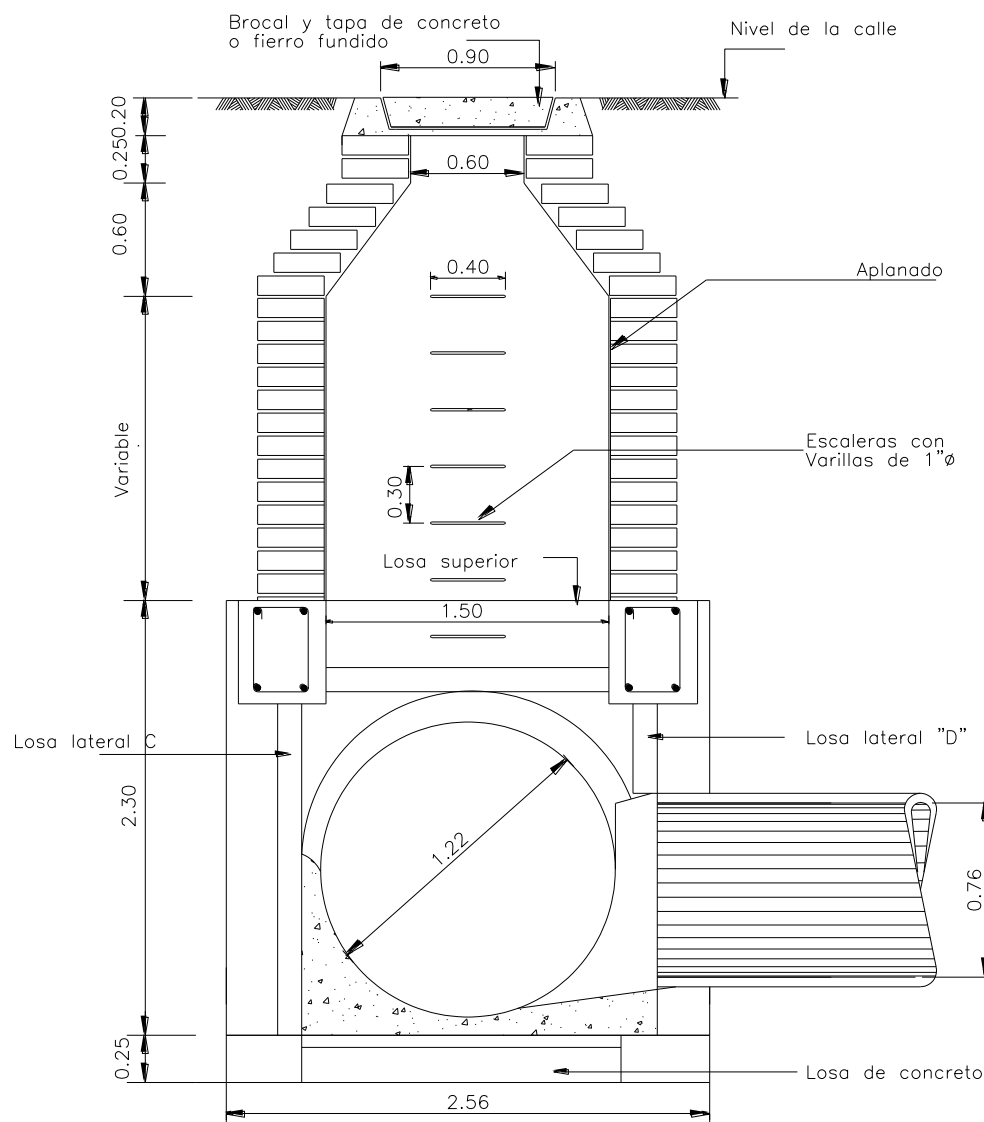
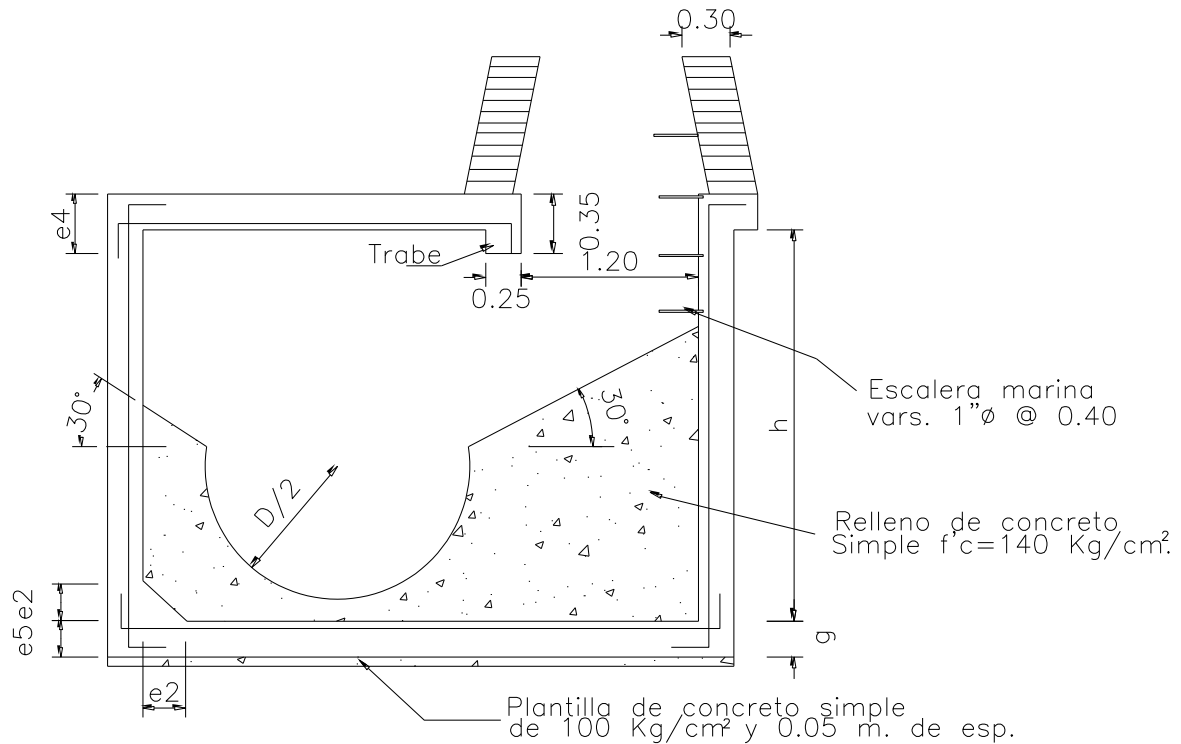


Figura 2-4 Pozo tipo caja (Extraído de CONAGUA, 2015)

- d) **Pozos tipo caja de deflexión.** Se les nombra de esta forma a los pozos caja a los que concurre una tubería de entrada y tienen sólo una de salida, con un ángulo de 45 grados

como máximo. Se utilizan en tuberías de 1.52 a 3.05 m de diámetro (Figura 2-5).



DIMENSIONES GENERALES															
CAJA TIPO	DIMENSIONES														
	D	D1	a	b	c	d	e1	e2	e3	e4	e5	f	g	h	i
B1	1.52	1.82	1.00	3.13	3.40	2.90	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.505	0.35	2.02	0.10
B2	1.83	2.19	1.00	3.13	3.40	2.90	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.32	0.35	2.38	0.09
C1	2.13	2.55	1.00	3.85	3.94	3.56	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.30	0.50	2.88	0.10
C2	2.44	2.88	1.00	3.85	3.94	3.56	0.20	0.20	0.25	0.25	0.25	0.185	0.50	3.25	0.12
D1	2.50	—	1.00	4.60	4.52	4.26	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30		0.70	3.55	
D2	3.05	—	1.00	4.60	4.52	4.26	0.20	0.25	0.30	0.30	0.30		0.70	4.15	

Figura 2-5 Pozo tipo caja (Extraído de CONAGUA, 2015)

- e) **Pozos de caída.** Son pozos constituidos también por una caja y una chimenea de tabique, en cuyo interior se les construye una pantalla que funciona como deflector del caudal que cae. Se construyen para tuberías de 0.30 a 0.76 m de diámetro y una altura de caída de hasta 1.50 m (Figura 2-6).

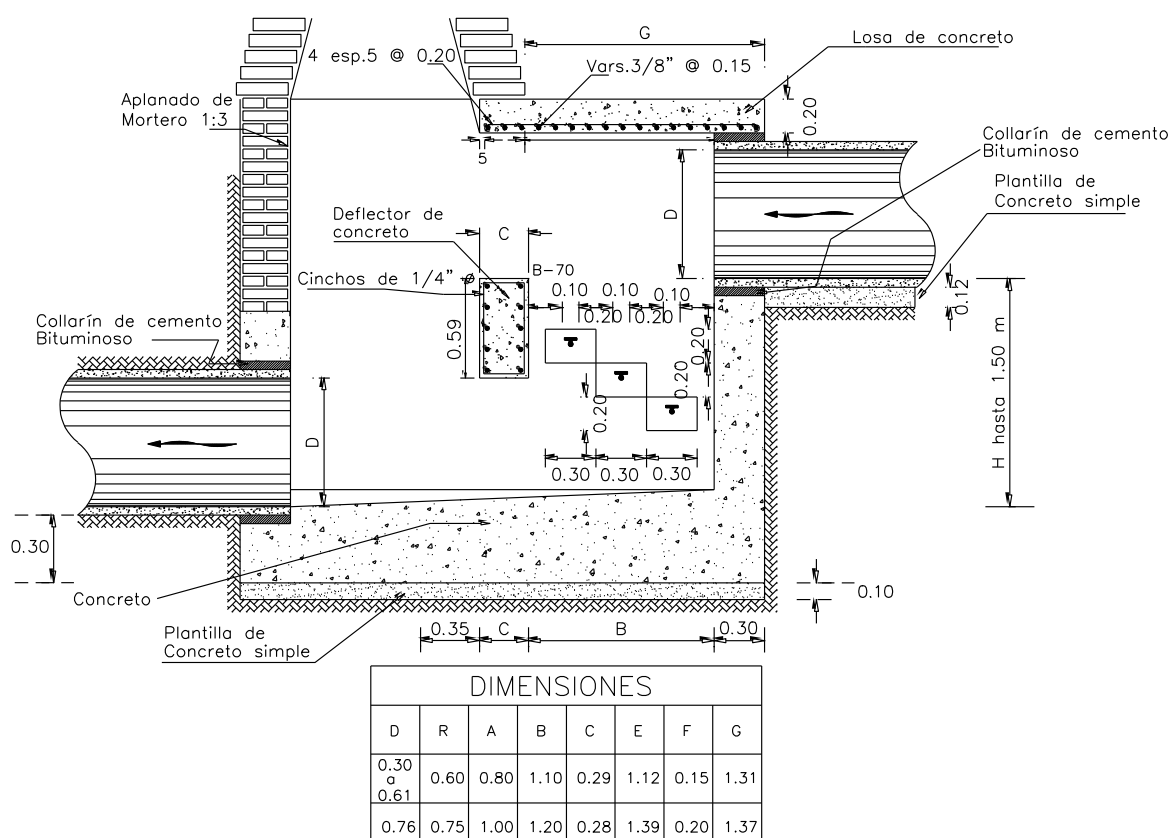


Figura 2-6 Pozo con caída (Extraído de CONAGUA, 2015)

- f) **Pozos con caída adosada.** Son pozos de visita comunes, a los que se les construye lateralmente una estructura que permite la caída en tuberías de 0.20 y 0.25 m de diámetro, con un desnivel de hasta 2.00 m (Figura 2-7).
- g) **Pozos con caída escalonada.** De acuerdo con CONAGUA (2015), son estructuras con caída gradual cuya variación es de 0.50 en 0.50 m hasta llegar a 2.50 m (cinco tramos) como máximo, que están provistas de dos pozos de visita en los extremos, entre los cuales se construye la caída escalonada; en el primer pozo, se localiza la plantilla de entrada de la tubería, mientras que el segundo pozo se ubica la plantilla de salida. Este tipo de estructuras se emplean en tuberías con diámetros de 0.91 a 2.44 m (Figura 2-8)

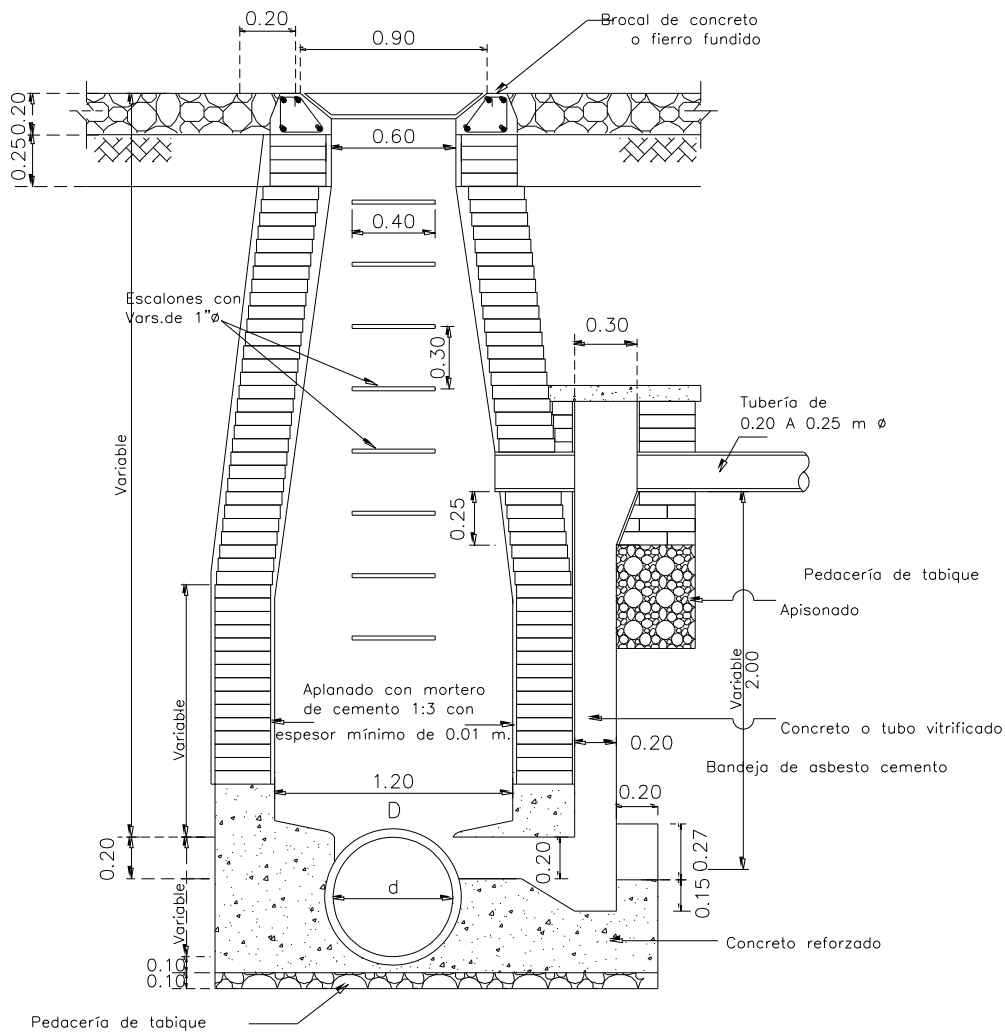


Figura 2-7 Pozo con caída adosada (Extraído de CONAGUA, 2015)

2.2.1 Tapas de los pozos de visita

Las tapas de los pozos de visita pueden ser de concreto o una rejilla de fierro fundido, son los materiales que más se utilizan en los proyectos de alcantarillado.

La función de la tapa de los pozos de visita es principalmente la ventilación del sistema de alcantarillado. Sin embargo, en un sistema combinado además de esa función en temporada de lluvias debe ayudar a las rejillas, a desalojar de las calles o avenidas las aguas pluviales y con ello colaborar para evitar que el agua se acumule y provoque una inundación.

Por lo anterior, es importante contar con las curvas de eficiencia de la tapa de concreto y de la rejilla de fierro fundido. A continuación, se describen las diferentes bocas de tormenta que se emplean en los drenajes pluviales.

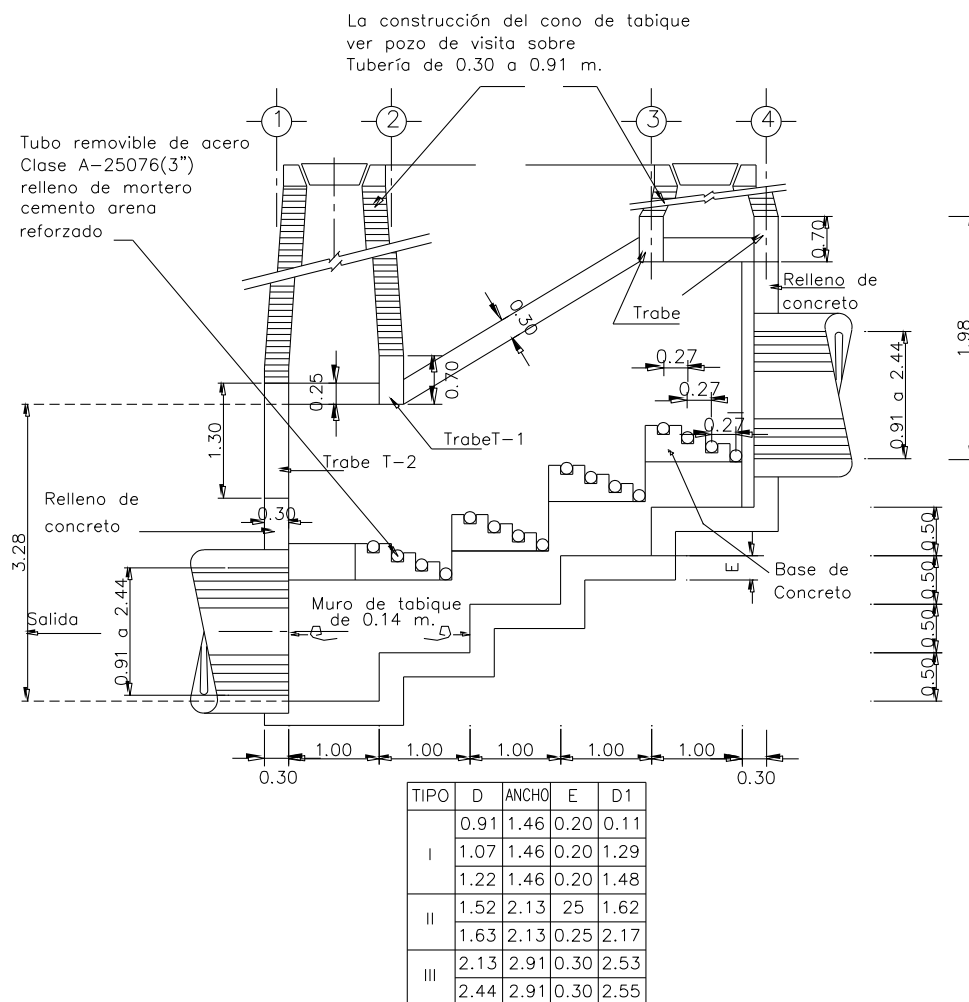


Figura 2-8 Pozo con caída escalonada (Extraído de CONAGUA, 2015)

2.3 Bocas de tormenta

Las bocas de tormenta en los sistemas de drenaje pluvial se utilizan para recoger el escurrimiento y descargarlo a un colector subterráneo. Éstas se encuentran normalmente en cunetas o en calles pavimentadas (CONAGUA, 2015). Los tipos de coladeras son las siguientes:

1) Coladeras de piso

Existe una amplia variedad de este tipo de boca de tormentas. Una coladera de piso (Figura 2-9), generalmente pierde capacidad con el aumento de rejillas. La principal ventaja de una coladera de piso es que están instaladas a lo largo de la calzada, donde el agua está fluyendo. Su principal desventaja es que se obstruyen fácilmente con basura flotante o escombros. Por razones de seguridad, se debe dar preferencia a las coladeras de piso en lugares con tránsito constante de vehículos. Además, se debe garantizar que la rejilla sea segura para bicicletas.

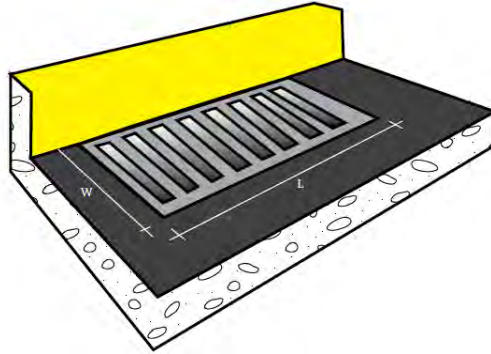


Figura 2-9 Coladera de piso (Extraído de CONAGUA, 2015)

2) Coladeras de banqueta

Son más eficaces en pendientes suaves, bajadas y con flujos que normalmente transportan cantidades importantes de desechos flotantes. La capacidad de captación de las coladeras de banqueta disminuye a medida que aumenta la pendiente de la cuneta. Por consiguiente, el uso de estas se recomienda en depresiones y con grados menores del 3 por ciento. Son seguras para peatones y bicicletas (Figura 2-10).

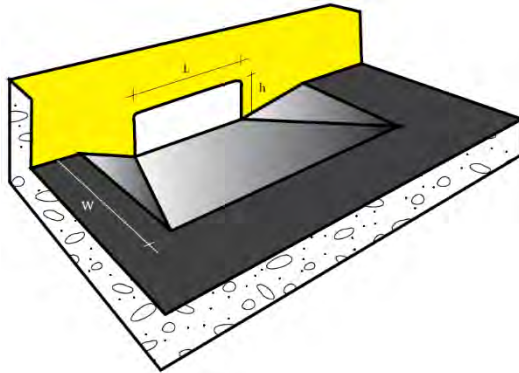


Figura 2-10 Coladera de banqueta (Extraído de CONAGUA, 2015)

3) Coladera de piso banqueta

Proporcionan las ventajas de las coladeras de piso y de banqueta. Esta combinación resulta en una captación de alta capacidad. Cuando la apertura de banqueteta precede a la rejilla de piso, la primera actúa como un interceptor de basura durante las fases iniciales de una tormenta.

En una configuración con desnivel, se puede tener una coladera de banqueteta a ambos lados de la de piso (Figura 2-11).

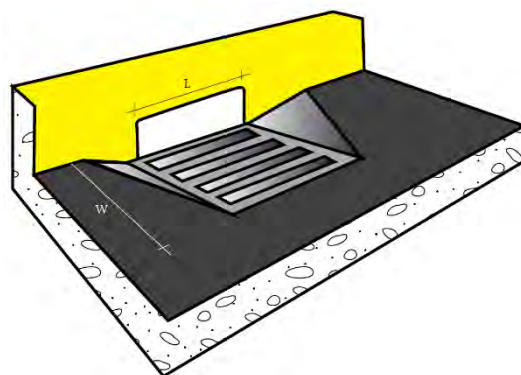


Figura 2-11 Coladera de piso/banqueta (Extraído de CONAGUA, 2015)

4) Coladeras de tipo ranura

Su principal ventaja es la capacidad para interceptar el flujo a través de una sección transversal. Sin embargo, son muy susceptibles a la obstrucción por sedimentos o escombros y no se recomienda para su uso en entornos donde el flujo arrastre gran cantidad de sólidos (Figura 2-12).

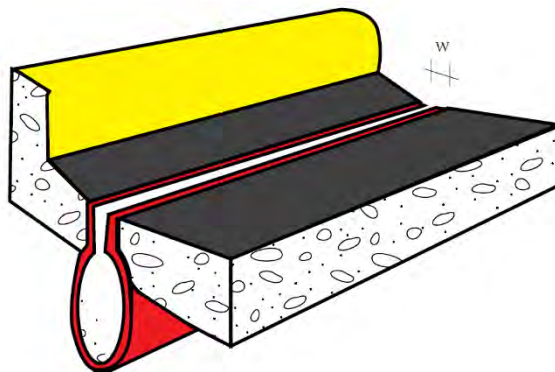


Figura 2-12 Coladera de ranura o longitudinal (Extraído de CONAGUA, 2015)

2.3.1 Eficiencia de captación de una boca de tormenta.

La eficiencia de captación de una boca de tormenta está en función de la pendiente transversal, la pendiente longitudinal, el flujo total y la rugosidad del pavimento.

El caudal interceptado (Q_i) es el flujo que una boca de tormenta es capaz de ingresar al sistema de drenaje. La eficiencia de la boca de tormenta (Ef), es el porcentaje del flujo total que la coladera es capaz de interceptar para las condiciones analizadas.

La eficiencia (Ef), se obtiene con la ecuación 2-1.

$$Ef = \frac{Q_i}{Q_{cu}} \quad ec. \ 2-1$$

Donde:

Ef es la eficiencia de captación

Q_{cu} es el flujo total de escurrimiento, en m^3/s

Q_i es el flujo interceptado, en m^3/s

El flujo que no entra por la boca de tormenta se le conoce como caudal de arrastre o derivación se obtiene con la ecuación 2-2.

$$Q_b = Q_{cu} - Q_i \quad ec. \ 2-2$$

Donde

Q_b es el caudal de derivación

Las coladeras de banqueta funcionan como vertedores laterales hasta que el nivel del agua alcanza la altura de la banqueta. Para profundidades superiores a 1.4 veces la altura de la abertura, la coladera funciona como un orificio y entre estas profundidades se produce la transición entre el funcionamiento como vertedor y como orificio (CONAGUA, 2015).

La capacidad de una boca de tormenta puede obtenerse con la ecuación 2-3.

$$Q_i = C_w P d_s^{1.5} \quad ec. \ 2-3$$

Donde:

Q_i es la capacidad de la coladera

P es el perímetro mojado de la rejilla hasta su altura máxima (m)

C_w es el coeficiente de descarga (1.66)

d_s es la altura de la sección (m), calculada como $d = (d_1 + d_2)^{0.5}$ (Figura 2-13)

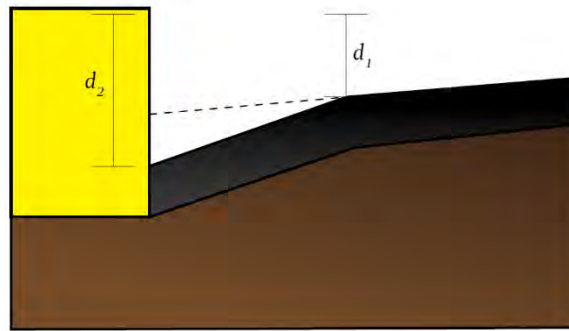


Figura 2-13 Definición de la altura d (Extraído de CONAGUA, 2015)

La capacidad de la coladera operando como un orificio se puede obtener con la ecuación 2-4:

$$Q_i = C_0 A_g (2gd)^{0.5} \quad \text{ec. 2-4}$$

Donde:

Q_i es la capacidad de la coladera (m^3/s)

C_0 es el coeficiente de orificio (0.67)

A_g es el área de abertura libre de la rejilla (m^2)

d es la altura de la sección (m)

g es la aceleración de la gravedad (m/s^2)

El uso de la Ecuación 2-4 considera una coladera sin obstrucciones. Para las rejillas de barras planas, tales como la P-50x100 (Figura 2-14) y P-30 (Figura 2-15), la abertura libre es igual a la superficie total de la rejilla menos el área ocupada por las barras (Brown, et al., 2001).

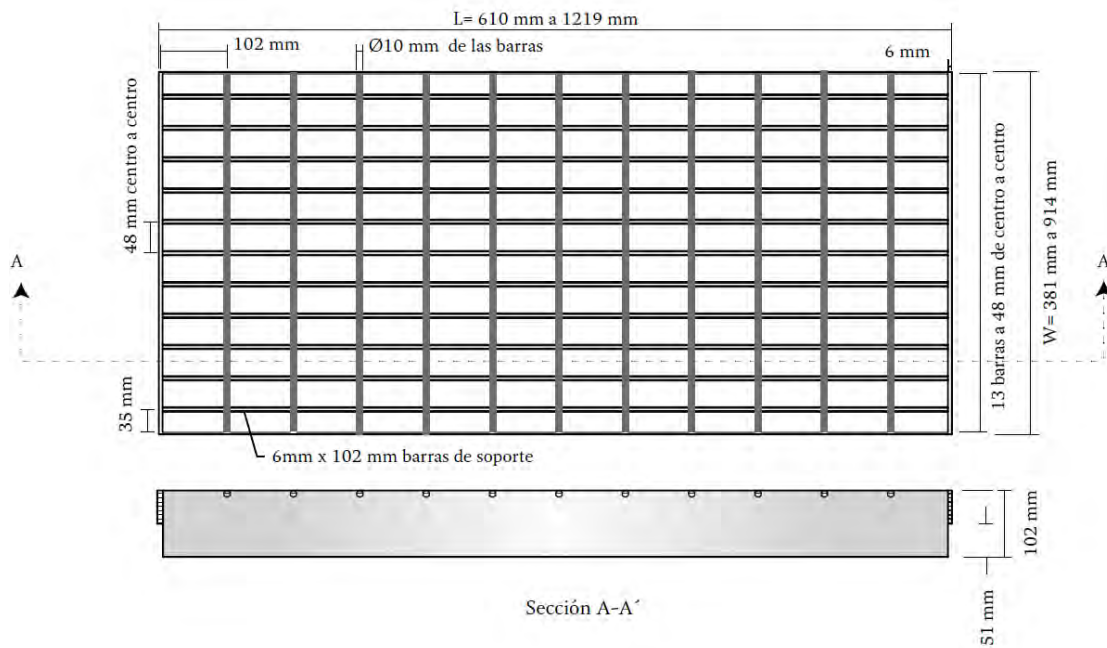


Figura 2-14 Rejillas P-50 y P-50 x 100 (Extraído de CONAGUA, 2015)

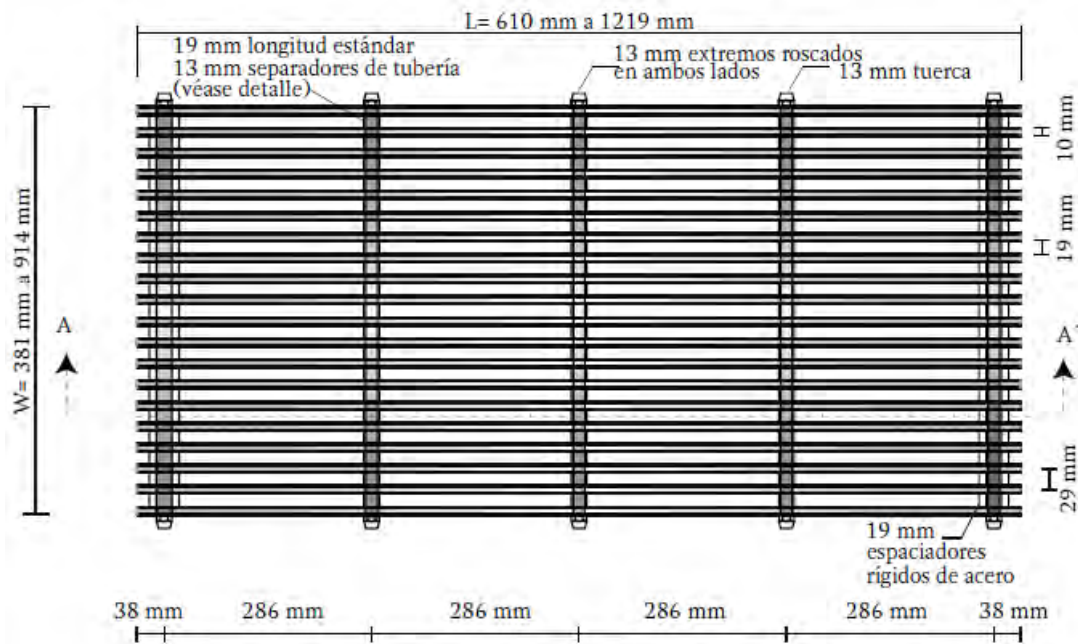


Figura 2-15 Rejillas P-30 (Extraído de CONAGUA, 2015)

La Figura 2-16 muestra que la captación considerando más barras no sería sustancialmente mayor que la rejilla de 0.6 x 0.6 m si se desea captar más flujo serían necesarias rejillas de mayores dimensiones.

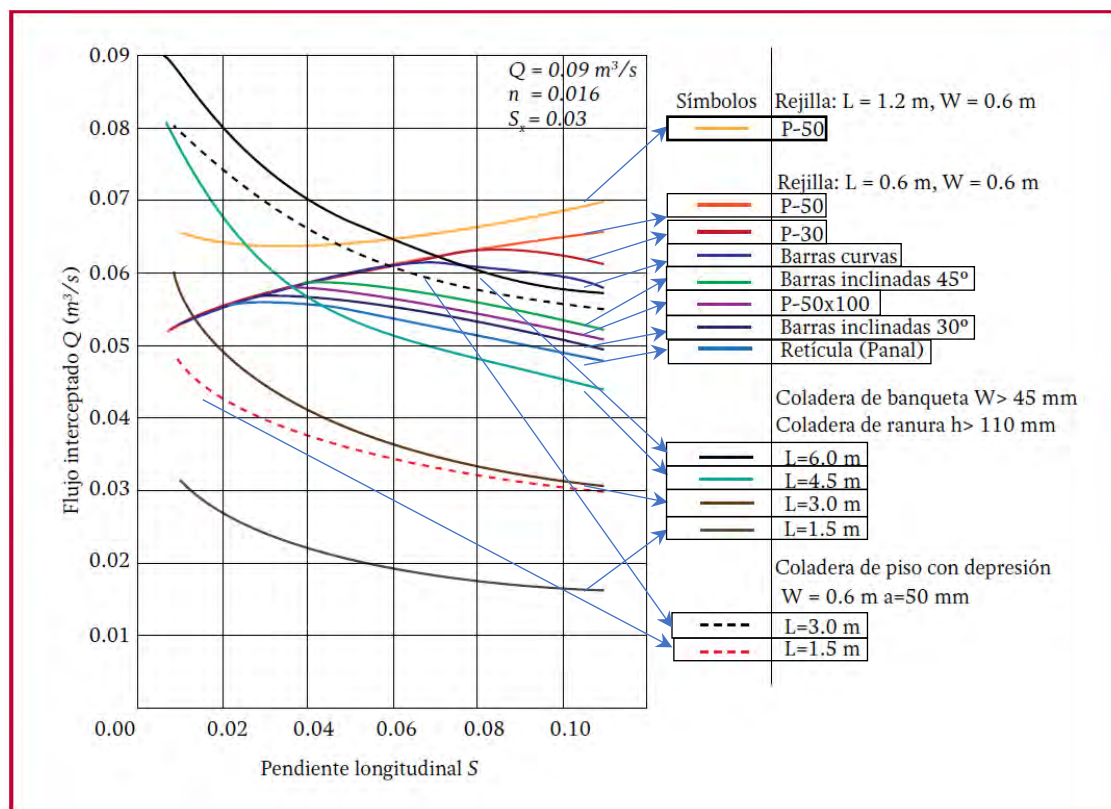


Figura 2-16. Comparación de rendimiento entre las distintas bocas de tormenta (Extraído de CONAGUA, 2015)

La Figura 2-17 muestra la comparación de la capacidad y la eficiencia. Se toma en cuenta una pendiente de 6 %, las salpicaduras comienzan aproximadamente a 0.02 m³/s de flujo sobre la rejilla de retícula. Por otra parte, con el aumento de flujo la capacidad de captación de todas las rejillas aumenta, sin embargo, la eficiencia disminuye.

Las rejillas P-50 y P-30 se encuentran dentro de las más eficientes para las condiciones antes mencionadas.

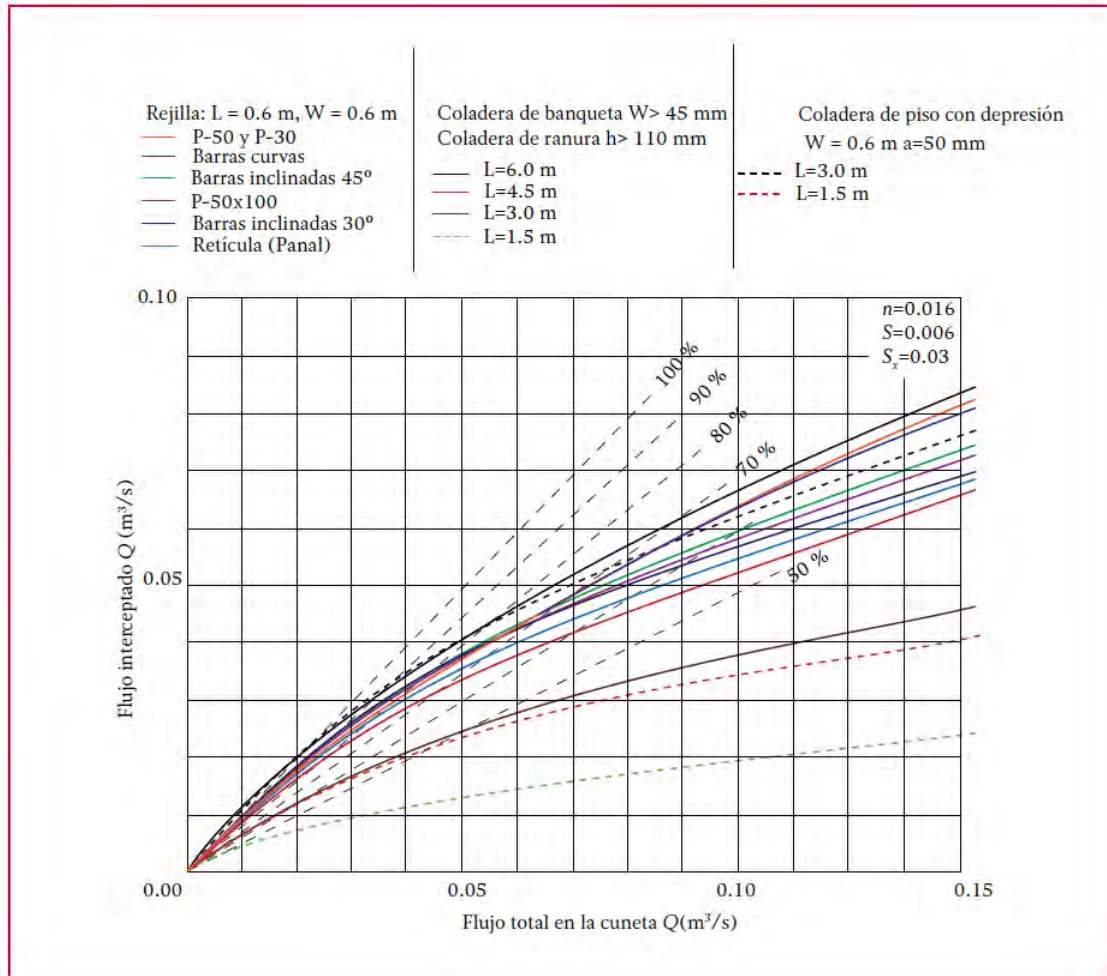


Figura 2-17 Comparación de la captación con respecto del flujo (Extraído de CONAGUA, 2015)

2.4 Modelos físicos

Los modelos físicos son de gran ayuda para estudiar los problemas que se presentan en la naturaleza de forma controlada. A mayor tamaño (menor escala), el modelo será más caro y las mediciones mejores; a menor tamaño (mayor escala), será más económico, pero los resultados serán de menor calidad. En la selección de escala del modelo los factores más importantes, además del económico, son: el tamaño del lugar donde se va a construir el modelo, la capacidad del equipo de bombeo y, eventualmente, la rugosidad de lo que se va a modelar (Sotelo, 2007).

La construcción de un modelo reducido a escala cuyo tamaño se supedita a factores como: espacio disponible, capacidad de las instalaciones del laboratorio, costo del modelo, efectos de

escala, etcétera. Para realizar las mediciones es necesario instalar los aparatos y dispositivos que permitan medir las características hidráulicas del escurrimiento como: gastos, velocidades, presiones, tirantes, tiempos, etcétera, de acuerdo con Sotelo (2007).

2.4.1 Teorema de Pi de Buckingham

De acuerdo con Cengel & Cimbala (2018) el método de repetición de variables, popularizado por Edgar Buckingham (1867-1940). El método lo publicó por primera vez el científico ruso Dimitri Riabouchinsky (1882-1962) en 1911, el cual se emplea considerando lo siguiente.

Cuando el número de variables o magnitudes físicas son cuatro o más, el Teorema de Pi de Buckingham constituye una excelente herramienta, mediante la cual pueden agruparse estas magnitudes en un número menor de grupos adimensionales significativos, a partir de los cuales puede establecerse una ecuación. Los grupos adimensionales se llaman grupos o números Pi. Si en el fenómeno físico en cuestión intervienen n magnitudes físicas de las cuales k son dimensiones fundamentales (por ejemplo, fuerza, longitud y tiempo, o bien masa, longitud y tiempo) y otras magnitudes físicas q (tales como velocidad, densidad, viscosidad, presión y área), entonces matemáticamente.

$$f_1(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = 0 \quad \text{ec. 2-5}$$

Y la ecuación 2-5 puede remplazarse por la relación de la ecuación 2-6.

$$\emptyset(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-k}) = 0 \quad \text{ec. 2-6}$$

Donde cualquier número π no depende más que de $(k+1)$ magnitudes físicas q y cada uno de los números π son funciones monómicas (un sólo término) independientes, adimensionalmente de las magnitudes q .

Se puede considerar a éste como un procedimiento paso a paso o “receta” para obtener parámetros adimensionales, para lo cual Giles (1969), presenta cinco pasos que se mencionan concisamente a continuación:

Paso 1.- Se escriben las n magnitudes físicas q , que intervienen en un problema en particular, anotando sus dimensiones y el número k de dimensiones fundamentales. Existirán $(n - k)$ números π .

Paso 2.- Seleccionar k de estas magnitudes, sin que haya ninguna sin dimensiones, ni dos que tengan las mismas dimensiones. Todas las dimensiones fundamentales deben incluirse colectivamente en las magnitudes seleccionadas.

Paso 3.- El primer grupo π puede expresarse como el producto de las magnitudes escogidas, elevada cada una a un exponente desconocido, y a una de las otras magnitudes elevada a una potencia conocida (normalmente se toma igual a uno).

Paso 4.- Mantener las magnitudes escogidas en el paso 2 como variables repetidas y escoger una de las variables restantes para establecer el nuevo número π . Repetir el procedimiento para obtener los sucesivos números π .

Paso 5.- En cada uno de los grupos π determinar los exponentes desconocidos mediante un análisis dimensional.

Recomendaciones para formar productos adimensionales

- Si una de las magnitudes q son adimensionales constituyen un número π sin tener que seguir el camino ordinario.
- Si 2 de las magnitudes q tienen las mismas dimensiones su cociente es un número π .
- Cualquier número π puede ser sustituido por una potencia del mismo, incluyendo -1.
- Cualquier número π puede sustituirse por su producto por una constante numérica.
- Cualquier π puede expresarse como función de otros π .
- Las propiedades del fluido, exceptuando a la densidad, como viscosidad, módulo de elasticidad etc., deben aparecer solas en un solo producto adimensional. Así un producto donde aparezca viscosidad y módulo de elasticidad, o viscosidad y tensión superficial, debe evitarse. Igualmente, sólo debe haber un producto adimensional donde esté la viscosidad, la tensión superficial, etc. Esta condición lleva, generalmente, a que si aparece la viscosidad aparecerá un Número de Reynolds, si aparece la gravedad un Número de Froude.

En la Tabla 2-1 se presentan los productos adimensionales dependientes para considerar los que apliquen a cada caso.

Tabla 2-1 Productos adimensionales dependientes (modificado de Echavez, 1996)

Nombre	Símbolo	Definición	Relación de importancia
Número de Euler	E	$\frac{\Delta P}{\rho V^2}$	$\frac{\text{Diferencia de presión}}{\text{Presión dinámica}}$
Número de Strouhal	S	V/nD	$\frac{\text{Tiempo de flujo característico}}{\text{Periodo de oscilación}}$
Coefficiente de presión	C_P	$\frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2}$	$\frac{\text{Diferencia de presión estática}}{\text{Presión dinámica}}$
Coefficiente de arrastre	C_A	$\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{F_A}{\rho V^2 A}\right)$	$\frac{\text{Fuerza de arrastre}}{\text{Fuerza dinámica}}$
Coefficiente de sustentación	C_S	$\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{F_S}{\rho V^2 A}\right)$	$\frac{\text{Fuerza de sustentación}}{\text{Fuerza de presión dinámica}}$
A es el área, en m^2; D es el diámetro, m; $F_{A,S}$ es la fuerza de arrastre o sustentación, en N; V es la velocidad, en m/s; g es la aceleración de la gravedad, en $\frac{m}{s^2}$; n es la frecuencia, en Hz; ΔP es la diferencia de presión, N/m²; ρ es la densidad, kgf/m³			

En la Tabla 2-2 se presentan los productos adimensionales independientes para obtener los números adimensionales. Mientras que en la Tabla 2-3 se presentan las características de flujo y escalas de semejanza correspondientes a la ley de Froude y a la ley de Reynolds, las cuales se expresan en función de la longitud equivalente (L_e).

Tabla 2-2 Productos adimensionales independientes (modificado de Echavez, 1996)

Nombre	Símbolo	Definición	Relación de importancia
Número de Reynolds	R	$\frac{VD\rho}{\mu}$	$\frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza viscosa}}$
Número de Froude	F	$\frac{V}{\sqrt{gh}}$	$\frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza gravitacional}}$
Número de Mach	M	$\frac{V}{\sqrt{\frac{E}{\rho}}}$	$\frac{\text{Velocidad de flujo}}{\text{Velocidad del sonido}}$
Número de Weber	W	$\frac{V}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho l}}}$	$\frac{\text{Fuerza inercial}}{\text{Fuerza de tensión superficial}}$
D es el diámetro, en m; E es el módulo de elasticidad, $\frac{kg}{ms^2}$; g es la aceleración de la gravedad, en $\frac{m}{s^2}$; h es el tirante, en m; l es la longitud, en m; μ es la viscosidad dinámica, en $\frac{kg}{ms}$; ρ es la densidad, en $\frac{kg}{m^3}$; σ tensión superficial, en $\frac{kg}{s^2}$			

2.4.2 Flujo uniforme en canales

Para el diseño de canales se considera el flujo uniforme, así como las siguientes consideraciones.

Canal prismático. Es el canal mediante el cual fluye el agua a superficie libre, la pendiente se mantiene constante y la sección transversal no cambia con respecto a la distancia, es la consideración principal para que se presente el flujo uniforme que se obtiene con la fórmula de Manning en función de los elementos geométricos que dependen del tipo de sección transversal. En la Tabla 2-4, se presentan los elementos geométricos para una sección rectangular y en la Tabla 2-5 para una sección circular.

En la Fórmula de Manning (ec 2-7), está en función de los elementos geométricos, la pendiente del canal (S_0) y del coeficiente de rugosidad de Manning (n) los cuales se presentan en la Tabla 2-6.

$$U = \frac{R_h^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_0}}{n} \quad \text{ec. 2-7}$$

Donde:

U es la velocidad media, en m/s.

R_h es el radio hidráulico, en m.

S_0 es la pendiente del canal, en m/m

n es el coeficiente de rugosidad de Manning (Tabla 2-6)

Tabla 2-3 Características de flujo y escalas de semejanza (Echavez, 1996)

Característica	Ley de Froude	Ley de Reynolds
Longitud	L_e	L_e
Área	L_e^2	L_e^2
Volumen	L_e^3	L_e^3
Tiempo	$[L_e \rho_e / \gamma_e]^{1/2}$	$L_e^2 \rho_e / \mu_e$
Velocidad	$[L_e \gamma_e / \rho_e]^{1/2}$	$\mu_e / L_e \rho_e$
Velocidad angular	$[\gamma_e / L_e \rho_e]^{1/2}$	$\mu_e / L_e^2 \rho_e$
Aceleración	γ_e / ρ_e	$\mu_e^2 / \rho_e^2 L_e^3$
Gasto	$L_e^{5/2} (\gamma_e / \rho_e)^{1/2}$	$L_e \mu_e / \rho_e$
Masa	$L_e^3 \rho_e$	$L_e^3 \rho_e$
Fuerza	$L_e^3 \gamma_e$	μ_e^2 / ρ_e
Presión	$L_e \gamma_e$	$\mu_e^2 / \rho_e L_e^2$
Impulso y cantidad de movimiento	$L_e^{7/2} (\gamma_e \rho_e)^{1/2}$	$L_e^2 \mu_e$
Energía y trabajo	$L_e^4 \gamma_e$	$L_e \mu_e^2 / \rho_e$
Potencia	$L_e^{7/2} \gamma_e^{3/2} \rho_e^{1/2}$	$\mu_e^3 / L_e \rho_e^2$
Rugosidad	$L_e^{1/6}$	L_e ó Moody
Pendientes	1	1

Donde:

L_e es la longitud equivalente, adimensional

ρ_e es la densidad equivalente, adimensional

Marco teórico

γ_e es el peso específico, adimensional

μ_e es la viscosidad dinámica, adimensional

Tabla 2-4 Elementos geométricos de la sección rectangular (Sotelo, 2002)

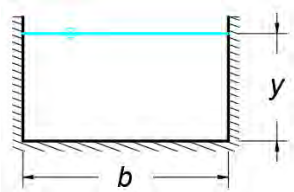
Sección	Rectangular 
Área, A	by
Perímetro mojado, P	$b+2y$
Radio hidráulico $R_h = \frac{A}{P}$	$\frac{by}{b + 2y}$
Ancho de la superficie libre, T	b
Tirante medio $\frac{A}{T}$	y
$\frac{dP}{dy}$	2
$\frac{dT}{dy}$	D

Tabla 2-5 Elementos geométricos de la sección circular (Sotelo, 2002)

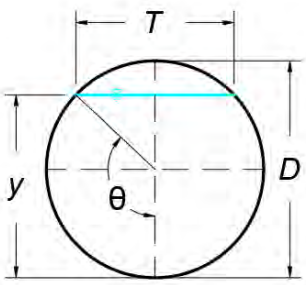
Sección	Circular 
Tirante	$0 \leq \frac{y}{D} \leq 1$
Ángulo	$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2y}{D} \right)$
Área, A	$\frac{1}{4} \left(\theta - \frac{1}{2} \text{sen} 2\theta \right) D^2$
Perímetro mojado, P	θD
Radio hidráulico $R_h = \frac{A}{P}$	$\frac{1}{4} \left(1 - \frac{\text{sen} 2\theta}{2\theta} \right) D$
Ancho de la superficie libre, T	$D(\text{sen} \theta) \text{ ó } 2\sqrt{y(d-y)}$
Tirante medio $\frac{A}{T}$	$\frac{1}{4} \left(\frac{\theta - \frac{1}{2} \text{sen} 2\theta}{\text{sen} \theta} \right) D$
$\frac{dP}{dy}$	$\frac{1}{\sqrt{\frac{y}{D} \left(1 - \frac{y}{D} \right)}}$
$\frac{dT}{dy}$	$\frac{1 - \frac{2y}{D}}{\sqrt{\frac{y}{D} \left(1 - \frac{y}{D} \right)}}$

Tabla 2-6 Coeficientes de rugosidad n de Manning (CONAGUA, 2015)

Tipo de cuneta o pavimento	n de Manning
Cuneta de concreto acabado fino	0.012
Pavimento asfáltico textura suave	0.013
Pavimento asfáltico textura rugosa	0.016
Cuneta de concreto-pavimento asfáltico suave	0.013
Cuneta de concreto-pavimento asfáltico rugoso	0.015
Concreto hidráulico acabado liso	0.014
Concreto hidráulico acabado escobillado	0.016
En cunetas con pendiente pequeña, donde los sedimentos tienden a acumularse, debe incrementar el valor de “ n ”	0.02

2.4.3 Vertedor triangular

El vertedor triangular (Figura 2-18) es el ideal para la medición de caudales pequeños los cuales se utilizan en modelos físicos a escala.

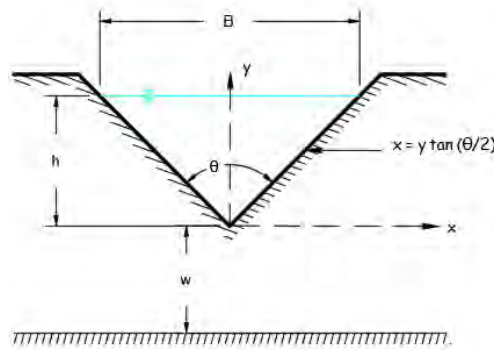


Figura 2-18 Vertedor triangular (Modificado de Sotelo, 2007)

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu h^{\frac{5}{2}} \quad \text{ec. 2-8}$$

$$Q = C h^{\frac{5}{2}} \quad \text{ec. 2-9}$$

Hegly (Sotelo, 2007) propone la ecuación 2-11, para obtener a μ

$$C = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu \quad \text{ec. 2-10}$$

donde C depende de θ , μ y g

$$\mu = \left[0.5812 + \frac{0.00375}{h} \right] \left\{ 1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)} \right]^2 \right\} \quad \text{ec. 2-11}$$

Donde:

μ , coeficiente de gasto (ec 2.11), adimensional

h , Carga hidráulica sobre el vertedor, en m

B , Ancho del canal, en m

w , altura de la cresta del vertedor, en m

La ecuación 2-11 es aplicable para ángulos $\theta = 90^\circ$; $0.10 \text{ m} \leq h \leq 0.50 \text{ m}$; y profundidades w pequeñas (Sotelo, 2007). La ecuación 2.10 es de las más precisas para vertedores con ángulo en el vértice de 90° .

Por otra parte, en Sotelo (2007), se presenta la ecuación de Heyndrickx, para obtener el coeficiente de descarga (ec 2-12), mediante el cual se puede obtener el caudal que descarga un vertedor con $\theta = 60^\circ$.

$$\mu = [0.5775 + 0.214 h^{1.25}] \left\{ 1 + \left[\frac{h^2}{B(h+w)} \right]^2 \right\} \quad \text{ec. 2-12}$$

Donde:

μ , coeficiente de gasto, adimensional

h , Carga hidráulica sobre el vertedor, en m.

B , Ancho del canal, en m.

w , distancia del fondo del canal al inicio del vertedor, en m.

2.4.4 Vertedor tipo embudo

Estas obras tienen una entrada en forma de embudo, que conecta a un túnel por el cual se conducen los excedentes generalmente de una presa (Arreguin y Alcocer, 2011). La presa Montecillo (Figura 2-19), situada en el norte de Carolina, da origen al lago Berryessa, tiene un vertedor de embudo de los más grandes del mundo.

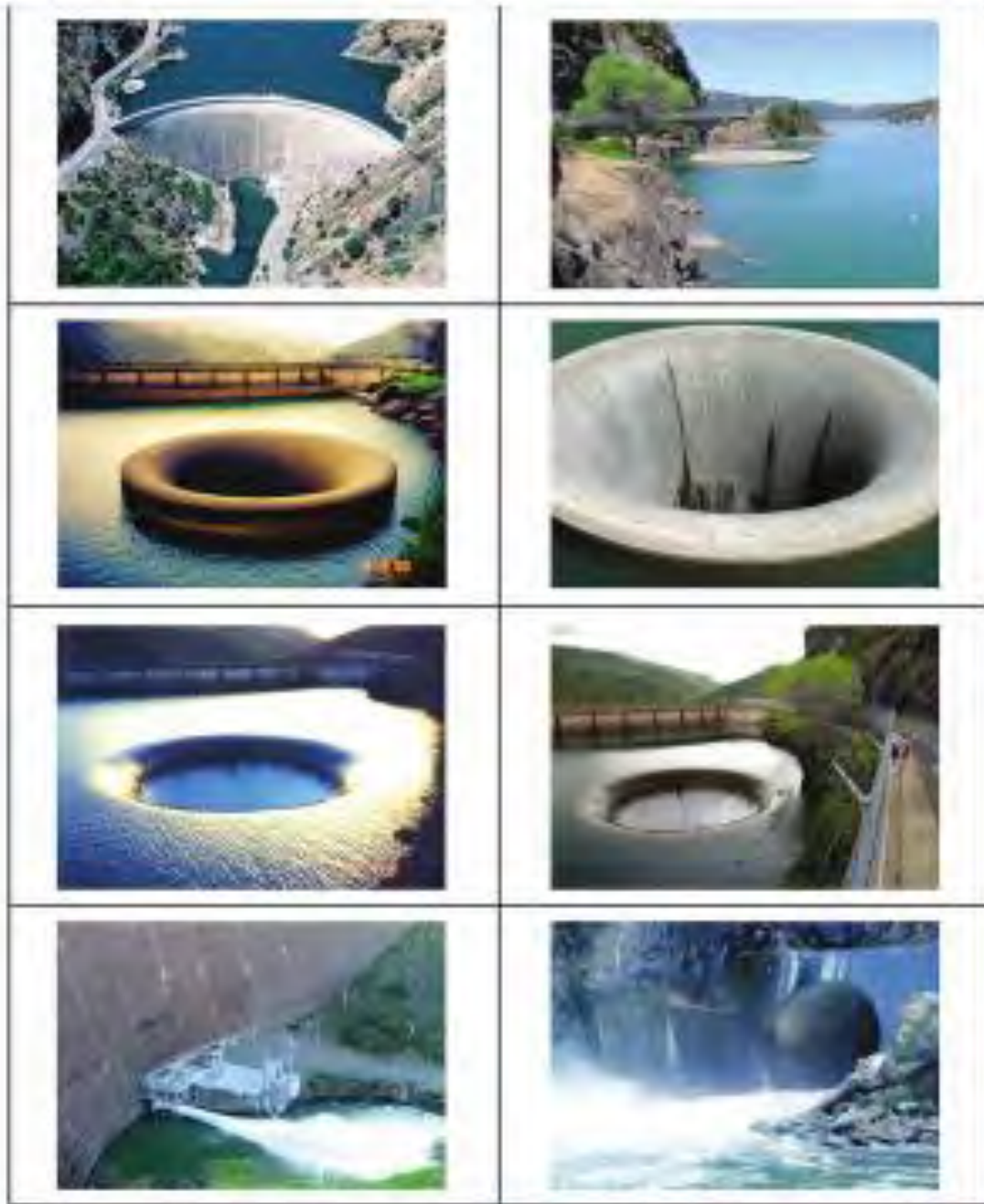


Figura 2-19 Vertedor de embudo de la presa Montecillo (Arreguin y Alcocer, 2011)

Arreguin y Alcocer (2011), se pueden presentar tres formas de funcionamiento en un vertedor de embudo (Figura 2-20), estos son:

Caso I. Cuando trabaja como vertedor y en este caso la descarga se regirá por la siguiente relación:

$$Q = f(H_e^{3/2}) \quad ec. 2-13$$

Donde:

H_e es la carga hidráulica, en m.

Caso II. Trabaja como orificio o tubo parcialmente lleno, con una relación de descarga:

$$Q = f(H)^{1/2} \quad ec. 2-14$$

Donde:

H es la carga hidráulica, en m.

Caso III. Trabajando a tubo lleno y cuya relación de descarga será:

$$Q = f(H_v) \quad ec. 2-15$$

Donde:

H_v es la carga hidráulica, en m.

La ecuación para obtener la descarga cuando se comporta como vertedor es la siguiente:

$$Q = \tilde{C} L_{ce} H^{3/2} \quad ec. 2-16$$

Donde:

$\tilde{C}$ es el coeficiente de descarga para vertedores de embudo.

L_{ce} es la longitud de cresta del vertedor de embudo, en m.

H es la carga hidráulica, en m.

Por tratarse de una sección circular

$$L_{ce} = 2\pi R_{ve} \quad ec. 2-17$$

Donde:

R_{ve} Radio de la circunferencia del vertedor de embudo, en m.

Por lo tanto.

$$Q = 2\tilde{C}\pi R_{ve} H^{3/2} \quad ec. 2-18$$

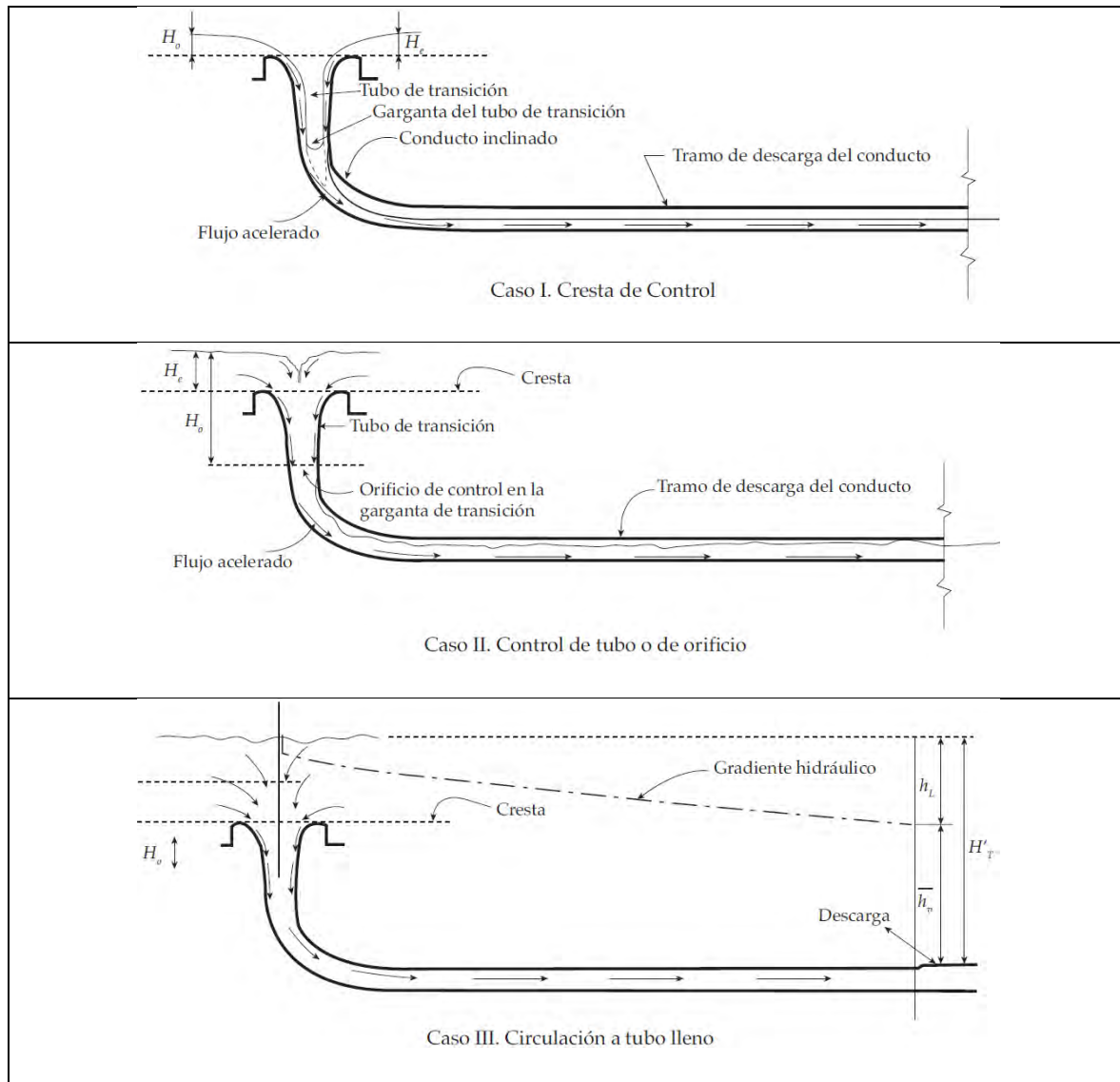


Figura 2-20 Casos del funcionamiento de un vertedor de embudo (Arreguin y Alcocer, 2011)

Donde:

h_L , Son las pérdidas totales, en m.

H'_T Carga hidráulica total, en m.

$\bar{h}_v$ Es el tirante en la descarga, en m.

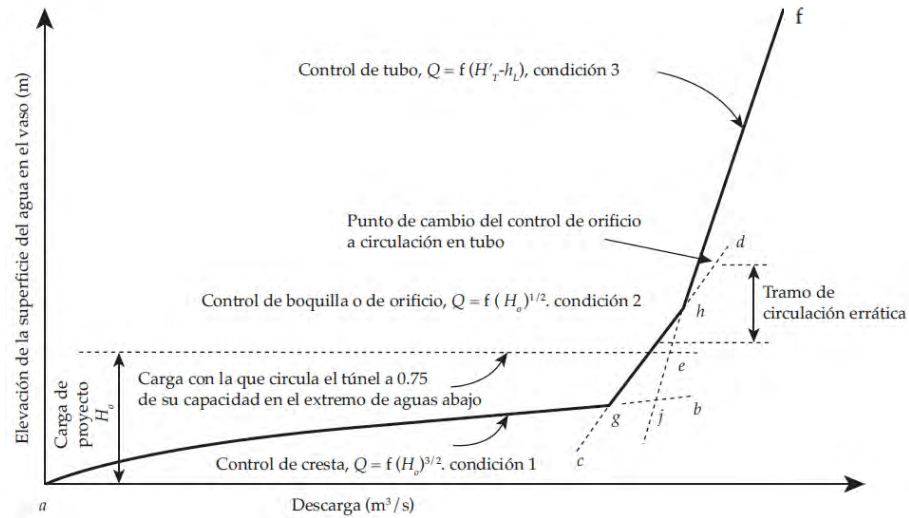


Figura 2-21 Funcionamiento de un vertedor de embudo (Arreguin y Alcocer, 2011)

La ecuación 2-19 expresada en términos de la carga hidráulica sobre el vertedor queda de la siguiente forma.

$$Q = 2\pi\tilde{C}R_sH_o^{3/2} \quad \text{ec. 2-19}$$

Donde:

$\tilde{C}$ es el coeficiente de descarga para vertedores de embudo

R_s es el radio del vertedor de embudo, en m

H_o es la carga hidráulica sobre el vertedor de embudo, en m

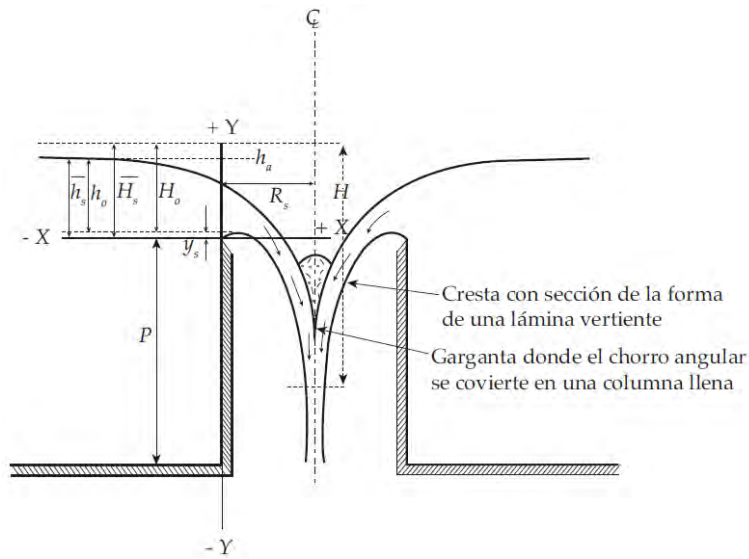


Figura 2-22 Funcionamiento de un vertedor de embudo, (USBR, 1960)

Donde:

R_s es el radio del vertedor de embudo, en m

y_s es la distancia vertical del origen de la cresta al vertedor, en m

$\bar{h}_s$, es el tirante aguas arriba del vertedor de embudo, en m

$\bar{H}_s$ es la carga total aguas arriba del vertedor de embudo, en m

h_o , es el tirante aguas arriba del vertedor de embudo menos y_s , en m

H_o , es la carga total aguas arriba del vertedor de embudo menos y_s , en m

P es la altura de la cresta del vertedor, en m

Para calcular el valor de coeficiente $\tilde{C}$, se consideran los efectos de sumergencia y contra presiones debidas a la convergencia de las corrientes, el USBR, ha propuesto las curvas presentadas en la figura 2-23, obtenidas para relaciones de P/R_s de 2.00, 0.30 y 0.15.

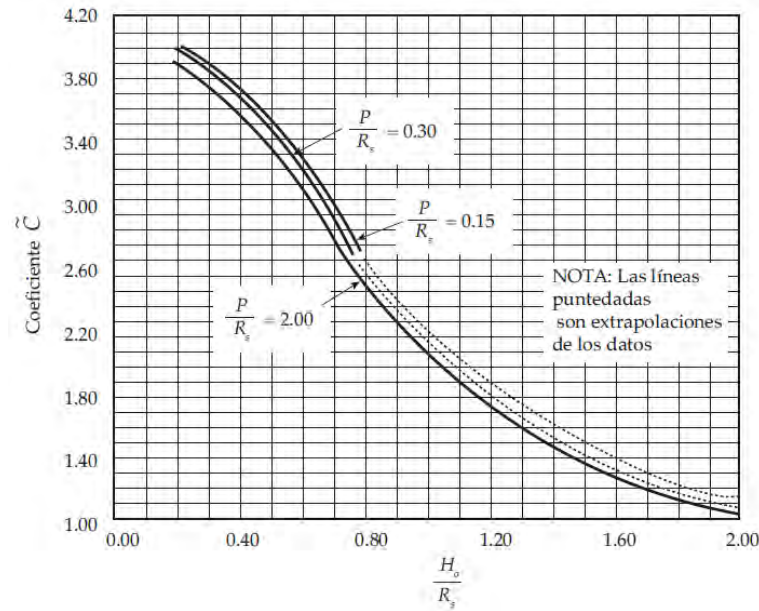


Figura 2-23 Funcionamiento de un vertedor de embudo, (USBR, 1960)

2.4.5 Ecuaciones para obtener el caudal que descarga el brocal de un pozo de visita para cuatro diferentes escenarios.

Las ecuaciones para obtener los caudales que se capta en los escenarios de sumidero libre y sumidero ahogado o el caudal que se descarga en los casos de surgencia ahogada y surgencia con descarga libre, son necesarias para obtener graficas de funcionamiento de diferentes tapas de pozos de visita o rejillas pluviales, estas ecuaciones están en función del tirante en la calle o diferencia de tirantes entre el tirante de la calle y tirante que se presenta al centro del brocal o tapa del pozo de visita y del coeficiente de descarga.

2.4.5.1 Sumidero libre

Rubinatto et al. (2017), proponen la ecuación 2.20 para obtener el caudal de captación en el escenario de sumidero libre en función de las cargas hidráulicas se calculan los caudales. En este escenario se toma en cuenta la ecuación para un vertedor, considerando que la longitud del vertedor es igual al perímetro del brocal y el tirante del flujo en la calle (h_s) alrededor del brocal. Si la descarga se ahoga se pasa al escenario 2.

$$Q_e = \frac{2}{3} C_i \pi D_M \sqrt{2g} (h_s)^{3/2} \quad \text{ec. 2-20}$$

Donde:

Q_e es el caudal de intercambio en m^3/s ,

h_s , tirante, en m.

D_M es el diámetro del brocal del pozo de visita, en m.

C_i es el coeficiente de descarga.

2.4.5.2 Sumidero ahogado

Cálculo del caudal con la ec. 2-21, para cuando el tirante en las tuberías excede la elevación (Z_{crest}).

$$Q_e = C_i \pi D_M \sqrt{2g} (h_s) (h_s + Z_{crest} - h_p)^{1/2}; \quad h_p > Z_{crest} \text{ y } h_s < A_M / \pi D_M \quad \text{ec. 2-21}$$

Donde:

C_i , es el coeficiente de descarga.

D_M es el diámetro del brocal, en m.

A_M es el área del brocal, en m^2 .

g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2

Z_{crest} es la diferencia de altura desde la parte inferior de la tubería hasta el nivel de la superficie, en m.

h_s , tirante, en m.

h_p , es el tirante medido desde la base de la tubería al centro del brocal, en m.

Si $h_s > A_M / \pi D_M$ se considera descarga sumergida y el caudal se obtendrá con la siguiente ecuación.

$$Q_e = C_i \pi D_M \sqrt{2g} (h_s + Z_{crest} - h_p)^{1/2} \quad \text{ec. 2-22}$$

Donde:

C_i , es el coeficiente de descarga.

D_M es el diámetro del brocal, en m.

g , es la fuerza de gravedad, en m/s^2

Z_{crest} es la diferencia de altura desde la parte inferior de la tubería hasta el nivel de la superficie, en m.

h_s , tirante, en m.

h_p , es el tirante medido desde la base de la tubería al centro del brocal, en m.

2.4.5.3 Surgencia libre y ahogada

Cálculo del caudal para cuando se presenta el fenómeno de surgencia ahogada, se obtiene con la ecuación 2.23.

$$Q_e = C_i A_M \sqrt{2g} \left(h_p - (Z_{crest} + h_s) \right)^{1/2} \quad ec. 2-23$$

C_i , es el coeficiente de descarga.

A_M es el área del brocal ó el área útil de la tapa, en m^2 .

g , es la fuerza de gravedad, en m/s^2

Z_{crest} es la diferencia de altura desde la parte inferior de la tubería hasta el nivel de la superficie, en m.

h_s , tirante, en m.

h_p , es el tirante medido desde la base de la tubería al centro del brocal, en m.

2.4.6 Ecuaciones para obtener el caudal que descarga un vertedor y un orificio

Para obtener los caudales que descarga un vertedor y un orificio se emplean las siguientes ecuaciones.

2.4.6.1 Ecuación de un orificio que funciona como vertedor

El caudal que descarga un vertedor se obtiene con la ecuación 2-24, la cual está en función de la longitud de cresta del vertedor y la carga hidráulica, se debe garantizar la descarga libre (Lee *et al.*, 2012).

$$Q_e = \frac{2}{3} C_i L \sqrt{2g} (h_s)^{3/2} \quad \text{ec. 2-24}$$

Donde:

Q_e caudal descargado, en m^3/s .

C_i coeficiente de descarga para vertedor.

L longitud de cresta del vertedor en caso de circunferencia esta longitud es el perímetro, en m.

g fuerza de gravedad, en m/s^2

h_s carga sobre en el vertedor, en m.

2.4.6.2 Ecuación de orificio

La ecuación 2-25 se emplea para conocer el caudal que descarga el sumidero ahogado y también el caudal descargado para el caso de surgencia ya sea trabajando en descarga libre o descarga ahogada. En los tres casos es un funcionamiento de orificio.

$$Q_e = C_i A_M \sqrt{2gh_s} \quad \text{ec. 2-25}$$

Donde:

Q_e caudal descargado, en m^3/s .

C_i coeficiente de descarga para vertedor.

A_M área del orificio, en m^2

g fuerza de gravedad, en m/s^2

h_s carga sobre en el vertedor, en m.

2.5 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La Dinámica de Fluidos Computacional, consiste en modelos matemáticos y técnicas numéricas para resolver todos aquellos problemas físicos que están relacionados con el movimiento de los fluidos, atendiendo también otros fenómenos asociados como la transferencia de calor, las reacciones químicas, el arrastre de sólidos, etc.

Su objetivo principal es la creación de esquemas numéricos capaces de ejecutar una gran cantidad de cálculos en menor tiempo que si estos se realizaran a mano.

En la tabla 2-7, se presentan las ventajas e inconvenientes del empleo de las técnicas numéricas CFD.

2.5.1 Modelo hidrodinámico bidimensional, IBER

Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos medioambientales en hidráulica fluvial. El modelo fue presentado oficialmente en el año 2010, por el Instituto Flumen, de la Universitat Politècnica de Catalunya, el grupo GEAMA (Grupo de Enxeñería da Agua e do Medio Ambiente) de la Universidad de la Coruña y el Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.

Actualmente IBER en su versión 3, cuenta con los siguientes módulos:

- Módulo hidrodinámico
- Módulo de turbulencia
- Módulo de transporte de sedimentos
- Módulo de rotura de presas y balsas
- Módulo de calidad de aguas
- Módulo de habitat hidráulico

- **Módulo de drenaje urbano**
- Módulo de hidrología
- Módulo de erosión de suelos

Tabla 2-7 Ventajas e inconvenientes de utilizar CFD (Fernández, 2012)

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Reducción sustancial de tiempo y costo en nuevos diseños.	Las técnicas CFD no son baratas. Se requiere de máquinas de gran capacidad y los programas tienen un costo alto para el público en general.
Posibilidad de analizar sistemas o condiciones muy difíciles de reproducir experimentalmente.	Se necesita personal calificado para utilizar el programa y que tenga los conocimientos en la materia para analizar los resultados
Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas.	No siempre es posible obtener resultados lo suficientemente precisos. En ocasiones se debe simplificar el fenómeno.
Alto nivel de detalle	Limitación de los modelos existentes para la turbulencia, la combustión, flujos multifásicos.
Diseño Asistido por Ordenador	Tendencia a validar los resultados sin la suficiente contrastación.

2.5.1.1 Módulo hidrodinámico

El módulo hidrodinámico resuelve ecuaciones de agua someras promediadas en profundidad, también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de St Venant bidimensionales. Bajo la siguiente hipótesis:

- Se cumple la ley de distribución de presión hidrostática
- La distribución relativamente uniforme de velocidad en profundidad

2.5.1.1.1 Ecuaciones de la Hidrodinámica

Para el flujo en zona urbana se utilizan las ecuaciones de Saint Venant, tanto en una dimensión como en dos dimensiones. Las ecuaciones bidimensionales se utilizan sobre todo en superficie, pero también para elementos que forman parte de la red de colectores, como pueden ser depósitos de retención o uniones de colectores. Las ecuaciones unidimensionales se utilizan principalmente en los colectores (Sanz et al., 2022).

Ecuaciones de Saint-Venant en 2D.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = R - f \quad \text{ec. 2-26}$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} - g \frac{n^2}{h^3} |q| q_x \quad \text{ec. 2-27}$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} - g \frac{n^2}{h^3} |q| q_y \quad \text{ec. 2-28}$$

Donde:

h es el tirante, en m

q_x y q_y son las dos componentes en dirección x y y , del caudal unitario, en m^2/s

$|q|$ es su módulo, en m^2/s

R es la intensidad de precipitación, en m/h

f es la tasa de infiltración, en m/h

Z_b es la cota del fondo, en m

g es la aceleración de la gravedad, en m/s^2

n es el coeficiente de Manning, adimensional

2.5.1.2 Módulo de drenaje urbano

El principal elemento de este módulo es el cálculo en una dimensión, de la propagación del flujo a través de los conductos cerrados que conforman una red de alcantarillado, ya sea en lámina

libre, o con presión. La consideración de flujo a presión Figura 2-24 (b) se ha implementado a través de la metodología de Preissmann (Sanz et al., 2022).

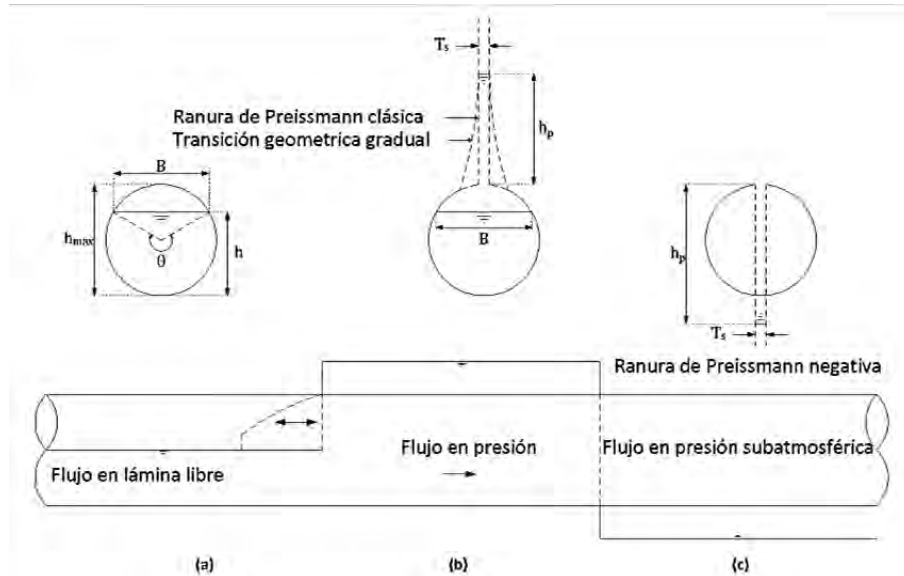


Figura 2-24. Etapas de la ranura de Preissmann a) flujo en lámina; b) flujo en presión; c) flujo en presión negativa (Sanz et al., 2022).

Un proceso del drenaje urbano es el intercambio de agua entre la superficie y la red, ya sea sólo de captación, a través de las rejillas de alcantarillado, o de salida de la red a superficie en episodios de grandes lluvias. Ambos fenómenos han sido incorporados en Iber a través de dos metodologías distintas: considerando las rejillas como orificios, o mediante la metodología de evaluación de la eficiencia hidráulica de las rejillas desarrollada en los laboratorios del Instituto Flumen, en la UPC (Sanz et al., 2022).

Para la simulación de las uniones de colectores, que también pueden funcionar en lámina libre o a presión, se ha optado por considerarlos como elementos puntuales de superficie, y calcularlos con un esquema bidimensional, semejante al utilizado por Iber en superficie (Sanz et al., 2022).

En la red de alcantarillado se ha implementado una opción para poder considerar elementos especiales de la propia red (por ejemplo, depósitos de retención, uniones complejas de colectores, etc.), pudiéndose simular éstos en un esquema bidimensional. Asimismo, este módulo se puede emplear para realizar la simulación únicamente en superficie, tanto en superficie como en la red, o tan sólo en la red de drenaje (Sanz et al., 2022).

2.5.1.3 Ecuaciones de gasto en sumidero y fuente

Las ecuaciones de orificio (ec. 2-29) y vertedero (ec. 2-30) que emplea IBER para simular fuentes y sumideros de acuerdo con Sanz *et al.* (2022), son las siguientes:

$$Q_o = C_{d,o} A_{int} \sqrt{2gH} \quad \text{ec. 2-29}$$

$$Q_v = C_{d,v} L_{int} H^{3/2} \quad \text{ec. 2-30}$$

Donde:

A_{int} es el área de captación, en m^2 .

L_{int} es la longitud de captación (perímetro), en m.

H es la carga hidráulica, en m.

$C_{d,o}$ es el coeficiente de descarga del orificio

$C_{d,v}$ es el coeficiente de descarga del vertedero

Para el coeficiente de descarga del orificio se recomiendan valores de entre 0.60 y 0.80 y para el coeficiente de descarga del vertedor se recomiendan valores de entre 1.70 y 3.20.

2.6 Métodos de análisis estadístico

Se explican los métodos estadísticos que darán validez al comportamiento de los datos experimentales, principalmente la diferencia promedio entre las lecturas experimentales y las predicciones del modelo de su recta o curva de ajuste.

2.6.1 Medidas de tendencia central a partir de datos no agrupados

Existen tres métodos comunes para identificar el centro de un conjunto de datos: la media, la mediana y la moda. Su cálculo e interpretación dependerá de la definición de “centro”. En cada caso, se ubican en el punto alrededor del cual se aglomeran los datos (Webster, 2001).

La media, o media aritmética, es la medida central que usualmente se le llamaba promedio.

Marco teórico

Media aritmética: Medida de la tendencia central que normalmente era considerada como promedio.

La media de una población es el parámetro μ . Si hay N observaciones en el conjunto de datos de la población, la media se calcula con la ecuación 2-31:

$$\mu = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad \text{ec. 2-31}$$

La media de una muestra es un estadístico $\bar{y}$ (que se lee y-barra). Con n observaciones en el conjunto de datos de la muestra, la media se determina mediante la ecuación 2-32:

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_N}{n} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{n} \quad \text{ec. 2-32}$$

La mediana algunas veces llamada media posicional, porque queda exactamente en la mitad del conjunto de datos después de que las observaciones se han colocado en serie ordenada. La mitad de las observaciones estará por encima de la mediana, la otra mitad estará por debajo de ella.

La mediana: es la observación de la mitad después de que se han colocado los datos en una serie ordenada (ec. 2-33).

$$\text{Posición de la mediana} = \frac{n+1}{2} \quad \text{ec. 2-33}$$

Donde:

n es el número de datos

La observación modal es la observación que ocurre con mayor frecuencia. Utilizando seis observaciones como los siguientes datos 35, 45, 52, 56, 67, 67, la moda es 67. Si se tuviera una séptima observación fuera 56, entonces el conjunto de datos sería bimodal, con modas de 56 y 67.

La media es la medida más común de tendencia central. Se presta para mayor manipulación e interpretación algebraica. Desafortunadamente, la media se ve afectada por valores extremos, o valores atípicos, y a diferencia de la mediana, puede ser sesgada por las observaciones que están muy por encima o muy por debajo de ésta.

2.6.2 Medidas de dispersión

Una descripción más completa del conjunto de datos puede obtenerse si se mide qué tan dispersos están los datos alrededor de su punto central. Esto es precisamente lo que hacen las medidas de dispersión. Indican cuánto se desvían las observaciones alrededor de su media. Por lo que, las medidas de dispersión miden qué tanto se dispersan las observaciones alrededor de su media (Webster, 2001).

La media de dispersión más simple (y menos útil) es el rango o recorrido. El rango es simplemente la diferencia entre la observación más alta y la más baja. Su ventaja es que es fácil de calcular. Su desventaja es que considera sólo dos, de los cientos de observaciones que hay en un conjunto de datos. El resto de las observaciones se ignoran.

La varianza y su raíz cuadrada, y la desviación estándar son medidas de dispersión mucho más útiles. Proporcionan una medida más significativa sobre el punto hasta el cual se dispersan las observaciones alrededor de su media.

La varianza es el “promedio de las desviaciones respecto a su media elevadas al cuadrado”. ¿Qué significa esto? Significa que:

1. se encuentra la cantidad por la cual cada observación se desvía de la media,
2. se elevan al cuadrado tales desviaciones, y
3. se hallan la media de tales desviaciones elevadas al cuadrado. Así, se tiene el promedio de las desviaciones de la media elevadas al cuadrado.

La varianza para una población σ^2 (sigma al cuadrado) se obtiene con la ecuación 2-34:

$$\sigma^2 = \frac{(X_1 - \mu)^2 + (X_2 - \mu)^2 + (X_3 - \mu)^2 + \dots + (X_N - \mu)^2}{N} = \frac{\sum (X_i - \mu)^2}{N} \quad \text{ec. 2-34}$$

Donde:

$X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ son las observaciones individuales

μ es la media poblacional

N es el número de observaciones

La desviación estándar σ y es la raíz cuadrada de la varianza. Es una medida importante de la dispersión de los datos.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad \text{ec. 2-35}$$

Es importante mencionar que se trabaja con la media de la población μ diferente a la media muestral $\bar{X}$ donde el número de observaciones es N y no n .

La varianza y la desviación estándar para una muestra representan medidas de dispersión alrededor de la media. La varianza de la muestra se obtiene con la ecuación 2-36:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad \text{ec. 2-36}$$

Y la desviación estándar de la muestra es la raíz de la varianza como se presenta en la ecuación 2-37

$$s = \sqrt{s^2} \quad \text{ec. 2-37}$$

2.6.3 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

Es la medida estadística se emplea para obtener el rendimiento de un modelo. El error medio cuadrático (RMSE), esta medida se utiliza para representar la diferencia promedio entre las lecturas experimentales y las predicciones del modelo (Chai & Draxler, 2014). Se Obtiene con las ecuaciones 2-38 y 2-39:

$$e_i = \hat{y}_i - y_i \quad \text{ec. 2-38}$$

Donde:

e_i es el error

$\hat{y}_i$ es el valor predicho

y_i es el valor de la lectura experimental

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad \text{ec. 2-39}$$

Donde:

e_i es el error

n es el número total de datos

2.6.4 Error absoluto medio (MAE)

De acuerdo con Willmott & Matsuura (2005), después de un análisis indican que el Error absoluto medio (MAE) es la medida más natural de la magnitud del error promedio y que (a diferencia del RMSE) que es una medida inequívoca de la magnitud del error promedio. Recomiendan que las comparaciones del error promedio de rendimiento de un modelo deben basarse en el MAE, que se obtiene con la ecuación 2-40.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad \text{ec. 2-40}$$

Donde:

e_i es el error

n es el número total de datos

2.6.5 Objetivos de un análisis de correlación

El análisis de correlación mide el grado de relación entre las variables. Los supuestos de población implícitas en el análisis de correlación simple son:

- 1) La relación entre dos variables es lineal.
- 2) Las dos variables son aleatorias.
- 3) Para cada variable las varianzas condicionales, dados valores diferentes de la otra variable son iguales.
- 4) Para cada variable las distribuciones condicionales, dados valores diferentes de la otra variable, son todas distribuciones normales.

2.6.6 Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación R^2 , es la medida más importante de la bondad de una recta o curva de ajuste (Webster, 2001) y de acuerdo Chicoo (2021), este coeficiente se obtiene con la ecuación 2-41.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (\hat{y}_i - y_i)}{\sum_{i=1}^m (\bar{y} - y_i)} \quad ec. 2-41$$

Donde:

$\hat{y}_i$ es el valor predicho

y_i es el valor de la lectura experimental

$\bar{y}$ es la media de una muestral

El coeficiente de determinación de todo modelo de regresión toma siempre valores numéricos entre 0 y 1. Entre mayor sea R^2 mayor poder explicativo tendrá el modelo.

CAPÍTULO 3

MATERIALES Y MÉTODOS

Las diferentes etapas para cumplir con los objetivos planteados en este trabajo, se presenta de forma resumida en la figura 3-1. Se consideraron cuatro etapas, búsqueda y análisis de información, construcción del modelo físico, experimentos en el modelo físico y la modelación con el modelo numérico IBER.

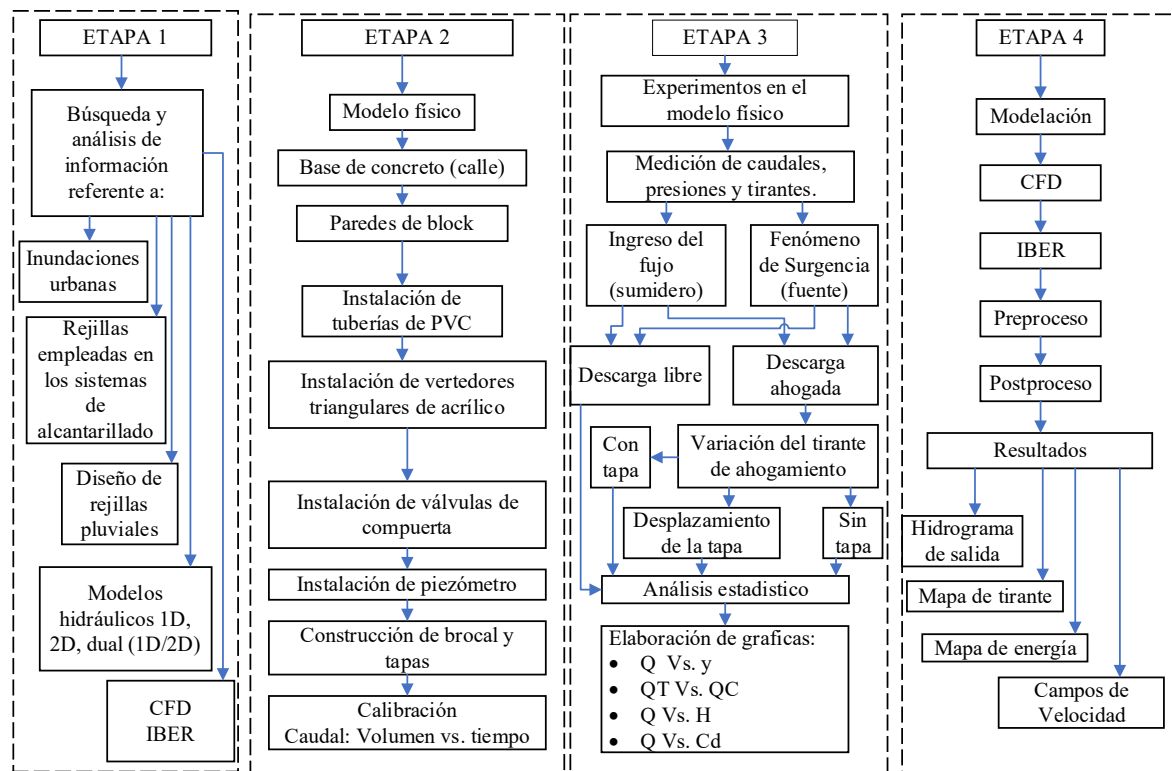


Figura 3-1. Contenido de las diferentes etapas empleadas en el desarrollo de la investigación.

3.1 Búsqueda y análisis de la información

En esta etapa, se realizó una búsqueda y análisis de información relacionada con el tema de inundaciones urbanas. Derivado de ello, se resume que debido al cambio climático las lluvias son de mayor intensidad y se presentan en las zonas con mayor concentración de población donde generan inundaciones. Las cuales se pueden medir por las pérdidas económicas que representan y de acuerdo con Weather (2021), para el año 2021 las inundaciones fueron el peligro más costoso a nivel mundial con un monto de 105 mil millones de dólares, también parte del problema se debe a que los sistemas de drenaje son combinados (pluvial y alcantarillado).

Se encontraron estudios experimentales de diferentes arreglos de rejillas que se emplean para los pozos de visita y bocas de tormenta (Lee *et al.*, 2012; Pérez, 2015; Rubinato, 2015; Morales, 2016). En los diferentes trabajos se determinan los coeficientes de descarga para la función de sumidero y de surgencia (fuente), así como sus curvas de eficiencia y la teoría mediante la cual se determinan sus respectivos valores.

Para las tapas de los pozos de visita común, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido, no se encontró información referente a su eficiencia de captación. En la información de sus fichas técnicas sólo se refiere a información de su resistencia y dimensiones, no presentan información de la orientación en que se debe colocar para que capten la mayor cantidad de agua, etc. También se consultó el MAPAS (2015), manual que se toma como base para el diseño de los sistemas de alcantarillado en México y no se encontró la información referente a eficiencia de captación y coeficientes de descarga para la rejilla fierro fundido y tapa de concreto.

Por otra parte, también fue necesario investigar la información relacionada con modelos de simulación 1D, simulación en 2D y simulación dual, principalmente donde interactúan los sistemas tanto de drenaje superficial como drenaje del alcantarillado y aquellas que consideran que los brocales de los pozos de visita trabajan como sumidero y/o fuente. Djordjević *et al* (2005); Leandro *et al* (2009); Concha y Gómez (2009); Lee *et al.*, (2013); Aragón (2013); Djordjević *et al.*, (2013); Bazin *et al.*, (2014); Jahanbazi y Egger (2014); Fraga, (2015); Chen *et al.*, (2015); Martins *et al.*, (2017); Sañudo *et al.*, (2020), son algunos autores que trabajaron en esta teoría, la cual sirve de base para generar modelos numéricos de simulación en donde se puede modelar dicha interacción, tomando en 1D a los sistemas de colectores y en 2D al sistema de calles.

Lo anterior condujo a investigar y analizar los modelos numéricos de uso libre que permitan simular el fenómeno de drenaje de forma dual. Con base a la información consultada se determinó que era factible utilizar el modelo numérico IBER, en el cual han incorporado el Módulo de drenaje urbano, sus funciones y aplicaciones se explican ampliamente en Sanz *et al.* (2022). El modelo numérico IBER está disponible en dos idiomas español e inglés y funciona considerando tres etapas de trabajo: preproceso, proceso y postproceso.

3.2 Modelo físico

Para el desarrollo del modelo físico, se consideró como prototipo una calle de pavimento asfáltico textura rugosa ($n = 0.016$) de San Juan Jalpa, San Felipe del Progreso, México. Las características de la calle son: Ancho de la calle de 6 m; pendiente longitudinal $S = 0.006$ y pozo de visita al centro de la calle con un diámetro interno del brocal de 0.6 m.

3.2.1 Diseño del modelo físico

Para el diseño del modelo se realizó un análisis dimensional, de acuerdo con Morales (2016), el análisis dimensional permite determinar variables adimensionales que componen el fenómeno y verificar como estas variables se relacionan para determinar las escalas de semejanza correspondientes. Las variables involucradas en esta investigación son las siguientes:

Q_c : caudal total en la calle, en l/s

Q_e : caudal captado por la tapa, en l/s

S_y : pendiente longitudinal de la calle, en m/m

S_x : pendiente transversal de la calle, en m/m

D_m : diámetro del brocal, en m.

A_u : área útil de captación del brocal, en m^2

y : tirante del escurrimiento sobre la calle antes del sumidero, en m

g : aceleración de gravedad, en m/s^2

ν : viscosidad cinemática del agua, en m^2/s

P : representa la presión en el colector, en kgf/m^2

Así el número total de variables son: $n = 10$ variables que describen el fenómeno y las unidades contenidas son $r = 3$ unidades contenidas [M], [L] y [T]. Por lo tanto, el número de parámetros adimensionales son: $n - r = 10 - 3 = 7$

Tomando una base de $r = 3$ elementos, se tiene una base $e = (D; Q_c; P)$, se pueden formar los siguientes parámetros adimensionales:

$$[\pi_1] = \frac{Q_e}{Q_c} = E: \text{Eficiencia de captación}$$

$$[\pi_2] = S_y$$

$$[\pi_3] = S_x$$

$$[\pi_4] = \frac{A_u}{D^2}$$

$$[\pi_5] = \frac{y}{D}$$

$$[\pi_6] = \frac{gD^5}{Q_c^2} = \frac{Q_c^2}{gD^5} = F_r: \text{Número de Froude.}$$

$$[\pi_7] = \frac{vD}{Q_c} = \frac{Q_c}{vD} = R_e: \text{Número de Reynolds.}$$

$$C_i = \phi \left(E; S_x; S_y; \frac{A_u}{D^2}; \frac{y}{D}; F_r; R_e \right) \quad \text{ec. 3-1}$$

3.2.1.1 Semejanza geométrica

El modelo que se reproduce a escala en el laboratorio y se le designa con m de modelo, de una estructura real a la cual se le designa con p de prototipo (Figura 3-2).

Las relaciones de escala entre prototipo y modelo, se obtiene con la siguiente ecuación:

$$L_e = \frac{L_p}{L_m} \quad \text{ec. 3-2}$$

Donde:

L_p es la longitud del prototipo

L_m es la longitud correspondiente en el modelo físico

Así la escala del modelo es:

$$L_e = \frac{L_p}{L_m} = \frac{6}{1} = 6$$

Por lo tanto, para el ancho de la calle

$$L_m = \frac{L_p}{L_e} = \frac{6}{6} = 1 \text{ m}$$

Y profundidad del pozo de visita es:

$$h_m = \frac{h_p}{h_e} = \frac{1.5}{6} = 0.25 \text{ m}$$

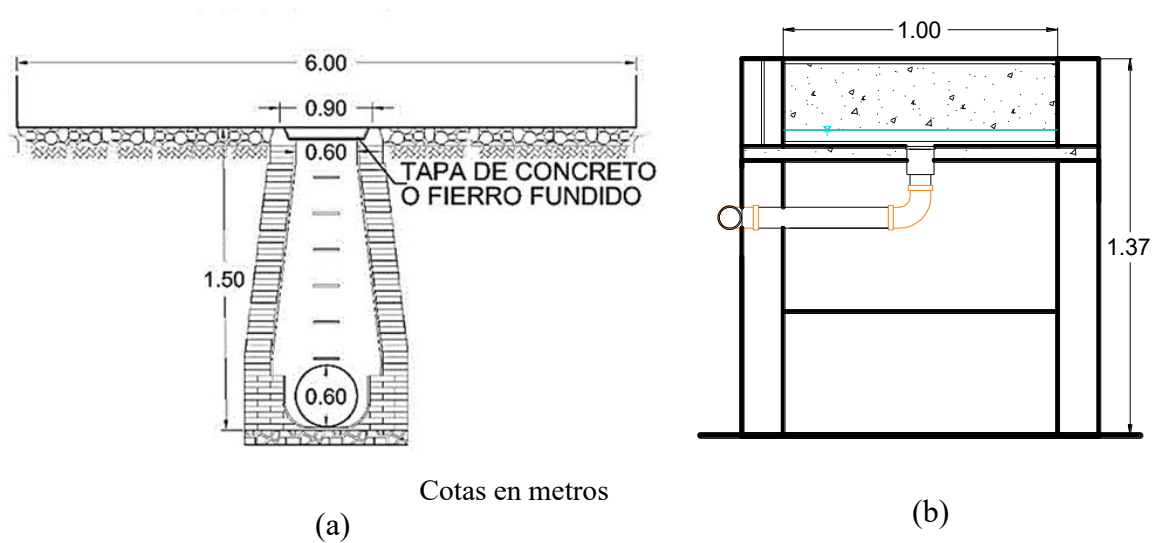


Figura 3-2 Semejanza geométrica; a) modelo del prototipo, b) modelo a escala.

3.2.1.2 Semejanza dinámica

Para los problemas con flujo a superficie libre, la influencia de la gravedad es importante, pues la superficie adoptará por sí misma la forma que le permita ser una superficie de igual presión. En estos problemas el número de Froude será el que determine los criterios de semejanza (Zhao, 2004; Sotelo, 2007; Rubinato, 2015).

Con las ecuaciones de la Tabla 2-3 del capítulo 2 y la longitud equivalente obtenida con la ec. 3-4, se obtuvieron las escalas de longitud, área, volumen, gasto, masa, presión, rugosidad y pendiente, escalas que se presentan en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Características de flujo y escalas de semejanza

	Ley de Froude	Escala
Longitud	$L_e = 6$	1:6
Área	$L_e^2 = (6)^2$	1:36
Volumen	$L_e^3 = (6)^3$	1:216
Velocidad	$[L_e \gamma_e / \rho_e]^{1/2} = [((6)(1))/1]^{1/2}$	1:2.45
Gasto	$L_e^{5/2} (\gamma_e / \rho_e)^{1/2} = (6)^{5/2} (1/1)^{1/2}$	1:88.18
Masa	$L_e^3 \rho_e = (6)^3 (1)$	1:216
Presión	$L_e \gamma_e = (6)(1)$	1:6
Rugosidad	$L_e^{1/6} = (6)^{1/6}$	1: 1.348
Pendiente	1	1:1

Nota: La escala relacionada con el peso específico y la densidad es igual a 1, esto es $\gamma_e = 1$ y $\rho_e = 1$ por tratarse del mismo líquido para el prototipo y para el modelo, en este caso se trabajó con agua.

Para obtener los caudales a modelar se consideró flujo uniforme tanto en la tubería como en la calle. Por lo tanto, se utilizó la fórmula de Manning con los siguientes datos, para la calle una pendiente longitudinal $S_0 = 0.006$, $n = 0.011$ correspondiente cemento pulido.

Los caudales que se pueden presentar en el colector para surgencia en el prototipo son los mostrados en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2 Caudal que transporta el colector a tubo lleno considerando $D = 0.6$ m

y (m)	θ	A (m ²)	P (m)	R _h (m)	U (m/s)	Q _p (m ³ /s)	Q _m (m ³ /s)	Q _m (l/s)
0.6	360	0.2827	1.8850	0.1500	1.3667	0.3864	0.0043	4.38

Los caudales y tirantes normales que puede ocurrir en la calle, considerando las características de rugosidad y pendiente longitudinal ya mencionados, así como los elementos geométricos de una sección rectangular, son los que se presentan en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Gastos para diferentes tirantes normales en la calle.

y_{np} (m)	Q_p (m ³ /s)
0.01	0.01
0.05	0.19
0.1	0.61
0.2	1.90
0.25	2.73
0.3	3.66
0.35	4.69

Los tirantes que se pueden presentar en la calle del modelo físico (Tabla 3-4), de donde se observa que para un caudal de 0.15 l/s su tirante correspondiente es de 0.44 cm y para un caudal 53.2 l/s su tirante correspondiente es de 7.03 cm.

Tabla 3-4 Caudales y tirantes a escala que se pueden presentar en el modelo.

Q_m (m ³ /s)	Q_m (l/s)	y_m (m)	y_m (cm)
0.00015	0.15	0.0044	0.44
0.00221	2.21	0.0075	0.75
0.00694	6.94	0.0204	2.04
0.02158	21.58	0.0399	3.99
0.03098	30.98	0.0494	4.94
0.04156	41.56	0.0600	6.00
0.05320	53.20	0.0703	7.03

Para conocer los tirantes a considerar a lo largo de la calle para el diseño del modelo físico se calcularon los perfiles hidráulicos bajo diferentes caudales. Los perfiles hidráulicos se obtuvieron en Excel, HEC-RAS e IBER, (Figura 3-3). Con esta información se determinó la altura para los muros del canal que delimitan la calle, la cual es de 30 cm considerando 20 cm de bordo libre.

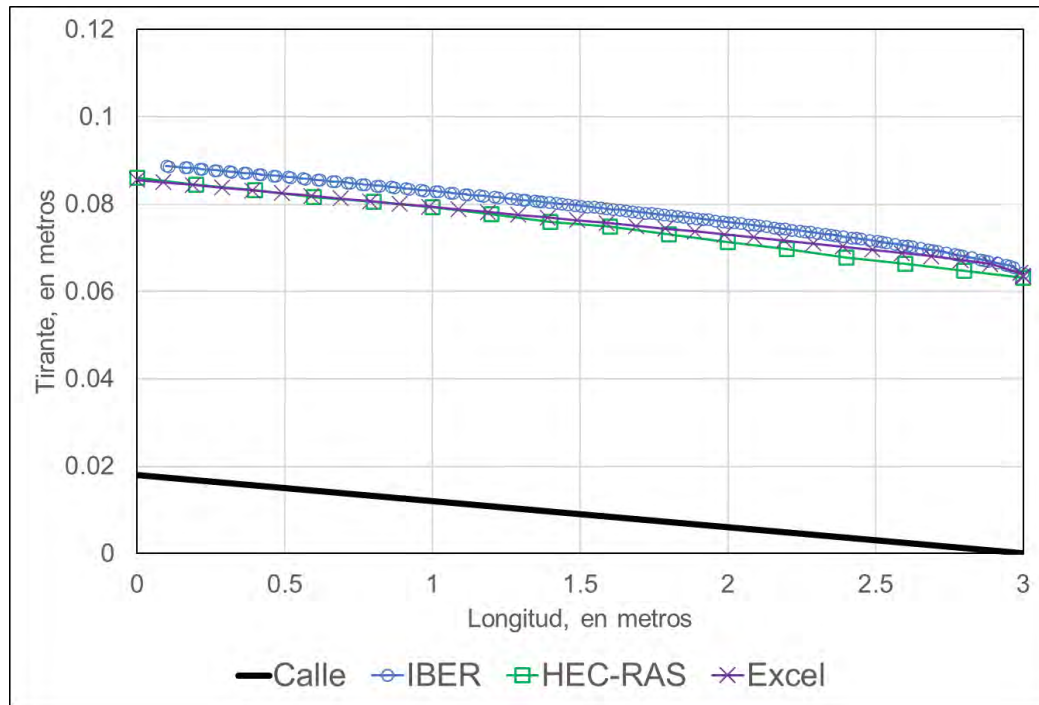


Figura 3-3 Perfiles de flujo para $Q=53.2$ l/s, con los cuales se determinó la altura de los muros del modelo físico.

El modelo físico se construyó de acuerdo con las dimensiones mostradas en el plano del anexo A, para el diseño en planta (Figura 3-4) y el corte longitudinal D-D' se presentan los niveles de los tanques de llegada y para el tanque regulador lateral del vertedor triangular (Figura 3-5).

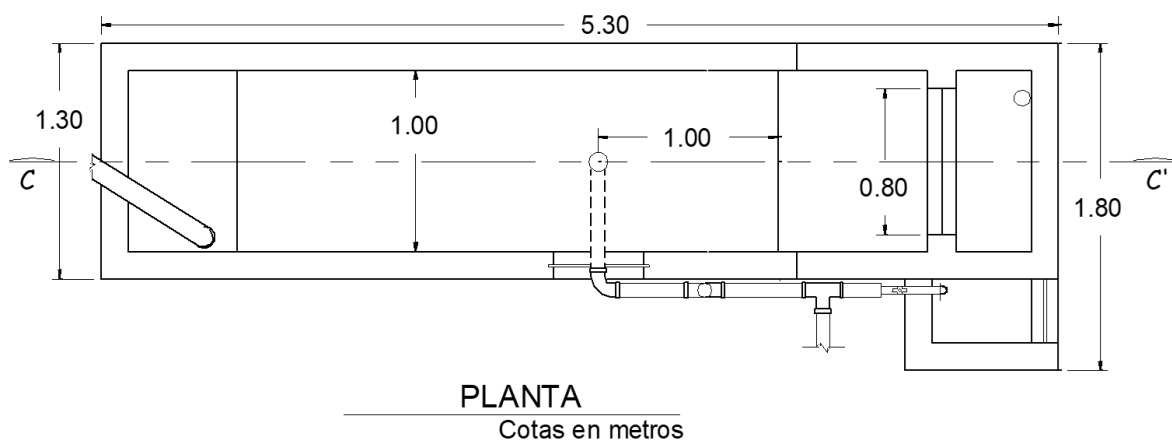


Figura 3-4 Diseño en planta del modelo físico.

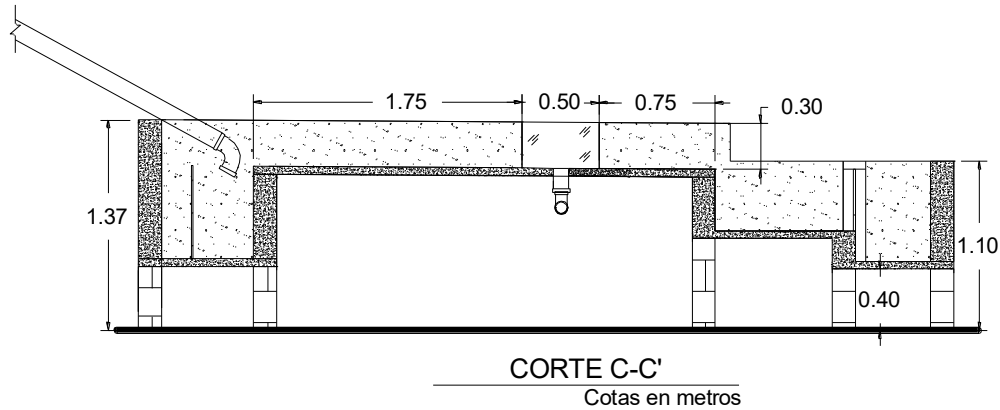


Figura 3-5 Corte C-C' del modelo físico

3.2.1.3 Diseño de las tapas a escala

Tomando como base la similitud Froudiana (Zhao *et al.*, 2004), en específico la escala de presiones y de masa, a continuación, se presentan los diseños de las tapas a escala.

a) Tapa de concreto

Las características del prototipo de la tapa de concreto (Figura 3-6) son las siguientes; la tapa tiene 70 cm de diámetro (mayor al diámetro del brocal para que se pueda sostener), 15 cm de espesor y 4 orificios de 4 cm de diámetro cada uno. El brocal tiene un diámetro interno de 60 cm, diámetro externo de 95 cm y 20 cm de espesor con un peso total de tapa con brocal de 320 kg y el peso de la tapa es de 136.34 kg., información tomada de Tubos para Drenaje (<https://goo.su/BTiQzh1>)



Figura 3-6 Tapa de concreto de pozo de visita común (extraído de <https://goo.su/BTiQzh1>)

Las tapas de concreto en ocasiones son desplazadas del brocal, cuando el pozo de visita trabaja a surgencia, tomando en cuenta que el peso de la tapa $W = 136.34 \text{ kg}$, para desplazar dicho peso se requiere una presión del orden de los 0.0337 kg/cm^2 , equivalente a 34 cmca (centímetros columna de agua). A continuación, se presenta el cálculo del peso de la tapa de concreto para el modelo físico a escala.

Masa

$$L_e^3 \rho_e = 216$$

$\rho_e = 1$ por tratarse de agua en el prototipo y en el modelo a escala.

Esc 1:216

$$W_m = \frac{W_p}{L_e^3 \rho_e} = \frac{W_p}{216} \quad \text{ec. 3-3}$$

Donde:

W_m es el peso de modelo, en kg.

W_p es el peso del prototipo, en kg.

Por lo tanto, $W_m = 0.631 \text{ kg}$

Presión

$$L_e \gamma_e = 6$$

$\gamma_e = 1$ Por tratarse de agua en el prototipo y en el modelo a escala.

Esc. 1:6

$$P_m = \frac{P_p}{L_e \gamma_e} = \frac{P_p}{6} \quad \text{ec. 3-4}$$

Donde:

P_m es la presión en el modelo, en kgf/m^2 .

P_p es la presión del prototipo, en kgf/m^2 .

$$P_m = 56.25 \text{ kg/m}^2$$

Con estos datos la tapa de concreto del modelo físico se elaboró de concreto (Figura 3-7), con un peso es de 630 gramos.



Figura 3-7 Modelo físico de la tapa de concreto

b) Rejilla de fierro fundido

Características del prototipo de la rejilla de fierro fundido (FoFo) presentadas en la Figura 3-8, la rejilla tiene un diámetro de 61 cm y tiene doce espacios rectangulares de 18 x 3 cm cada uno, tiene un peso de 95 kg, el brocal tiene un diámetro exterior de 72.5 cm y un diámetro interior de 61 cm y altura de 13.5 cm, de acuerdo con la ficha técnica de FAREMEX (<https://goo.su/BmMI37>).



Figura 3-8 Brocal con tapa de FoFo para pozo de visita, (extraído de <https://goo.su/BmMI37>).

De acuerdo con la escala de masa 1:216 y tomando en cuenta el peso de la rejilla de fierro fundido de 95 kg. La rejilla a escala debe pesar $W_{FoFo} = 0.416$ kg. El diseño de la rejilla se realizó en AutoCAD y Revit (Figura 3-9) para su impresión en 3D de dicha rejilla.

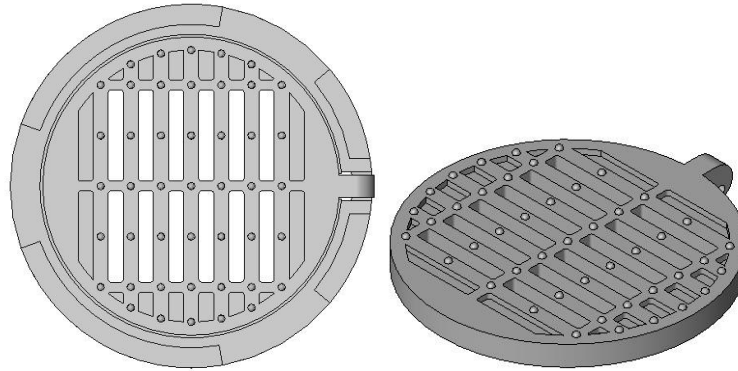


Figura 3-9 Modelo de brocal y rejilla de fierro fundido en Revit.

Para la rejilla de fierro fundido, se imprimió el modelo a escala en 3D y para cumplir con el peso se le adicionó una plomada para alcanzar el peso de 0.415 kg (Figura 3-10).



Figura 3-10 Modelo físico de la rejilla de fierro fundido.

3.2.2 Construcción del modelo físico

Para la elaboración del modelo físico se utilizó un espacio del laboratorio de modelos hidráulicos del IITCA y fue construido con base en las especificaciones del plano de construcción (Anexo A). Consta de un canal rectangular que representa la calle y para el sistema de colectores se utilizó tubería, así como las piezas necesarias para las uniones se utilizó PVC hidráulico, los

muros se construyeron con block y las losas de concreto, a continuación, se explica el proceso constructivo.

3.2.2.1 Proceso constructivo del modelo físico

Se desplantó el modelo al lado de la Unidad modular para medición de pérdidas de carga hidráulica del laboratorio de modelos hidráulicos del IITCA (Figura 3-11).



Figura 3-11 Construcción del tanque de entrada del agua

Fue necesario incluir acero de refuerzo para la losa que simula la calle como se presenta en la figura 3-12, para lo cual primero se cimbró con madera y posteriormente colocó la malla y varilla de 9.5 mm (3/8”), además para el perímetro se colocó varilla de 38.1 mm (1 ½”) de diámetro, que fue el material con el que se dispuso.



Figura 3-12 Cimbrado y armado de la losa que simula la calle

Para colado de la calle del modelo físico se tomó en cuenta la pendiente longitudinal y se utilizó concreto hidráulico como se presenta en la figura 3-13. Para las losas de los tanques tanto de llegada y los tanques reguladores de los vertedores triangulares se utilizó concreto hidráulico.



Figura 3-13 Colado de la losa del modelo físico

Para la construcción de los muros se utilizó block y tabique rojo recocido para el mamposteo de los muros y la delimitación de los tanques para la instalación de los vertedores triangulares, mediante ellos se realizó la medición de los caudales descargados (Figura 3-14).



Figura 3-14 Construcción de muros del modelo físico

Materiales y métodos

De acuerdo con las características de los vertedores triangulares se puede emplear para la medición de caudales con una precisión aceptable. Ambos vertedores triangulares son de acrílico (Figura 3-15) y los dos se adaptaron para este modelo físico.



Figura 3-15 Vertedores triangulares en el modelo físico

Para que el modelo fuese impermeable se pulieron los muros (Figura 3-16). Igualmente se pulieron los tanques de llegada y los tanques de los vertedores triangulares.



Figura 3-16 Pulido de muros y tanques del modelo físico.

3.2.2.2 Alimentación del modelo físico

Para la alimentación del modelo físico, se adaptó la tubería de descarga del sistema de la Unidad modular para medición de pérdidas de carga hidráulica del laboratorio de modelos hidráulicos del IITCA para ello se realizaron trabajos de cortes y unión del codo especial mediante soldadura, como se muestra en la Figura 3-17.



Figura 3-17 Instalación de la tubería de alimentación de agua para el modelo físico

3.2.2.3 Instalación de tuberías de PVC hidráulico.

En la figura 3-18 se presenta el cople de 114.3 mm (4") de PVC hidráulico que representa el brocal el cual se conecta a una tubería de 88.9 mm (3") en la cual se conectó una tee de PVC hidráulico con la reducción bushing de PVC hidráulico que sirve de preparación para la instalación del piezómetro.

La tubería que abastece de agua al modelo físico, se generó una toma de la tubería de acero galvanizado del sistema de tuberías del laboratorio de modelos hidráulicos del IITCA, dicha toma sirve para alimentar el modelo en los escenarios de surgencia y la descarga es controlada por una válvula de cobre de 60.3 mm (2") (Figura 3-19).



Figura 3-18 Instalación de tubería y cople para captación del caudal.



Figura 3-19 Conexión para la alimentación en caso de surgencia en el modelo físico

3.2.2.4 Instalación de los equipos de medición

Se instaló un piezómetro (Figura 3-20) para medir las presiones de los escenarios de surgencia. Del análisis realizado se determinó que no se presentarían presiones grandes, los piezómetros son útiles para medir presiones relativamente pequeñas.

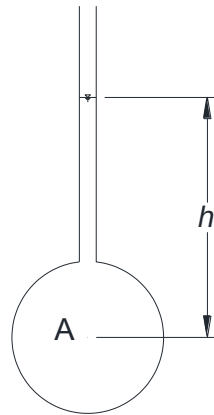


Figura 3-20 Piezómetro instalado en el modelo físico.

Para la medición de los tirantes hidráulicos se utilizó un limnómetro (Figura 3-21), el cual tiene una precisión de decimales de milímetro, se adaptó una base para poder desplazarlo a lo largo del canal y así cubrir todo el perfil longitudinal y también la periferia del brocal donde se instalaron la tapa y rejilla.



Figura 3-21 Limnómetro instalado en el modelo físico.

3.2.2.5 Instalación de uniformizador de flujo

Para disminuir la turbulencia y poder realizar las mediciones de los tirantes se instaló el uniformizador de flujo, para los escenarios 2 y 3 se coloca aguas abajo del canal (Figura 3-22) para provocar un remanso y generar el ahogamiento de la descarga.

3.2.3 Construcción de las curvas de descarga de los vertedores.

Los vertedores triangulares que se instalaron son propiedad del laboratorio de modelos hidráulicos del IITCA, el vertedor que se instaló en el canal principal es el vertedor que se emplea en el canal de pendiente variable de 1 metro de ancho.

Se construyeron sus curvas de descarga para que en la etapa de experimentación al leer la carga sobre el vertedor y conociendo la ecuación de la curva de descarga se calcula el caudal que descarga el vertedor.

Para calibrar los vertedores triangulares, primero se obtuvieron los caudales máximos que pueden descargar, con las ecuaciones presentadas en 2.4.3, mediante las cuales el vertedor triangular con ángulo de abertura de $\theta = 60^\circ$ y el vertedor triangular con ángulo de abertura $\theta = 90^\circ$ pueden descargar los caudales presentados en las Tablas 3-5 y 3.6 respectivamente, con esta información se determinó el tamaño del recipiente con el cual fue conveniente captar el volumen de agua.



Figura 3-22 Uniformizador instalado aguas abajo en el modelo físico.

Tabla 3-5 Capacidad de descarga del vertedor triangular 1

θ	w(m)	h(m)	B(m)	μ	C	Q(m ³ /s)	Q(l/s)
90°	0.1	0.21	0.42	0.67	2.56	0.05164	51.64

Los caudales se presentan en tablas independientes debido a que las fórmulas para calcular el coeficiente μ , son diferentes.

Tabla 3-6 Capacidad de descarga del vertedor triangular 2

θ	w(m)	h(m)	B(m)	μ	C	Q(m ³ /s)	Q(l/s)
60°	0.05	0.13	0.35	0.6369	0.8686	0.00529	5.29

3.2.3.1 Vertedor triangular 1

El vertedor triangular 1, tiene un ancho de 1 metro y un ángulo de abertura $\theta = 90^\circ$ (Figura 3-23), se instaló para medir el caudal que transita por la calle, también para medir el caudal en el caso de surgencia libre y ahogada.



Figura 3-23 Vertedor triangular con $\theta=90^\circ$ del canal principal (vertedor triangular 1).

Materiales y métodos

Para los caudales menores a 5 l/s se utilizó un bote de plástico de 19 litros (Figura 3-23a), los cuales se pesaron y se restó la tara. Para los caudales mayores a 6 l/s, se aforó un tambo de plástico de 220 litros (Figura 3-23b) para poder captar los caudales descargados por el vertedor principal, se consideraron tiempos de 9 y 10 segundos, tiempo durante el cual se captó el volumen de agua.

3.2.3.2 Vertedor triangular 2

El vertedor triangular 2 se instaló en el tanque lateral y este vertedor sirve para medir el caudal de captación para los escenarios 1 y 2 (sumidero) en el modelo físico, este vertedor se adecuó con una extensión en la descarga (Figura 3-25), debido a que tiene perfiles de aluminio que impedían la captura del volumen de agua, para el caso de los caudales menores a un litro se utilizó una probeta graduada.



(a)



(b)

Figura 3-24 Medición del volumen de agua descargado contra tiempo del vertedor 2; (a) Bote de plástico de 19 litros, (b) Tambo de plástico de 220 litros.

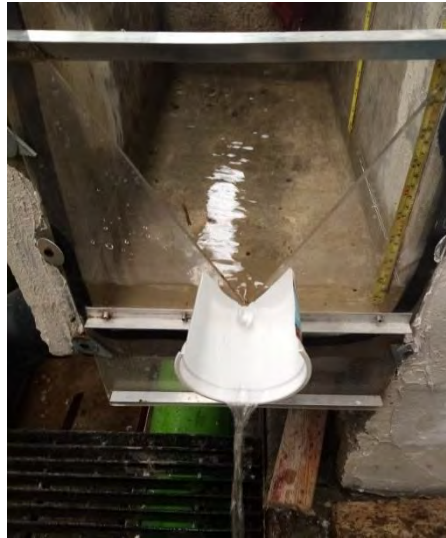


Figura 3-25 Aforo del vertedor triangular con ángulo de abertura $\theta=60^\circ$ (vertedor triangular 2)

Para la obtención de los caudales que descarga el vertedor triangular 2, al tratarse de volúmenes menores a 1 litro se midieron con una probeta graduada como se muestra en la Figura 3-26 y para la obtención de los volúmenes mayores a 1 litro se utilizó un bote de plástico de 19 litros, el cual se pesó junto con el agua captada con una báscula digital (Dongwoo, 2015), proceso que es más práctico, en comparación a medir todo el volumen captado con la probeta graduada. El tiempo de captación del volumen de agua se midió con el cronómetro.



Figura 3-26 Aforo con probeta de un litro.

Para los volúmenes que fueron posibles captar con un bote de plástico de 19 litros, se obtuvieron los volúmenes pesando la cubeta y restando la tara de acuerdo con la Figura 3-27.



Figura 3-27 Aforo con cubeta de 19 litros.

Para cada vertedor se establecieron 8 diferentes caudales de descarga y para cada uno de dichos caudales se realizaron 10 repeticiones, las curvas de descarga se presentan en el Capítulo 4.

3.3 Experimentación en el modelo físico

Una vez que se calibraron los vertedores, se realizaron los experimentos para el orificio libre, tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido, los cuales se dividieron en cuatro escenarios:

- ✓ Escenario 1 (descarga libre). En este escenario se realizaron los experimentos para el caso de sumidero libre (flujo continuo del agua) considerando que, la tapa de concreto y rejilla de fierro fundido, trabajan como vertedores.
- ✓ Escenario 2 (descarga ahogada). Se trabaja con flujo generando un remanso al final del canal para generar un ahogamiento y desde el inicio de los experimentos se debe presentar el sumidero ahogado, es decir la tapa, la rejilla y el brocal sin tapa

trabajan como orificios, excepto para caudales menores a 8 l/s en caso de brocal sin tapa y de 2.5 l/s para la rejilla de fierro fundido.

- ✓ Escenario 3 (surgencia ahogada). Para el caso de surgencia ahogada, se establece primero un caudal en la calle y posteriormente se envía caudal para surgencia hacia la calle.
- ✓ El Escenario 4 (surgencia libre), considera surgencia libre, se envían caudales de surgencia hacia la calle de forma gradual.

Los cuatro escenarios se representan en el árbol de experimentos de la figura 3-28, donde se observan que se tienen doce casos para cubrir los cuatro escenarios.

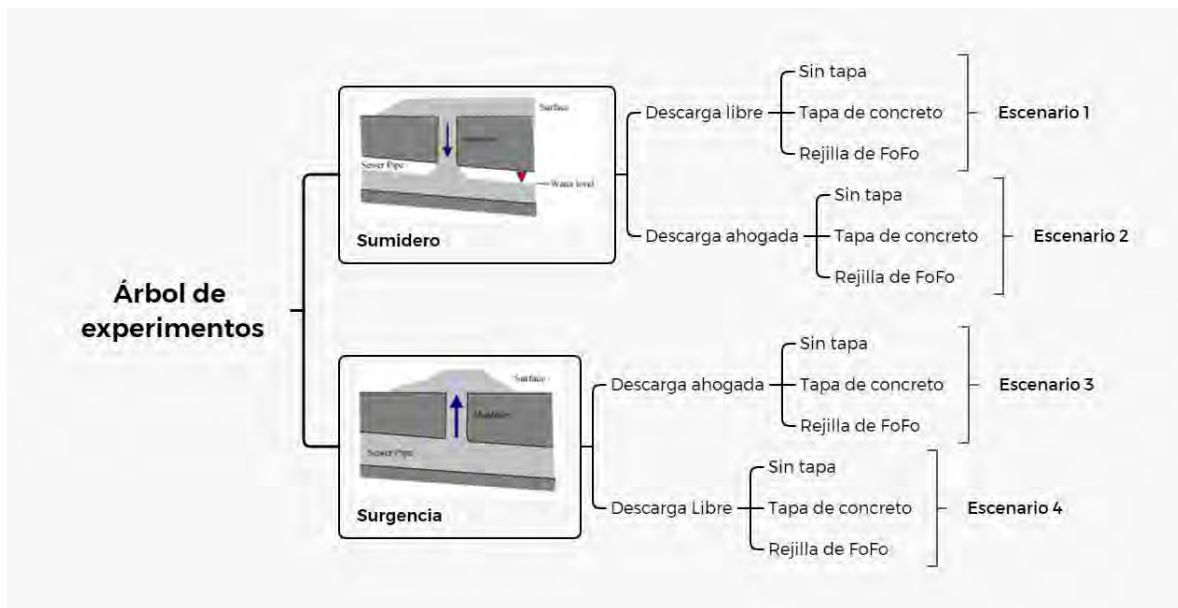


Figura 3-28 Árbol de experimentos.

3.3.1 Escenario 1. Sumidero libre.

Se realizaron los experimentos de acuerdo con la figura 3-29, el agua escurre por la calle y al llegar al brocal ingresa hacia el colector en descarga libre, lo cual hace que el brocal trabaje como vertedor, a esto se le llama sumidero libre (brocal sin tapa).

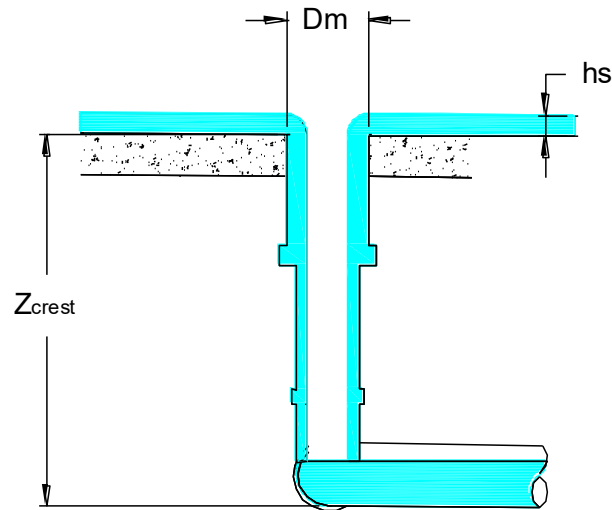


Figura 3-29 Sumidero libre, escenario 1.

Donde:

D_m es el diámetro del brocal del pozo de visita, en m

Z_{crest} es la diferencia de altura desde la parte inferior de la tubería hasta el nivel de la superficie, en m.

h_s es el tirante en la calle, en m

En la Figura 3-30 se presentan los elementos que deben estar funcionando para realizar los experimentos del escenario 1 para los tres casos; brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido.

Pasos a seguir para realizar los experimentos.

- 1) Abrir la válvula de compuerta 1 y esperar a que se estabilice el gasto, se toma lectura de la carga en el vertedor triangular 1.
- 2) Se abre la válvula de esfera e inicia la captación de agua por la tapa.
- 3) Se toman lecturas de tirante en cuatro puntos ubicados alrededor del pozo (brocal, tapa o rejilla), con el limnómetro como se indica en la Figura 3-31.
- 4) Se toma lectura de las cargas hidráulicas en los vertedores 1 y 2, para saber cuánta agua se capta en los tres casos.

- 5) Se abre más la válvula de compuerta 1 para aumentar el caudal, se espera la estabilización del caudal y se repiten los pasos del 1 al 4.

3.3.2 Escenario 2. Sumidero ahogado

Para las pruebas del escenario 2 (Figura 3-32), se establece un caudal y se genera un remanso colocando un estabilizador de flujo en la parte final del canal, con lo cual desde el inicio de la toma de lecturas la descarga será ahogada.

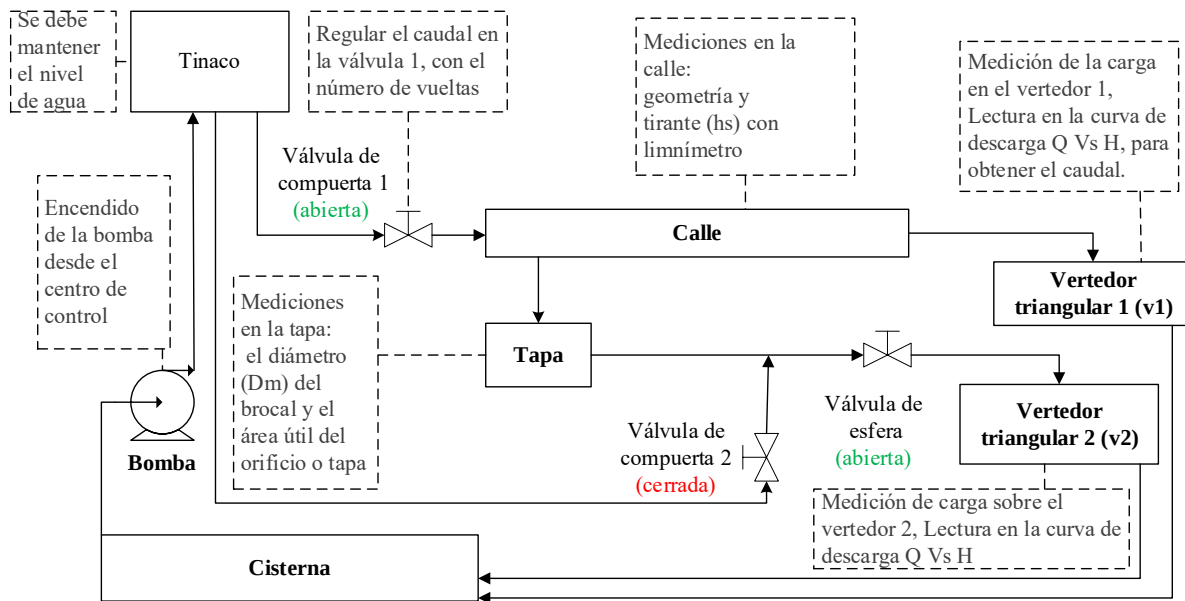


Figura 3-30. Diagrama de funcionamiento del modelo físico para el escenario 1.

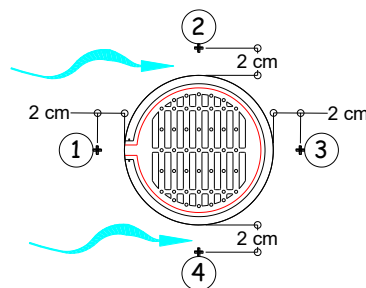


Figura 3-31. Puntos alrededor del pozo donde se tomaron las lecturas de tirante.

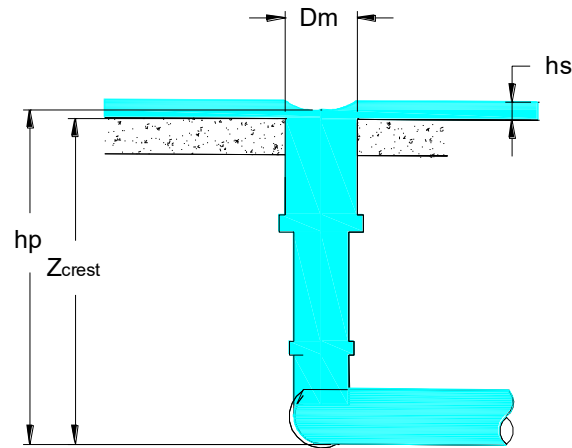


Figura 3-32 Sumidero ahogado, escenario 2

Donde:

D_m es el diámetro del brocal del pozo de visita, en m.

Z_{crest} es la diferencia de altura desde el fondo de la tubería hasta el nivel de la superficie, en m.

h_s es el tirante en la calle, en m.

h_p es el tirante medido desde la base de la tubería al centro del brocal, en m.

Los pasos para realizar los experimentos del escenario 2 de sumidero ahogado se muestra en la Figura 3-33, para los tres casos; sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido.

Procedimiento para el desarrollo de los experimentos.

- 1) Se abre la válvula de compuerta 1 y se genera el remanso con el vertedor rectangular para ahogar la descarga. Se toma lectura de la carga sobre el vertedor triangular 1.
- 2) Se abre la válvula de esfera que permite el paso del caudal hacia el vertedor 2.

- 3) Se toma lectura de tirante sobre la calle en los cuatro puntos (Figura 3-30).
- 4) Se toma lectura de las cargas hidráulicas en los vertedores 1 y 2, para determinar el caudal que se capta en los tres casos medido corresponde al que descarga en el vertedor 2, o la diferencia entre ellos.
- 5) Se continúa abriendo la válvula de compuerta 1 para aumentar el caudal, se espera la estabilización del caudal y se repiten los pasos del 1 al 4, diez veces para cada caudal establecido.
- 6) Para el cálculo teórico del caudal se utilizan las ecuaciones 2-21 y 2-22.

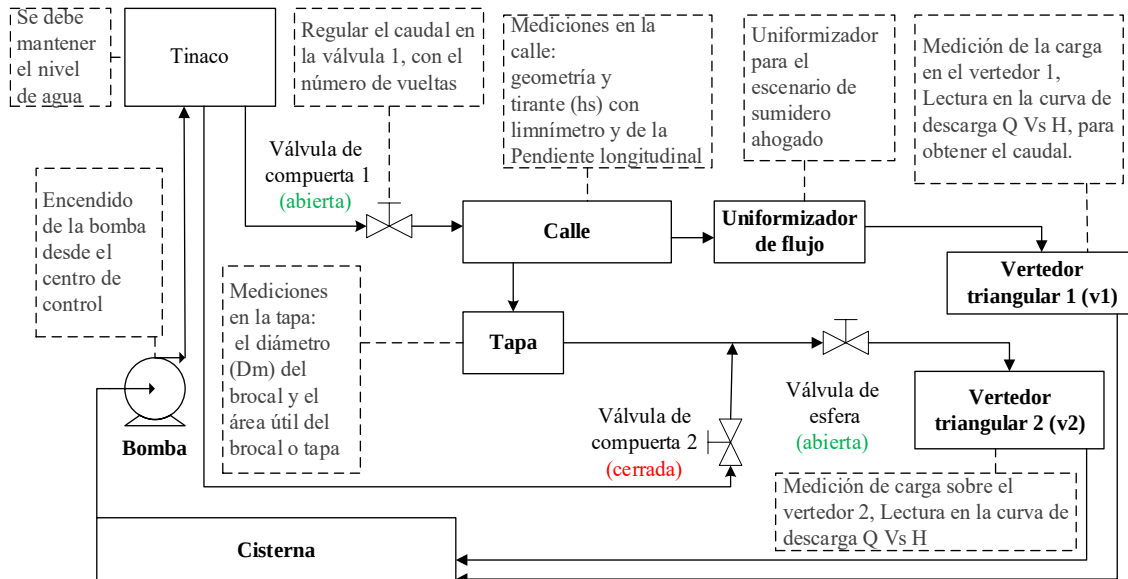


Figura 3-33. Diagrama de funcionamiento del modelo físico para el escenario 2.

3.3.3 Escenario 3. Surgencia ahogada.

Este escenario se toma en cuenta surgencia ahogada (Figura 3-34), se establece un caudal en la calle y posteriormente se envía caudal que genera surgencia. Para los casos de tapa de concreto y rejilla de fierro fundido se fue suministrando caudal hasta lograr las siguientes tres etapas: la tapa permanece sobre el brocal después la tapa inicia su movimiento sobre el brocal y finalmente

la tapa se desplaza hacia aguas abajo (en el caso de la tapa de concreto), en este escenario se midió también la presión con un piezómetro.

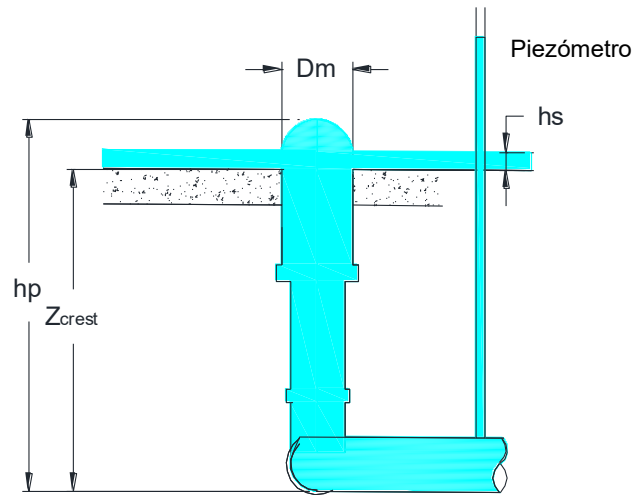


Figura 3-34 Surgencia ahogada, escenario 3

Donde:

D_m es el diámetro del brocal del pozo de visita, en m.

Z_{crest} es la diferencia de altura desde el fondo de la tubería hasta el nivel de la superficie, en m.

h_s es el tirante en la calle, en m.

h_p es la carga hidráulica medida desde la base de la tubería al centro del brocal, en m.

Los pasos para realizar los experimentos del escenario 3 de surgencia ahogada se muestran en la figura 3-35, se realizaron para los tres casos sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido y son los siguientes:

Procedimiento para el desarrollo de los experimentos.

- 1) La válvula de esfera debe estar cerrada
- 2) Se abre la válvula de compuerta 1 y se espera a que se estabilice el gasto.
- 3) Medir la carga hidráulica sobre el vertedor 1.

- 4) Se abre la válvula de compuerta 2 y se espera que se estabilice el gasto.
- 5) Medir la altura de la columna de agua en el piezómetro.
- 6) Con el limnómetro se miden los tirantes en los cuatro puntos ubicados en el perímetro del orificio.
- 7) Se toma la segunda lectura de la carga hidráulica en el vertedor 1, para saber cuánta agua se adicionó por surgencia.
- 8) Se continúa abriendo la válvula de compuerta 2 para aumentar el caudal, se espera la estabilización del caudal y se repiten los pasos del 3 al 7, diez veces para cada caudal establecido. Se realiza lo mismo para los tres casos: sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido.

Para el cálculo teórico del caudal se utiliza la ecuación 2-23.

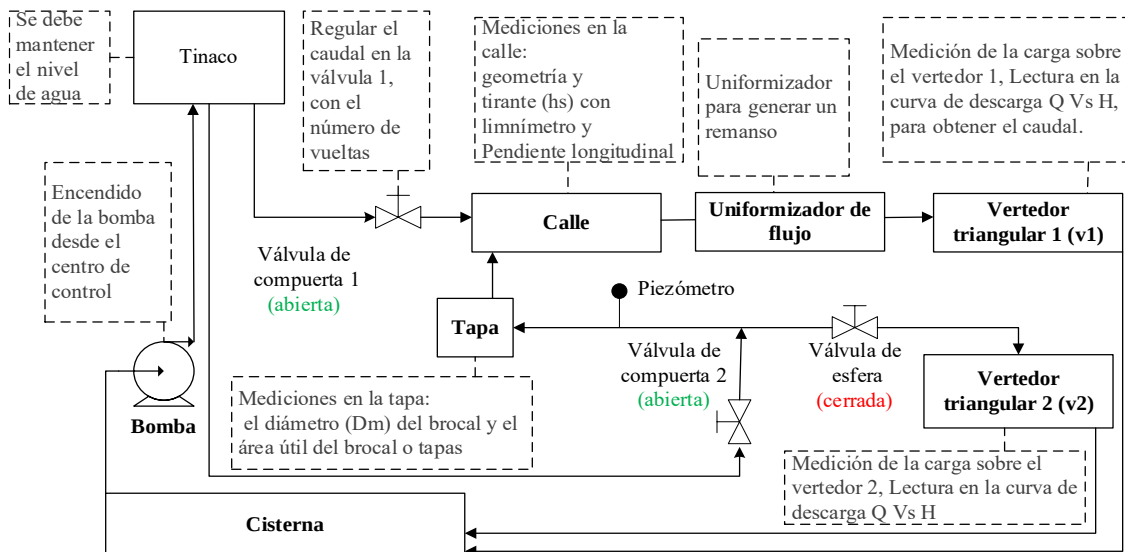


Figura 3-35 Diagrama de funcionamiento del modelo físico para el escenario 3.

3.3.4 Escenario 4. Surgencia libre.

En este escenario se toma en cuenta surgencia libre (Figura 3-36), se envía caudal que genera surgencia. Para los casos de tapa de concreto y rejilla de fierro fundido se continúa enviando caudal hasta lograr las siguientes tres etapas del fenómeno: la tapa permanece sobre el brocal,

la tapa inicia su movimiento sobre el brocal y la tapa se desplaza completamente del brocal hacia aguas abajo en el sentido de la corriente, en este escenario se midió también la presión con un piezómetro.

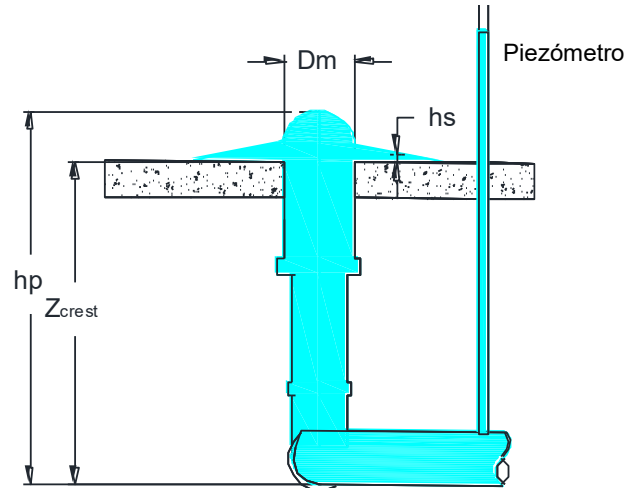


Figura 3-36 Surgencia libre, escenario 4

Los pasos para realizar los experimentos del escenario 4 correspondiente a surgencia libre se procede de acuerdo con el diagrama de la figura 3-37 y se repiten para los tres casos; sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido:

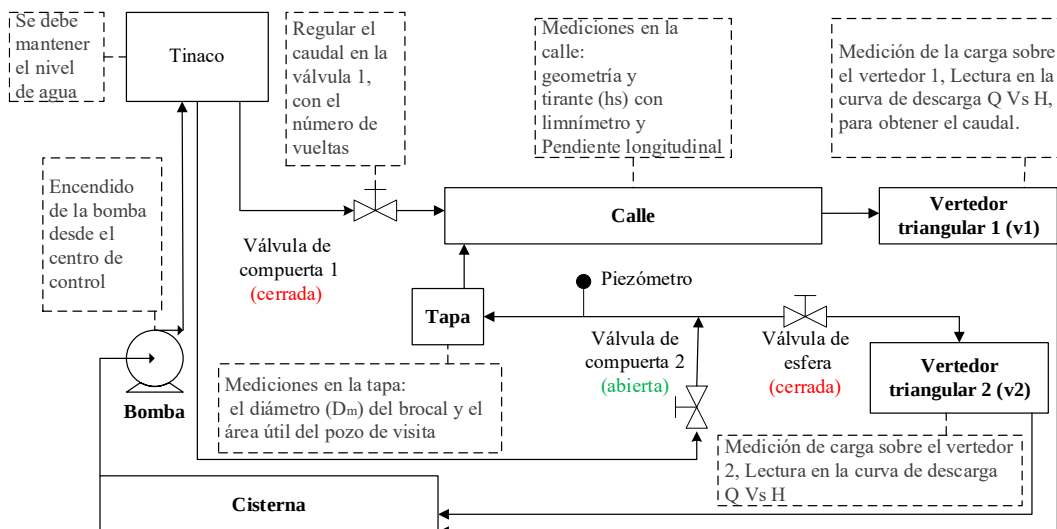


Figura 3-37 Diagrama de funcionamiento del modelo físico para el escenario 4.

Procedimiento para el desarrollo de los experimentos.

- 1) La válvula de compuerta 1 debe estar cerrada
- 2) La válvula de esfera debe estar cerrada
- 3) Se abre la válvula de compuerta 2 y se espera que se estabilice el gasto.
- 4) Se toma lectura de la presión en el piezómetro.
- 5) Se toma lectura de tirante sobre el orificio en los cuatro puntos.
- 6) Se toma la segunda lectura de la carga hidráulica en el vertedor 1, para saber cuánta agua se adicionó por surgencia.
- 7) Se continúa abriendo la válvula de compuerta 2 para aumentar el caudal, se espera la estabilización del caudal y se repiten los pasos del 2 al 5. Se realiza lo mismo diez veces para los tres casos; sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido.

Para el cálculo teórico del caudal se utiliza la ecuación 2-23.

3.4 Modelación en el Modelo numérico IBER

Haciendo uso del modelo numérico IBER se realizaron las simulaciones del modelo a escala real de todos los elementos y de las variables que influyen para la función de sumidero y fuente, con las que se simuló la interacción del flujo superficial y de los colectores del sistema de alcantarillado con la finalidad de conocer el comportamiento del agua utilizando los coeficientes de descarga obtenidos experimentalmente.

La simulación en IBER lleva a cabo en tres etapas: preproceso, proceso y un postproceso. A continuación, se describe cada etapa.

3.4.1 Preproceso en IBER

1. Definir la topografía es la primera etapa para crear un modelo en IBER, para lo cual se debe generar la malla mediante un análisis de tamaño de malla.

2. Se asigna el caudal y la sección de entrada, para el caudal puede ser un caudal fijo o un hidrograma.
3. Se asigna la sección de salida. Puede ser una o varias secciones de salida.
4. El uso de suelo se asigna de la lista de los coeficientes que trae cargados el IBER, también se puede asignar un material que no se encuentre en la lista precargada.
5. Las condiciones iniciales se asignan dependiendo si el sistema tiene un caudal base o en condiciones sin agua (seco).

El preproceso del modelo en estudio se consideró concreto pulido ($n=0.011$) y condiciones iniciales seco o con un tirante dependiendo del escenario (Figura 3-38).

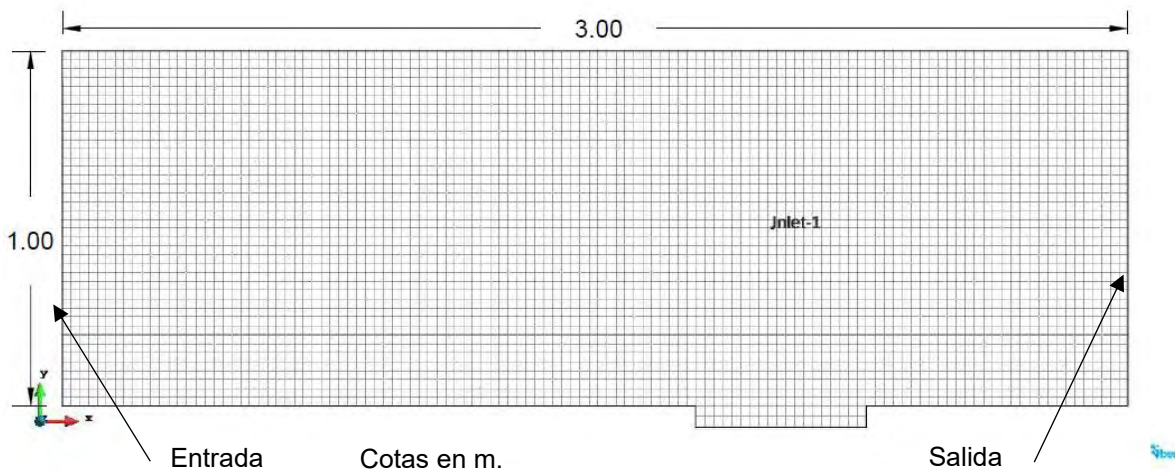


Figura 3-38 Malla y dimensiones del modelo en IBER (vista en planta)

Para considerar el uniformizador de flujo en IBER, para el escenario 1, se coloca aguas arriba una compuerta que simula dicha estructura como se muestra en la figura 3-39.

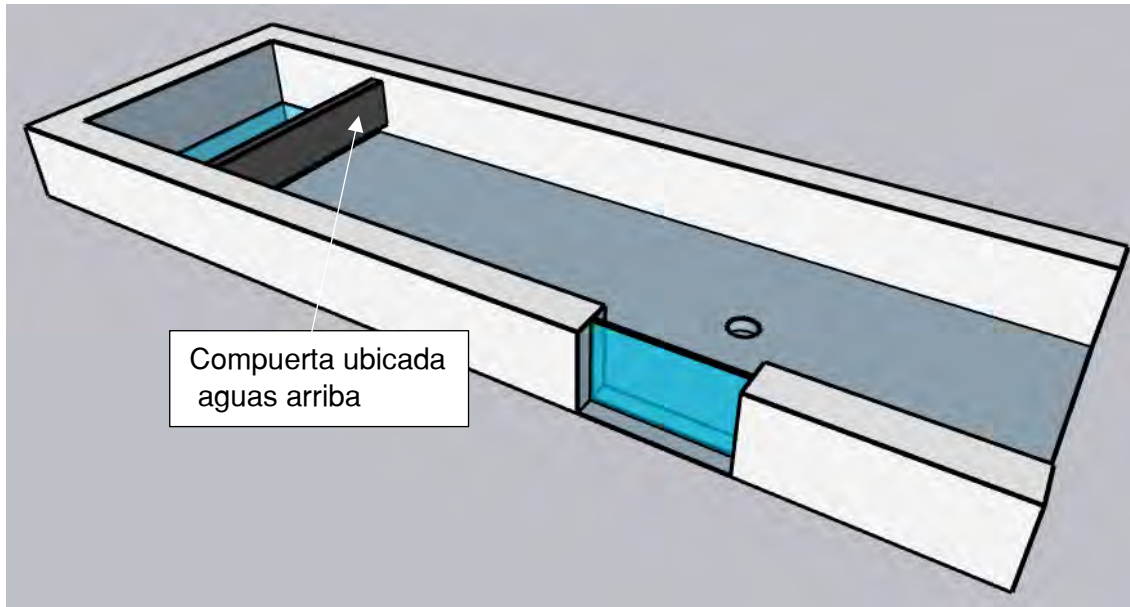


Figura 3-39 Condición interna (compuerta) en IBER para el escenario 1

Para de la modelación en IBER de los escenarios 2 y 3 la compuerta se coloca aguas abajo con lo cual se genera el remanso que garantiza la descarga ahogada, función que realiza el uniformizador en el modelo físico (Figura 3-40).

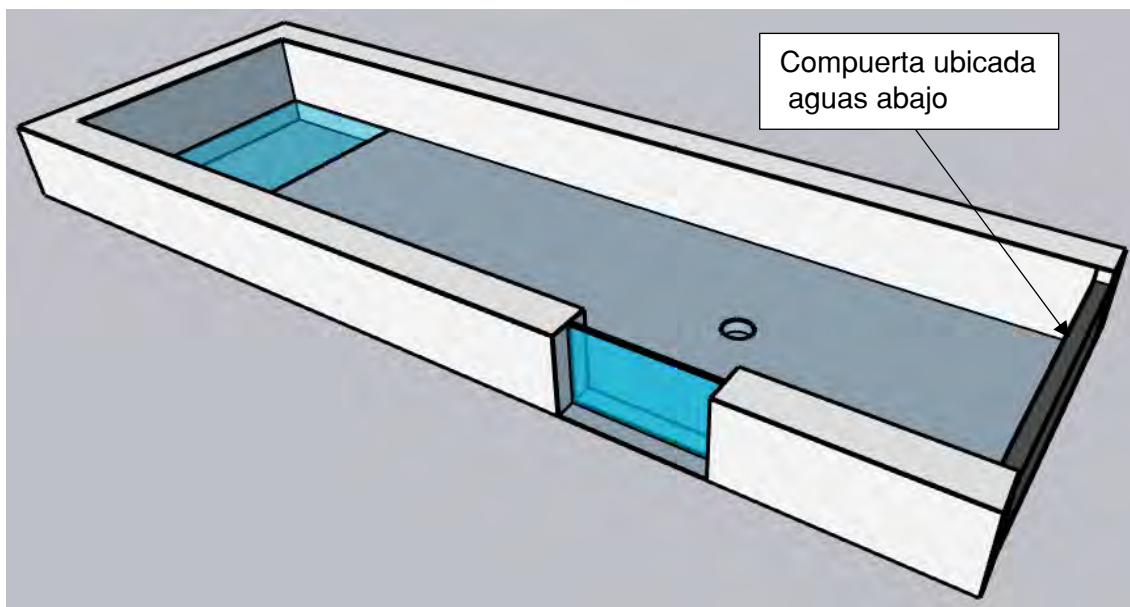


Figura 3-40 Condición interna (compuerta) en IBER para los escenarios 2 y 3.

3.4.1.1 Calibración del modelo en IBER

Antes de realizar las simulaciones en IBER, se debe calibrar el modelo para lo cual se midieron en el modelo físico en nueve puntos del perfil longitudinal para tres caudales.

La calibración se realizó tomando en cuenta tres diferentes caudales 8.9, 11.2 y 20 l/s de los cuales se midieron los tirantes en el modelo físico y estos tirantes se compararon con los obtenidos en el modelo numérico IBER. Además, se midió la velocidad en el modelo físico y se obtuvo un valor de 0.62 m/s para un caudal de 8.9 l/s, en estas condiciones se obtiene un número de Froude mayor a 1, por lo que se considera como condición de frontera al régimen supercrítico.

Los resultados de la comparación de los tirantes se muestran en la figura 3-41. En esta figura se observa turbulencia en los puntos medidos en el modelo físico.

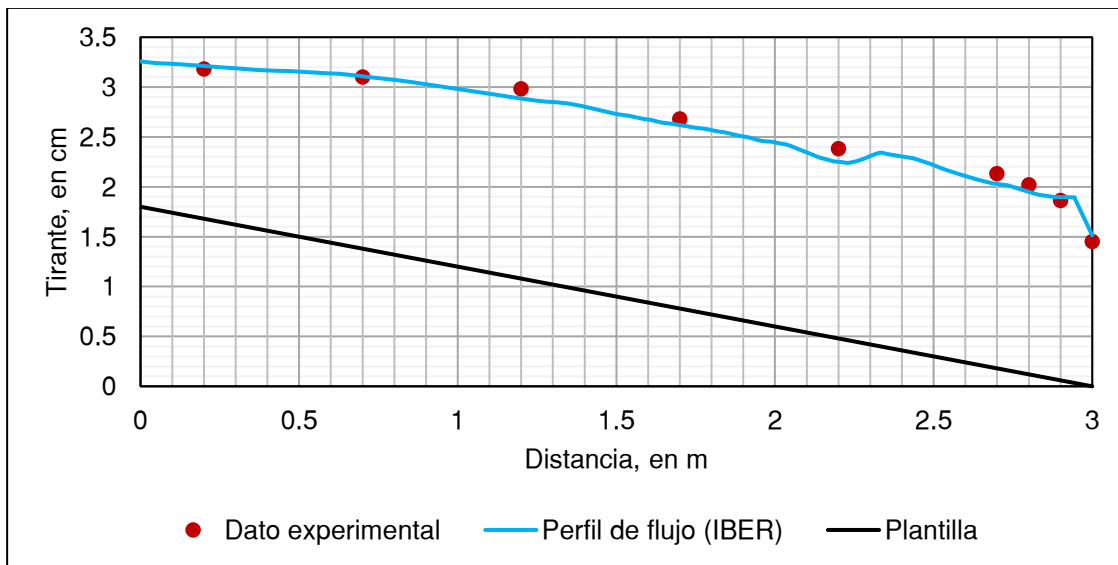


Figura 3-41 Perfil hidráulico de calibración para un caudal de 8.9 l/s

Para un caudal de 11.2 l/s se presenta una velocidad de 0.66 m/s, condiciones que se fijan aguas arriba por tratarse de un régimen supercrítico. Se realizaron las lecturas de los tirantes y la comparación se presentan en la Figura 3-42. El comportamiento varía en la parte central y en los extremos coincide con el perfil hidráulico obtenido en el modelo numérico IBER.

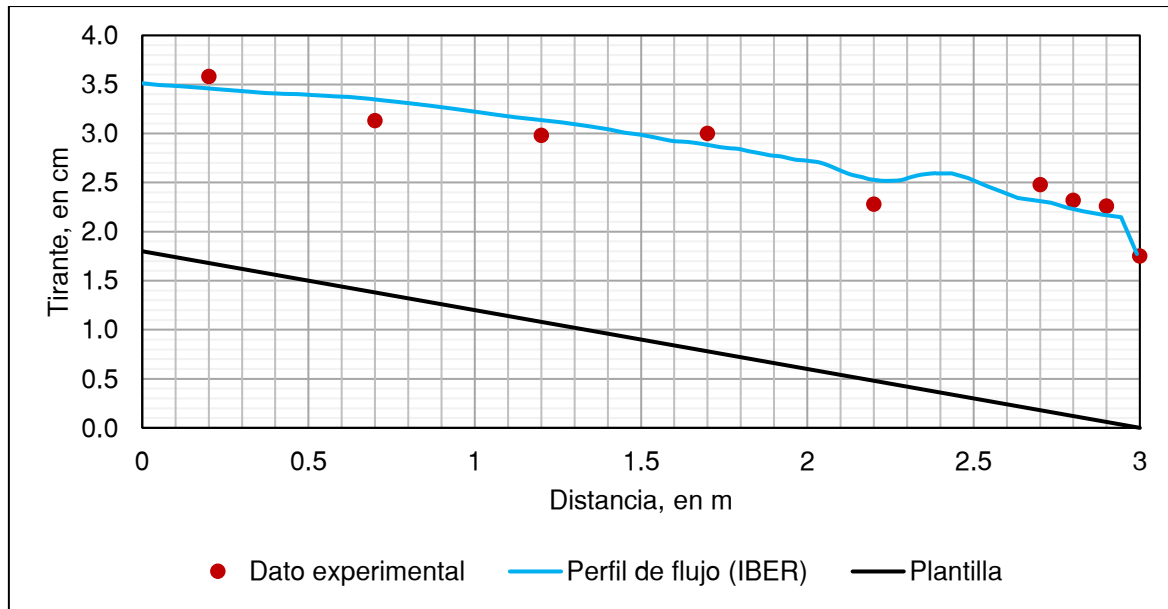


Figura 3-42 Perfil hidráulico de calibración para un caudal de 11.2 l/s

También, se midió la velocidad en el modelo físico y se obtuvo un valor de 0.92 m/s para un caudal de 0.02 m³/s. Para estas condiciones se obtiene un número de Froude mayor a 1, por lo que se considera como condición de frontera un régimen supercrítico, los resultados se muestran en la figura 3-43. En la figura se corrobora la existencia de turbulencia es los puntos medidos en el modelo físico con un comportamiento similar al perfil obtenido en el modelo numérico IBER.

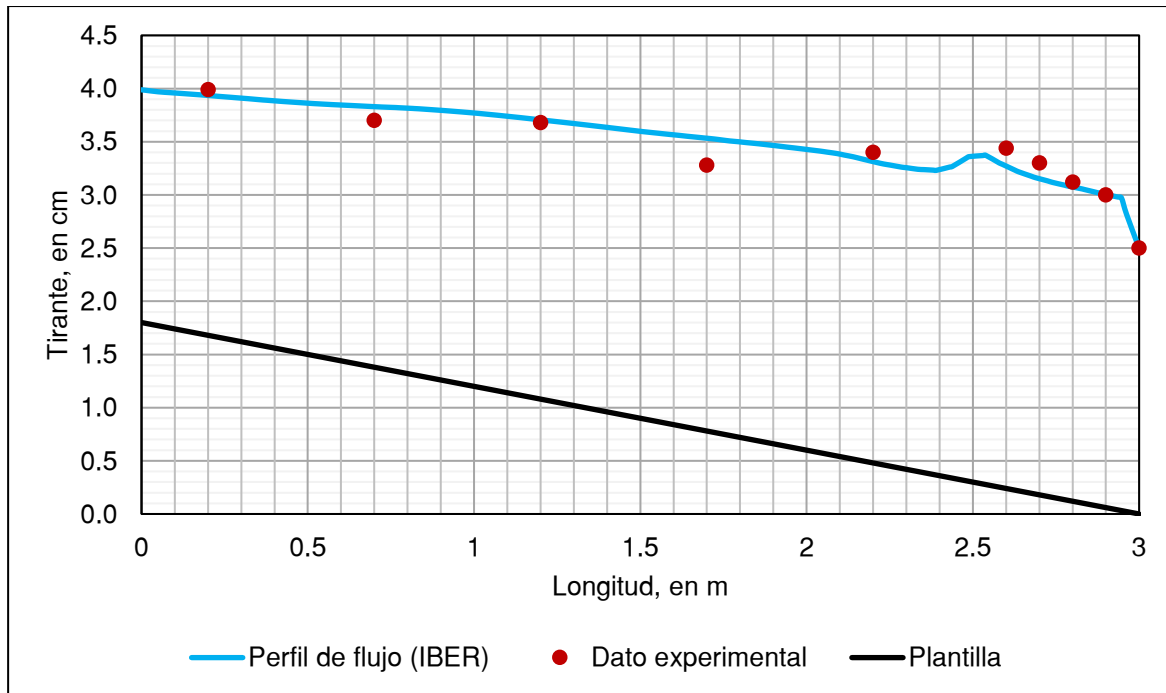


Figura 3-43 Perfil hidráulico de calibración para un caudal de 20 l/s

3.4.2 Proceso en IBER

En esta etapa, el modelo numérico realiza los cálculos tomando en cuenta todas las condiciones que se definieron en la etapa del preproceso. En esta etapa se revisaron los errores y advertencias se corrigieron y con ello se realizaron las simulaciones en el modelo numérico IBER para los diferentes escenarios.

3.4.3 Postproceso en IBER

En esta etapa se pueden observar los resultados, el modelo numérico IBER permite generar mapas con escala de colores de:

- Calado (tirante), en m.
- Número de Froude
- Caudal específico, en m^2/s .

- Velocidad, en m/s.
- Cota de agua, en m.

También permite generar gráficas de análisis hidráulico y topográfico en las cuales se puede observar:

- Evolución de punto.
- Gráfico de punto.
- Gráfico de línea.

Las simulaciones en IBER se realizaron considerando el elemento de fuente y sumidero para los tres casos; sin tapa, tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo, se presentan los resultados producto de experimentar los cuatro escenarios mencionados en 3.3. y de las simulaciones que se realizaron tomando en cuenta las dimensiones del modelo físico, empleando el modelo numérico bidimensional IBER. Se presentan primero los resultados obtenidos en el modelo físico y posteriormente los resultados obtenidos de las simulaciones en IBER.

4.1 Modelo físico

En este apartado se presentan los resultados del aforo de los vertedores que sirvieron para medir los caudales en el modelo físico, así como los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios. Los resultados se explican con la ayuda de figuras y fotografías correspondientes a cada caso (brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido).

4.1.1 Curvas de aforo de los vertedores

Para determinar las curvas de aforo se realizaron 10 repeticiones de la captación del caudal, obteniendo 87 datos experimentales para cada curva de aforo para el vertedor triangular 1 ubicado en el canal principal y 100 datos experimentales para el vertedor triangular 2 instalado en la margen derecha del modelo físico.

4.1.1.1 Curva de aforo para el vertedor triangular 1 (Caudal en la calle)

En la Figura 4-1, se presentan los datos experimentales del caudal en la calle que se obtuvieron con el método de volumen-tiempo utilizando el vertedor triangular 1, con su respectiva curva de ajuste (polinómica) la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2 = 0.99$. Mediante esta curva se pudieron determinar caudales mayores a los medidos, los cuales se consideran para surgencia ahogada cuando el caudal que transita por la calle es el máximo que puede alimentar el sistema.

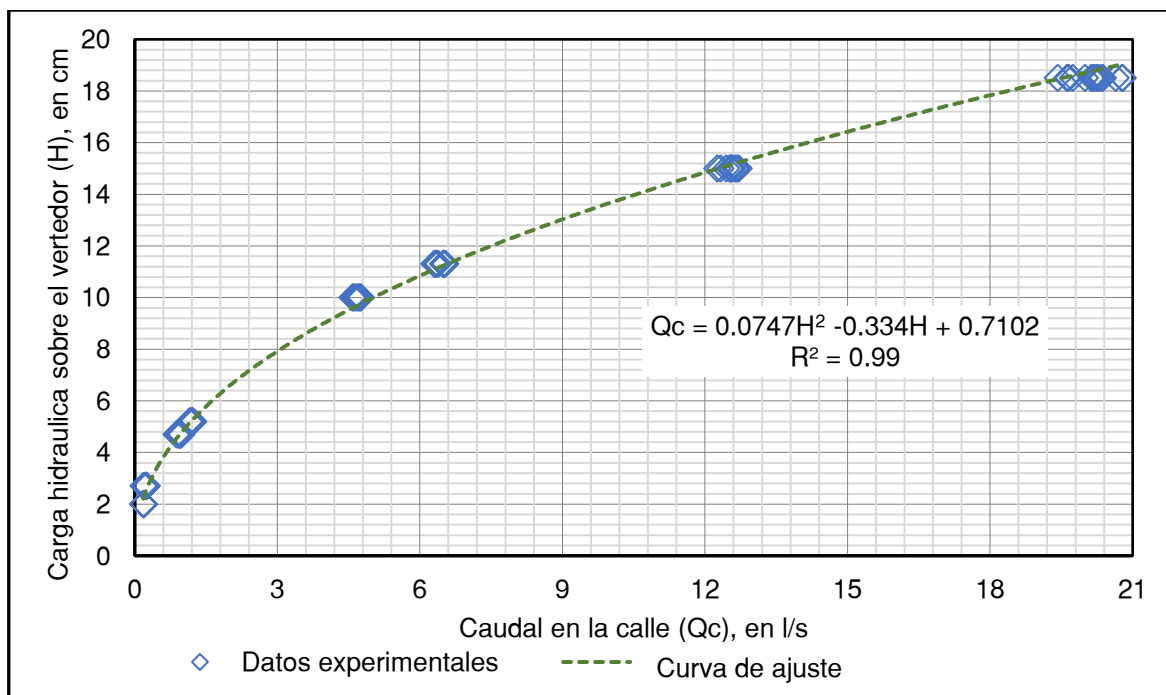


Figura 4-1 Curva de descarga del vertedor triangular 1 ($\theta=90^\circ$).

En la Tabla 4-1 se presentan los 87 datos experimentales correspondiente a ocho caudales, los cuales se establecieron y se tomaron las lecturas mediante el método de volumen-tiempo, llevando a cabo diez repeticiones de cada uno de éstos, con excepción de la carga sobre el vertedor de 18.5 cm para el cual se obtuvieron 17 lecturas. Para la carga hidráulica sobre el vertedor de 5.2 cm se tomaron 12 lecturas y para la carga hidráulica de 4.7 cm se consideraron 11 lecturas.

4.1.1.2 Curva de aforo para el vertedor triangular 2 (caudal en la tubería)

En la Figura 4-2 se muestra los datos experimentales y su respectiva curva de ajuste (polinómica) la cual presentó el mejor ajuste con una $R^2 = 0.99$ para el caudal captado por el pozo de visita. Mediante este ajuste se obtuvieron los caudales descargados por dicho vertedor, así como los caudales mayores a los aforados para el vertedor triangular 2.

Tabla 4-1 Datos experimentales del aforo del vertedor 1

H (cm)	Q (l/s)	H (cm)	Q (l/s)	H (cm)	Q (l/s)	H (cm)	Q (l/s)
18.5	20.25	15	12.55	11.3	6.33	10	4.60
18.5	20.78	15	12.67	11.3	6.34	10	4.76
18.5	20.37	15	12.33	11.3	6.39	10	4.72
18.5	20.26	15	12.54	11.3	6.32	10	4.68
18.5	20.33	15	12.52	11.3	6.31	10	4.62
18.5	20.27	15	12.64	11.3	6.54	10	4.58
18.5	19.42	15	12.26	11.3	6.50	10	4.76
18.5	20.65	15	12.58	11.3	6.51	10	4.62
18.5	19.64	15	12.71	11.3	6.49	10	4.68
18.5	20.00	15	12.45	11.3	6.50	10	4.72
5.2	1.21	4.7	0.88	2.7	0.19	2	0.18
5.2	1.23	4.7	0.97	2.7	0.23	2	0.19
5.2	1.22	4.7	0.94	2.7	0.24	2	0.19
5.2	1.17	4.7	0.98	2.7	0.24	2	0.19
5.2	1.21	4.7	0.96	2.7	0.24	2	0.19
5.2	1.20	4.7	0.94	2.7	0.25	2	0.19
5.2	1.16	4.7	0.94	2.7	0.24	2	0.19
5.2	1.18	4.7	0.96	2.7	0.24	2	0.19
5.2	1.20	4.7	0.93	2.7	0.25	2	0.19
5.2	1.22	4.7	0.95	2.7	0.24	2	0.19

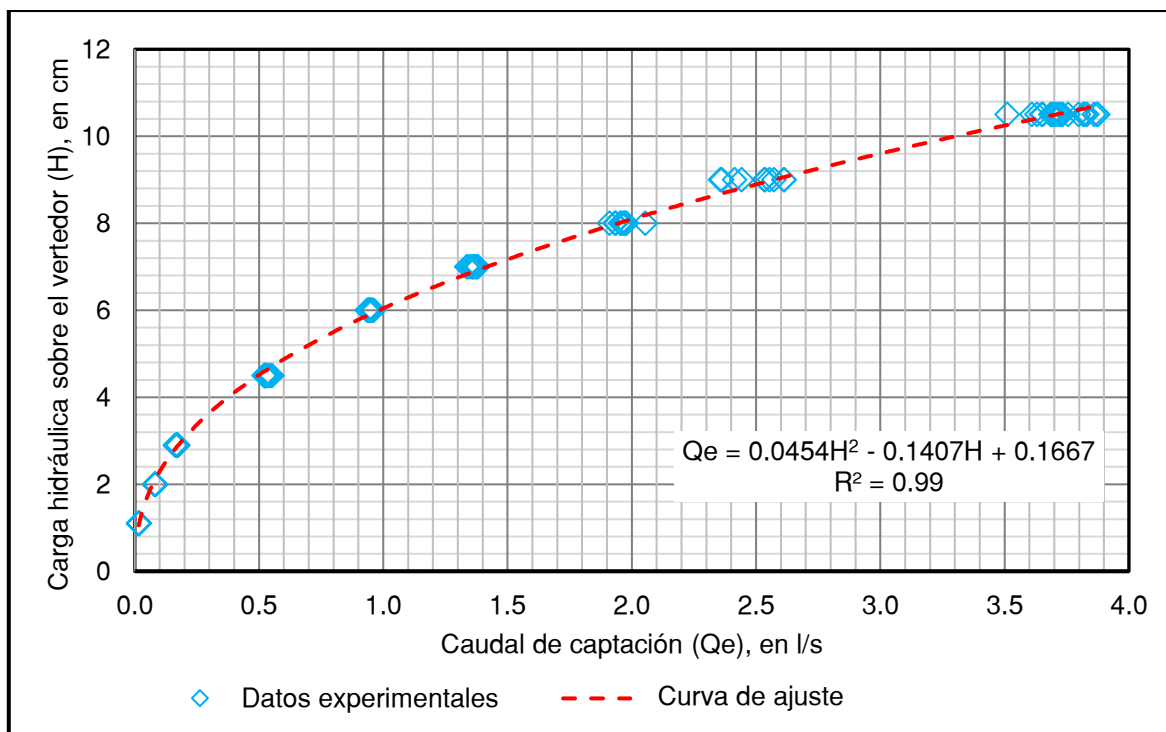


Figura 4-2 Curva de descarga del vertedor 2 ($\theta=60^\circ$).

Mientras que en la Tabla 4-2 se muestran los 100 datos experimentales, correspondientes a 9 caudales diferentes, los cuales una vez establecidos se realizaron diez repeticiones de cada uno, a excepción de los correspondientes a la carga hidráulica de 10.5 cm, para el cual se tomaron 20 lecturas. Se realizó la toma de lecturas como se explica ampliamente en el capítulo 3 referente Materiales y métodos.

A continuación, se presentan los resultados de los cuatro escenarios. Primero para el brocal sin tapa, después los resultados de la tapa de concreto y al final de cada escenario los resultados obtenidos en la experimentación con la rejilla de hierro fundido.

4.1.2 Resultados de los experimentos para el Escenario 1

Los resultados que se presentan a continuación son los referentes al funcionamiento del modelo físico de acuerdo con el esquema presentado en la figura 3.29 del capítulo 3, que corresponde a Sumidero libre, para la tapa de concreto y para la rejilla de hierro fundido, la descarga llega a ahogarse.

Tabla 4-2 Datos experimentales del aforo del vertedor 2

H (cm)	Q (l/s)	H (cm)	Q (l/s)	H (cm)	Q (l/s)	H (cm)	Q (l/s)	H (cm)	Q (l/s)
10.5	3.630	9	2.414	8	1.936	7	1.376	6	0.952
10.5	3.873	9	2.554	8	2.054	7	1.362	6	0.955
10.5	3.733	9	2.571	8	1.974	7	1.381	6	0.942
10.5	3.511	9	2.535	8	1.963	7	1.336	6	0.942
10.5	3.610	9	2.442	8	1.955	7	1.375	6	0.943
10.5	3.875	9	2.358	8	1.955	7	1.358	6	0.949
10.5	3.718	9	2.361	8	1.910	7	1.340	6	0.935
10.5	3.698	9	2.533	8	1.932	7	1.368	6	0.944
10.5	3.650	9	2.613	8	1.979	7	1.350	6	0.962
10.5	3.727	9	2.612	8	1.970	7	1.361	6	0.937
10.5	3.831	4.5	0.522	2.9	0.168	2	0.081	1.1	0.016
10.5	3.690	4.5	0.523	2.9	0.172	2	0.083	1.1	0.017
10.5	3.654	4.5	0.524	2.9	0.163	2	0.081	1.1	0.016
10.5	3.756	4.5	0.552	2.9	0.172	2	0.081	1.1	0.016
10.5	3.817	4.5	0.526	2.9	0.170	2	0.081	1.1	0.016
10.5	3.706	4.5	0.521	2.9	0.171	2	0.082	1.1	0.016
10.5	3.861	4.5	0.542	2.9	0.172	2	0.081	1.1	0.017
10.5	3.797	4.5	0.535	2.9	0.173	2	0.082	1.1	0.016
10.5	3.822	4.5	0.526	2.9	0.168	2	0.082	1.1	0.016
10.5	3.686								

4.1.2.1 Sumidero libre en el brocal sin tapa.

En la Figura 4.3, se presenta el comportamiento del tirante sobre la calle vs. el caudal captado, obteniendo un caudal máximo captado de 3.3 l/s al cual le corresponde una carga hidráulica sobre el orificio de 2.5 cm. La curva de ajuste tiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0.96$, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.12 y el error absoluto medio (MAE) = 0.10.

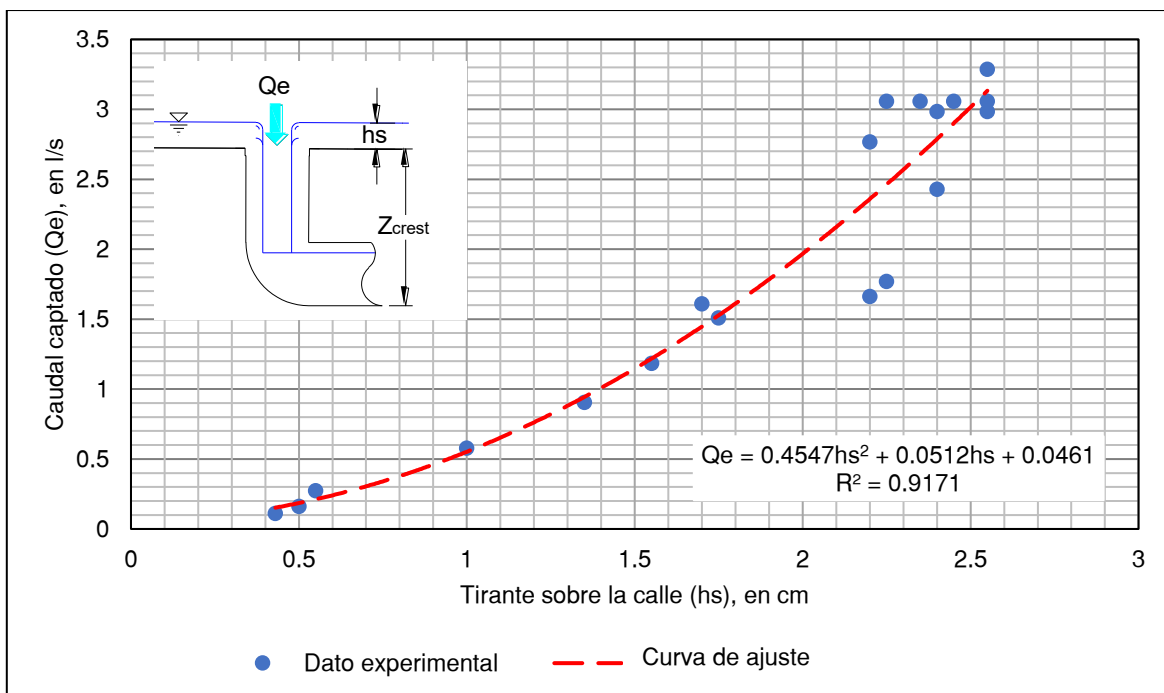


Figura 4-3 Variación del Caudal captado respecto al tirante sobre la calle, para sumidero libre en el brocal sin tapa.

En la Figura 4-4 se muestra la eficiencia del brocal sin tapa para el escenario de sumidero libre, la cual oscila entre el 15 y 20 % de captación del caudal que se envía por la calle. Se experimentó con un caudal máximo de 20 l/s de los cuales el orificio pueden captar 3 l/s. Por otra parte, se observa que a partir de los 15 l/s circulando por la calle, el caudal de captación se estabiliza en 3 l/s. Estos valores sirvieron de referencia para las eficiencias de la tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido, comparativa que se presenta en el capítulo 5 referente al análisis de resultados.

Para este escenario el brocal trabaja como vertedor y con los datos medidos en el modelo físico, el coeficiente de descarga se obtuvo graficando los datos de caudal captado teórico vs. el caudal captado real, determinando su línea de tendencia. En la Figura 4-5, se presenta la ecuación de la línea de tendencia, en la cual, la pendiente de esta línea recta representa el coeficiente de descarga (C_o). Para este escenario se obtuvo un coeficiente de descarga $C_o = 0.74$ con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.91$, raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.32 y el error absoluto medio (MAE) = 0.24.

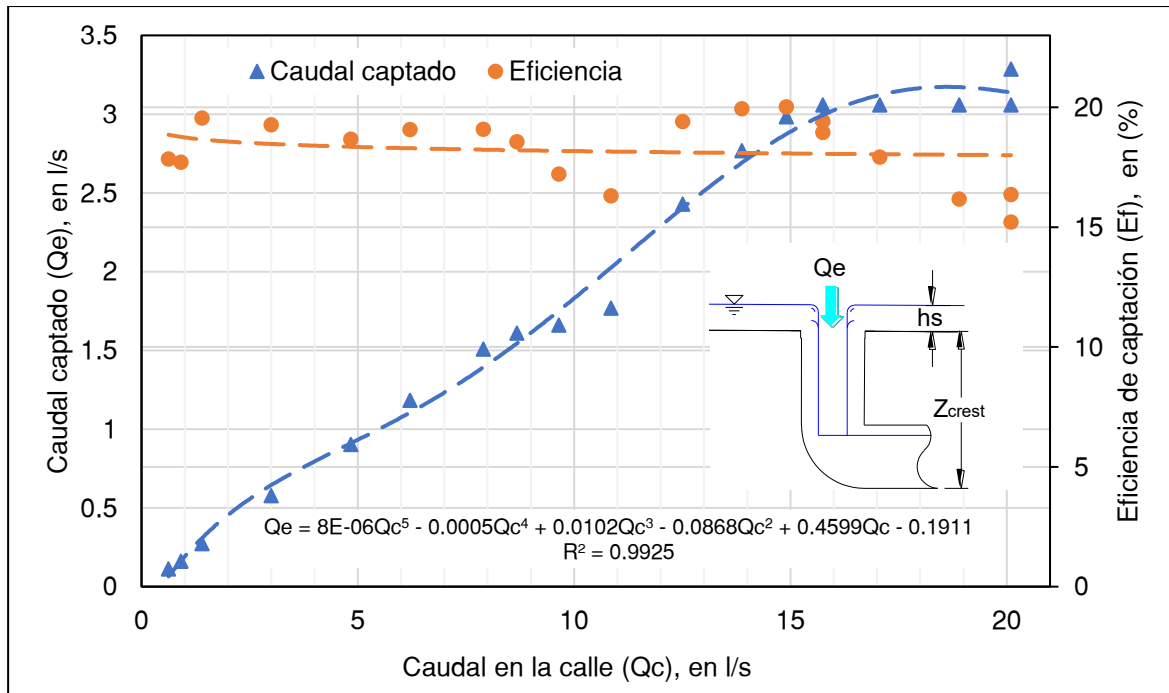


Figura 4-4 Eficiencia de captación del orificio sin tapa, considerando sumidero libre.

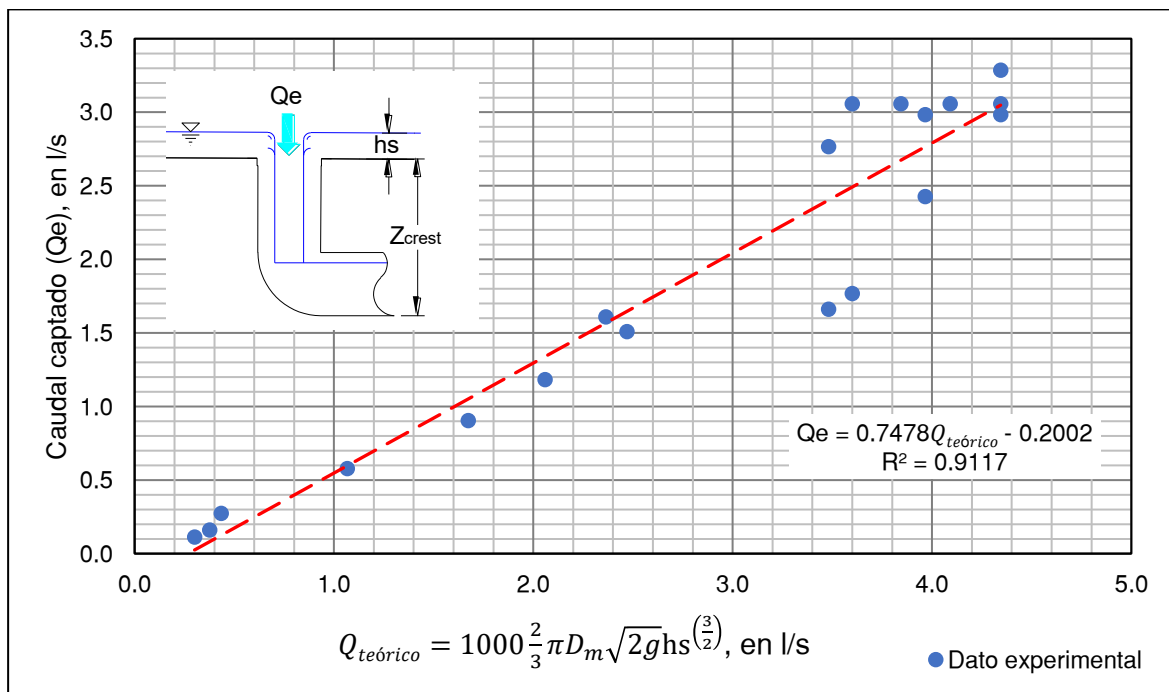


Figura 4-5 Coeficiente de descarga para sumidero libre en brocal sin tapa.

4.1.2.2 Sumidero libre en la tapa de concreto

Los resultados experimentales de sumidero libre en la tapa de concreto se presentan en las siguientes figuras. En la Figura 4-6, se representa el caudal máximo captado el cual es de 0.4 l/s, lo cual en el prototipo representa un caudal de captación de 35.27 l/s, que comparado con el captado por la rejilla de fierro fundido y por el brocal sin tapa, este es muy pequeño incluso insignificante, lo que demuestra que la tapa de concreto no sirve como medio de captación de agua que escurre por la calle. Para la curva de ajuste se obtuvo la raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.23 y el error absoluto medio (MAE) = 0.16.

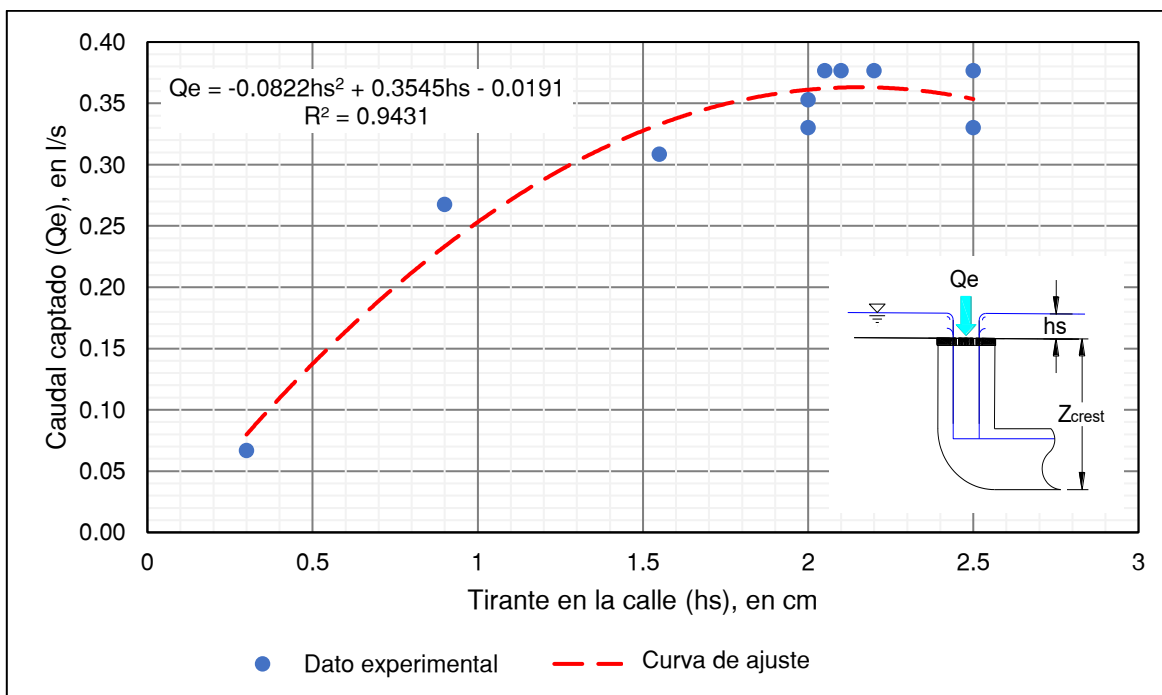


Figura 4-6 Variación del Caudal captado (Q_e) respecto al tirante sobre la calle (h_s), para sumidero libre con tapa de concreto

Para la eficiencia de la tapa de concreto como se observa en la figura 4-7, los valores se encuentran entre 13 y 2 %, es decir de los 20 l/s que transitan por la calle, la tapa de concreto sólo logra captar 0.4 l/s. Resultando que a medida que el caudal aumenta en la calle, el caudal que capta la tapa tiende a mantenerse constante, esto se debe a la poca área hidráulica disponible.

Resultados

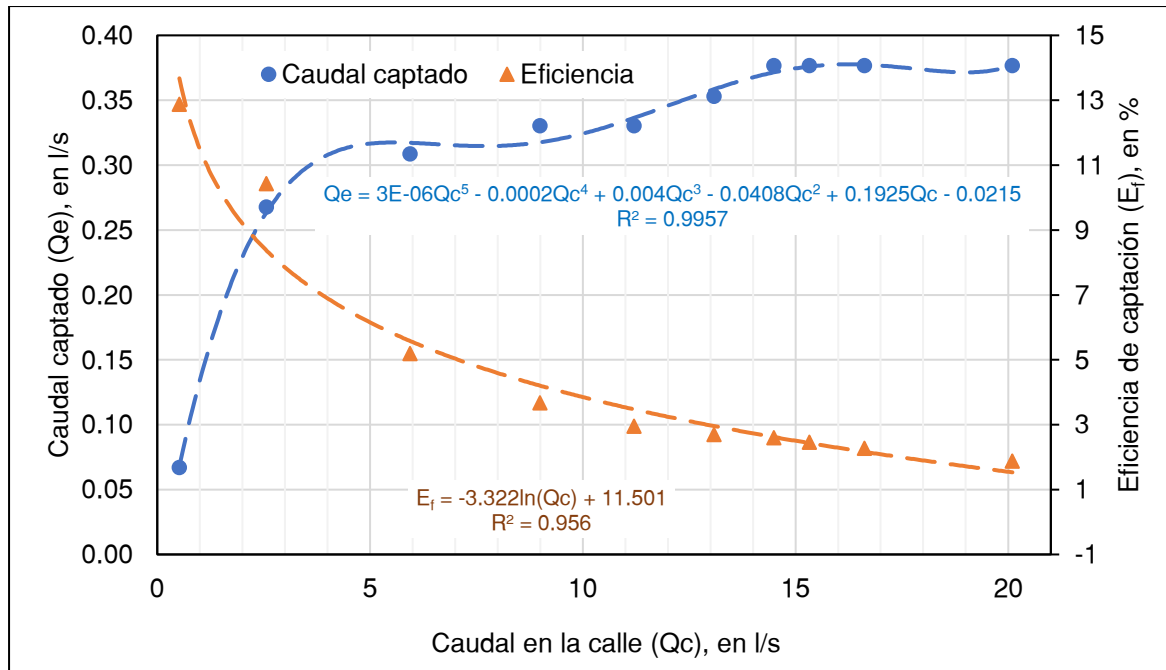


Figura 4-7 Eficiencia de captación, sumidero libre en la tapa de concreto

En la figura 4-8 se muestra que, el coeficiente de descarga de la tapa de concreto es $C_o = 0.34$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.87$, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.03 y el error absoluto medio (MAE) = 0.02.

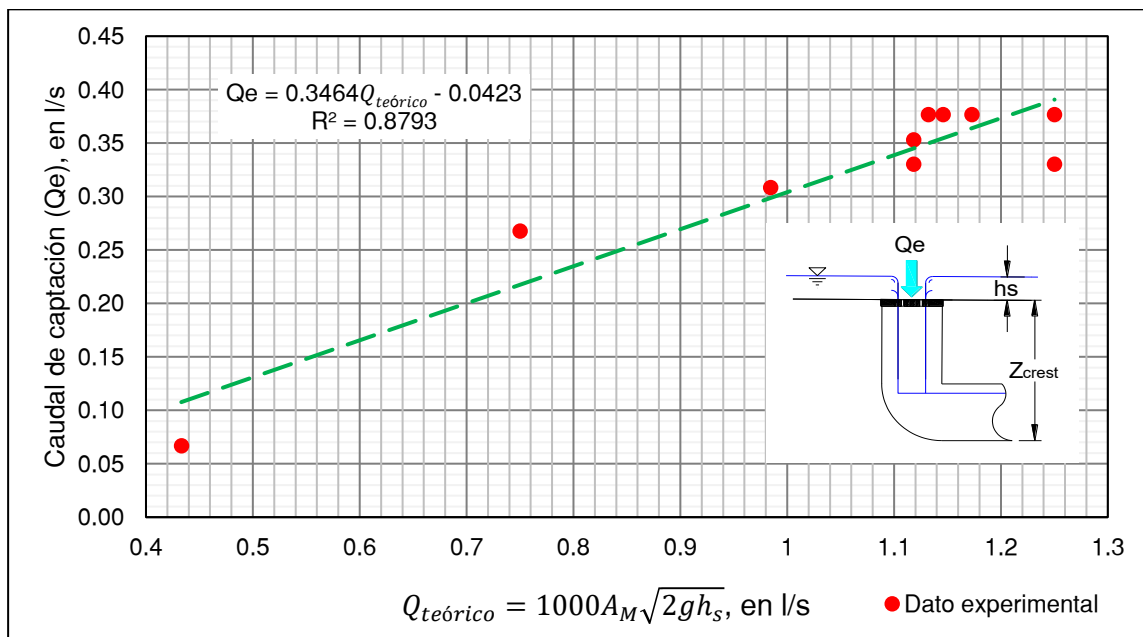


Figura 4-8 Coeficiente de descarga para sumidero libre en la tapa de concreto.

4.1.2.3 Sumidero libre en la rejilla de fierro fundido

En este apartado se presentan los resultados de la experimentación del escenario 1 (sumidero libre) con la rejilla de fierro fundido, las lecturas del tirante en la calle contra el caudal captado y la eficiencia se presentan en la misma gráfica y finalmente su coeficiente de captación.

El caudal máximo captado es del orden de 1.7 l/s para un tirante en la calle de 2.7 cm (Figura 4.9), que de acuerdo con la escala de caudales 1:88.18, representan en el prototipo un caudal de 149.9 l/s. Para la recta de ajuste se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.92$, la raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.12 y el error absoluto medio (MAE) = 0.1.

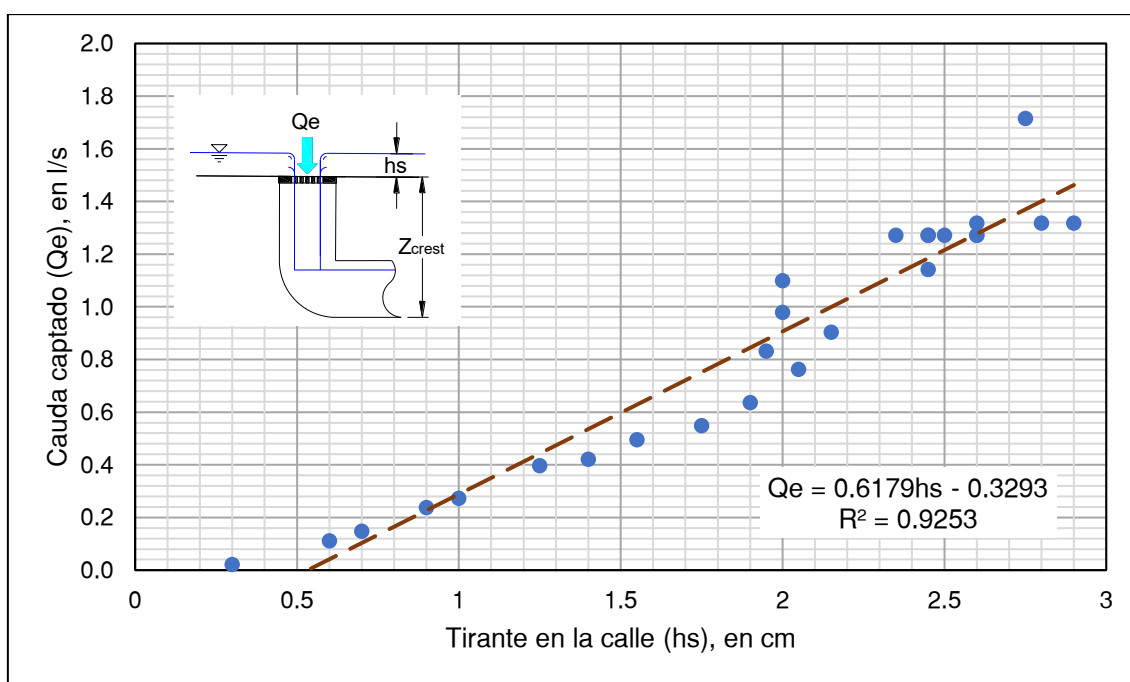


Figura 4-9 Variación del Caudal captado (Q_e) respecto al tirante sobre la calle (h_s), para sumidero libre en la rejilla de fierro fundido.

La eficiencia de la rejilla de fierro fundido indica que dicha rejilla capta entre el 8 y 12% del agua que circula por la calle, como se presenta en la figura 4-10.

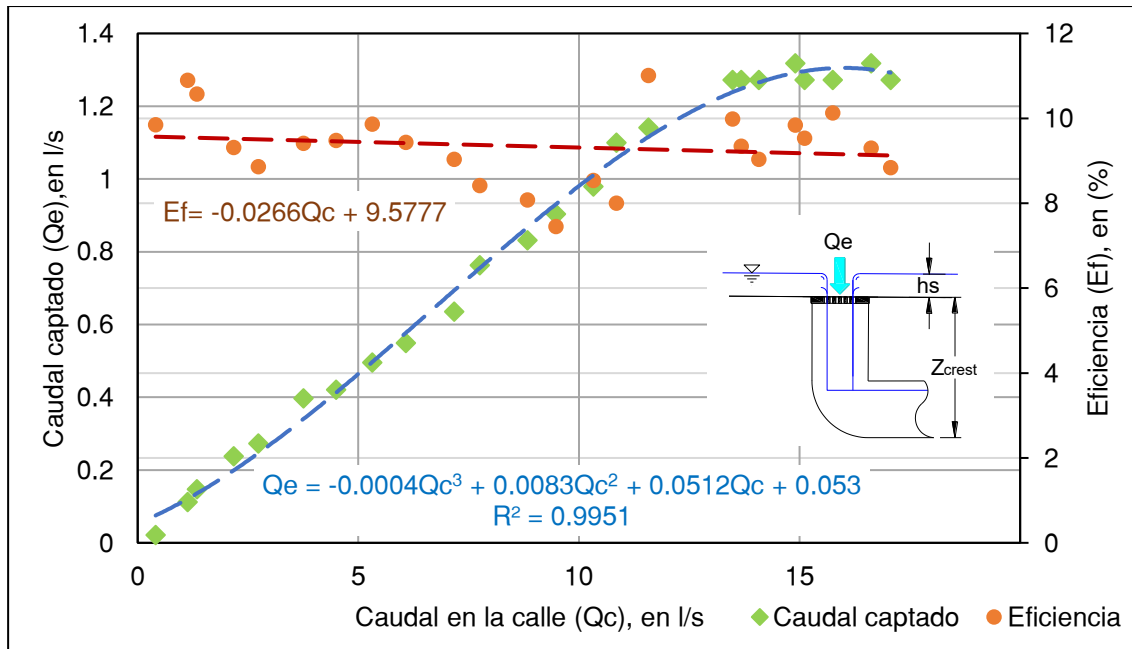


Figura 4-10 Eficiencia de captación, sumidero libre en la rejilla de fierro fundido.

El coeficiente de descarga para sumidero libre de la rejilla de fierro fundido es del orden de 0.62, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.97$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.03 y un error absoluto medio (MAE) = 0.025 (Figura 4-11).

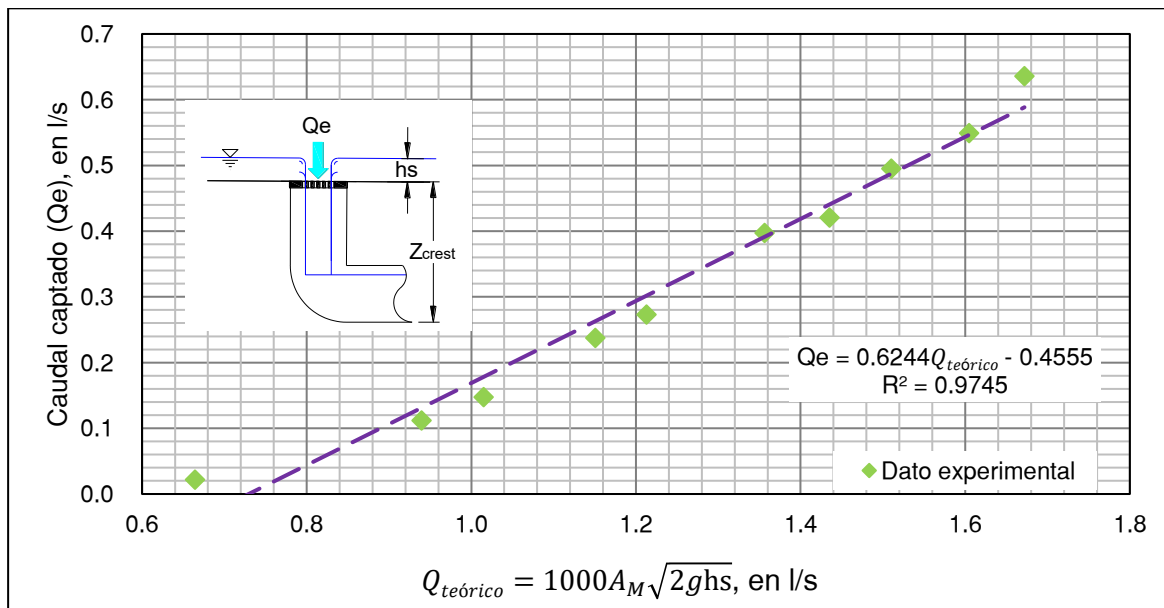


Figura 4-11 Coeficiente de descarga para sumidero libre en la rejilla de fierro fundido.

4.1.3 Resultados obtenidos de los experimentos en condiciones del Escenario 2

Los resultados presentados a continuación son producto de la experimentación realizada en el modelo físico de acuerdo con el esquema presentado en la figura 3.32, para sumidero ahogado.

4.1.3.1 Sumidero ahogado sin tapa

En la figura 4.12, se observa que el caudal máximo captado es de 3.5 l/s, lo cual representa en el prototipo un caudal de 308.63 l/s. También indica que la tendencia del caudal llega a un máximo con un tirante en la calle de 5.5 cm y a partir de ahí, no importa que la carga hidráulica en la calle (tirante) aumente ya que, la capacidad de captación tiende a mantenerse constante. Para la curva de ajuste se obtiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0.98$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.15 y un error absoluto medio (MAE) = 0.11.

Para sumidero ahogado, se obtiene una eficiencia para el brocal sin tapa, del orden del 70% para un caudal en la calle de 4 l/s y después decrece hasta una eficiencia de 20% para caudales de 18 a 20 l/s (Figura 4-13).

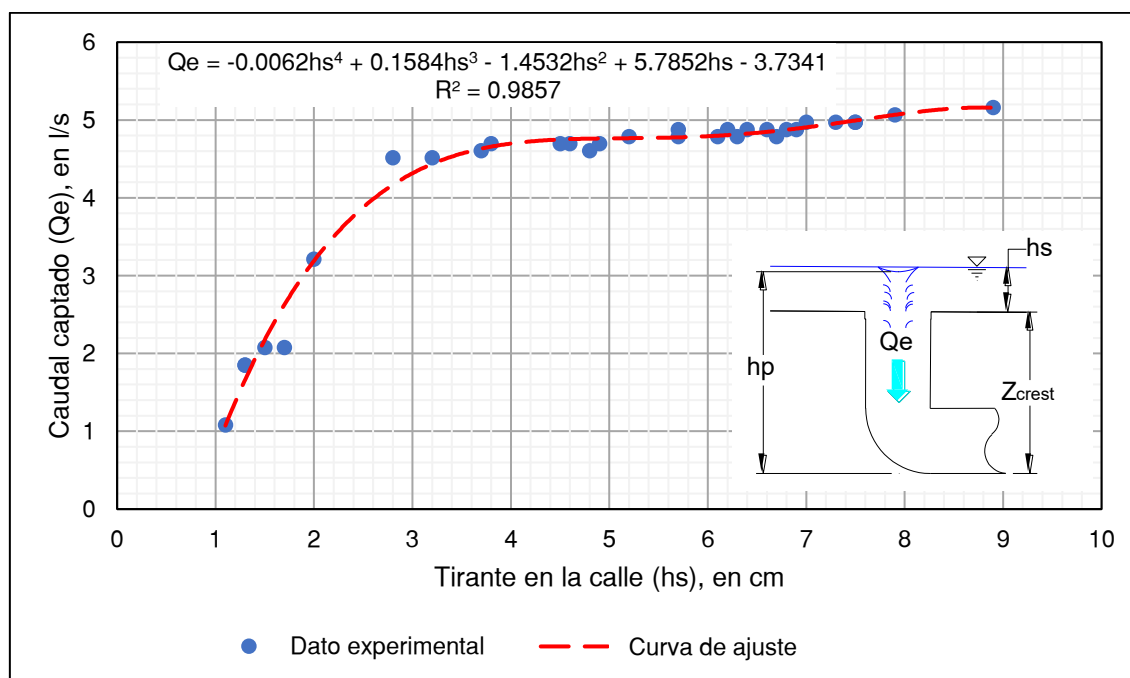


Figura 4-12 Variación del Caudal captado (Q_e) respecto al tirante sobre la calle (h_s), para sumidero ahogado sin tapa

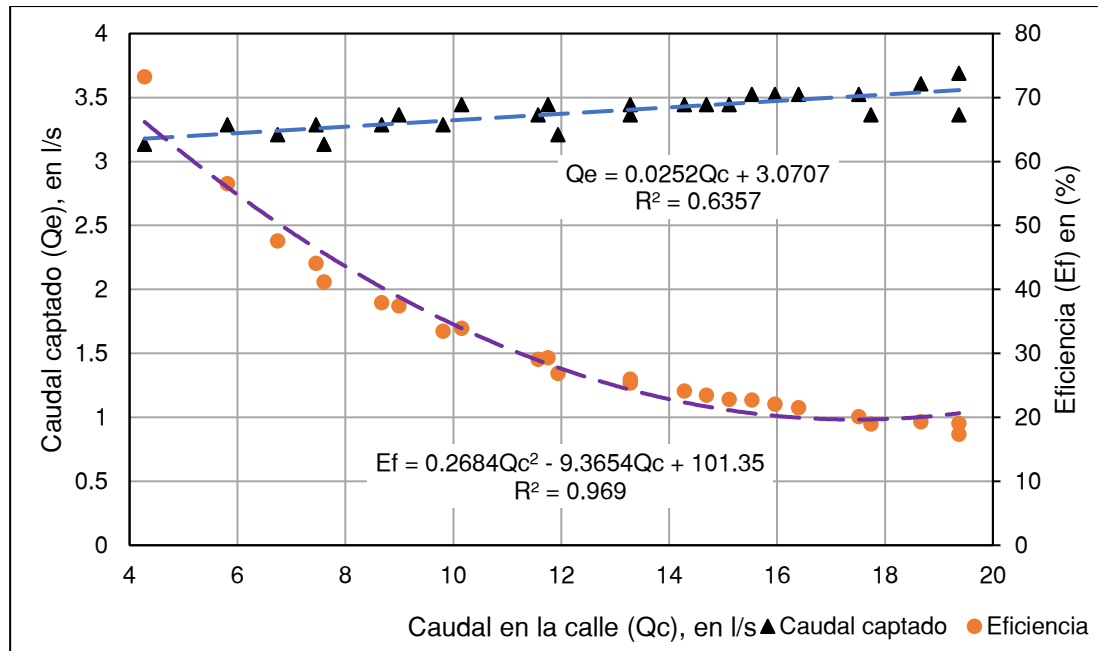


Figura 4-13 Eficiencia de captación para sumidero ahogado del brocal sin tapa.

Para el escenario 2, el coeficiente de descarga se obtuvo en dos formas de funcionamiento como vertedor y como orificio. Funcionando como vertedor se obtuvo un coeficiente de 0.45 para el brocal sin tapa, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.95$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.66 y un error absoluto medio (MAE) = 0.44 (Figura 4-14). Para el funcionamiento como orificio se obtuvo un coeficiente 0.11, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.97$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.02 y un error absoluto medio (MAE) = 0.01 (Figura 4-14).

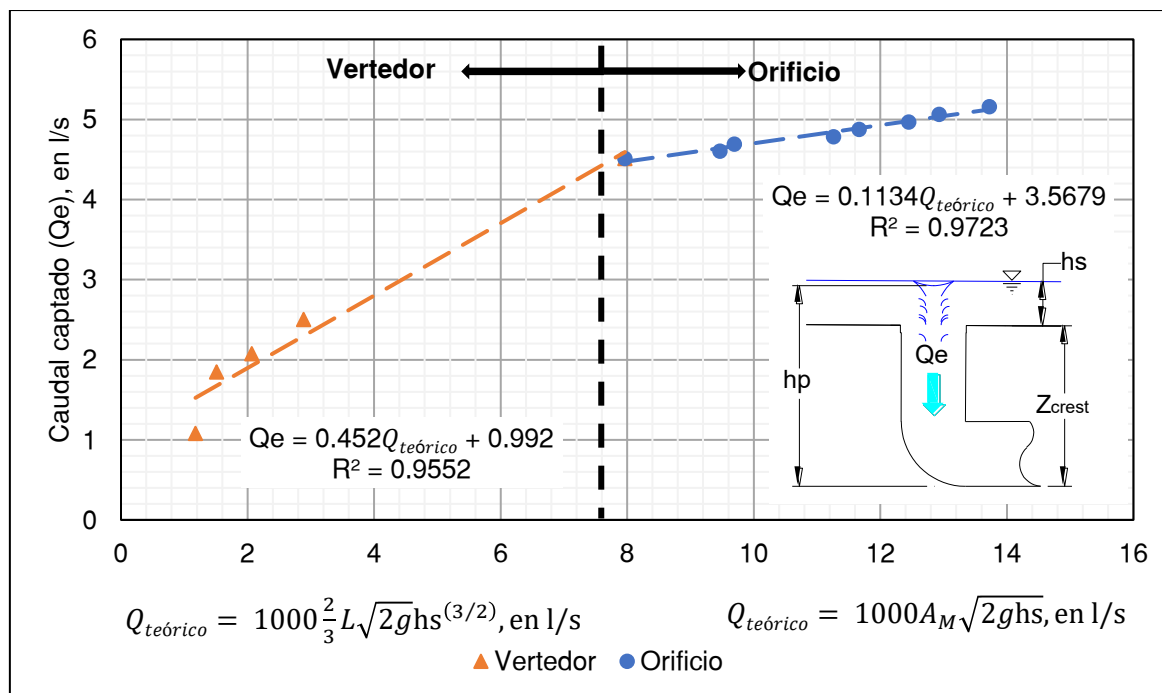


Figura 4-14 Coeficiente de descarga para sumidero ahogado del brocal sin tapa.

4.1.3.2 Sumidero ahogado en la tapa de concreto.

El máximo caudal que puede captar la tapa de concreto en condiciones de sumidero ahogado es del orden de 0.49 l/s (Figura 4-15), equivale a un caudal en el prototipo de 43.2 l/s, también se observa que al aumentar el tirante en la calle, el caudal aumenta en una tendencia ascendente, pero trata de ser constante a 0.5 l/s, a partir de un tirante de 10 cm en la calle. Para la curva de ajuste se obtiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0.99$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.17 y un error absoluto medio (MAE) = 0.14.

Resultados

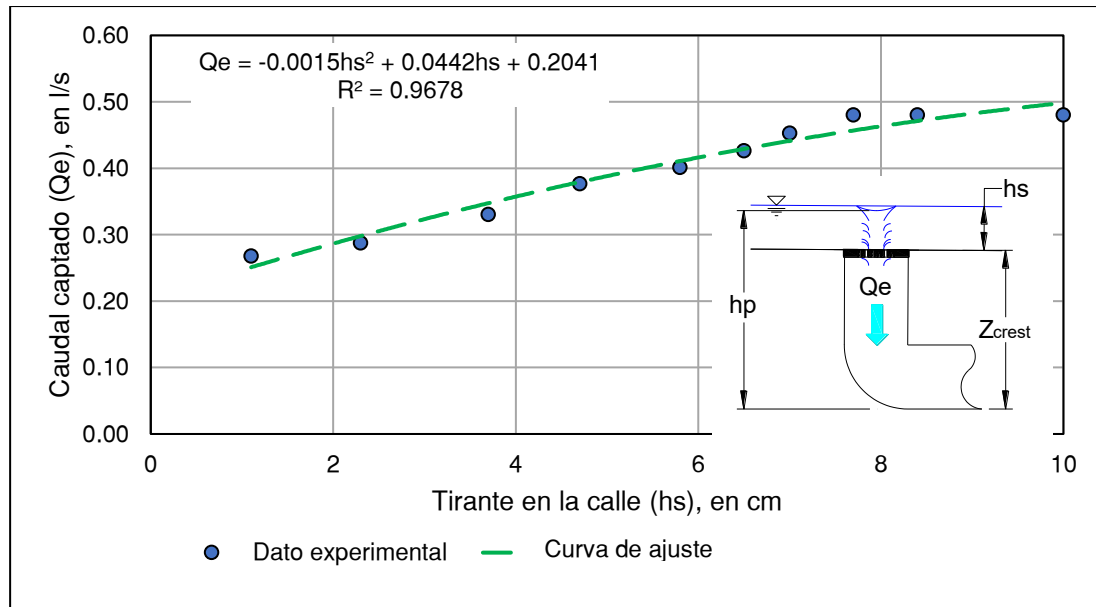


Figura 4-15 Comportamiento del caudal captado (Q_e) respecto al tirante en la calle (h_s) de la tapa de concreto para sumidero ahogado.

El máximo caudal captado por la tapa de concreto es de 0.49 l/s con una eficiencia del 2%, para un caudal que transita por la calle de 20 l/s y para caudales menores del orden de los 1 l/s, la eficiencia aumenta hasta 30% (Figura 4-16).

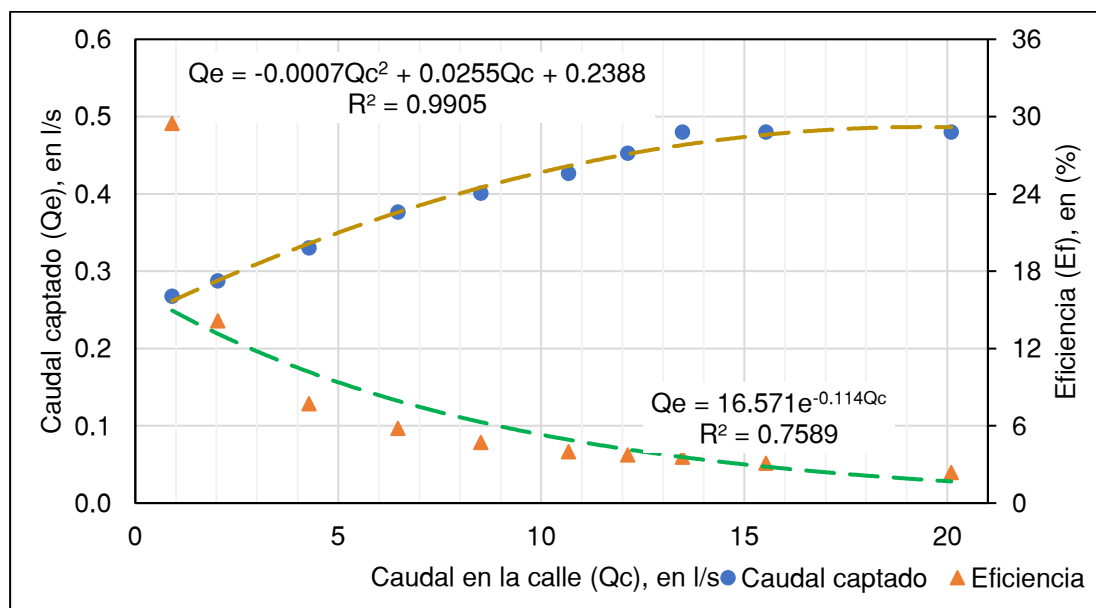


Figura 4-16 Eficiencia de captación para flujo con remanso de la tapa de concreto.

Se obtuvo un coeficiente de 0.15 para el orificio en sumidero ahogado, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.96$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.016 y un error absoluto medio (MAE) = 0.014, como se presenta en la Figura 4-17.

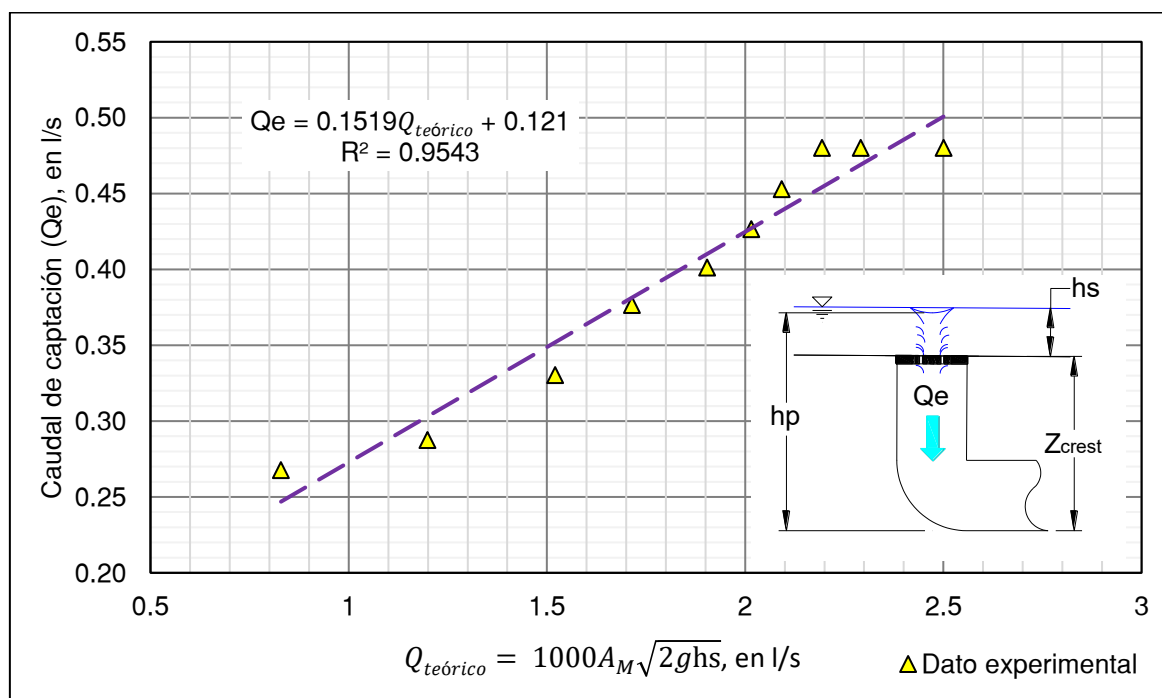


Figura 4-17 Coeficiente de descarga de la tapa de concreto para sumidero ahogado.

4.1.3.3 Sumidero ahogado en la rejilla de hierro fundido

El comportamiento del tirante en la calle (carga hidráulica) contra el caudal captado indica que a partir de una carga hidráulica de 5 cm tiende a ser constante el caudal de captación, con un valor de 3 l/s aunque aumente el tirante en la calle (Figura 4-18). Para la curva de ajuste se obtiene un coeficiente de determinación $R^2=0.97$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.15 y un error absoluto medio (MAE) = 0.13.

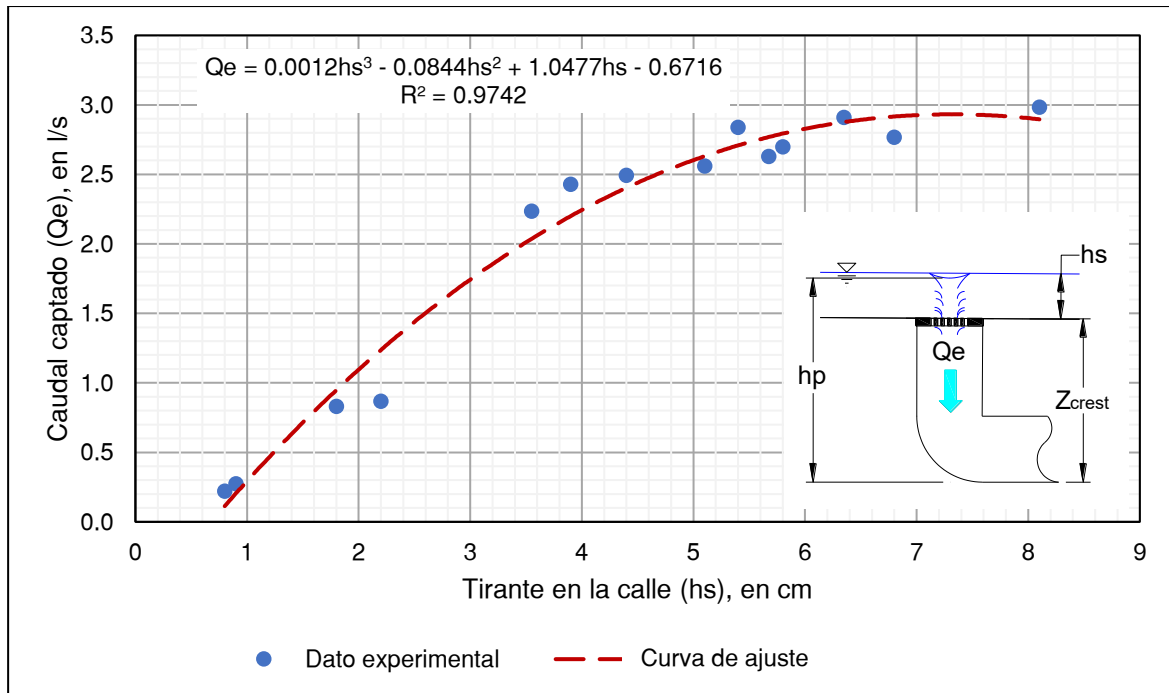


Figura 4-18 Variación del Caudal captado (Q_e) respecto al tirante sobre la calle (h_s) para sumidero ahogado con rejilla de hierro fundido.

La eficiencia de captación de la rejilla de hierro fundido para sumidero ahogado y debido al remanso que se provoca al ahogar la descarga en este escenario, se observa que, para caudales de 1 hasta 17 l/s la eficiencia alcanza su valor máximo correspondiente a 40% y para los caudales de 17 a 20 l/s, la eficiencia es del orden del 15% (figura 4-19).

Para la rejilla de hierro fundido se identificaron dos formas de funcionamiento, para los caudales menores trabaja como vertedor obteniendo un coeficiente de descarga $C_w = 0.52$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.98$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.04 y un error absoluto medio (MAE) = 0.03 y caudales mayores trabajando como orificio se obtiene un coeficiente de descarga $C_o = 0.62$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.93$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.05 y un error absoluto medio (MAE) = 0.04.

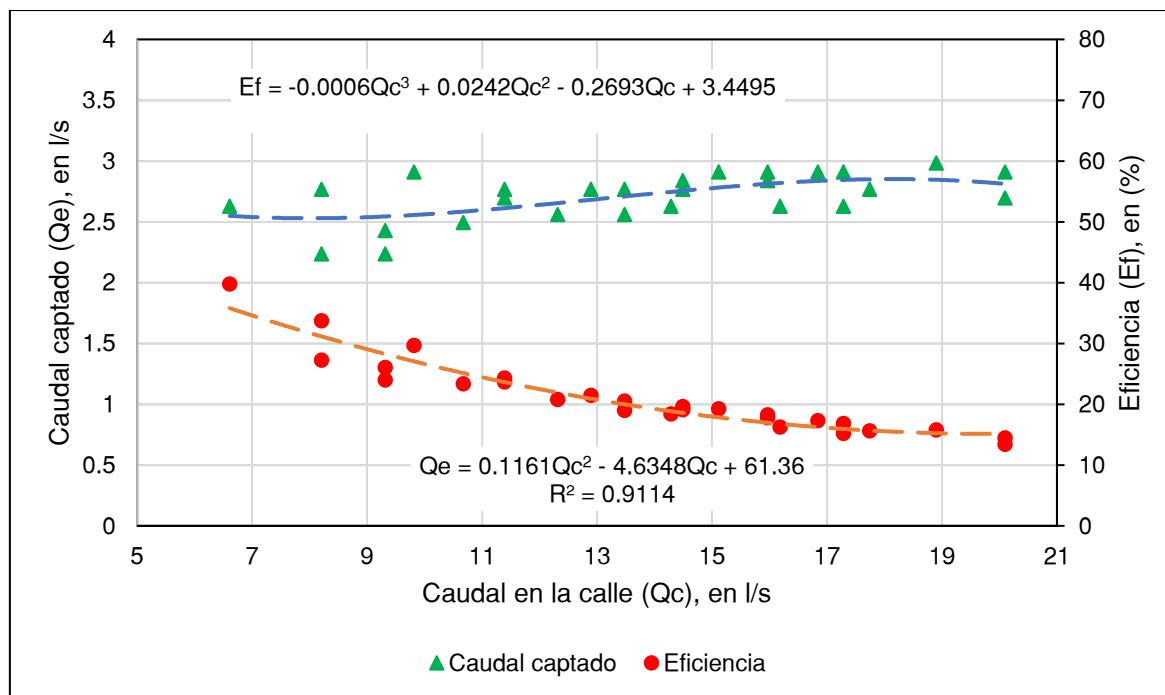


Figura 4-19 Eficiencia de captación de la rejilla de hierro fundido para sumidero ahogado.

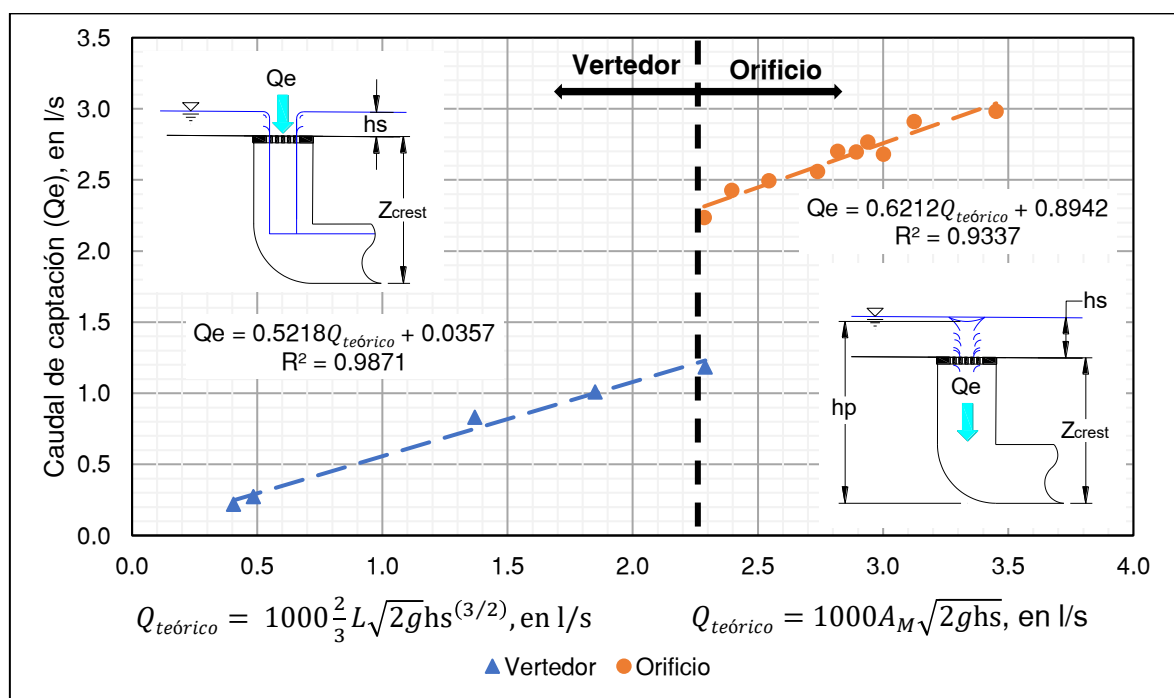


Figura 4-20 Coeficiente de descarga para sumidero ahogado de la rejilla de hierro fundido.

4.1.4 Resultados obtenidos de los experimentos en condiciones del Escenario 3.

El escenario 3, es para surgencia ahogada mediante un gasto base por la calle, por ello se le denomina surgencia ahogada, en este apartado se presentan los resultados para el brocal sin tapa y para la tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido.

4.1.4.1 Surgencia ahogada con brocal sin tapa.

En la figura 4-21 se presentan dos caudales de ahogamiento de 8 y 20 l/s y el máximo caudal que se adiciona por surgencia son 3.7 l/s. La descarga no depende del caudal de ahogamiento, sólo de la capacidad del brocal para descargar agua hacia la calle.

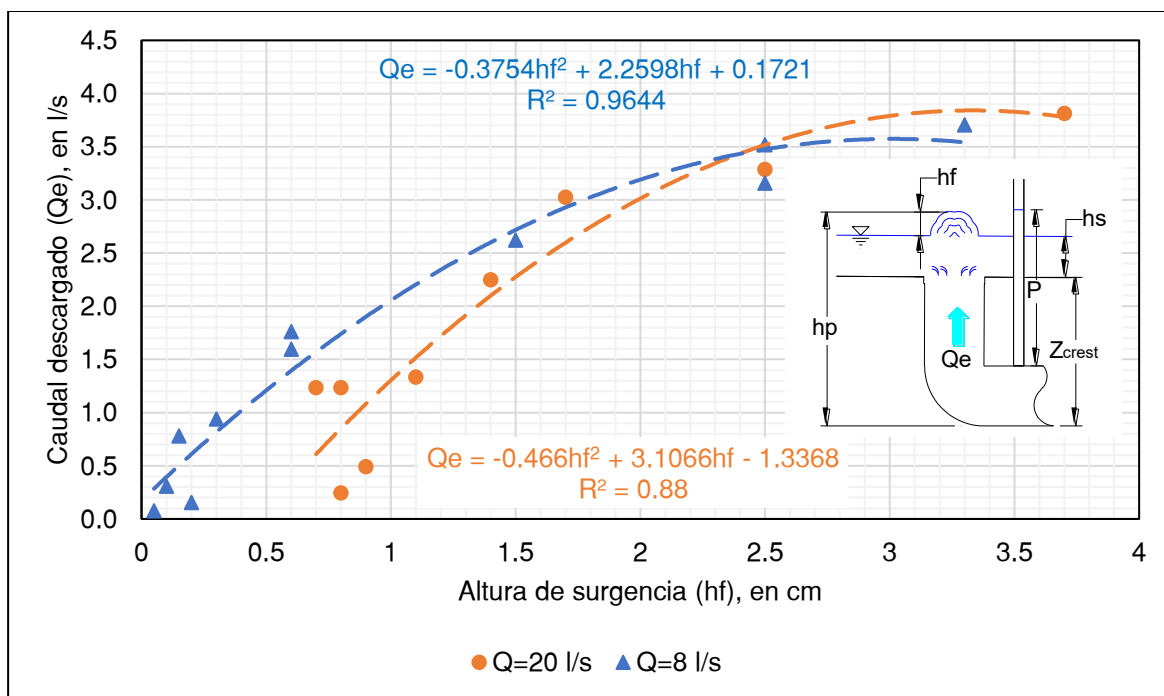


Figura 4-21 Variación del Caudal captado (Q_e) respecto a la altura de la surgencia (h_f), para surgencia ahogada en el brocal sin tapa.

La presión que se presenta en el caso de surgencia ahogada y para un caudal de inundación de 8 l/s, es de 0.4 metros columna de agua (mca) como máxima, equivalente a 400 kgf/m² ó 0.04 kgf/cm² correspondiente a un caudal de 3.7 l/s y una altura de surgencia de 3.3 cm. Mientras

que en la figura 4-22 se presenta la ecuación multiparamétrica entre el caudal descargado (Q_e), contra la altura de surgencia (h_f) y la carga presión en la tubería (P), el ajuste presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.99$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)=0.1347.

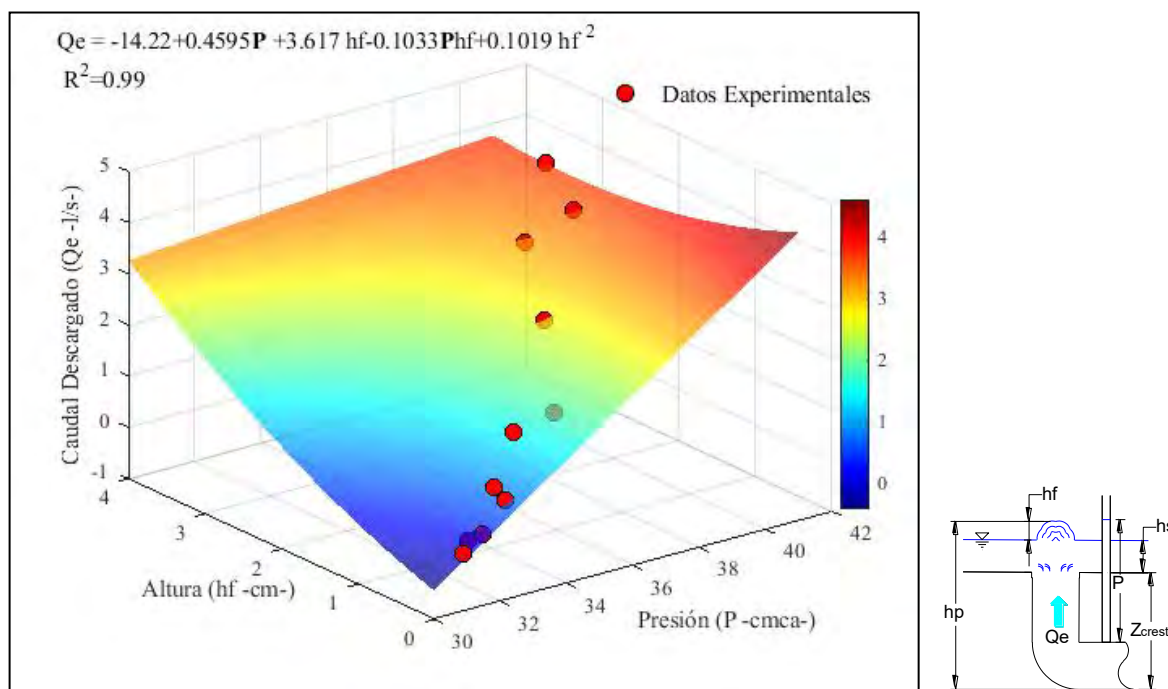


Figura 4-22 Comportamiento del caudal descargado por en función de la carga de presión en la tubería (P) y la altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada, con caudal de inundación de 8 l/s y brocal sin tapa.

La presión que se presenta en el caso de surgencia ahogada y para un caudal de inundación de 20 l/s, se tiene una presión máxima de 45 centímetros columna de agua (cmca) equivalente a 450 kgf/m^2 ó 0.045 kgf/cm^2 con una altura de surgencia (h_f) de 3.75 cm y un caudal máximo de surgencia (Q_e) de 3.8 l/s. En la figura 4-23, se presenta la gráfica correspondiente al ajuste multiparamétrico entre el caudal descargado (Q_e), contra la altura de surgencia (h_f) y la carga presión en la tubería (P), el ajuste tiene un coeficiente de determinación $R^2=0.98$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)=0.1813

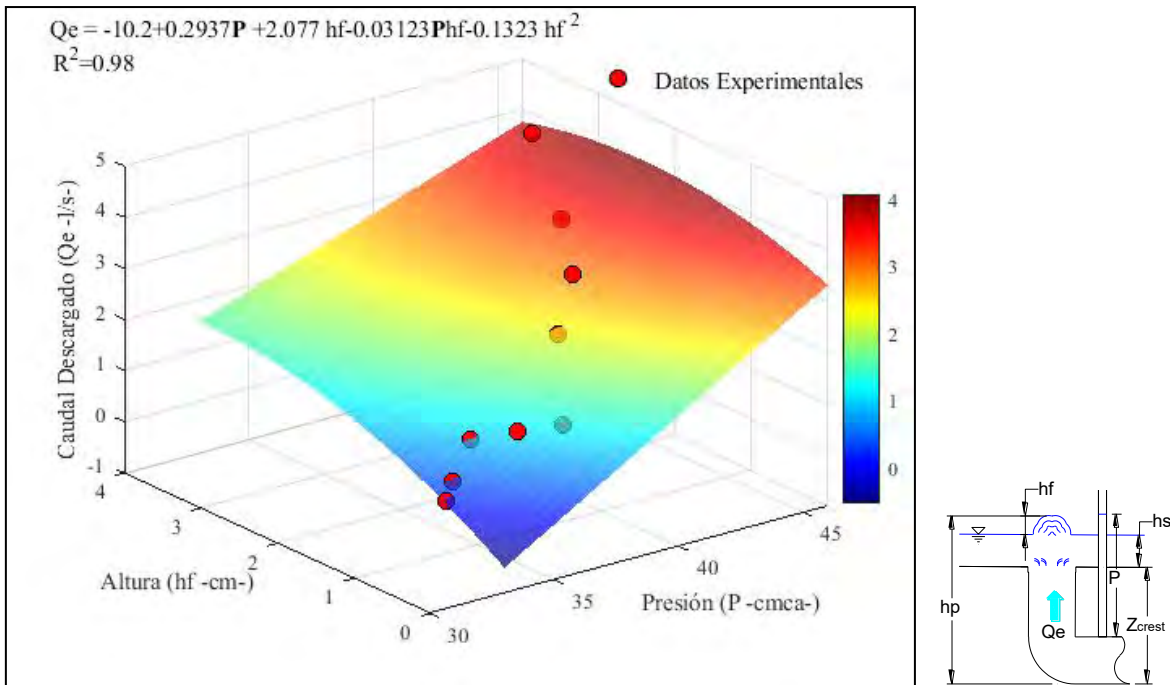


Figura 4-23 Comportamiento del caudal descargado por en función de la carga de presión en la tubería (P) y la altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada, con un caudal de inundación de 18.9 l/s y descarga del brocal sin tapa.

En la Figura 4.24 se presenta una comparativa del caudal de surgencia contra la presión. la tendencia es similar en ambas, la presión aumenta ligeramente para el caudal de 20 l/s esto se debe a que, el tirante que se presenta en la calle representa un obstáculo para descarga en surgencia y también hace que aumente la presión

Para el caso de la descarga ahogada en el brocal sin tapa, con un caudal de inundación en la calle de 20.1 l/s, se obtiene un coeficiente de descarga $C_o = 0.51$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.96$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.47 y un error absoluto medio (MAE) = 0.41 (Figura 4-25).

Mientras que, para un caudal de inundación en la calle de 8.05 l/s, se obtuvo un coeficiente de descarga $C_o = 0.53$, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.5$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.22 y un error absoluto medio (MAE) = 0.18 (Figura 4-26).

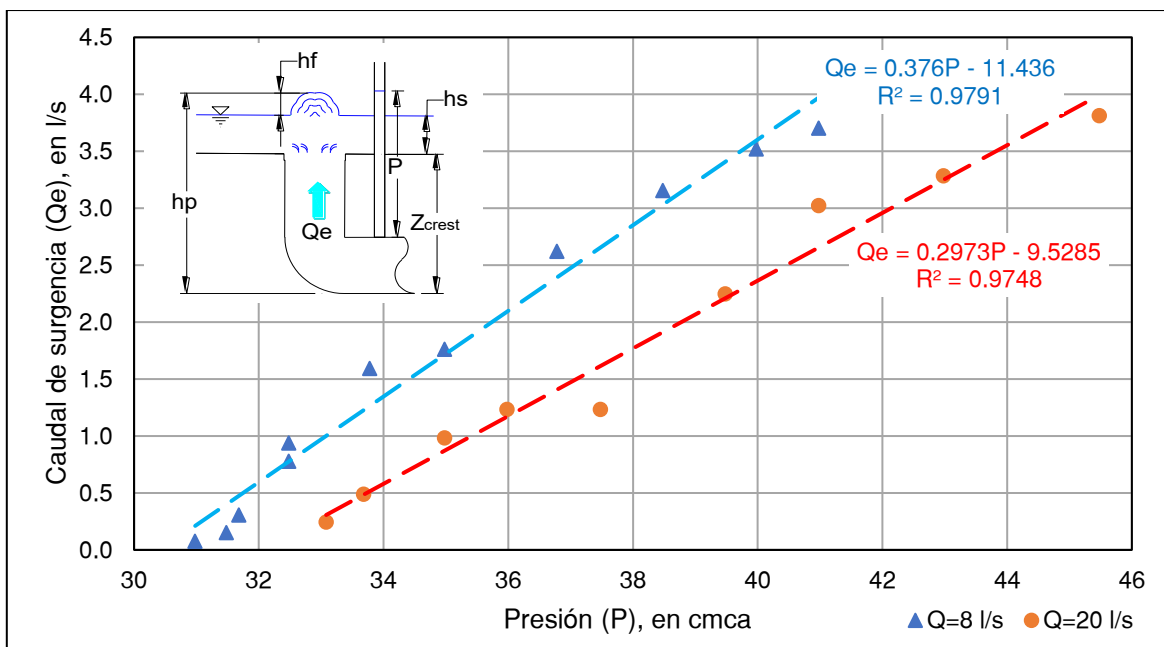


Figura 4-24 Comparación del caudal descargado en surgencia (Q_e) en función de la carga de presión en la tubería (P) para los caudales de ahogamiento de 8 y 20 l/s.

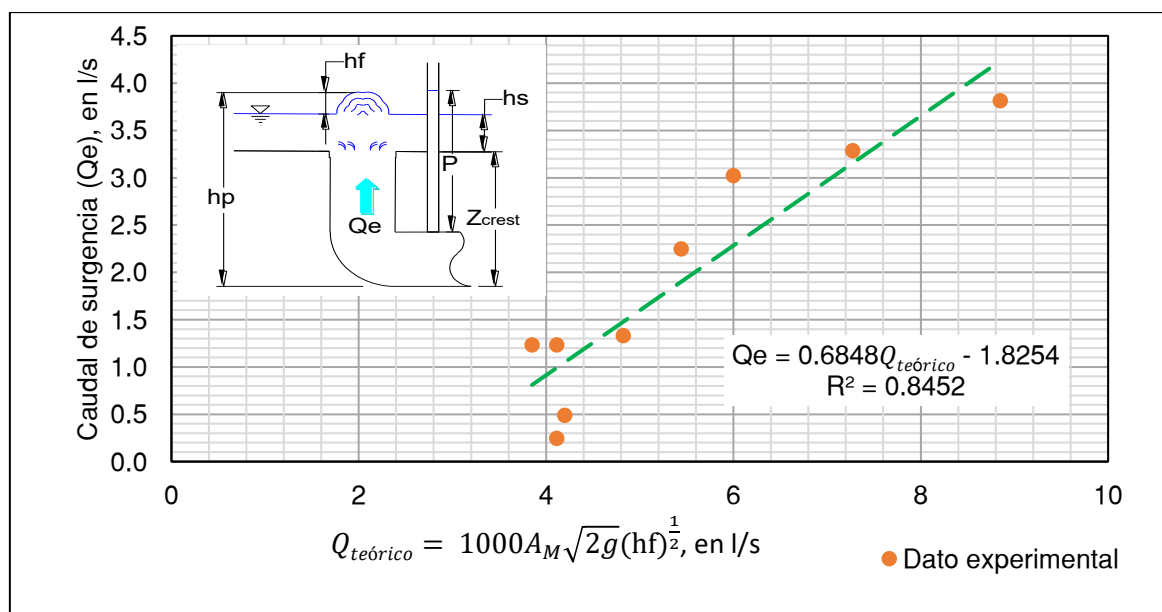


Figura 4-25 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia brocal sin tapa, caudal de inundación en la calle de 20 l/s.

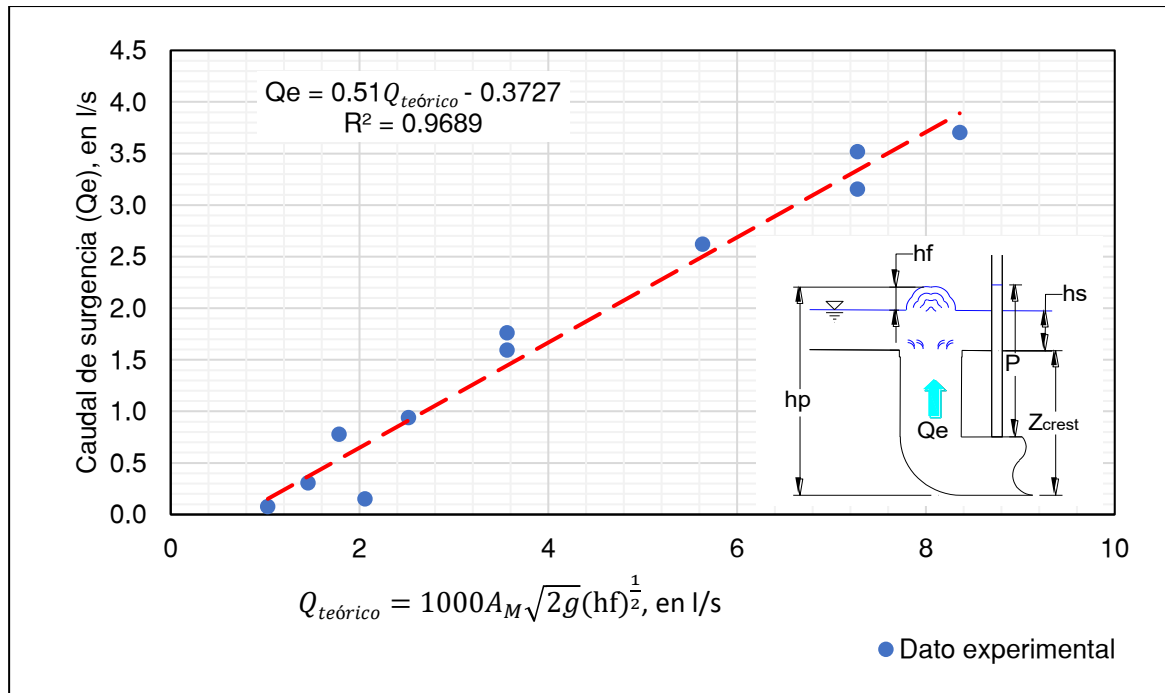


Figura 4-26 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia para el brocal sin tapa, con caudal de inundación en la calle de 8 l/s.

4.1.4.2 Surgencia ahogada con la tapa de concreto

La presión que se presenta en el caso de surgencia ahogada y para un caudal de inundación en la calle de 0.56 l/s, es de 56 centímetros columna de agua (cmca) como máximo, equivalente a 560 kgf/m² o 0.056kgf/cm², para un tirante de 7 cm en la calle y un caudal de surgencia de 0.6 l/s. Para estas condiciones, la tapa se empieza a desplazar a partir de la presión mencionada. Al inicio de los experimentos la tapa al no contar con bisagra es proclive a atorarse en el brocal y por ello, se genera el aumento de presión (56 cmca) que hace que la tapa se desplace completamente del brocal. En la Figura 4-27 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y el tirante total de surgencia (h_c) con su respectiva ecuación de ajuste la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.948$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.1643.

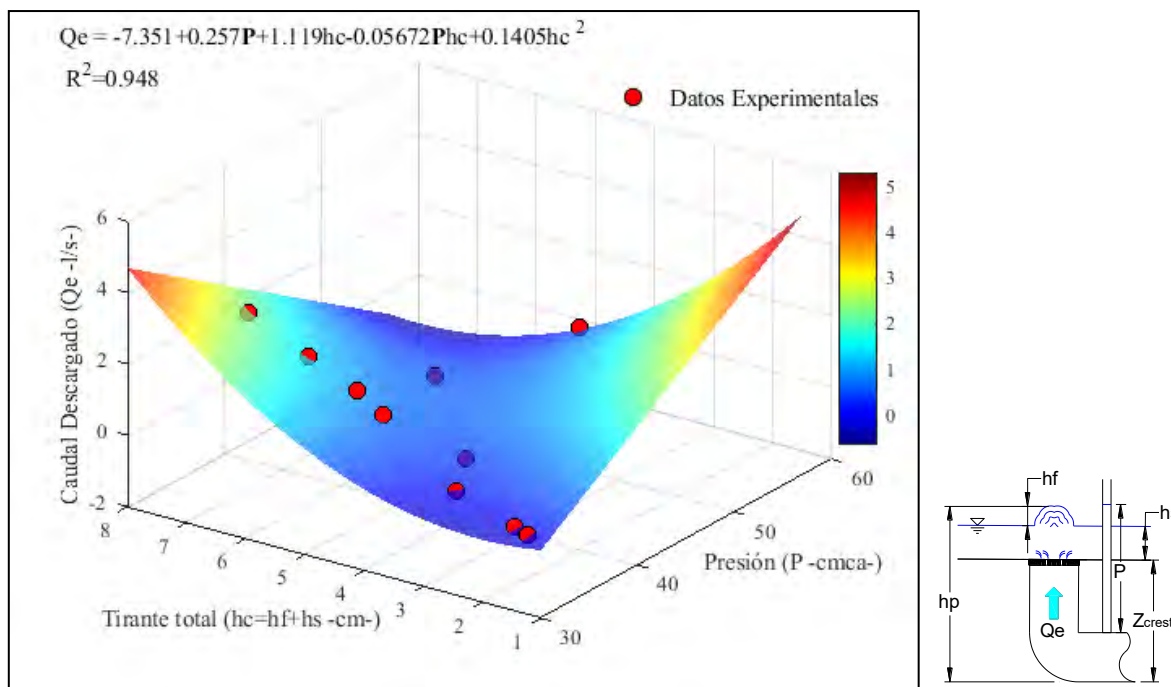


Figura 4-27 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (hc) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 0.56 l/s.

Por otro lado, la carga de presión que se presenta en el caso de surgencia ahogada para un caudal de inundación de 2.03 l/s, alcanzó un valor máximo de 53 centímetros columna de agua (cmca), equivalente a 530 kgf/m² ó 0.053 kgf/cm², para un tirante total de 14 cm y un caudal máximo de surgencia de 3.4 l/s. En la Figura 4-28 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y el tirante total de surgencia (hc) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta coeficiente de determinación $R^2=0.913$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.3121.

Resultados

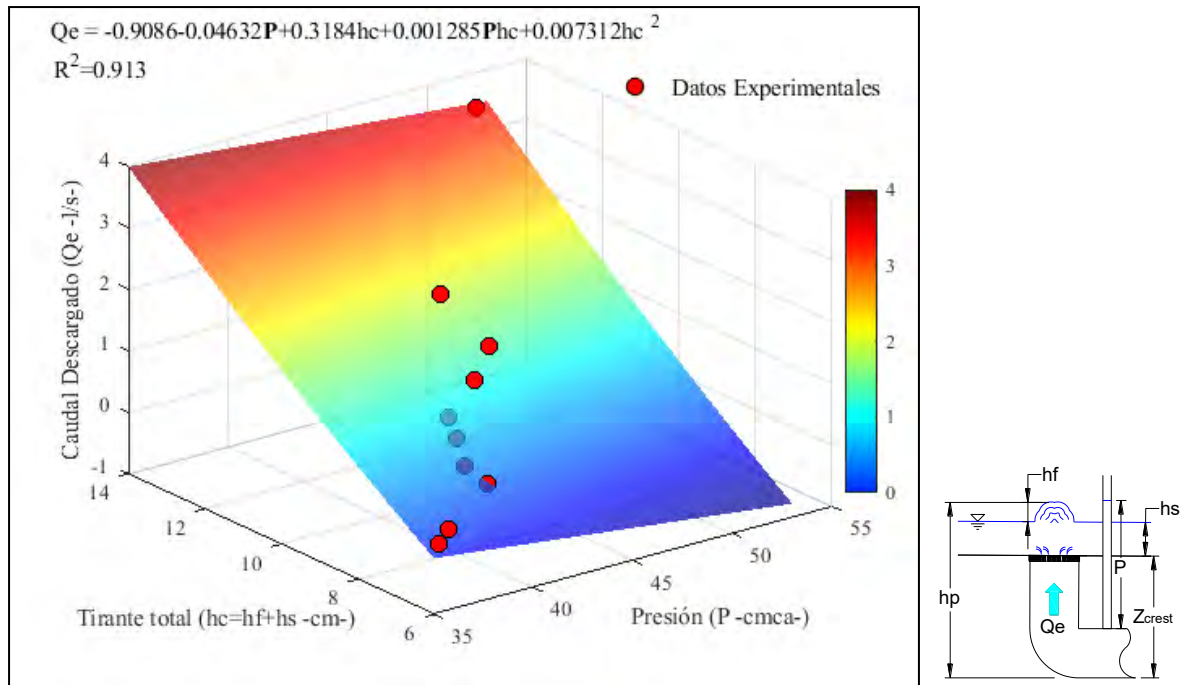


Figura 4-28 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (hc) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 2.03 l/s.

Mientras que, para un caudal de inundación de 6.74 l/s, la presión que se presenta en el caso de surgencia ahogada y tapa de concreto es de 48 centímetros columna de agua (cmca) equivalente a 480 kgf/m^2 ó 0.048 kgf/cm^2 , para un tirante total de 12.5 cm y caudal máximo de surgencia de 3.1 l/s. En la figura 4-29 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y el tirante total de surgencia (hc) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta coeficiente de determinación $R^2=0.96$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.2006.

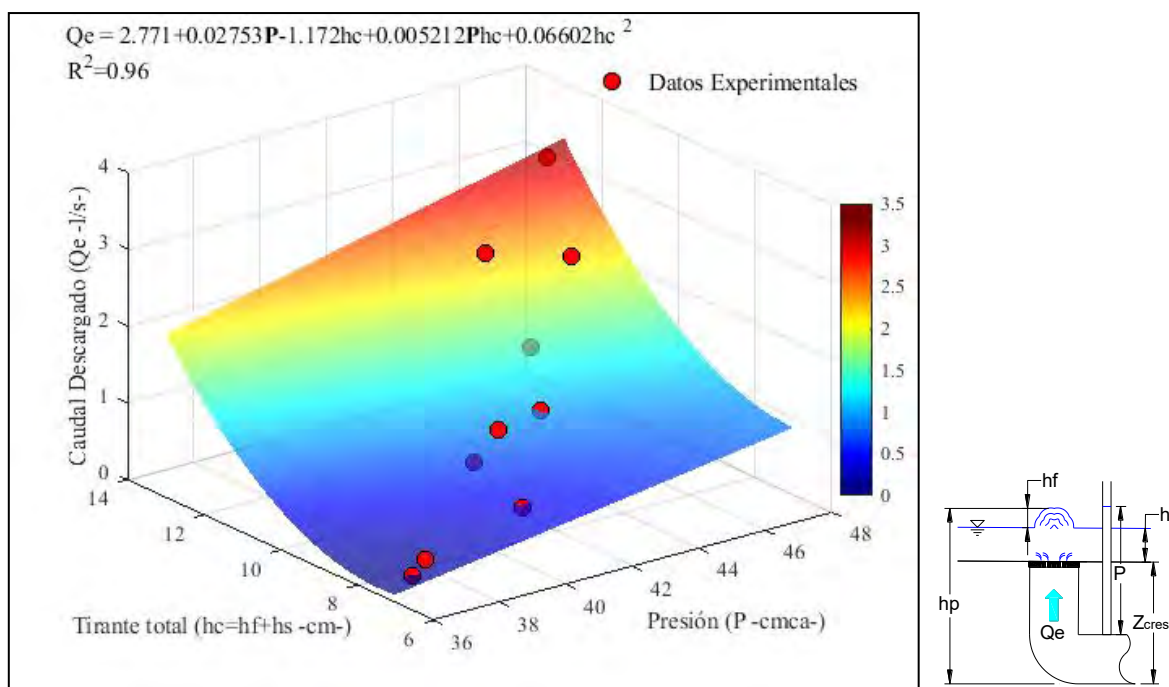


Figura 4-29 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (h_c) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 6.74 l/s.

La carga de presión que se presenta en surgencia ahogada para un caudal de inundación en la calle de 9.81 l/s y un caudal de surgencia de 3.6 l/s, es de 51 centímetros columna de agua (cmca) equivalente a 510 kgf/m² ó 0.051 kgf/cm², para un tirante total de 15 cm. En la figura 4-30 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y el tirante total de surgencia (h_c) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta coeficiente de determinación $R^2=0.957$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.2345.

Resultados

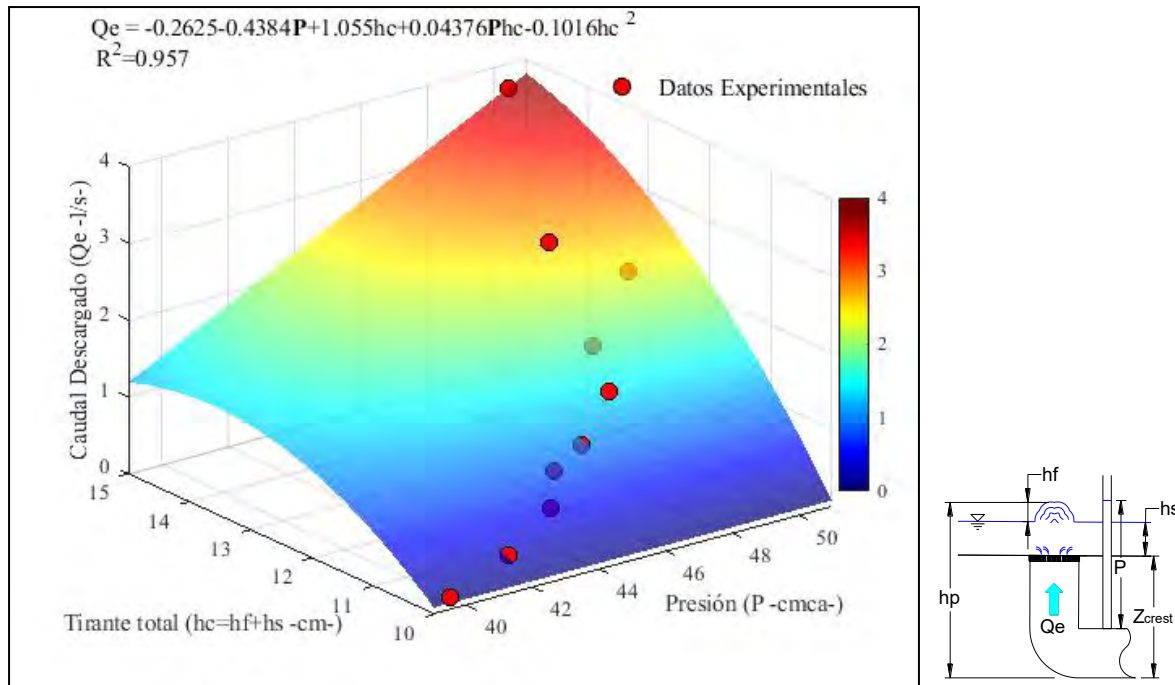


Figura 4-30 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (h_c) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 9.81 l/s.

Respecto a la presión que se presenta en el caso de surgencia ahogada y para un caudal de inundación en la calle de 15.54 l/s para la tapa de concreto, es de 53 centímetros columna de agua (cmca) equivalente a 530 kgf/m² ó 0.053 kgf/cm², para un tirante de 14 cm y un caudal de surgencia de 2.2 l/s. En la figura 4-31 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y el tirante total de surgencia (h_c) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.983$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.1403.

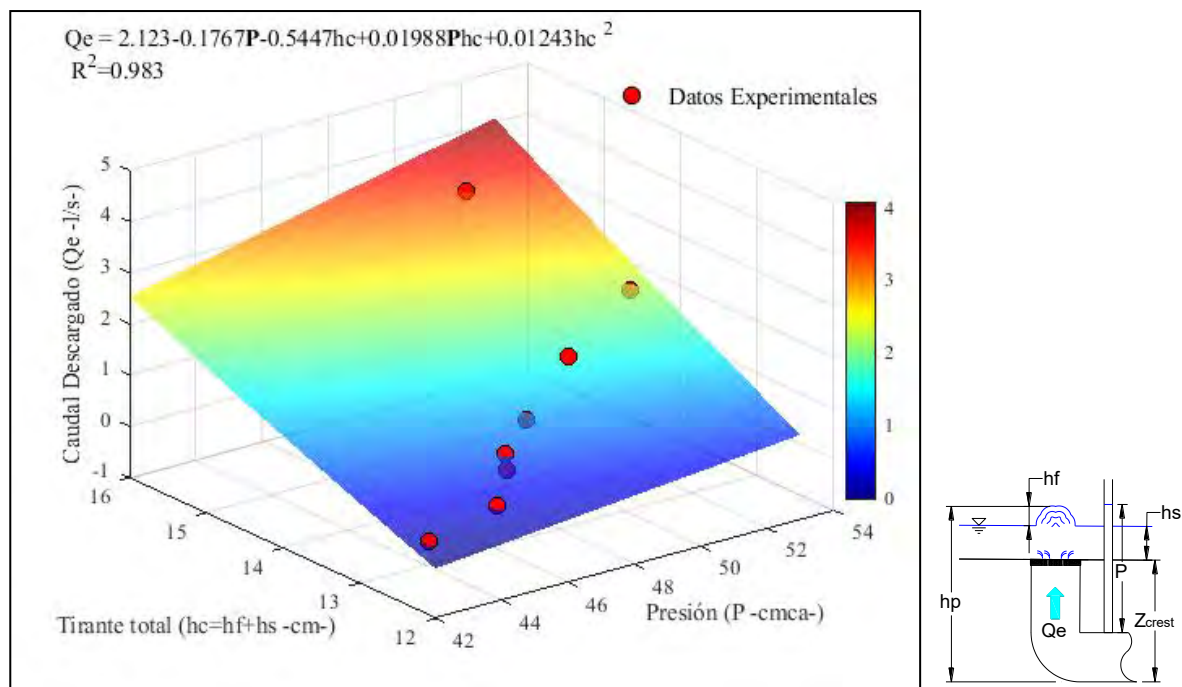


Figura 4-31 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (hc) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 15.54 l/s.

Finalmente, para el análisis de surgencia en la tapa de concreto, la presión que se presenta para un caudal de inundación que transita por la calle de 18.9 l/s y un caudal de surgencia de 2.9 l/s, es de 54 centímetros columna de agua (cmca) equivalente a 540 kgf/m² ó 0.054 kgf/cm², para un tirante total de 16 cm. En la figura 4-32 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y el tirante total de surgencia (hc) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.987$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.1158.

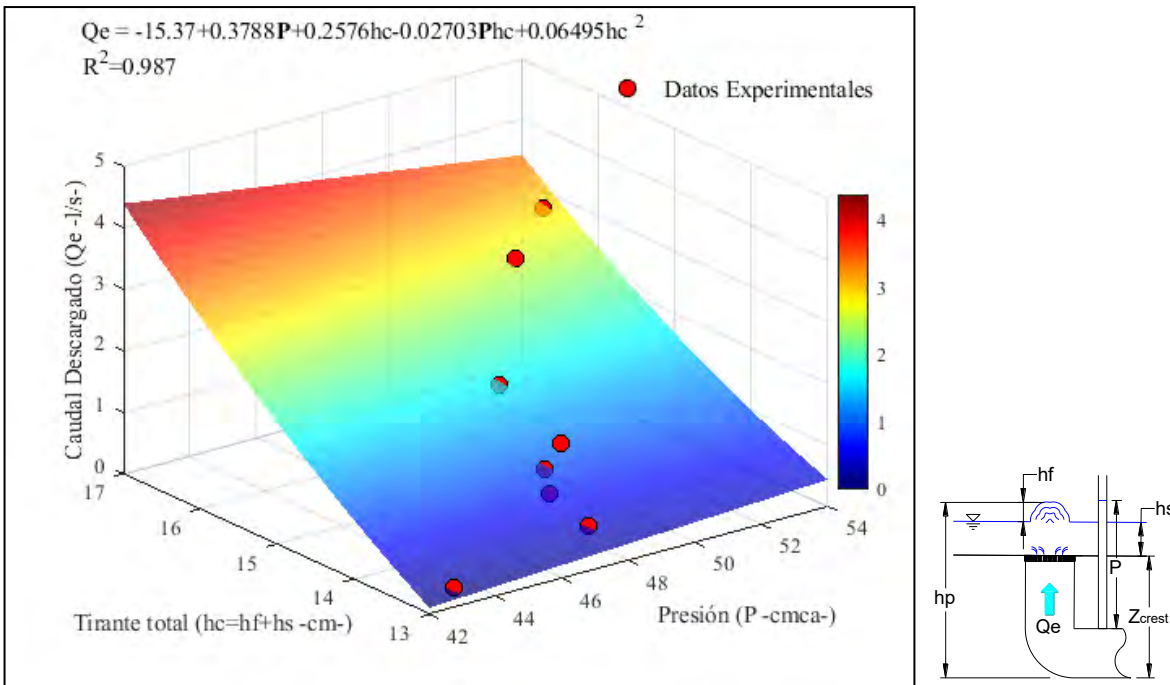


Figura 4-32 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y el tirante total de surgencia (hc) para surgencia ahogada con tapa de concreto y caudal de inundación de 18.9 l/s.

A manera de resumen, en la figura 4-33 se presenta un concentrado de las presiones con los diferentes caudales de ahogamiento. Se puede decir que si afecta el caudal que circula por la calle, al caudal que sale por surgencia. También, se determinó que la presión a la cual se inicia el desplazamiento de la tapa de concreto es de 35 cmca ó 0.035 kgf/cm², a partir, de esta presión la tapa de concreto se encuentra flotando dentro del brocal (Figura 4-34b). También se obtiene la presión con la cual la tapa de concreto es removida del brocal, bajo las condiciones de análisis, la tapa no se desplaza completamente quedando estacionada en la parte de aguas abajo y obstruyendo parte del área del brocal lo que provoca incremento en la carga de presión. La carga de presión con la que se logra remover la tapa por completo es de 39 cmca ó 0.039 kgf/cm². Posteriormente sigue saliendo caudal de surgencia hasta alcanzar una presión de 45 cmca.

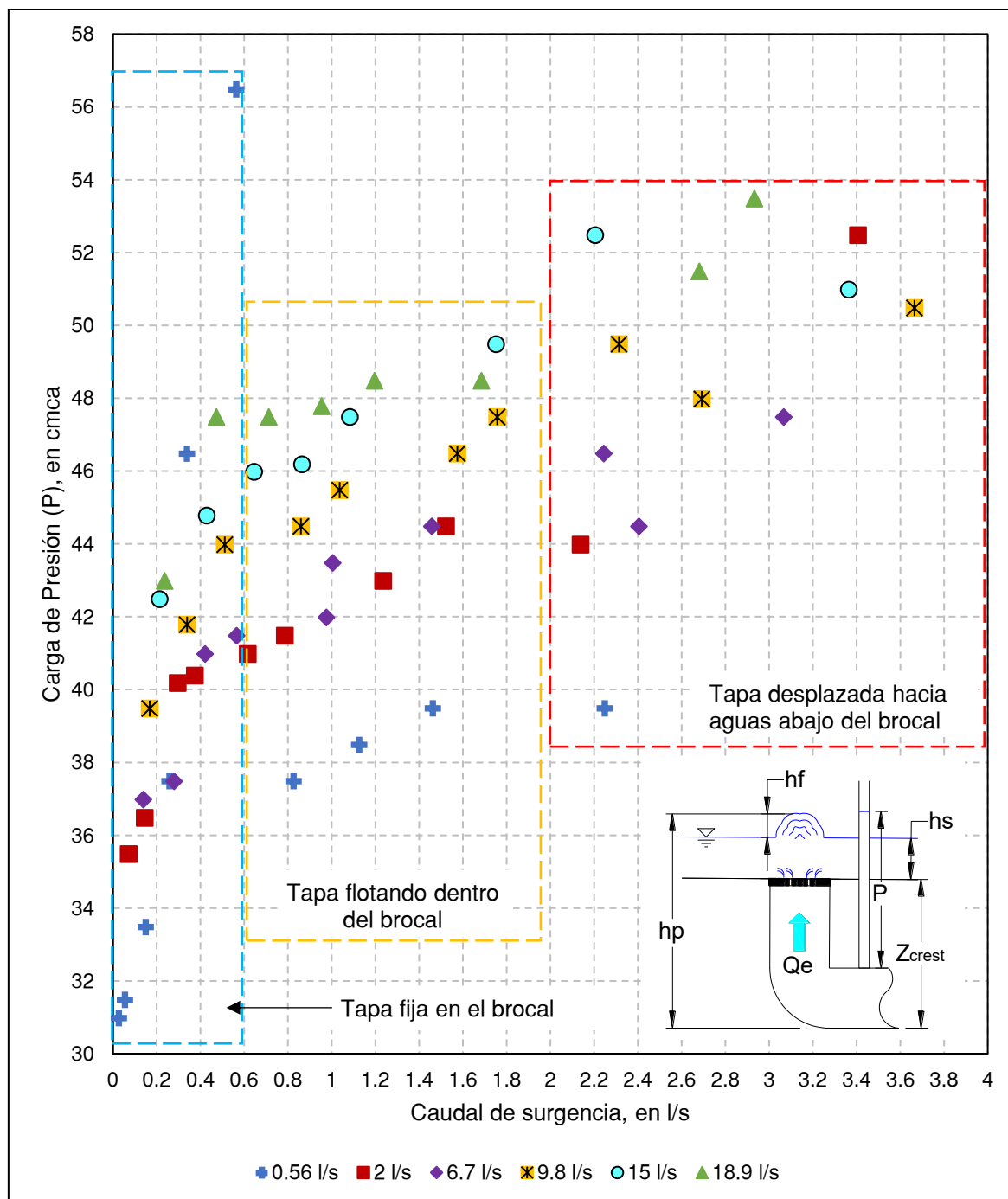


Figura 4-33 Zonas de desplazamiento de la tapa de concreto para diferentes cargas de presión y diferentes caudales de ahogamiento.

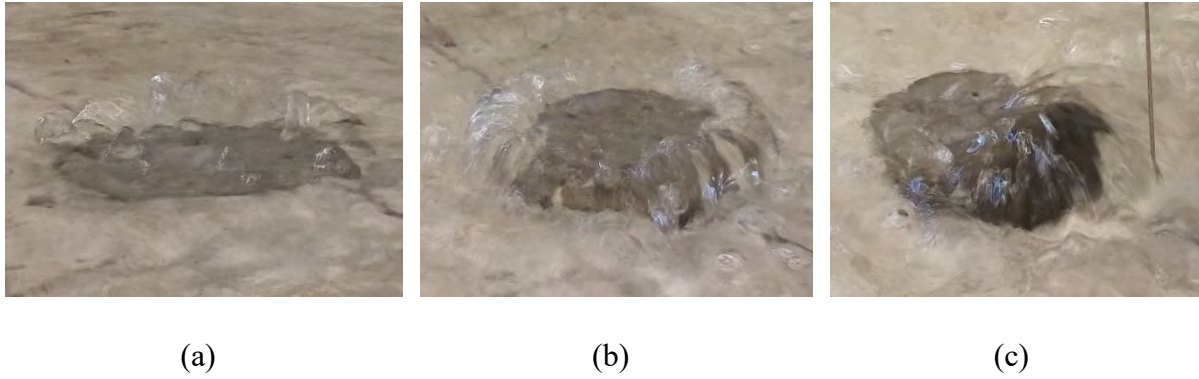


Figura 4-34 Tapa de concreto en el escenario de surgencia ahogada para la tapa de concreto.
a) Tapa fija, b) Tapa flotando dentro del brocal, c) Tapa desplazada.

Respecto a los coeficientes de descarga, para un caudal de inundación de 0.57 l/s, se obtiene un coeficiente de descarga $C_o = 0.18$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.96$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.12 y un error absoluto medio (MAE) = 0.11 (Figura 4-35).

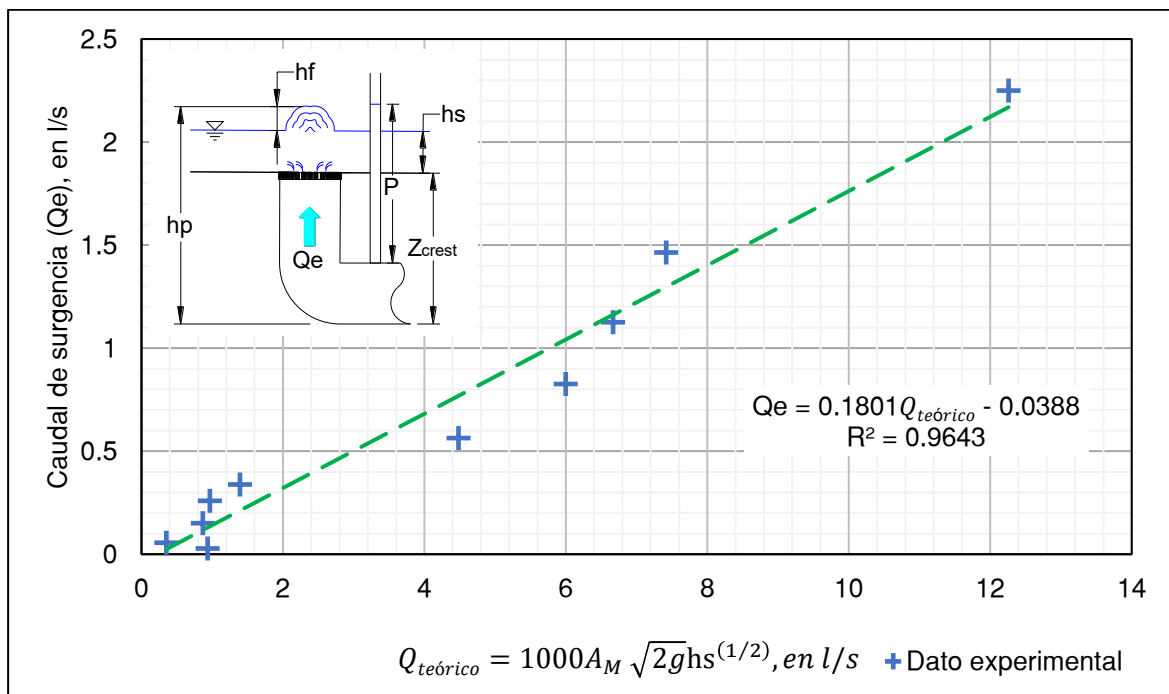


Figura 4-35 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 0.57 l/s.

Mientras que, para un caudal de inundación de 2.03 l/s, se obtiene un coeficiente de descarga $C_o = 0.33$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.88$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.34 y un error absoluto medio (MAE) = 0.3 (Figura 4-36).

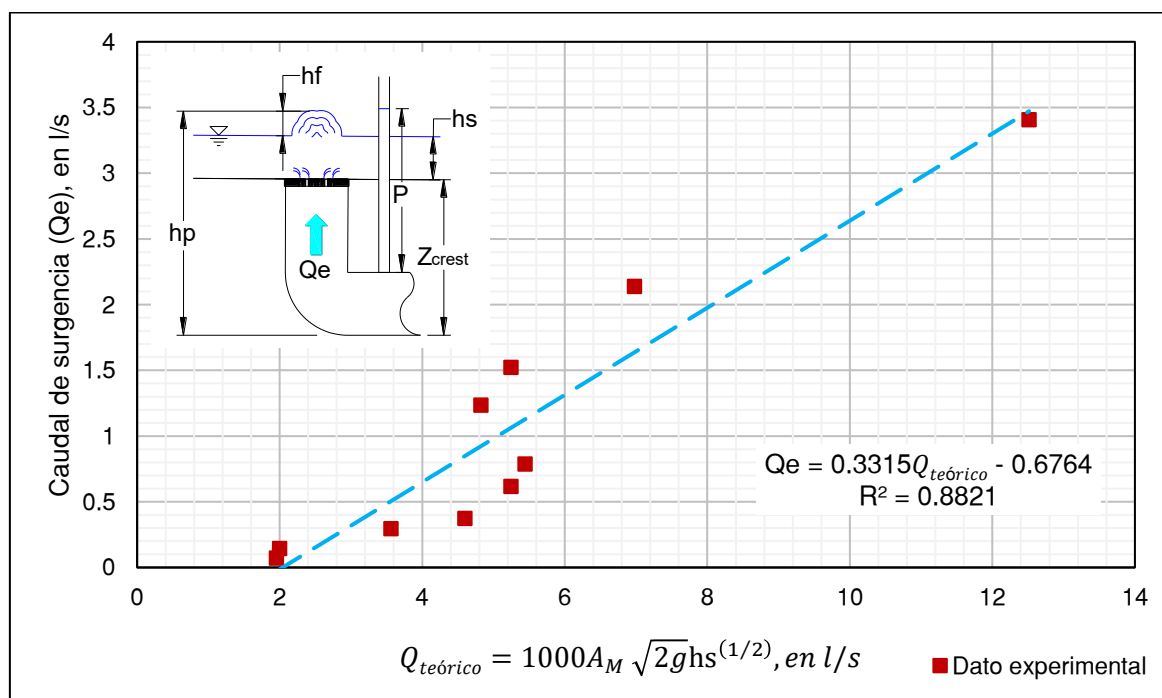


Figura 4-36 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 2.03 l/s.

Si el gasto de inundación es de 6.75 l/s, el coeficiente de descarga es $C_o = 0.40$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.82$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.39 y un error absoluto medio (MAE) = 0.34 (Figura 4-37).

Para un gasto de inundación de 9.82 l/s, se obtiene un coeficiente de descarga $C_o = 0.56$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.96$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.19 y un error absoluto medio (MAE) = 0.15 (Figura 4-38).

Resultados

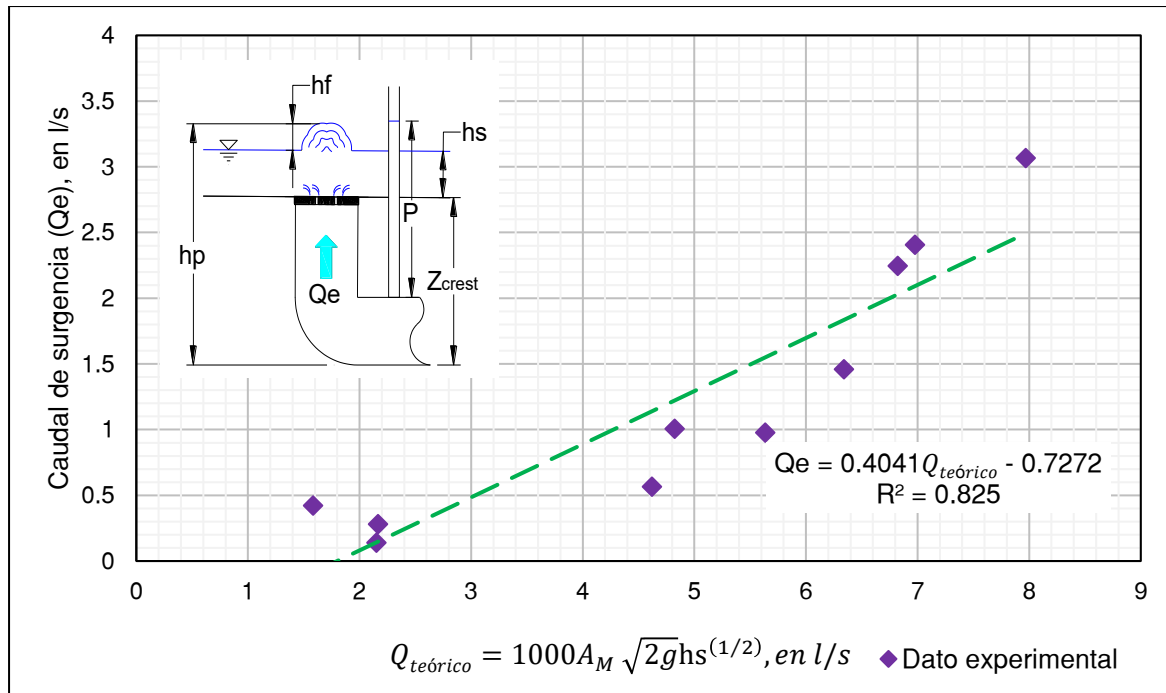


Figura 4-37 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 6.74 l/s.

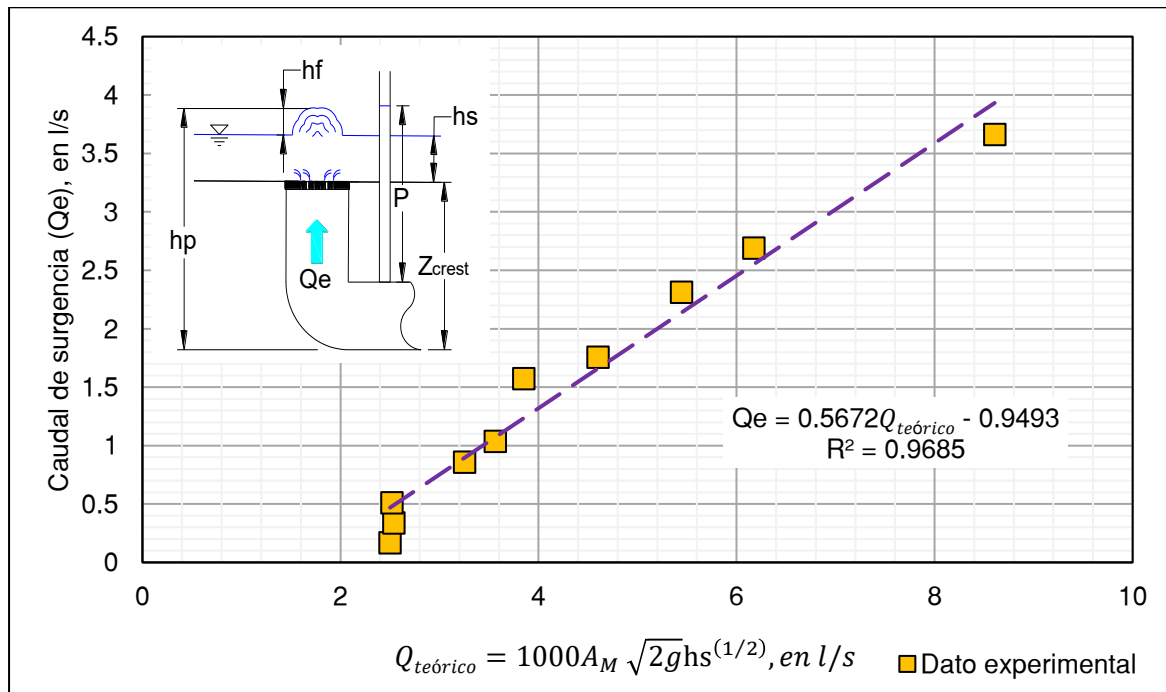


Figura 4-38 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 9.81 l/s.

Para un caudal por la calle de 15.5 l/s, se obtiene un coeficiente de descarga $C_o = 0.66$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.96$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.19 y un error absoluto medio (MAE) = 0.15 (Figura 4-39)

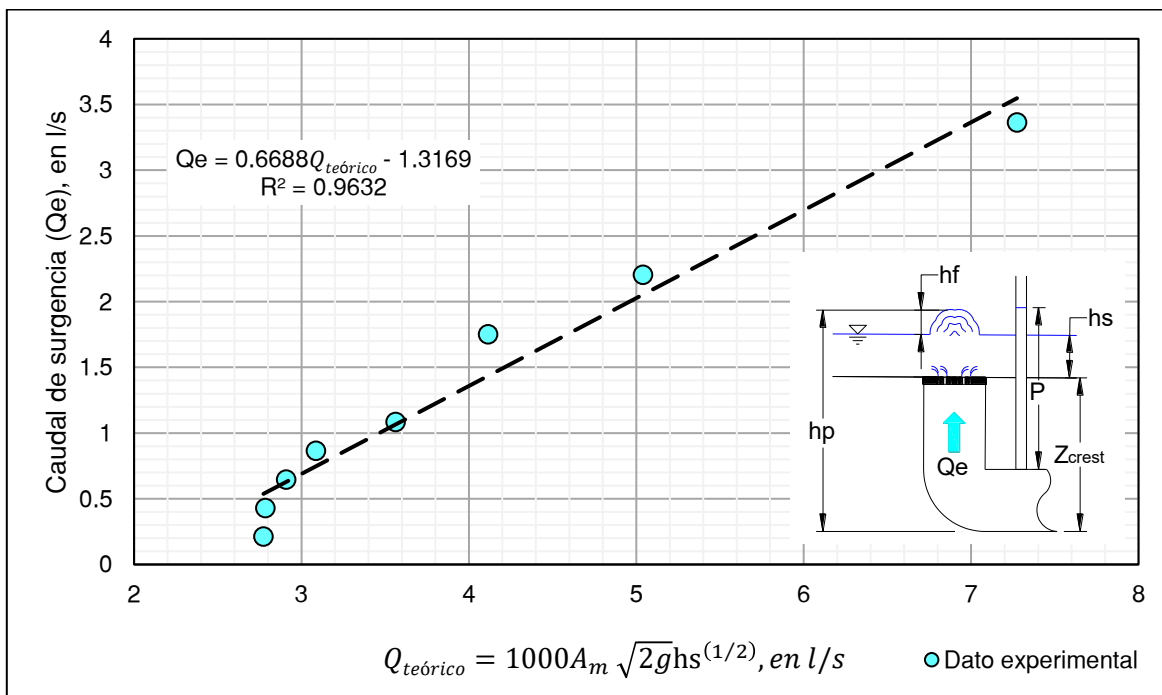


Figura 4-39 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 15.5 l/s.

Finalmente, para un caudal en la calle de 18.9 l/s, se obtiene un coeficiente de descarga $C_o = 0.56$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.93$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.24 y un error absoluto medio (MAE) = 0.2 (Figura 4-40)

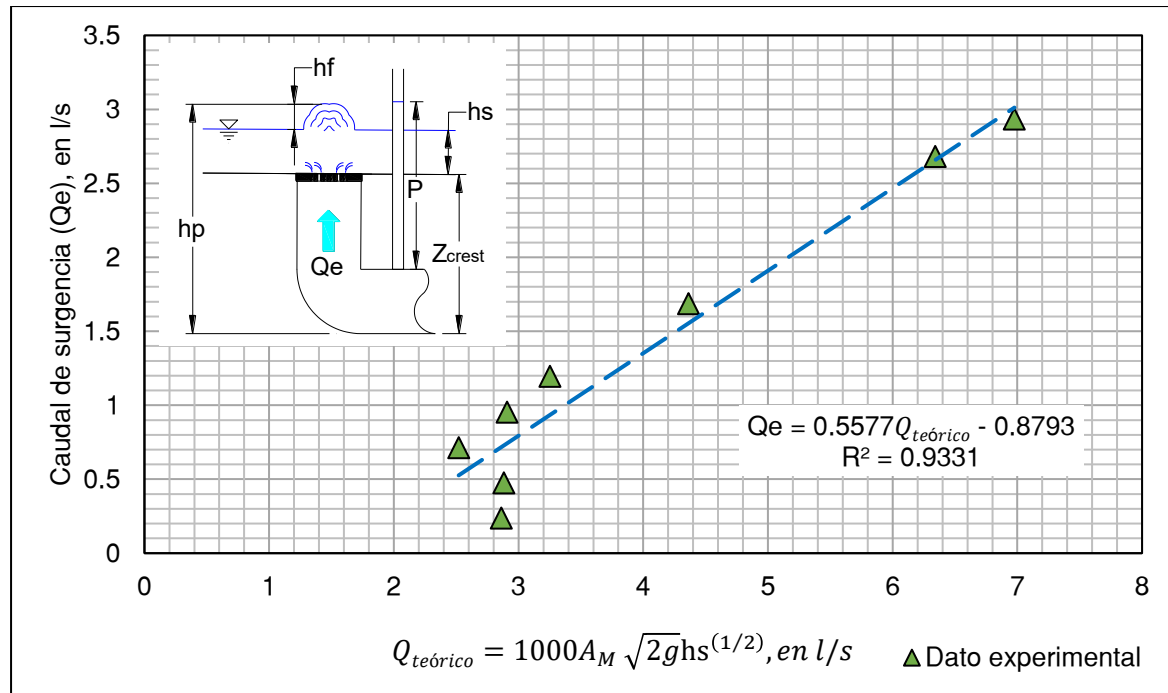


Figura 4-40 Coeficiente de descarga para la tapa de concreto trabajando en surgencia ahogada, con un gasto en la calle de 18.9 l/s.

4.1.4.3 Surgencia ahogada con la rejilla de fierro fundido

Respecto a los experimentos de surgencia ahogada con la rejilla de fierro fundido, para un caudal que transita por la calle es de 0.86 l/s y un caudal de surgencia de 3 l/s, se presenta una presión máxima de 45 centímetros columna de agua (cmca), equivalente a 450 kgf/m² ó 0.045 kgf/cm², correspondiente a un tirante en la calle de 3.5 cm. En la figura 4-41 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y la altura de surgencia (h_f) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.993$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.0833.

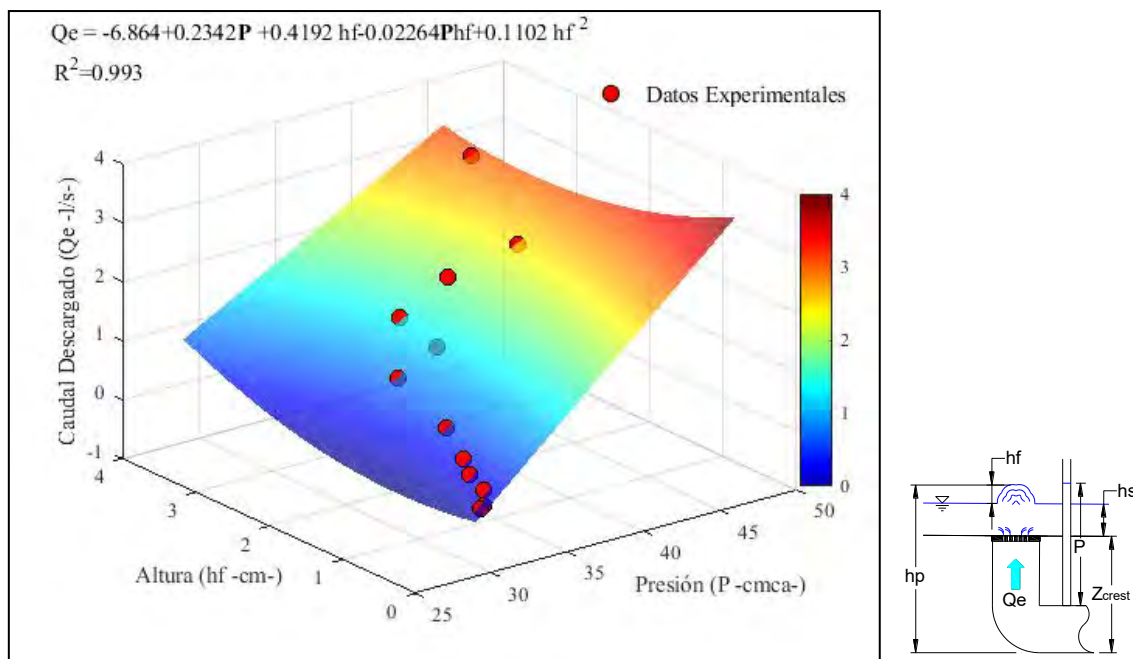


Figura 4-41 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (hf) para surgencia ahogada con rejilla de fierro fundido y caudal de inundación de 0.86 l/s.

Mientras que para una surgencia ahogada con un caudal que transita por la calle de 2.56 l/s y con un caudal de surgencia de 3.4 l/s, se presenta una presión máxima de 49 centímetros columna de agua (cmca), equivalente a 490 kgf/m² ó 0.049 kgf/cm², correspondiente a un tirante en la calle de 5 cm. En la Figura 4-42 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y la altura de surgencia (hf) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.996$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.065.

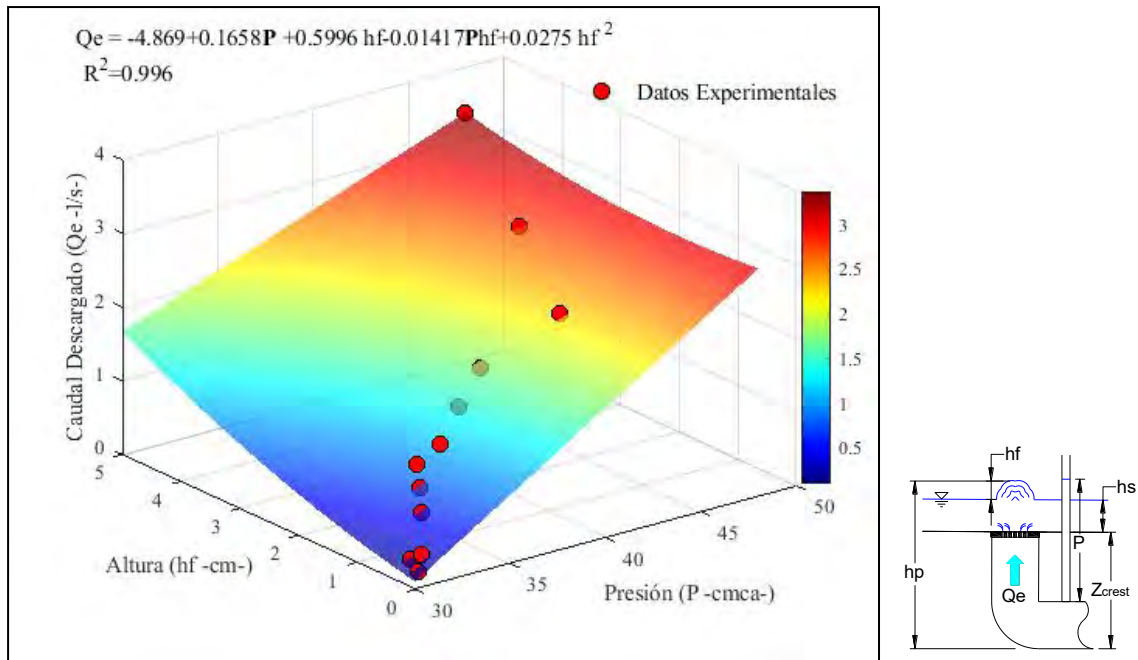


Figura 4-42 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada con rejilla de hierro fundido y caudal de inundación de 2.56 l/s.

Para un caudal que transita por la calle de 6.34 l/s y un caudal de surgencia de 3.8 l/s, provoca una presión máxima de 51 centímetros columna de agua (cmca), equivalente a 510 kgf/m² ó 0.051 kgf/cm², y un tirante en la calle de 5 cm. En la figura 4-43 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y la altura de surgencia (h_f) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.956$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.2796.

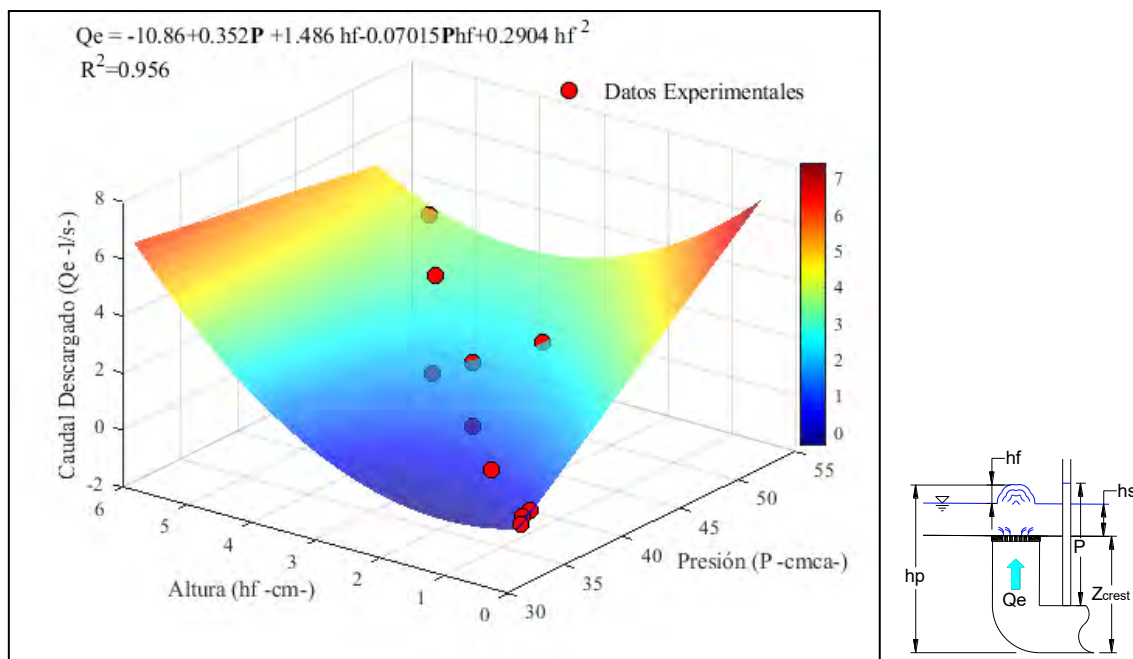


Figura 4-43 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada con rejilla de fierro fundido y caudal de inundación de 6.34 l/s.

Para una surgencia ahogada por un caudal en la calle de 12.5 l/s y un caudal de surgencia de 4.3 l/s, provoca una presión máxima de 55 centímetros columna de agua (cmca), equivalente a 550 kgf/m^2 ó 0.055 kgf/cm^2 , con un tirante en la periferia del brocal de 8 cm. En la figura 4-44 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y la altura de surgencia (h_f) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.992$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.1221.

Resultados

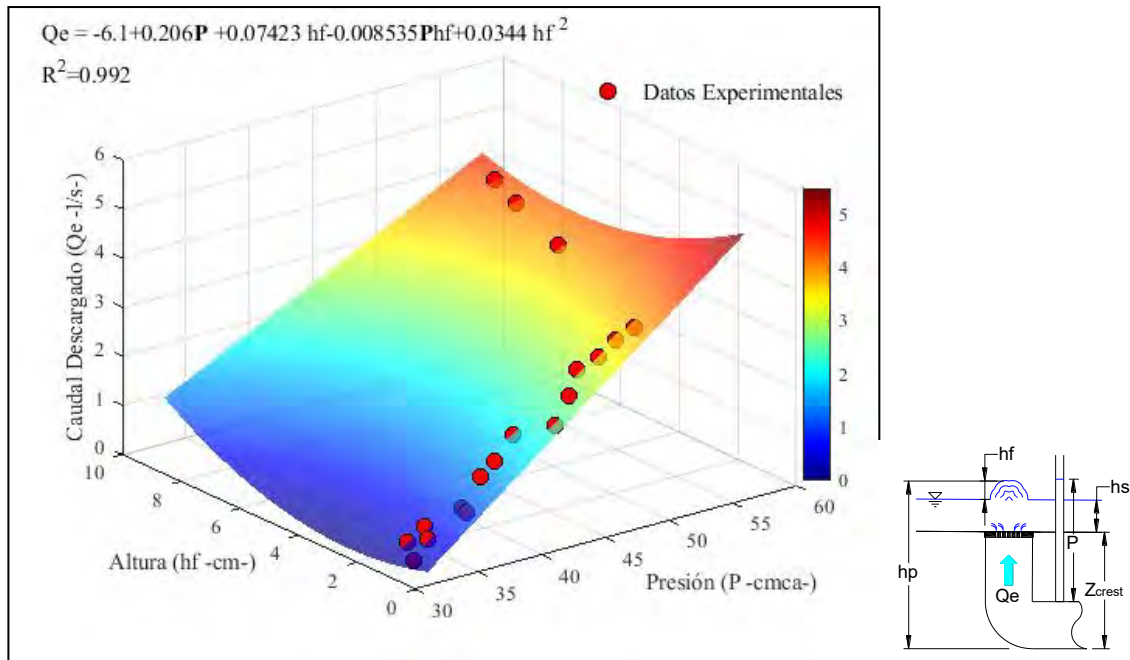


Figura 4-44 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (hf) para surgencia ahogada con rejilla de hierro fundido y caudal de inundación de 12.5 l/s.

Si el caudal que transita por la calle de 20 l/s y el caudal de surgencia de 3 l/s, esta combinación genera una presión máxima de 49 centímetros columna de agua (cmca), equivalente a 490 kgf/m^2 ó 0.049 kgf/cm^2 , con un tirante en la calle de 1 cm. En la Figura 4-45 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y la altura de surgencia (hf) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.992$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.0776.

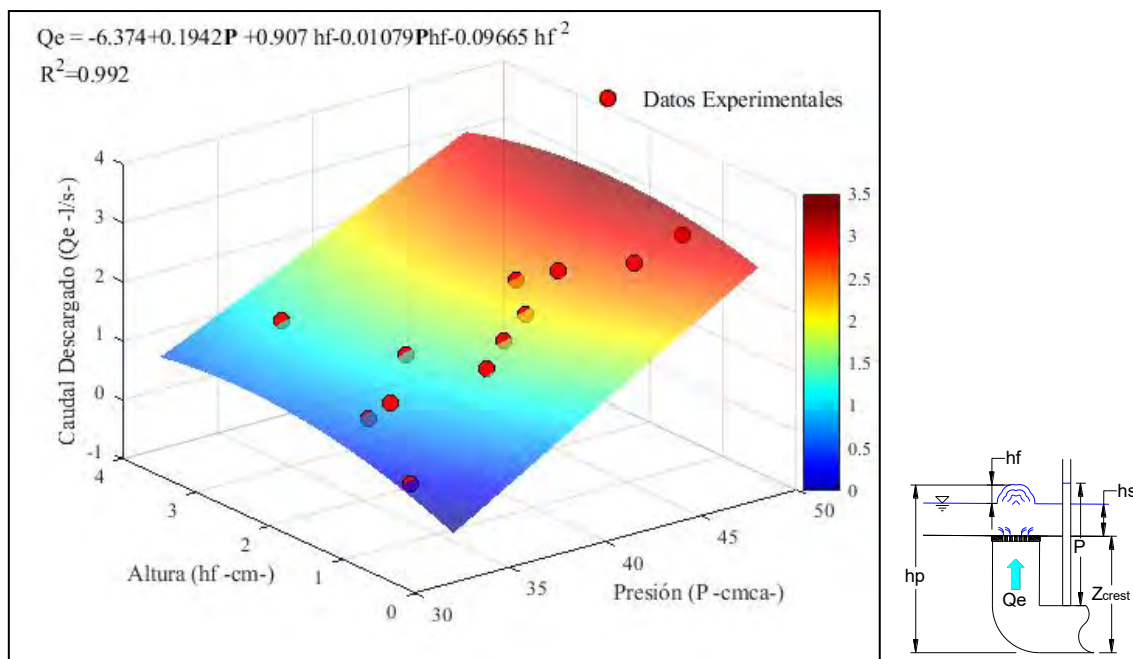


Figura 4-45 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia ahogada con rejilla de fierro fundido y caudal de inundación de 20 l/s.

Los caudales de surgencia presentados en las Figuras 4-40 a la 4-45, se concentran en la figura 4-46 y se observa la misma tendencia que para la surgencia con la tapa de concreto, independientemente del caudal de surgencia. En el rango de presión de 3 a 35 cmca, la tapa se mantiene fija en el brocal (Figura 4-47a), mientras que para un rango de presión de 35 a 55 cmca, es donde se presenta la abertura de la rejilla (Figura 4-47b). El caudal con el cual se inicia la abertura es del orden de 1.2 l/s, al cual le corresponde una presión de los 35 cmca equivalente a 350 kgf/m^2 ó 0.035 kgf/cm^2 .

Respecto a los coeficientes de descarga para la surgencia ahogada de la rejilla de fierro fundido, para un caudal de inundación de 0.867 l/s, se obtiene un coeficiente de descarga de 0.56 con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.89$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.3 y un error absoluto medio (MAE) = 0.2 (Figura 4-48)

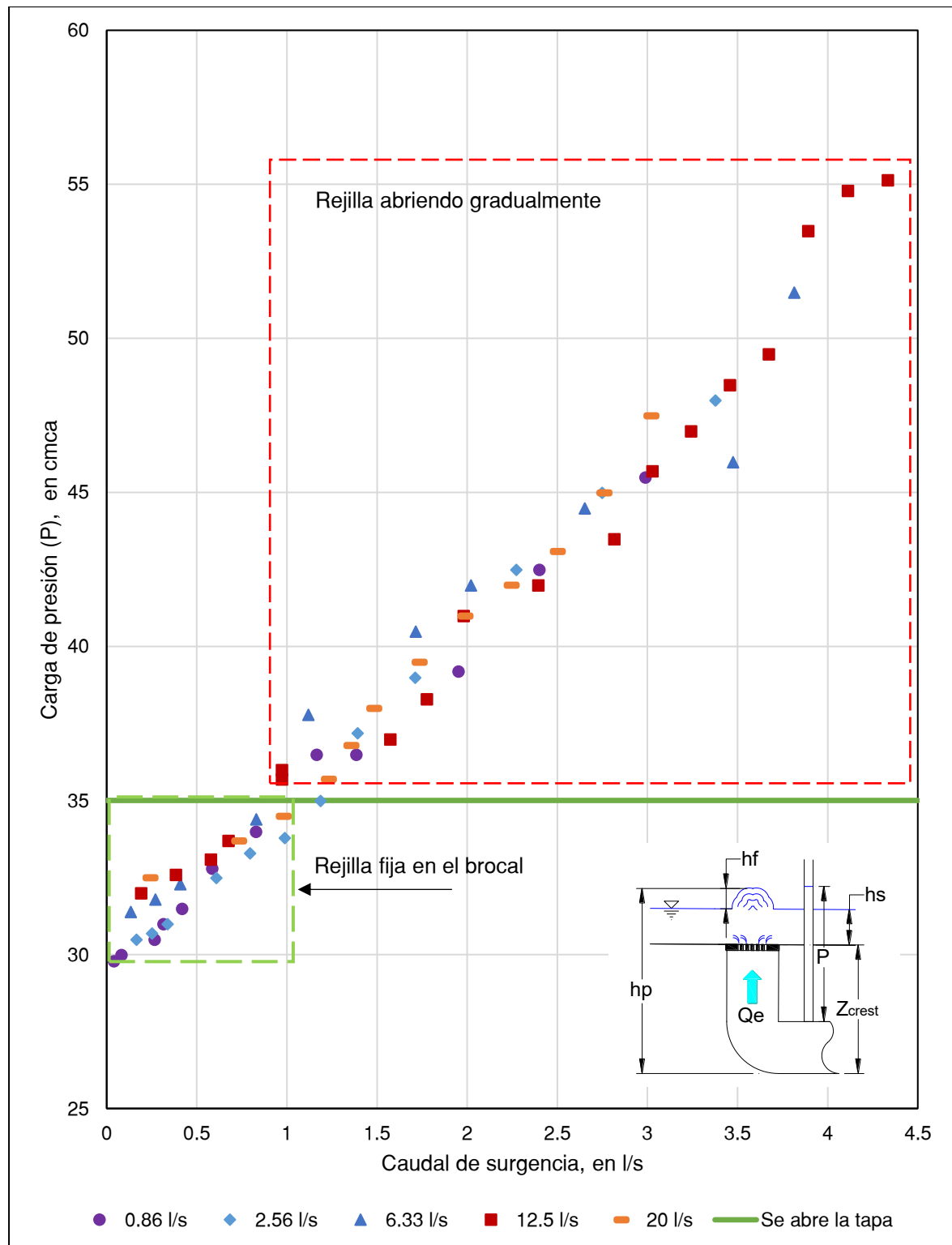


Figura 4-46 Zonas de desplazamiento de la rejilla de fierro fundido para diferentes cargas de presión y diferentes caudales de ahogamiento.

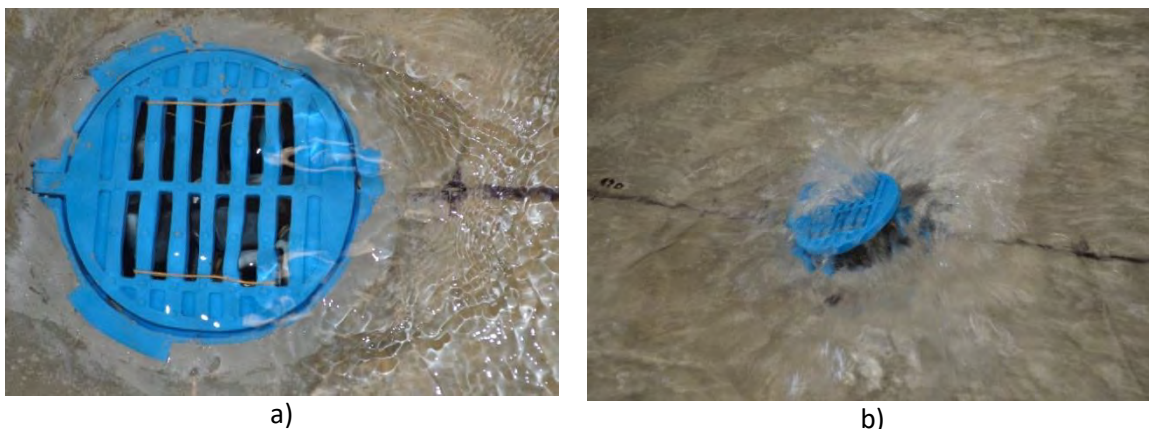


Figura 4-47 Rejilla de hierro fundido en surgencia libre, a) rejilla fija, b) rejilla abriendo

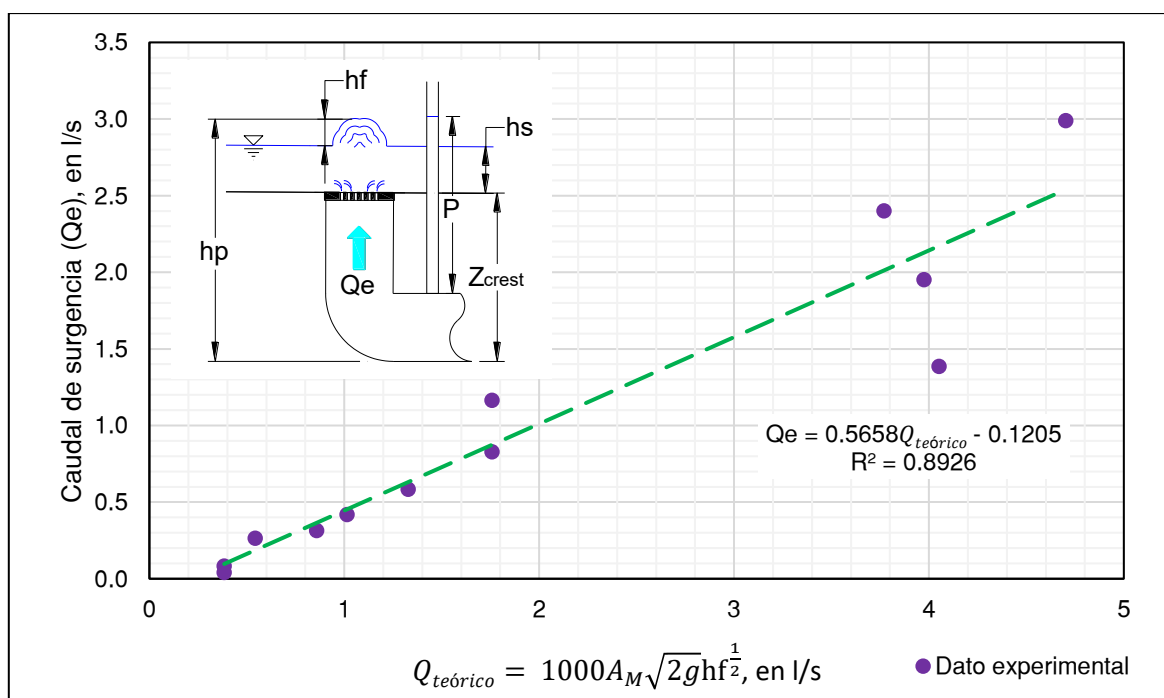


Figura 4-48 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia con la rejilla de hierro fundido, con un caudal en la calle de 0.86 l/s.

Con un caudal de inundación de 2.57 l/s, se obtiene un coeficiente de descarga de 0.4 con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.92$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.34 y un error absoluto medio (MAE) = 0.27 (Figura 4-49).

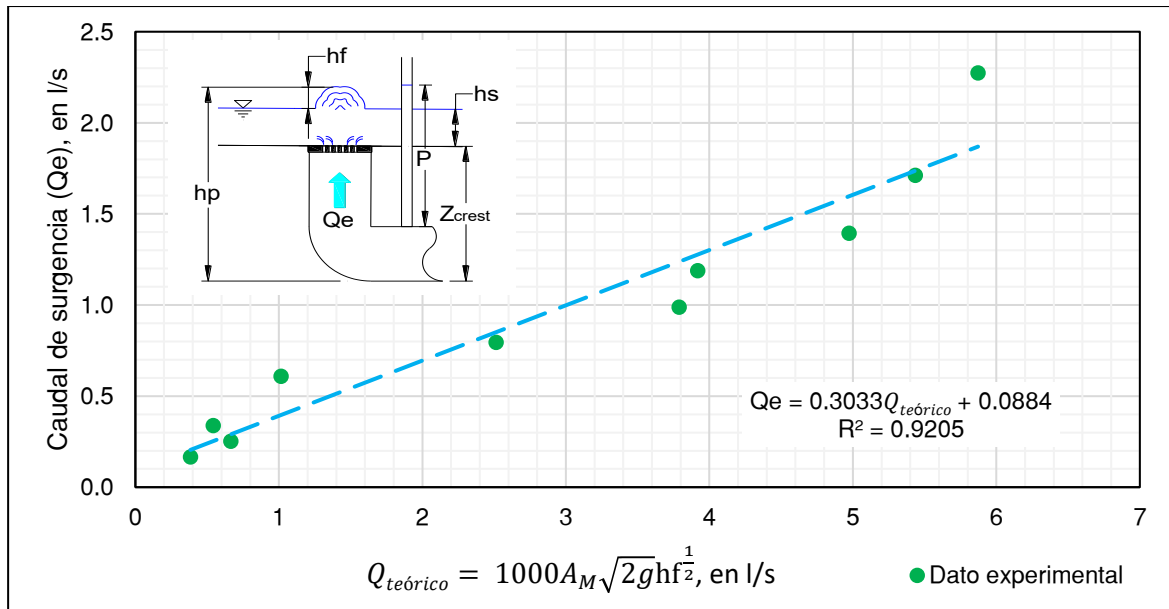


Figura 4-49 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia con la rejilla de hierro fundido, con caudal en la calle de 2.56 l/s.

Mientras que, si el gasto de inundación es de 6.34 l/s, se obtiene un coeficiente de descarga de 0.64 con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.95$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.27 y un error absoluto medio (MAE) = 0.19 (Figura 4-50).

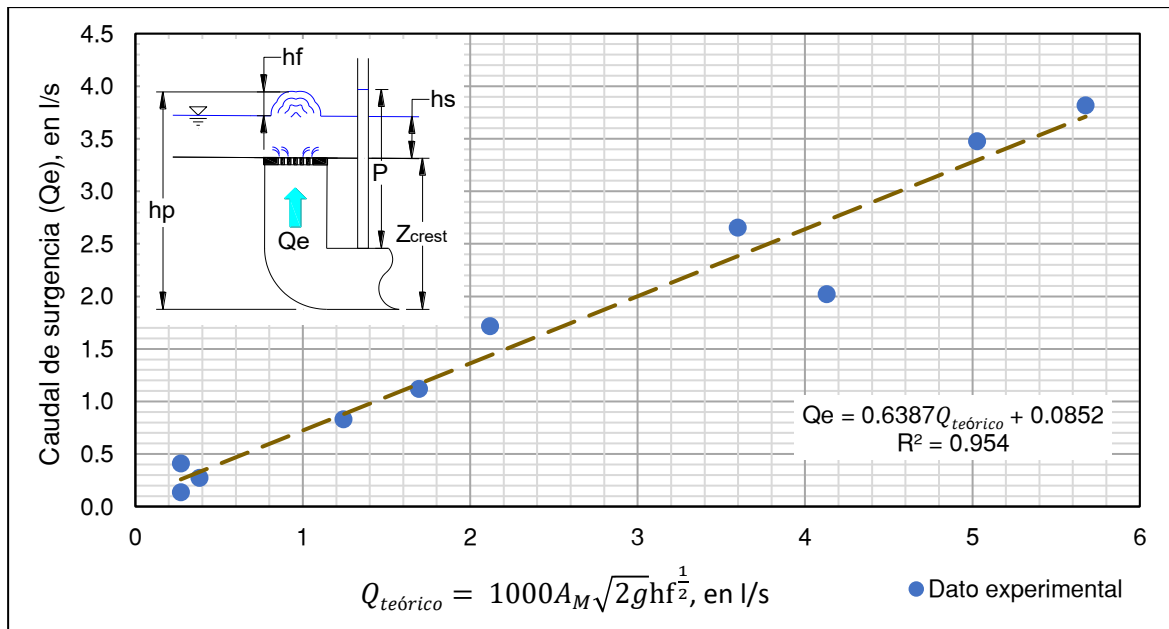


Figura 4-50 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia con rejilla de hierro fundido, con un caudal en la calle de 6.33 l/s.

Para un gasto de inundación de 12.5 l/s, el coeficiente de descarga es de 0.59 con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.92$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.37 y un error absoluto medio (MAE) = 0.32 (Figura 4-50).

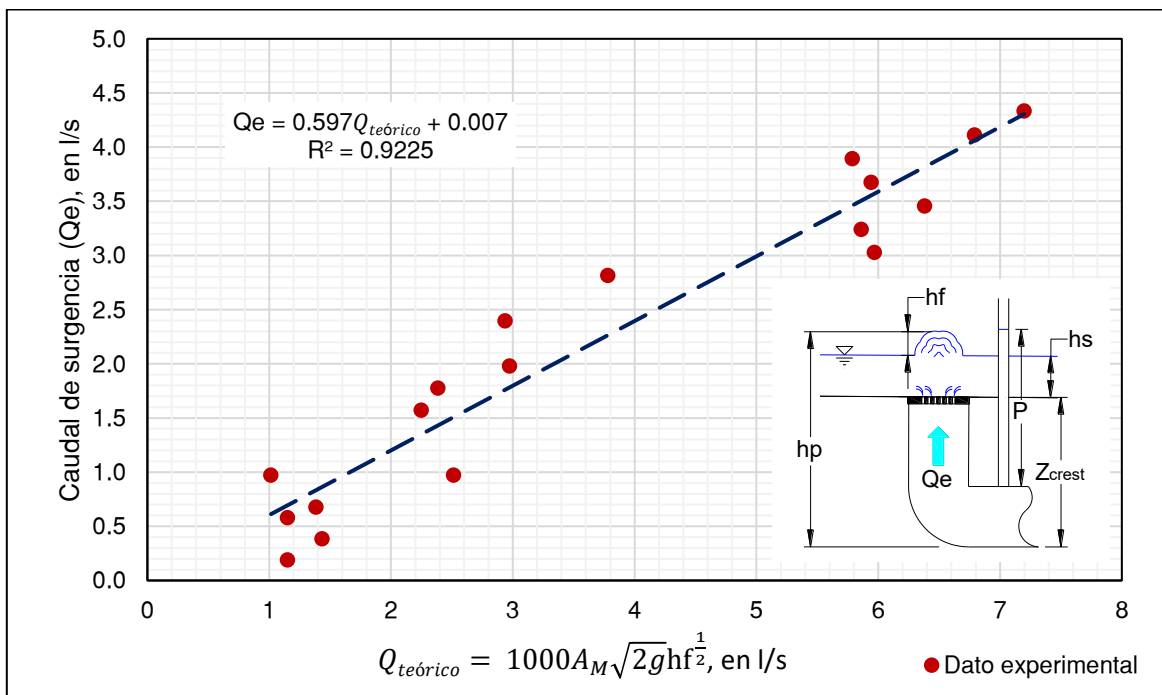


Figura 4-51 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia con la rejilla de fierro fundido, con un caudal en la calle de 12.5 l/s.

Finalmente, para un caudal de 20.1 l/s, se obtiene un coeficiente de descarga de 0.63 con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.94$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.19 y un error absoluto medio (MAE) = 0.15 (Figura 4-51).

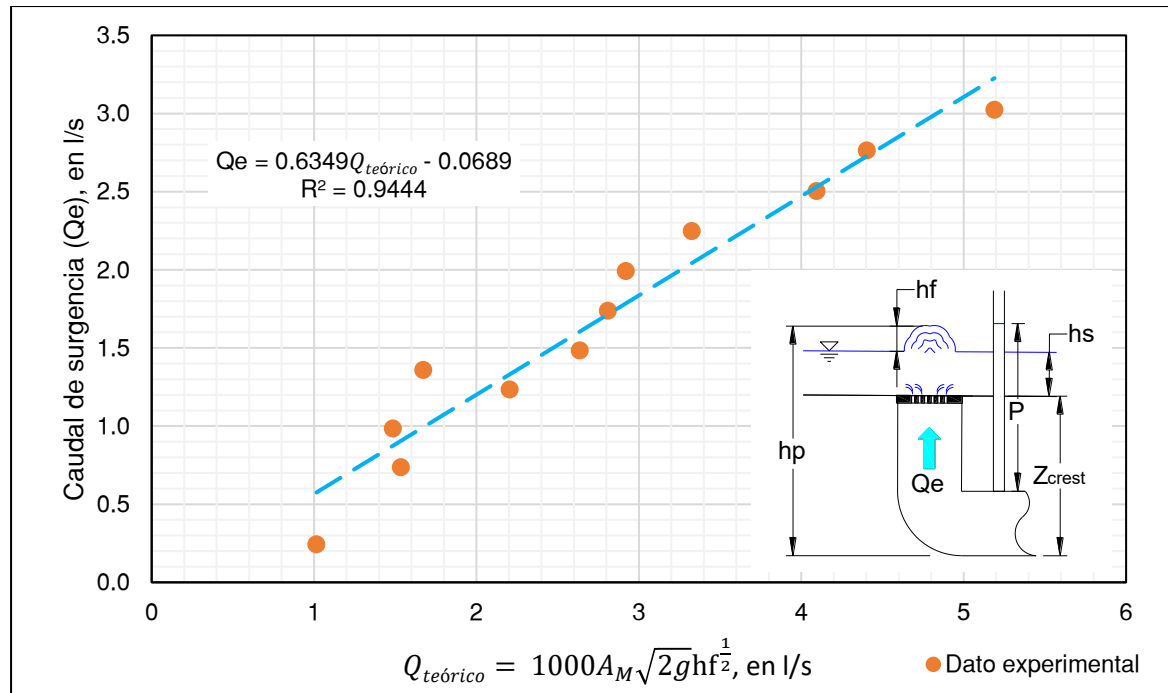


Figura 4-52 Coeficiente de descarga ahogada en surgencia con la rejilla de fierro fundido, con un caudal en la calle de 20 l/s.

4.1.5 Resultados obtenidos de los experimentos en condiciones del Escenario 4.

El escenario 4, se experimentó con surgencia libre, para lo cual, sólo se envió agua por surgencia. Los resultados que a continuación se presentan están de acuerdo con el caso analizado, primero el brocal sin tapa después los resultados de la tapa de concreto y finalmente la rejilla de fierro fundido.

4.1.5.1 Surgencia libre con brocal sin tapa

En la figura 4-53 se presentan los datos obtenidos experimentalmente en el modelo físico de carga hidráulica medida al centro de la tapa de concreto. El máximo caudal descargado es del orden de los 5.4 l/s y le corresponde un tirante de 5.2 cm. Para la curva de ajuste se obtiene un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.97$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.30 y un error absoluto medio (MAE) = 0.27.

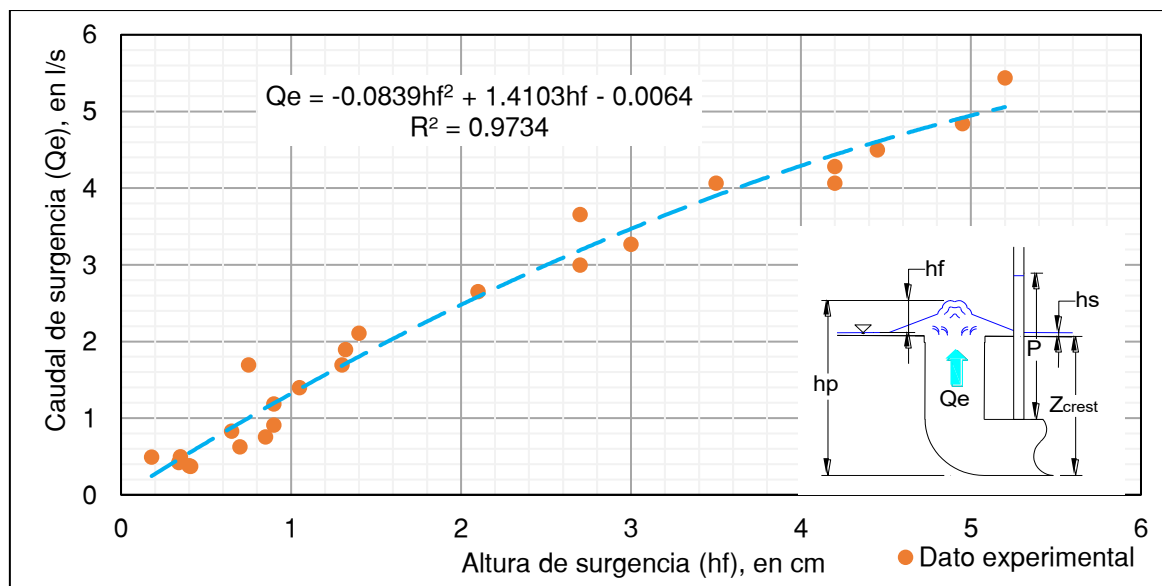


Figura 4-53 Variación del caudal de surgencia (Q_e) respecto a la altura de la surgencia (h_f), para surgencia con descarga libre en el brocal sin tapa.

El coeficiente de descarga para el brocal sin tapa trabajando a surgencia con descarga libre es $C_o = 0.59$ al cual le corresponde un coeficiente de determinación $R^2 = 0.96$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.28 y un Error absoluto medio (MAE) = 0.22 (Figura 4-54).

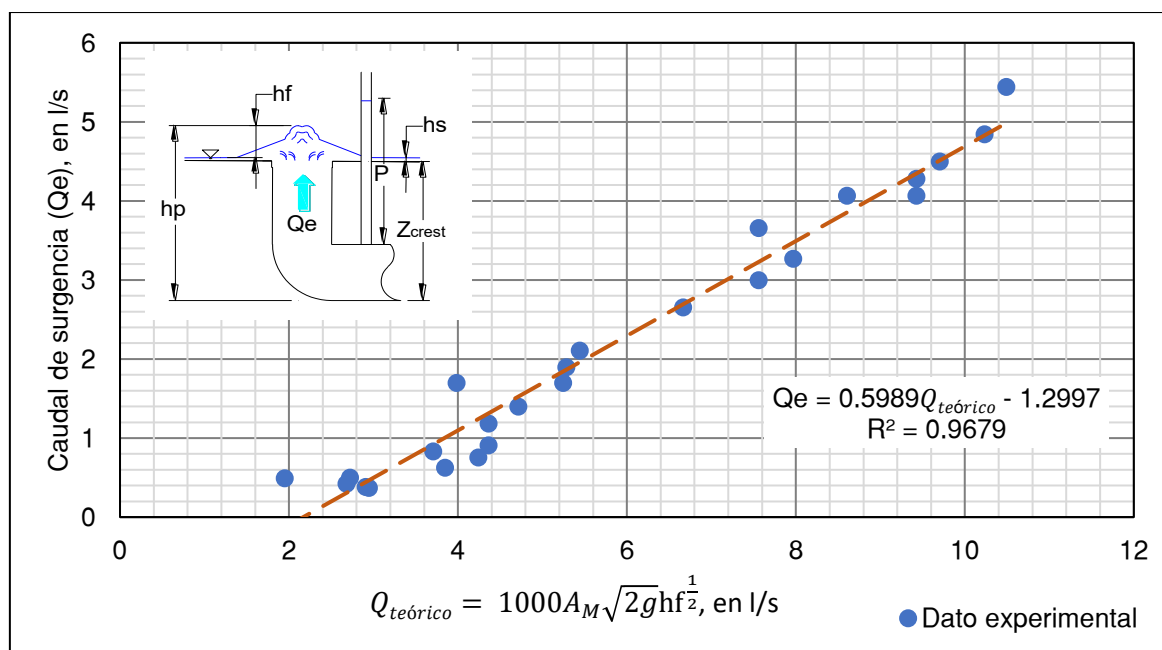


Figura 4-54 Coeficiente de descarga para surgencia libre en del brocal sin tapa.

4.1.5.2 Surgencia libre con tapa de concreto

En surgencia libre para la tapa de concreto se presentan los resultados del caudal que capta, las presiones que se presentan para diferentes caudales de surgencia en las diferentes etapas del fenómeno y los coeficientes de descarga en función del caudal descargado.

En la Figura 4-55 se presenta la relación entre la altura de surgencia (h_f) y el caudal de surgencia (Q_e). El caudal máximo registrado alcanza aproximadamente 1.4 l/s, correspondiendo a una altura h_f de 5 cm. En cuanto a la curva de ajuste, se obtuvieron métricas que respaldan su validez, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.98, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) de 0.05 y un error absoluto medio (MAE) de 0.03.

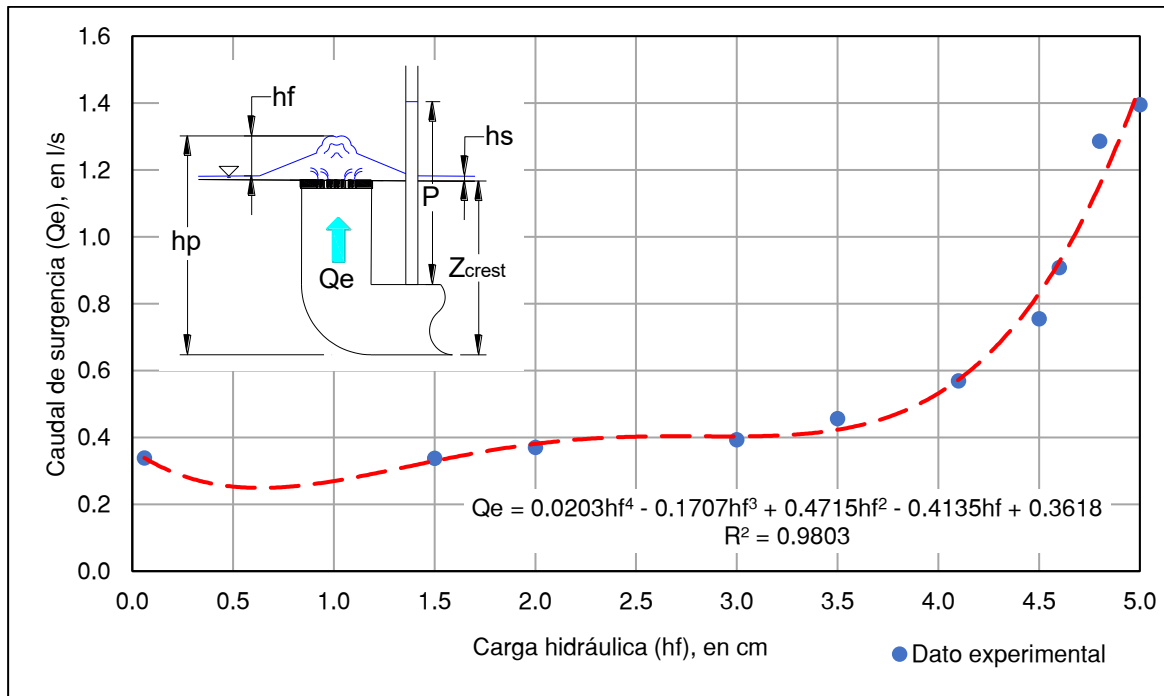


Figura 4-55 Variación del caudal de surgencia (Q_e) respecto a la altura total de la surgencia (h_f), para surgencia con descarga libre en el brocal con tapa de concreto.

Bajo esta condición de surgencia libre, la tapa de concreto se desplaza a partir de los 35 cmca y la remueve del brocal cuando alcanza una presión 39 cmca y a partir de ese punto la presión y el tirante en la calle tiende a disminuir sus valores (Figura 4-56). En la figura 4-56 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y la altura de surgencia (h_f) con su respectiva ecuación

de ajuste, la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.834$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.1614.

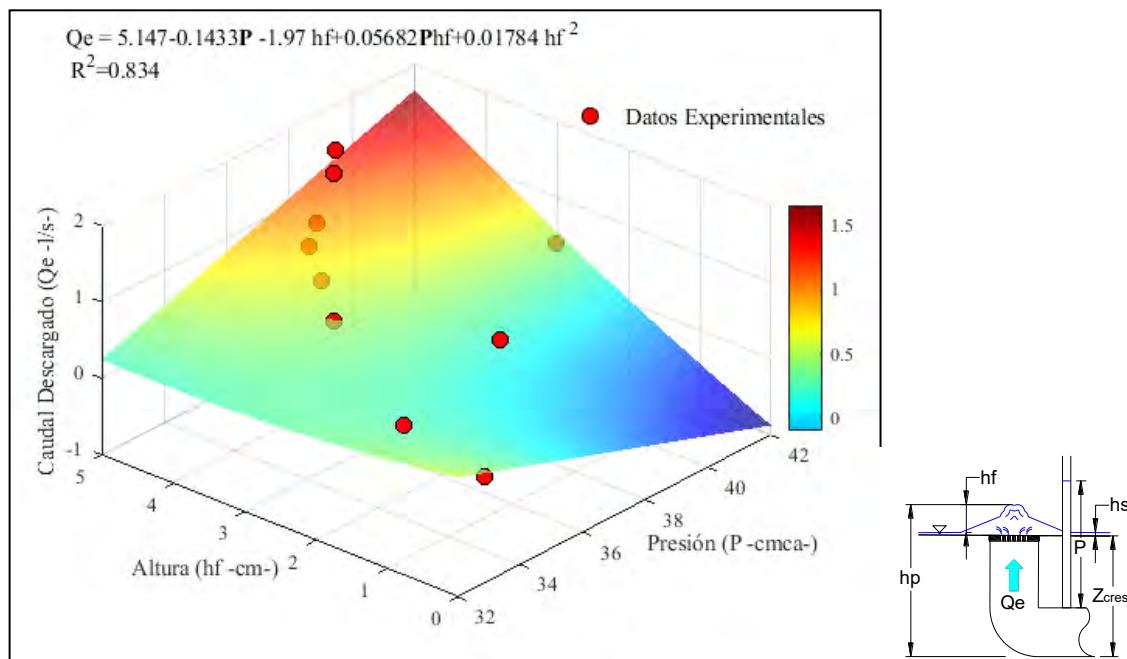


Figura 4-56 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (hf) para surgencia libre, con tapa de concreto.

La tapa de concreto en surgencia presenta tres etapas en su desplazamiento; al inicio está fija en su brocal posteriormente se mantiene flotando dentro del brocal y finalmente es desplazada hacia aguas abajo (Figura 4-57).

La tapa de concreto en condiciones de surgencia libre, el caudal máximo que puede descargar es del orden de 1.4 l/s. El coeficiente de descarga para surgencia libre de la tapa de concreto es de $Co = 0.10$ y a su línea de ajuste le corresponde un coeficiente de determinación $R^2 = 0.94$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.08 y un error absoluto medio (MAE) = 0.08 (Figura 4-58).

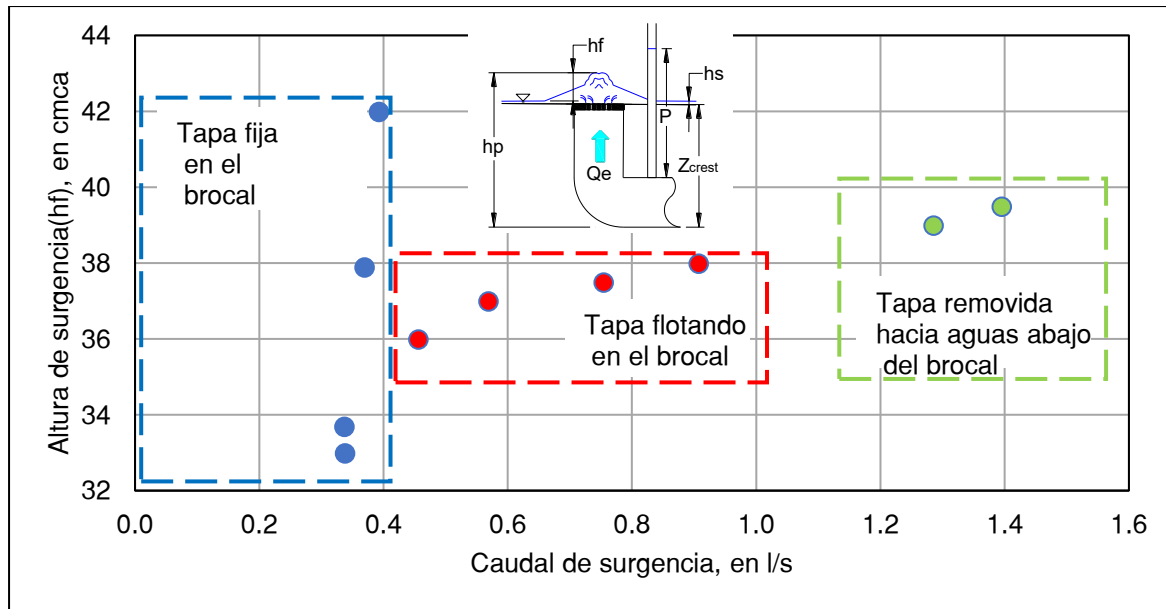


Figura 4-57 Zonas de desplazamiento de la tapa de concreto para diferentes cargas de presión, para surgencia libre.

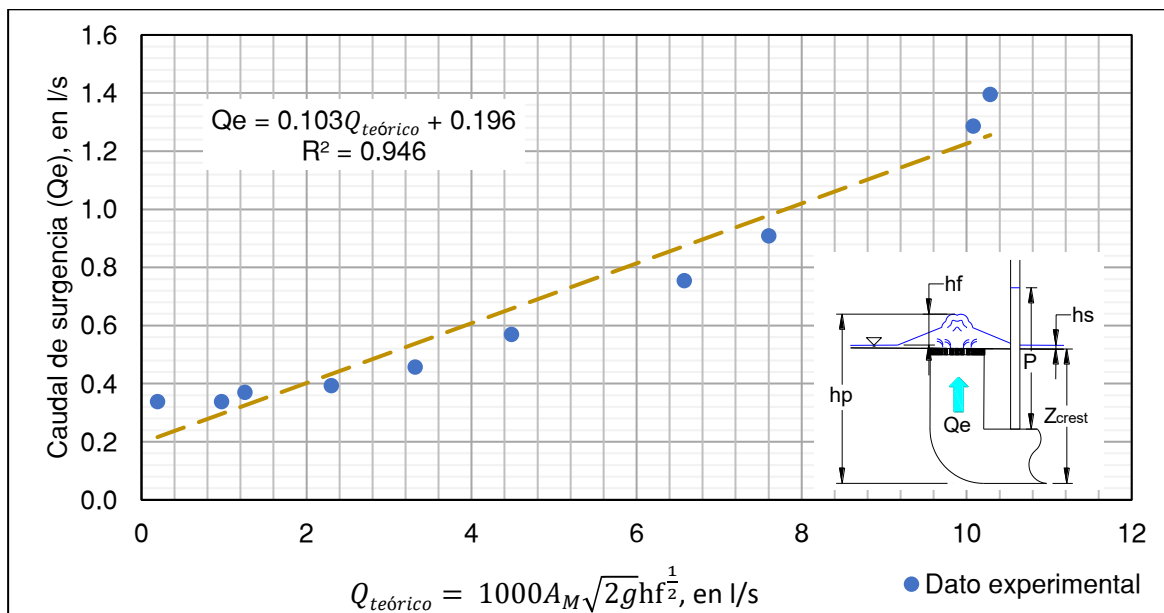


Figura 4-58 Coeficiente de descarga en surgencia libre con tapa de concreto.

4.1.5.3 Surgencia libre con la rejilla de fierro fundido

Para la rejilla de fierro fundido y como producto de los datos experimentales, se obtuvieron valores de caudal descargado, las diferentes presiones que abren la rejilla y su coeficiente de descarga para este escenario.

En la figura 4-59 se muestra la altura de la surgencia medida desde el nivel de la calle (carga hidráulica) al centro de la rejilla contra el caudal descargado. Bajo estas condiciones el máximo caudal que descarga la rejilla de fierro fundido es de 2.8 l/s correspondiente a un tirante de 3.1 cm. Después de ese punto la carga de presión en la tubería (P) desciende debido a que la tapa ya se abrió completamente. Para la curva de ajuste se tiene un coeficiente de determinación $R^2 = 0.95$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.19 y un error absoluto medio (MAE) = 0.14.

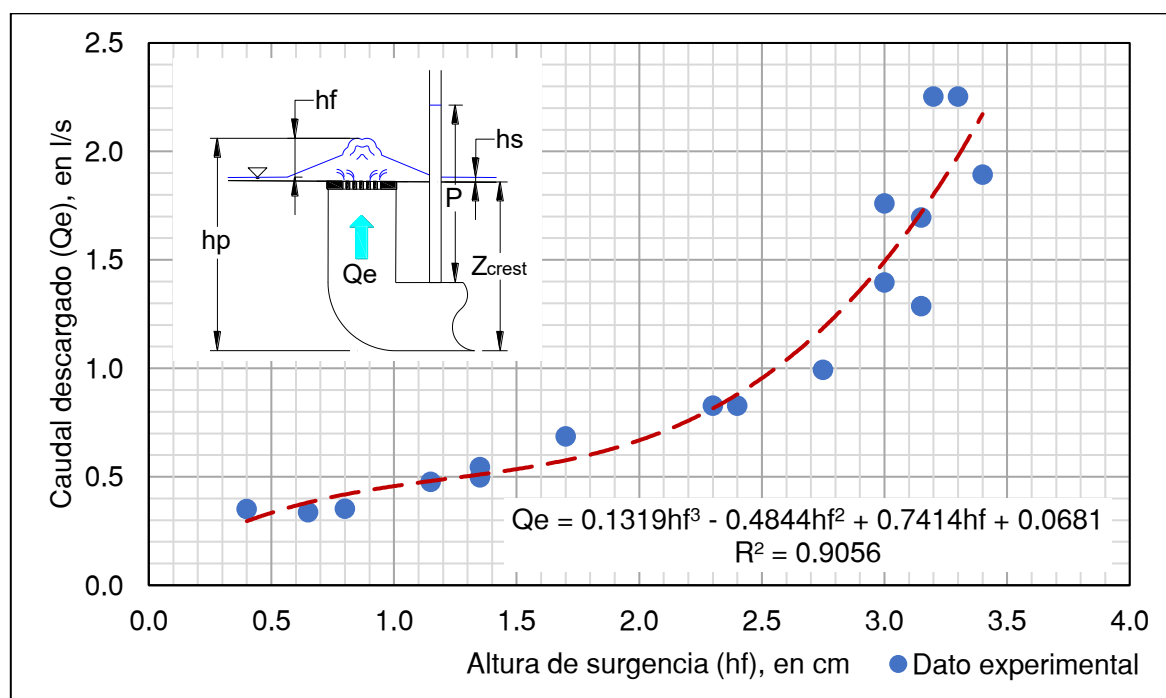


Figura 4-59 Variación del caudal de surgencia (Q_e) respecto a la altura de la surgencia (h_f), para surgencia con descarga libre en la rejilla de fierro fundido.

Una vez determinado el caudal de surgencia libre en el brocal con rejilla de fierro fundido, se determinó que la máxima presión que se presenta en la tubería, bajo esta condición es de 51

Resultados

cmca, para un caudal de surgencia 3.78 l/s y esto sucede cuando la altura de la surgencia medida desde el nivel de calle es de 8 cm. En la figura 4-60 se presenta el comportamiento del caudal de surgencia (Q_e) de forma multiparamétrica, en función de la carga de presión (P) en el pozo de visita y la altura de surgencia (h_f) con su respectiva ecuación de ajuste, la cual presenta un coeficiente de determinación $R^2=0.993$ y una raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.0952.

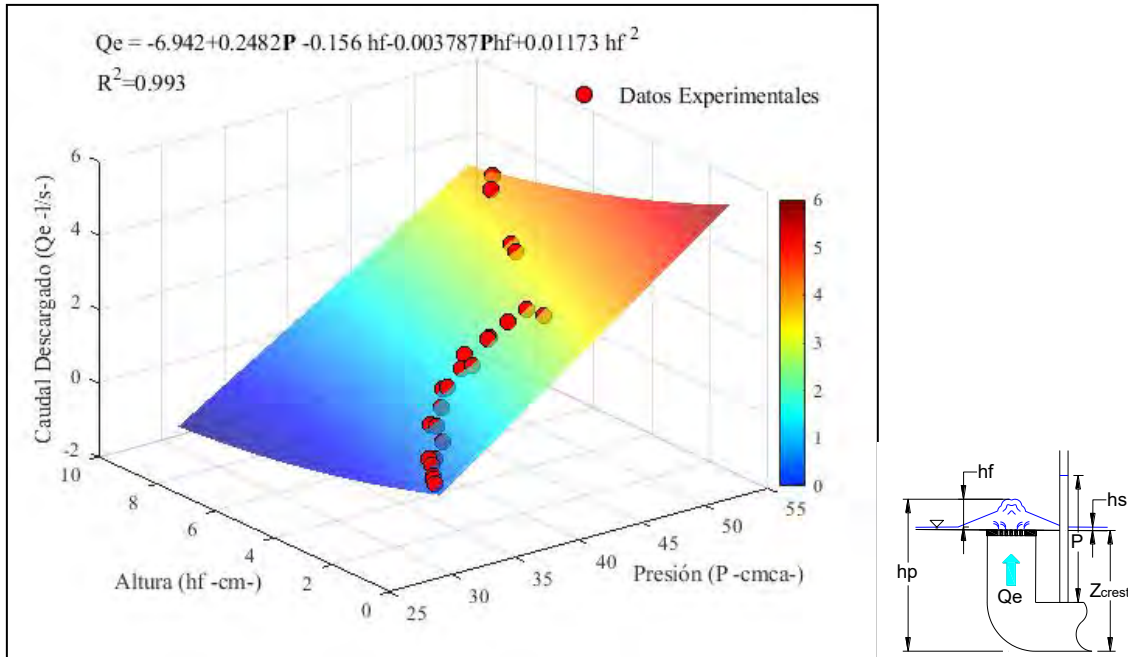


Figura 4-60 Comportamiento del caudal de surgencia (Q_e), en función de la carga de presión (P) y altura de surgencia (h_f) para surgencia libre, par rejilla de fierro fundido.

En la experimentación de la surgencia libre en la rejilla de fierro fundido, en la figura 4-61 se presentan dos etapas del fenómeno, de 30 a 37 cmca de presión, la rejilla se mantiene cerrada y a partir de 37 cmca la rejilla inicia su apertura de forma gradual hasta alcanzar su máxima apertura con una presión de 52 cmca, para esta presión se descarga un caudal de 3.8 l/s, este es el caudal que puede descargar la rejilla de fierro fundido en surgencia libre, para su apertura máxima.

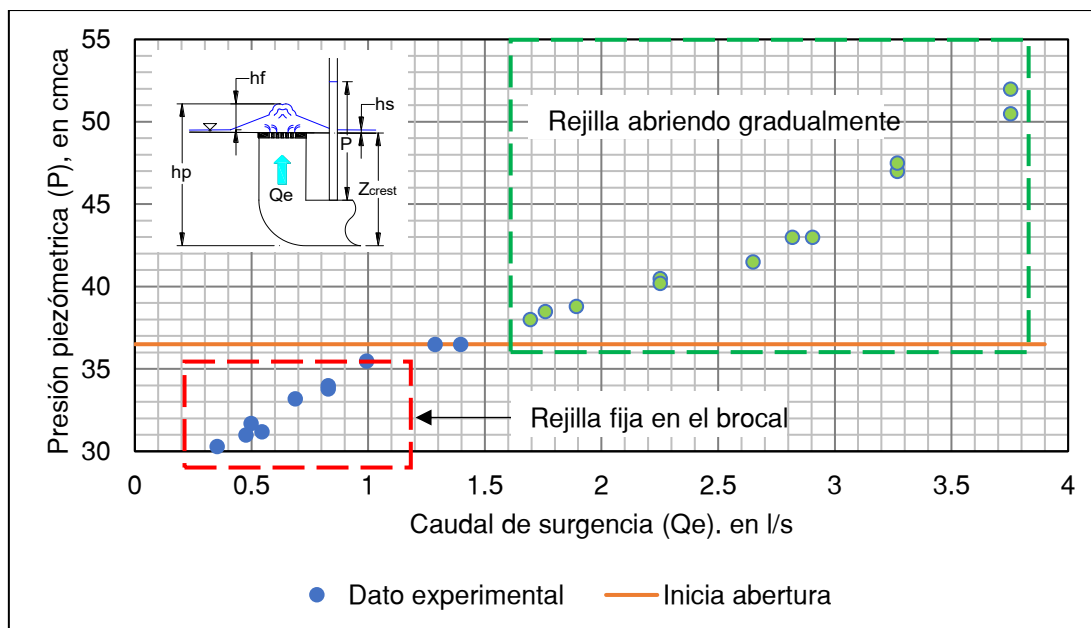


Figura 4-61 Zonas de desplazamiento de la tapa de concreto para diferentes cargas de presión, para surgencia libre en la rejilla de fierro fundido.

El coeficiente de descarga para la rejilla de fierro fundido para el escenario de surgencia libre es $C_o = 0.65$ con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.88$, una raíz del error cuadrático medio (RMSE) = 0.36 y un error absoluto medio (MAE) = 0.27 (Figura 4-62).

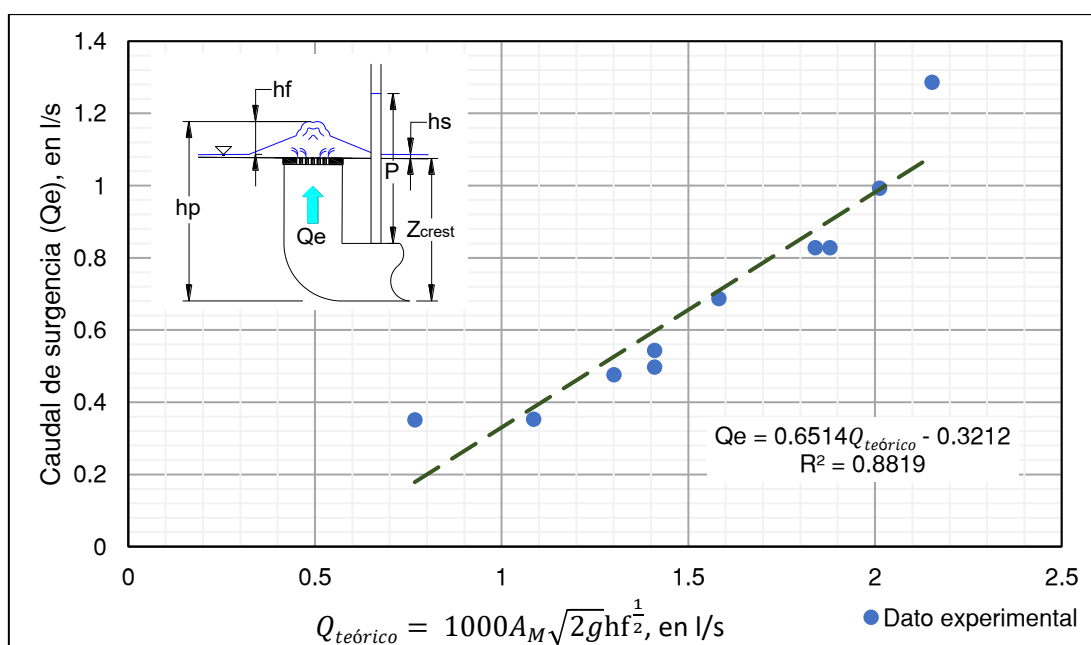


Figura 4-62 Coeficiente de descarga para la rejilla de fierro fundido en surgencia libre.

4.1.6 Resultados escalados a prototipo

Una vez realizado las pruebas experimentales, en este apartado se presentan los resultados escalados al prototipo, es decir, que caudal y tirante se pueden presentar bajo las condiciones experimentales realizadas en el modelo, para ello se escalan los valores medidos de acuerdo con las escalas de la tabla 3-1, presentando los datos representativos para cada caso y para los cuatro escenarios.

El coeficiente de Manning en el modelo físico corresponde a concreto pulido ($n = 0.0115$) una vez escalado a se obtiene $n = 0.015$ (asfalto rugoso). Respecto a las velocidades que se obtuvieron para régimen supercrítico se tiene que, la velocidad en el modelo físico fue de $v = 0.92$ m/s, mientras que, para el prototipo corresponde a $v = 2.25$ m/s y para régimen subcrítico la velocidad en el modelo físico es $v = 0.6$ m/s y en el prototipo de $v = 1.47$ m/s.

4.1.6.1 Resultados escalados de caudal y tirante, para el escenario 1, brocal sin tapa.

En la tabla 4-3, se presentan los datos de tirantes y caudales tanto el enviado en la calle como el captado por el brocal sin tapa. Los datos obtenidos en el modelo físico y los correspondientes al prototipo, en condiciones del escenario 1 correspondiente a sumidero libre y brocal sin tapa.

4.1.6.2 Resultados escalados de caudal y tirante del escenario 1, tapa de concreto.

Para el funcionamiento de sumidero libre en la tapa de concreto, en la tabla 4-4, se presentan los valores tanto del modelo como del prototipo, donde se observa que el caudal de captación tiende a ser constante a partir de un caudal en la calle de 0.01449 m³/s y aunque aumente dicho caudal, el caudal de captación no aumenta, permanece constante. Escalado al prototipo indica que cuando el caudal es de 1.278 m³/s el caudal captado es constante con un valor de 0.033 m³/s.

Tabla 4-3 Datos experimentales escalados al prototipo para condiciones del escenario 1 y brocal sin tapa.

Modelo físico			Prototipo		
hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)
0.004	0.00063	0.000112	0.026	0.055	0.01
0.005	0.00091	0.000161	0.03	0.08	0.014
0.006	0.00140	0.000273	0.033	0.123	0.024
0.016	0.00621	0.001184	0.093	0.547	0.104
0.018	0.00790	0.001508	0.105	0.697	0.133
0.022	0.00965	0.001662	0.132	0.851	0.147
0.023	0.01085	0.001769	0.135	0.957	0.156
0.024	0.01251	0.002427	0.144	1.103	0.214
0.025	0.01890	0.003058	0.147	1.667	0.27
0.026	0.02010	0.003286	0.153	1.772	0.29

Tabla 4-4 Datos experimentales escalados a prototipo para condiciones del escenario 1 y tapa de concreto.

Modelo físico			Prototipo		
hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)
0.003	0.00052	0.000067	0.018	0.046	0.006
0.009	0.00257	0.000268	0.054	0.226	0.024
0.0155	0.00594	0.000309	0.093	0.524	0.027
0.02	0.00899	0.000330	0.120	0.793	0.029
0.025	0.01121	0.000330	0.150	0.988	0.029
0.02	0.01309	0.000353	0.120	1.154	0.031
0.0205	0.01449	0.000377	0.123	1.278	0.033
0.021	0.01532	0.000377	0.126	1.351	0.033
0.022	0.01662	0.000377	0.132	1.466	0.033
0.025	0.02010	0.000377	0.150	1.772	0.033

4.1.6.3 Resultados escalados de caudal y tirante del escenario 1, rejilla de fierro fundido.

Para la condición de sumidero libre para la rejilla de fierro fundido, en la tabla 4-5 se observa que el caudal de captación en el modelo se hace constante a partir de los 13.48 l/s circulando en la calle lo que ocasiona solo un caudal captado de 1.2 l/s, en este caso el tirante llega a un valor de 2.8 cm, lo que corresponde a un caudal de 151 l/s que corresponde a 16.5 cm en el prototipo.

Tabla 4-5 Datos experimentales escalados a prototipo para la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 1.

Modelo físico			Prototipo		
hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)
0.003	0.00041	0.000022	0.018	0.036	0.002
0.006	0.00113	0.000112	0.036	0.1	0.01
0.007	0.00134	0.000147	0.042	0.118	0.013
0.009	0.00218	0.000237	0.054	0.192	0.021
0.01	0.00273	0.000273	0.06	0.241	0.024
0.013	0.00375	0.000397	0.075	0.331	0.035
0.014	0.0045	0.00042	0.084	0.397	0.037
0.016	0.00532	0.000495	0.093	0.469	0.044
0.018	0.00607	0.000549	0.105	0.536	0.048
0.019	0.00717	0.000635	0.114	0.632	0.056
0.02	0.01085	0.001099	0.12	0.957	0.097
0.021	0.00775	0.000763	0.123	0.684	0.067
0.022	0.00948	0.000903	0.129	0.836	0.08
0.024	0.01348	0.001272	0.141	1.189	0.112
0.025	0.01408	0.001272	0.147	1.242	0.112
0.026	0.01511	0.001272	0.156	1.333	0.112
0.028	0.0201	0.001715	0.165	1.772	0.151

4.1.6.4 Resultados escalados de caudal y tirante del escenario 2, brocal sin tapa.

Respecto al brocal sin tapa, la tabla 4-6 muestra los resultados experimentales del modelo, escalados al prototipo y se observa que para los máximos caudales empleados en los

experimentos del modelo ($Q_c=19.4$ l/s), el caudal de captación tiende a ser constante cuando el caudal en la calle es mayor a 9 l/s. Lo que implica que, aunque se aumente el caudal en la calle el caudal captado es constante.

Tabla 4-6 Datos experimentales escalados a prototipo para el brocal sin tapa en condiciones del escenario 2.

Modelo físico			Prototipo		
hs (m)	Q_c (m ³ /s)	Q_e (m ³ /s)	hs (m)	Q_c (m ³ /s)	Q_e (m ³ /s)
0.011	0.0010	0.0011	0.066	0.092	0.095
0.013	0.0017	0.0018	0.078	0.149	0.163
0.017	0.0023	0.0021	0.102	0.199	0.183
0.02	0.0032	0.0032	0.12	0.280	0.283
0.028	0.0043	0.0045	0.168	0.377	0.398
0.038	0.0058	0.0047	0.228	0.513	0.414
0.046	0.0075	0.0047	0.276	0.658	0.414
0.052	0.0090	0.0048	0.312	0.793	0.422
0.057	0.0102	0.0049	0.342	0.895	0.430
0.062	0.0118	0.0049	0.372	1.037	0.430
0.066	0.0133	0.0049	0.396	1.171	0.430
0.064	0.0143	0.0049	0.384	1.260	0.430
0.069	0.0147	0.0049	0.414	1.296	0.430
0.073	0.0155	0.0050	0.438	1.370	0.438
0.075	0.0164	0.0050	0.45	1.446	0.438
0.079	0.0187	0.0051	0.474	1.646	0.446
0.089	0.0194	0.0052	0.534	1.708	0.455

4.1.6.5 Resultados escalados de caudal y tirante del escenario 2, tapa de concreto.

Los resultados para este escenario se resumen en de la tabla 4-7, donde se muestra el tirante, caudal en la calle y de captación tanto del modelo como los correspondientes al prototipo. Se observa que el para este escenario el caudal de captación tiende a ser constante a 0.48 l/s para los caudales en la calle mayores a 13.48 l/s, que corresponde a 4.2 l/s en el prototipo, lo que

Resultados

demuestra que la tapa de concreto no es diseñada para captar agua de lluvia o superficial en la calle dados sus bajos caudales captación.

Tabla 4-7 Datos experimentales escalados a prototipo para la tapa de concreto en condiciones del escenario 2.

Modelo físico			Prototipo		
hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)
0.011	0.00091	0.000268	0.066	0.080	0.024
0.023	0.00203	0.000288	0.138	0.179	0.025
0.037	0.00428	0.000330	0.222	0.377	0.029
0.047	0.00647	0.000377	0.282	0.571	0.033
0.058	0.00852	0.000401	0.348	0.751	0.035
0.065	0.01068	0.000427	0.390	0.941	0.038
0.070	0.01213	0.000453	0.420	1.070	0.040
0.077	0.01348	0.000480	0.462	1.189	0.042
0.084	0.01554	0.000480	0.504	1.370	0.042
0.100	0.02010	0.000480	0.600	1.772	0.042

4.1.6.6 Resultados escalados de caudal y tirante obtenidos en condiciones del escenario 2, rejilla de fierro fundido.

Respecto a la rejilla de fierro fundido, se escalaron los valores de tirante (carga hidráulica), caudal que transita por la calle y caudal que capta la rejilla, los valores experimentados en el modelo y escalados al prototipo se presentan en la tabla 4-8. Se observa que, para caudales mayores a 11.4 l/s en la calle, el caudal captado se hace constante a 2.7 l/s, y para estos valores en el prototipo corresponden a un caudal en la calle de 1 m³/s y caudal captado de 0.244 m³/s, lo que indica que solo se capta menos del 25%, es decir el 75% del caudal sigue escurriendo en la calle. También se observa que después de 11.4 l/s en la calle, el flujo presentó mucha turbulencia, de ahí que los valores de caudal captado presenten fluctuaciones.

Tabla 4-8 Datos experimentales escalados a prototipo para condiciones del escenario 2 y rejilla de fierro fundido.

Modelo físico			Prototipo		
hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)
0.008	0.0013	0.00022	0.048	0.113	0.019
0.018	0.0027	0.00083	0.108	0.241	0.073
0.022	0.0043	0.00087	0.132	0.377	0.076
0.039	0.0093	0.00243	0.234	0.822	0.214
0.053	0.0114	0.00277	0.318	1.004	0.244
0.057	0.0129	0.00277	0.342	1.137	0.244
0.062	0.0145	0.00277	0.372	1.278	0.244
0.065	0.0151	0.00291	0.39	1.333	0.257
0.067	0.0160	0.00291	0.402	1.408	0.257
0.071	0.0168	0.00291	0.426	1.485	0.257
0.081	0.0189	0.00298	0.486	1.667	0.263

4.1.6.7 Resultados escalados de caudal y tirante obtenidos en condiciones del escenario 3, brocal sin tapa.

Para el fenómeno de surgencia en el brocal sin tapa, en la tabla 4-9 se presentan los diferentes parámetros tanto del modelo como los escalados al prototipo, para este fenómeno se incluye la carga de presión (piezométrica) en el pozo de visita, esta presión es importante para analizar la altura que alcanza el agua en la calle, denominada en este trabajo como altura de surgencia (hs), además solo se presenta para el caso en que el caudal de ahogamiento es máximo 20 l/s, por considerar el caso más crítico, además de los tirantes que se presentan en la calle y el caudal de surgencia que se fue variando.

Tabla 4-9 Datos experimentales escalados a prototipo para condiciones del escenario 3 y brocal sin tapa.

Modelo físico					Prototipo			
hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	P (mca)	P (kgf/cm ²)	hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	P (kgf/cm ²)
0.338	0.02010	0.000244	0.3308	0.033	2.028	1.772	0.021	0.198
0.351	0.02010	0.000489	0.3368	0.034	2.106	1.772	0.043	0.202
0.348	0.02010	0.000984	0.3498	0.035	2.088	1.772	0.087	0.210
0.354	0.02010	0.001234	0.3598	0.036	2.124	1.772	0.109	0.216
0.356	0.02010	0.001234	0.3748	0.037	2.136	1.772	0.109	0.225
0.366	0.02010	0.002247	0.3948	0.039	2.196	1.772	0.198	0.237
0.371	0.02010	0.003023	0.4098	0.041	2.226	1.772	0.267	0.246
0.381	0.02010	0.003285	0.4298	0.043	2.286	1.772	0.290	0.258
0.393	0.02010	0.003813	0.4548	0.045	2.358	1.772	0.336	0.273

4.1.6.8 Resultados escalados de caudal y tirante obtenidos en condiciones del escenario 3, tapa de concreto.

Con respecto al fenómeno de descarga ahogada, la presión aumenta cuando se realiza la surgencia con la tapa de concreto, hasta que se desplaza, en la tabla 4-10 se presentan los datos de caudal de ahogamiento que transita por la calle y el caudal que se adiciona por surgencia, medido en el modelo físico y escalados al prototipo.

4.1.6.9 Resultados escalados de caudal y tirante obtenidos en condiciones del escenario 3, rejilla de fierro fundido.

Para el fenómeno de surgencia ahogada con rejilla de fierro fundido, la presión que experimenta es en promedio el 10 % menor en comparación con la presión que experimenta la tapa de concreto cuando están abiertas, pero del 24% cuando la tapa está cerrada, lo que demuestra que para la tapa de concreto requiere de mayor presión para ser desplazada, los resultados del modelo y del prototipo se muestran en la tabla 4-11.

Tabla 4-10 Datos experimentales escalados al prototipo para condiciones del escenario 3 y tapa de concreto.

Modelo físico					Prototipo			
hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	P (mca)	P (kgf/cm ²)	hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	P (kgf/cm ²)
0.131	0.0189	0.00024	0.429800	0.0430	0.786	1.667	0.021	0.2579
0.133	0.0189	0.00047	0.474800	0.0475	0.798	1.667	0.042	0.2849
0.138	0.0189	0.00071	0.474800	0.0475	0.828	1.667	0.063	0.2849
0.140	0.0189	0.00095	0.477800	0.0478	0.840	1.667	0.084	0.2867
0.141	0.0189	0.00120	0.484800	0.0485	0.846	1.667	0.105	0.2909
0.149	0.0189	0.00169	0.484800	0.0485	0.894	1.667	0.149	0.2909
0.160	0.0189	0.00268	0.514800	0.0515	0.960	1.667	0.236	0.3089
0.165	0.0189	0.00293	0.534800	0.0535	0.990	1.667	0.259	0.3209

Tabla 4-11 Datos experimentales escalados a prototipo para condiciones del escenario 3 y la rejilla de fierro fundido.

Modelo físico					Prototipo			
hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	P (mca)	P (kgf/m ²)	hs (m)	Qc (m ³ /s)	Qe (m ³ /s)	P (kgf/cm ²)
0.331	0.0201	0.00024	0.3248	0.0325	1.986	1.772	0.021	0.19488
0.348	0.0201	0.00074	0.3368	0.0337	2.088	1.772	0.065	0.20208
0.346	0.0201	0.00098	0.3448	0.0345	2.076	1.772	0.087	0.20688
0.357	0.0201	0.00136	0.3678	0.0368	2.142	1.772	0.120	0.22068
0.355	0.0201	0.00148	0.3798	0.0380	2.130	1.772	0.131	0.22788
0.359	0.0201	0.00174	0.3948	0.0395	2.154	1.772	0.153	0.23688
0.361	0.0201	0.00250	0.4308	0.0431	2.166	1.772	0.221	0.25848
0.358	0.0201	0.00276	0.4498	0.0450	2.148	1.772	0.244	0.26988
0.362	0.0201	0.00302	0.4748	0.0475	2.172	1.772	0.267	0.28488

4.1.6.10 Resultados escalados de caudal y tirante obtenidos en condiciones del escenario 4, brocal sin tapa.

Para el fenómeno de surgencia libre solo se envía caudal por surgencia, por lo que, los datos de tirante y caudal de surgencia en del modelo y del prototipo se muestran en la tabla 4-12, donde se observa que a medida que aumenta el caudal de surgencia también aumenta la altura de surgencia (tirante alcanzado por la surgencia en la calle).

Tabla 4-12 Datos experimentales escalados al prototipo para condiciones del escenario 4 y brocal sin tapa.

Modelo físico		Prototipo	
hs (m)	Qe (m ³ /s)	hs (m)	Qe (m ³ /s)
0.004	0.00038	0.024	0.034
0.005	0.00091	0.030	0.080
0.007	0.00118	0.042	0.104
0.008	0.00140	0.048	0.123
0.010	0.00170	0.057	0.149
0.011	0.00189	0.066	0.167
0.013	0.00210	0.078	0.186
0.015	0.00265	0.090	0.234
0.016	0.00299	0.096	0.264
0.017	0.00365	0.102	0.322
0.018	0.00406	0.108	0.358
0.019	0.00428	0.114	0.377
0.023	0.00450	0.135	0.397
0.024	0.00484	0.141	0.427
0.029	0.00544	0.174	0.480

4.1.6.11 Resultados escalados de caudal y tirante obtenidos en condiciones del escenario 4, tapa de concreto.

La tabla 4-13, se muestran los valores para la surgencia libre con tapa de concreto tanto los obtenidos experimentalmente en el modelo como los escalados a condiciones reales (prototipo), donde se observa que para un caudal de surgencia de 0.39 l/s se alcanza una carga de presión de 0.4198 mca y para un caudal de 0.46 l/s la carga de presión cae a 0.3598 mca esto se debe a que se presenta el desplazamiento de la tapa.

Tabla 4-13 Datos experimentales escalados al prototipo para condiciones del escenario 4 y tapa de concreto.

Modelo físico				Prototipo		
hs (m)	Qe (m ³ /s)	P (mca)	P (kgf/cm ²)	hs (m)	Qe (m ³ /s)	P (kgf/cm ²)
0.001	0.00034	0.3298	0.0330	0.006	0.030	0.19788
0.001	0.00034	0.3368	0.0337	0.006	0.030	0.20208
0.001	0.00037	0.3788	0.0379	0.006	0.033	0.22728
0.003	0.00039	0.4198	0.0420	0.018	0.035	0.25188
0.005	0.00046	0.3598	0.0360	0.030	0.040	0.21588
0.006	0.00057	0.3698	0.0370	0.036	0.050	0.22188
0.007	0.00075	0.3748	0.0375	0.042	0.067	0.22488
0.007	0.00091	0.3798	0.0380	0.042	0.080	0.22788
0.010	0.00129	0.3898	0.0390	0.060	0.113	0.23388
0.013	0.00140	0.3948	0.0395	0.078	0.123	0.23688

4.1.6.12 Resultados escalados de caudal y tirante obtenidos en condiciones del escenario 4, rejilla de fierro fundido.

De la misma forma que para la tapa de concreto, en la tabla 4-14 se muestran los resultados escalados del tirante en la calle, caudal de surgencia y de la presión, que se experimenta en la surgencia libre la rejilla de fierro fundido, donde se observa que, la presión necesaria en el modelo para que se empiece a desplazar la tapa es de 0.38 mca, y para el prototipo de 2.28 mca, información que se debe considerar en el diseño de proyectos de drenaje pluvial.

Tabla 4-14 Datos experimentales escalados a prototipo para condiciones del escenario 4 y rejilla de fierro fundido.

Modelo físico				Prototipo		
hs (m)	Qe (m ³ /s)	P (mca)	P (kgf/cm ²)	hs (m)	Qe (m ³ /s)	P (kgf/cm ²)
0.002	0.00035	0.2948	0.029	0.012	0.031	0.17688
0.005	0.00054	0.3118	0.031	0.027	0.048	0.18708
0.012	0.00140	0.3648	0.036	0.072	0.123	0.21888
0.014	0.00170	0.3798	0.038	0.084	0.149	0.22788
0.013	0.00189	0.3878	0.039	0.078	0.167	0.23268
0.016	0.00225	0.4018	0.040	0.096	0.199	0.24108
0.017	0.00265	0.4148	0.041	0.102	0.234	0.24888
0.019	0.00291	0.4298	0.043	0.114	0.256	0.25788
0.018	0.00375	0.5198	0.052	0.108	0.331	0.31188

4.2 Resultados obtenidos en el modelo IBER

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la simulación de los diferentes escenarios con el modelo numérico IBER. Para realizar las simulaciones se utilizaron las dimensiones del modelo físico a escala.

4.2.1 Resultados de la simulación en IBER, en condiciones del Escenario 1.

Para llevar a cabo las simulaciones del Escenario 1 incluyendo el uniformizador de flujo colocado aguas arriba del brocal en el modelo físico, en IBER se consideró como una compuerta con las características mostradas en condiciones internas de cada caso, para simular la función del uniformizador y con ello comparar los tirantes que se presentan en la simulación con los obtenidos experimentalmente en el modelo.

4.2.1.1 Simulación del Sumidero libre en el brocal sin tapa

Para la simulación del escenario de brocal sin tapa en el modelo numérico IBER, se tomaron en cuenta las condiciones mostradas en la Tabla 4-15. El tamaño de la malla es de 0.025 como malla estructurada y el tiempo máximo de simulación fue de 1000 segundos (16.6 minutos), con intervalo de resultados a cada 100 segundos (1.6 minutos).

Tabla 4-15 Condiciones para la simulación del sumidero libre con el brocal sin tapa.

Hidrodinámica					Rugosidad		
Condiciones de contorno		Condiciones iniciales	Condiciones internas	Sumidero		n = 0.011 (concreto pulido)	
Entrada 2D		Calado=0.0 (seco)	Tipo de condición (m): Compuerta	Tipo: Pozo			
Entrada: Caudal total			Cota de compuerta (m): 0.0374	Diámetro (m): 0.115			
Régimen: crítico/subcrítico			Elevación del fondo (m): 0.0174	Área efectiva (%): 100			
Caudal total			Porcentaje de apertura de compuerta (%): 100	Cd vertedero: 1.7			
Tiempo (s)	Q (m³/s)		Tipo de compuerta: Fija	Cd orificio: 0.74			
0.0	0.02		Cd compuerta libre: 0.6	Caudal de entrada			
Salida 2D			Cd compuerta anegada: 0.8	Tiempo (s)	Q (m³/s)		
Condición de flujo: Supercrítico/crítico				0.0	0.00306		

Los tirantes que se presentaron para el caso del brocal sin tapa a la entrada del canal muestran que se genera un remanso debido al uniformizador de flujo, y el tirante en ese punto es de 14.2 cm, en el punto del brocal el tirante es de 2.53 cm y a la salida del modelo se presentó un tirante de 2.95 cm. (Figura 4.63).

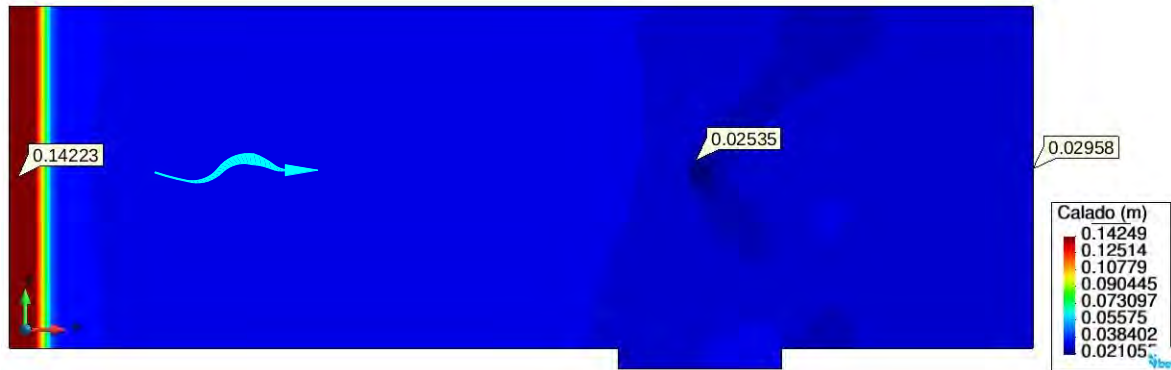


Figura 4-63 Mapa del Calado (tirante) del Escenario 1 con brocal sin tapa.

Para las cotas del modelo, estas se midieron con respecto al punto más bajo del modelo, que se ubica en la salida de este, en la cota 0 m. Aguas arriba se presenta una cota del agua de 16 cm y aguas abajo una cota del agua de 2.96 cm, en la zona del brocal se presentó una cota del agua de 3.12 cm. (Figura 4-64). Con los datos de las cotas se obtiene el perfil longitudinal de la Figura 4-65, el perfil de flujo que se presentó en esta condición a lo largo de los tres metros que mide el modelo físico se obtuvo en el centro del canal (corte A-A'), en la figura se observa claramente el descenso del nivel del agua debido a la entrada de flujo en el brocal.

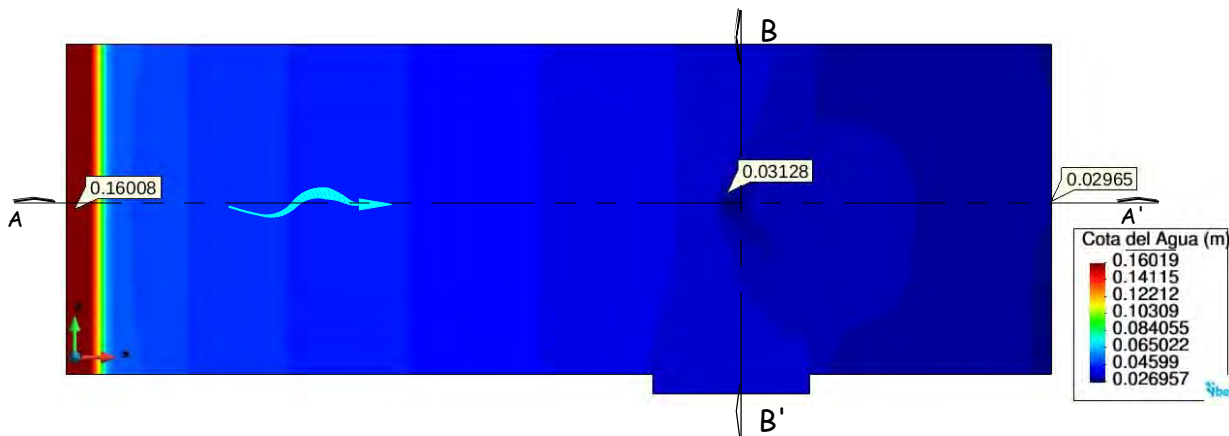


Figura 4-64 Mapa de la Cota de agua del Escenario 1 con brocal sin tapa.

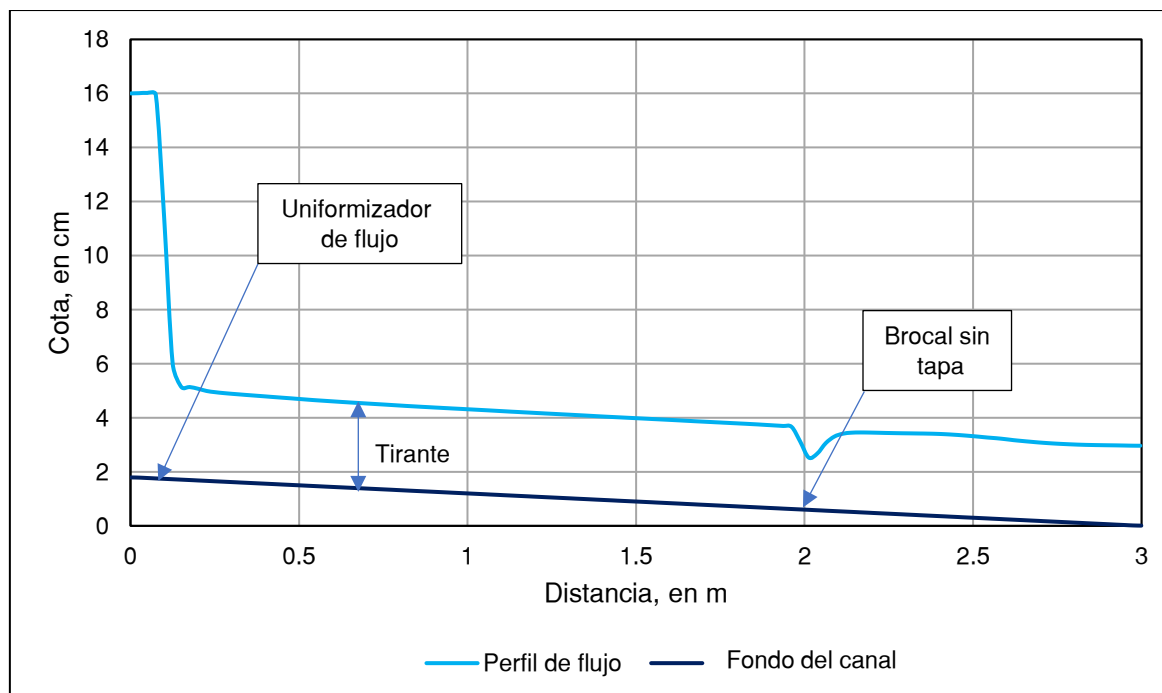


Figura 4-65 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') del del sumidero libre en el brocal sin tapa.

También, se obtuvo el perfil de flujo transversal al centro del brocal (corte B-B'), representa una sección transversal del canal al centro del brocal, el perfil muestra los tirantes que se presentan en la periferia del brocal sin tapa, alcanzando 3.5 cm (Figura 4-66).

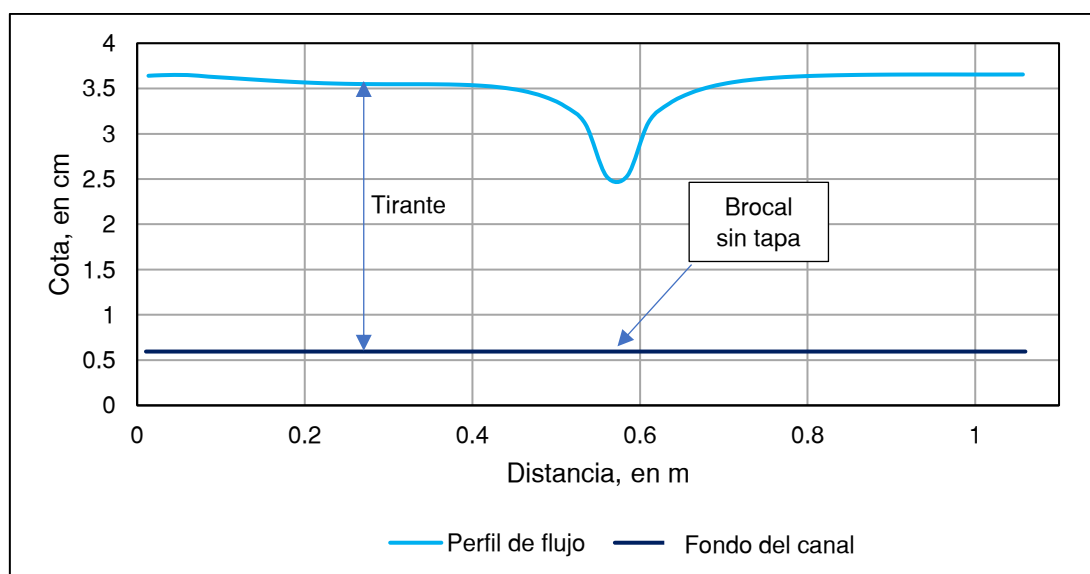


Figura 4-66 Perfil de flujo transversal (corte B-B') del sumidero libre en el brocal sin tapa

Resultados

Mientras que, en la figura 4-67 se muestra el comportamiento del número de Froude, donde se identifican claramente dos zonas. En la zona de aguas arriba se tiene un número menor a 1, lo que indica que es un régimen subcrítico (lento), en la zona de aguas abajo un número de Froude es mayor a 1 así como en la zona donde se ubica el brocal, lo cual indica que se encuentra en régimen supercrítico (rápido).

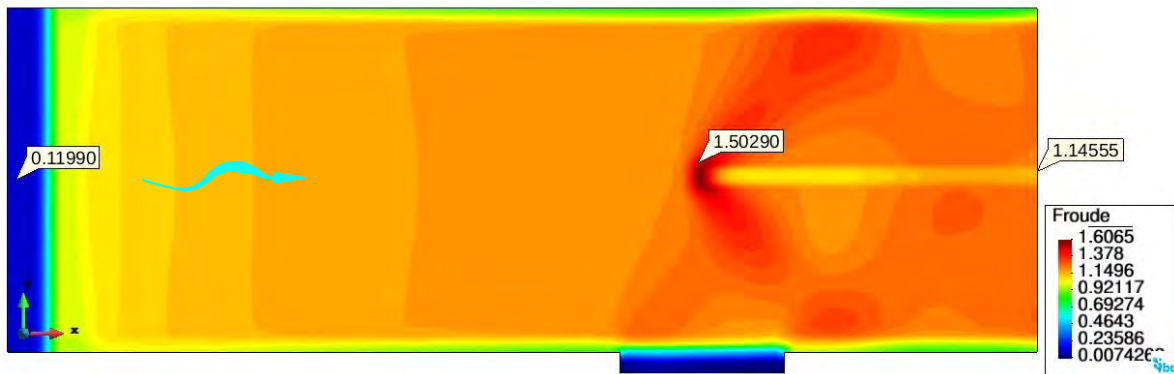


Figura 4-67 Comportamiento del Número de Froude del sumidero libre en el brocal sin tapa.

En la Figura 4-68 se presenta el comportamiento del caudal unitario (caudal por unidad de ancho) que ingresa y sale en el modelo, la diferencia entre ambos indica el caudal que capta el brocal sin tapa, en este escenario.

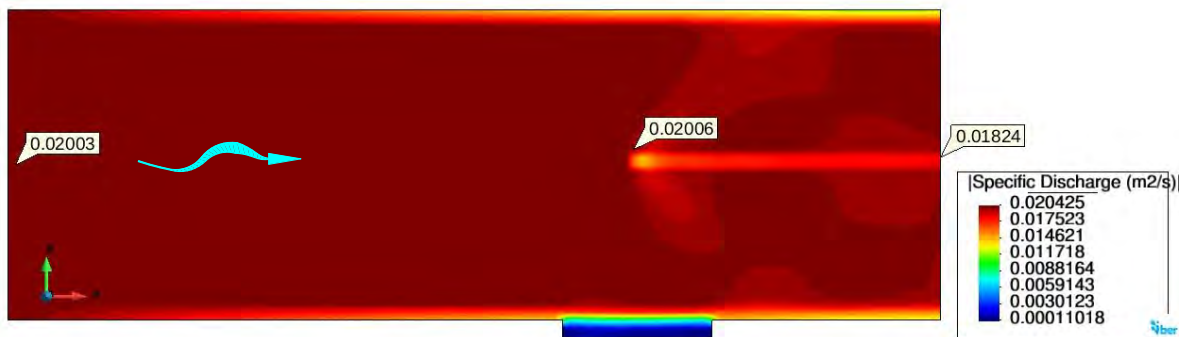


Figura 4-68 Caudal específico del sumidero libre en el brocal sin tapa.

Para un caudal de entrada en la calle de 20 l/s, el brocal sin tapa capta 3.6 l/s por lo que, el caudal de salida es de orden de los 16 l/s, información que concuerda con los resultados obtenidos en los experimentos en el modelo físico (Figura 4-69).

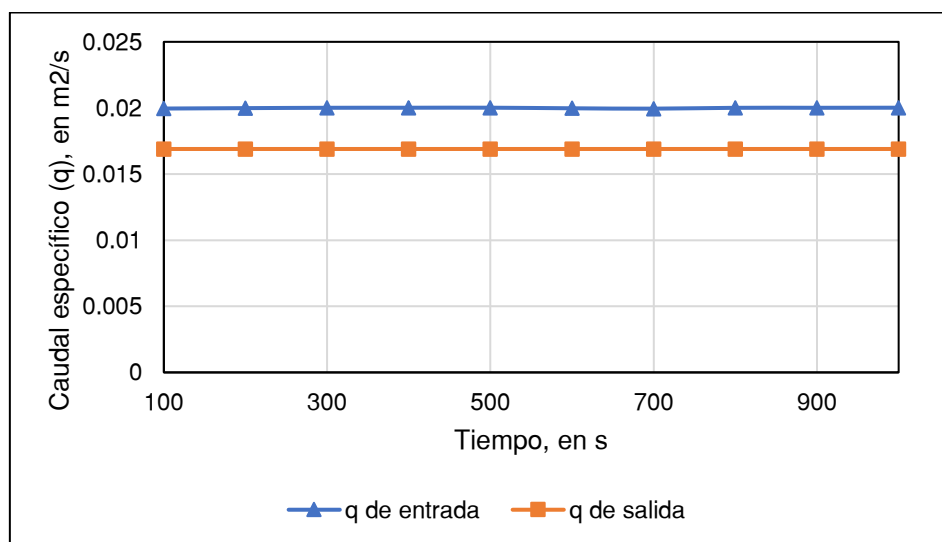


Figura 4-69 Caudal específico de entrada y salida del sumidero libre en el brocal sin tapa.

Respecto a la velocidad que se presentó en la simulación del sumidero libre en el brocal sin tapa, aguas arriba se presenta una velocidad media de 0.14 m/s, mientras que aguas abajo es del orden de los 0.61 m/s y en el punto del sumidero se presentó una velocidad de 0.75 m/s (Figura 4-70).

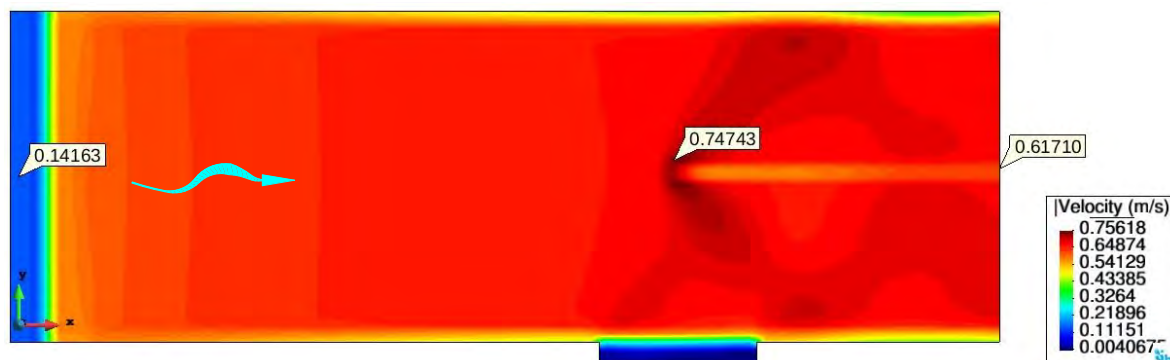


Figura 4-70 Mapa de velocidad del sumidero libre en el brocal sin tapa.

4.2.1.2 Simulación del Sumidero libre con la tapa de concreto.

Para la simulación de este escenario, se simula el fenómeno de sumidero libre con la tapa de concreto en el modelo numérico IBER. El tamaño de la malla es de 0.025 como malla estructurada y el tiempo máximo de simulación fue de 1000 segundos (16.6 minutos), con intervalo de resultados a cada 100 segundos (1.6 minutos).

Tabla 4-16 Condiciones para la simulación del sumidero libre con tapa de concreto.

Hidrodinámica					Rugosidad	
Condiciones de contorno		Condiciones iniciales	Condiciones internas	Sumidero	n = 0.011 (concreto pulido)	
Entrada 2D		Calado=0.0 (seco)	Tipo de condición (m): Compuerta	Tipo: Pozo		
Entrada: Caudal total			Cota de compuerta (m): 0.0374	Diámetro (m): 0.115		
Régimen: crítico/subcrítico			Elevación del fondo (m): 0.0174	Área efectiva (%): 17		
Caudal total			Ancho de apertura compuerta (%): 100	Cd vertedero: 1.7		
Tiempo (s)	Q (m³/s)		Tipo de compuerta: Fija	Cd orificio: 0.75		
0.0	0.02		Cd compuerta libre: 0.6	Caudal de entrada		
Salida 2D			Cd compuerta anegada: 0.8	Tiempo (s)		Q (m³/s)
Condición de flujo: Supercrítico/crítico				0.0		0.00038

Los tirantes que se presentaron en la simulación para el caso de sumidero libre, aguas arriba se presenta un tirante de 14.22 cm y aguas abajo de 2.95 cm, en la ubicación del brocal con la tapa de concreto se presenta un tirante de 2.5 cm, dato que se corrobora con los tirantes medidos en los experimentos (Figura 4-71).

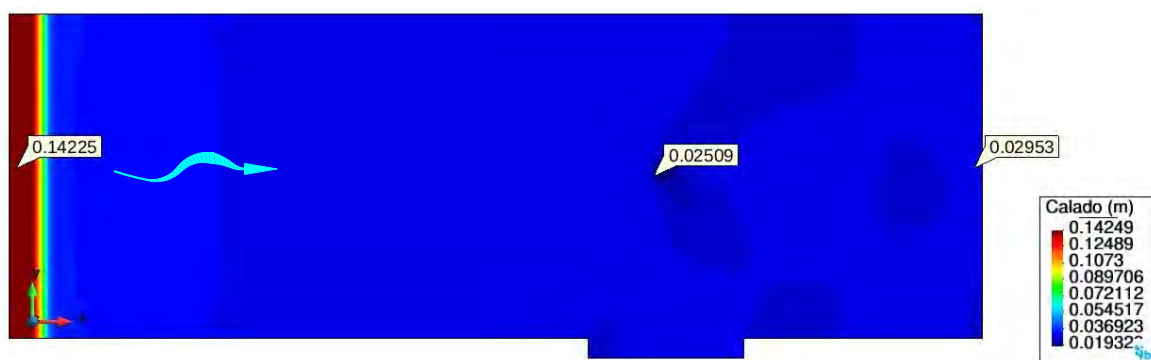


Figura 4-71 Mapa del Calado (tirante) del Escenario 1 con tapa de concreto

Para cota del agua, al tirante se le suma el desnivel de la plantilla del canal, en la entrada se presentó la zona del remanso debido a la compuerta que representa al uniformizador de flujo en esta zona se presenta una cota de 16 centímetros y en la salida una cota de 2.96 centímetros como se muestra en la Figura 4-72, además se indican los cortes A-A' y B-B' donde se obtienen los perfiles de flujo.

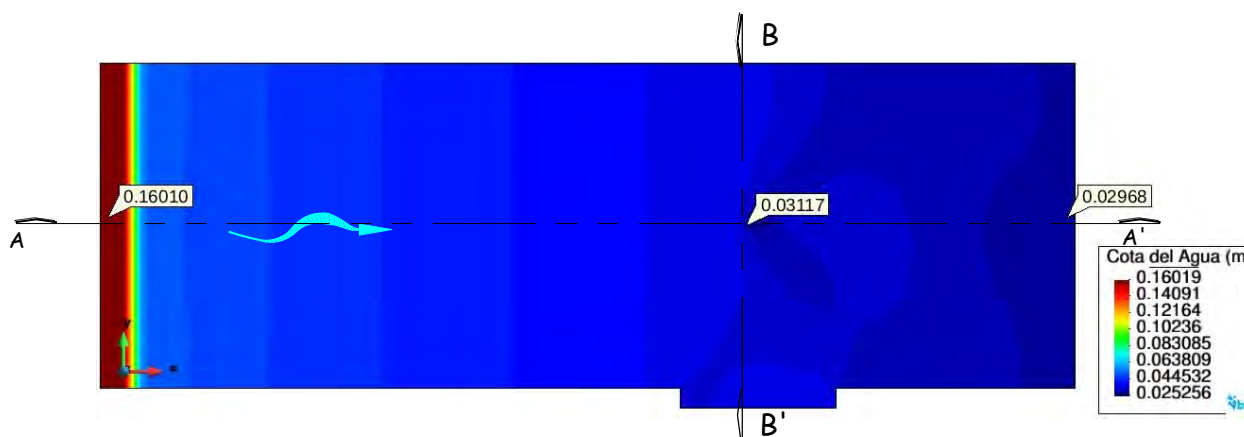


Figura 4-72 Mapa de la Cota de agua del Escenario 1 con tapa de concreto.

En la Figura 4-73, se muestra el perfil de flujo longitudinal (corte A-A'), que coincide con las etiquetas de la Figura 4-72, también se indica la posición del uniformizador del flujo y de la tapa de concreto, en el modelo físico no fue perceptible la depresión que se presenta en el perfil de flujo exactamente al pasar sobre la tapa de concreto, que se puede asumir a las condiciones del flujo.

Resultados

También, se obtuvo el perfil de flujo transversal al centro del brocal (corte B-B'), este representa una sección transversal del canal al centro del brocal, el perfil muestra los tirantes que se presentan en la periferia del brocal sin tapa, alcanzando de hasta 3 centímetros (Figura 4-74).

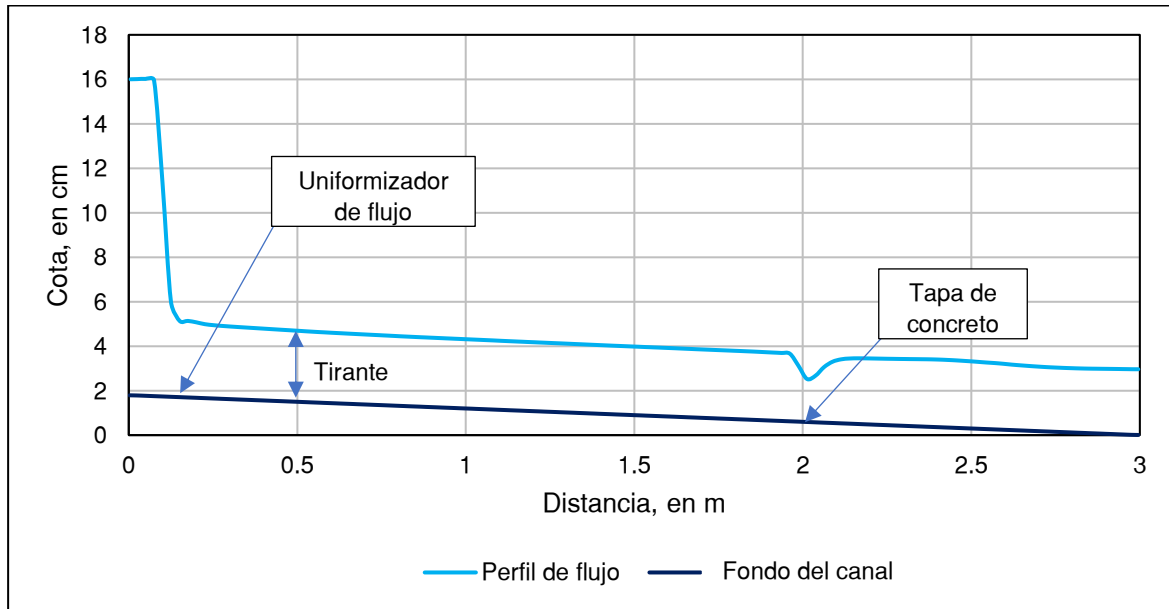


Figura 4-73 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A'), del sumidero libre con tapa de concreto.

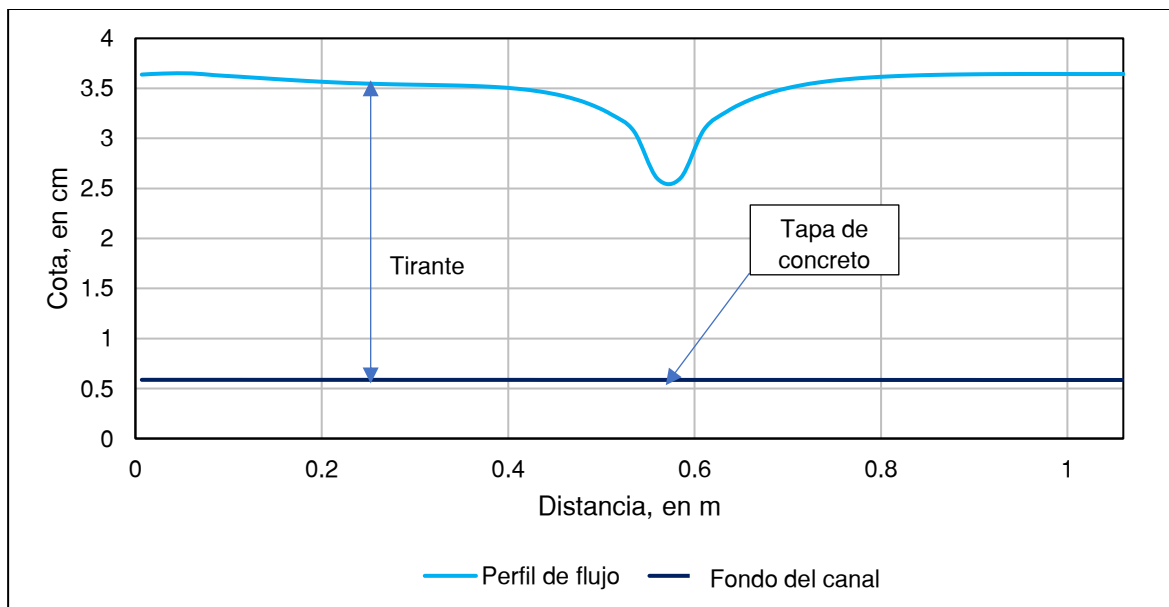


Figura 4-74 Perfil de flujo transversal (corte B-B'), del sumidero libre con tapa de concreto

En la figura 4-75, se muestra el número de Froude que se presentó en la simulación, para la zona de la entrada el número de Froude es menor a 1, que indica que el régimen de flujo es subcrítico (lento), a la salida del uniformizador de flujo el agua sale con un régimen supercrítico (rápido), ya que el número de Froude es mayor a 1.

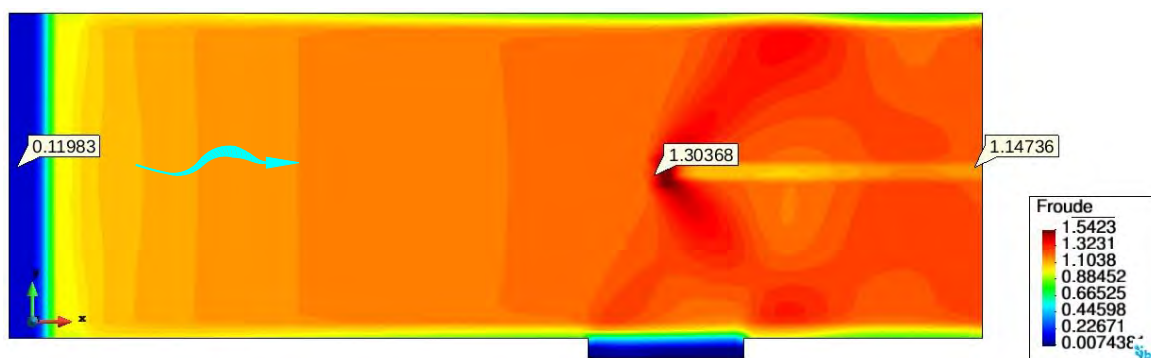


Figura 4-75 Mapa del Número de Froude del del sumidero libre con tapa de concreto

En el caso de la tapa de concreto, queda demostrado que no funciona para captar agua, ya que, solo capta un caudal de 0.38 l/s, en la figura 4-76 se presentan los resultados del caudal específico (q), y el mapa de colores se mantiene en el color que representa los 20 l/s.

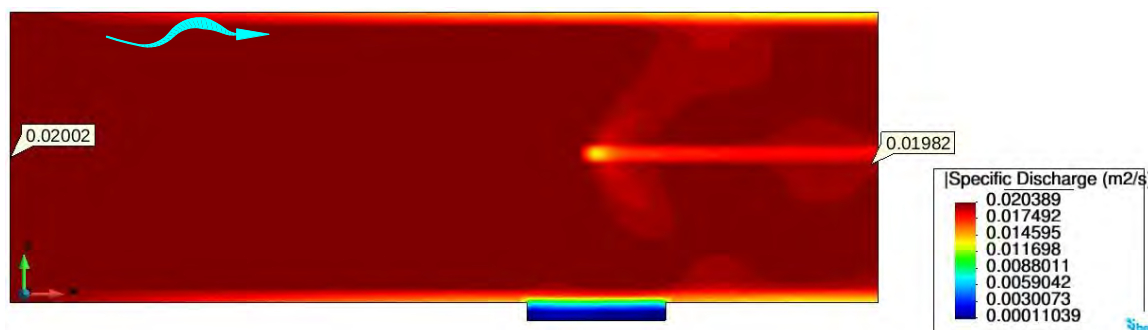


Figura 4-76 Mapa del caudal específico del del sumidero libre con tapa de concreto.

La Figura 4-77 muestra el comportamiento del caudal unitario que ingresa y del caudal unitario que sale del canal, lo que, en términos prácticos se deduce que el caudal que entra es el mismo que sale.

Resultados

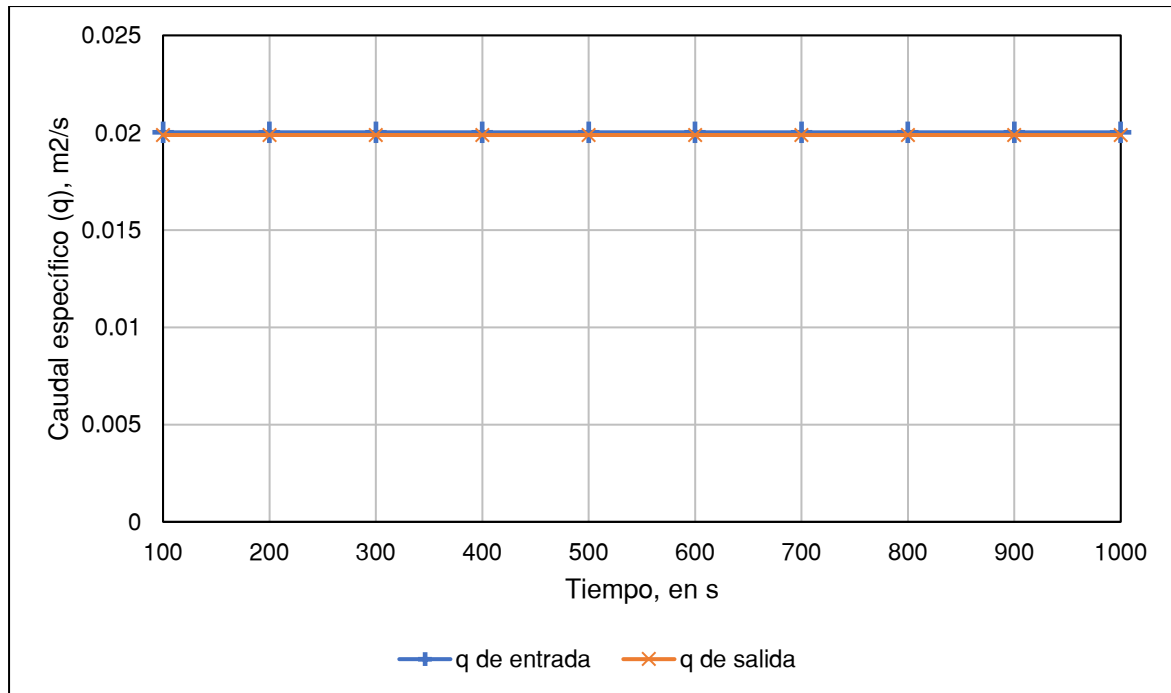


Figura 4-77 Caudal específico de entrada y salida del sumidero libre con tapa de concreto.

Finalmente, para la tapa de concreto funcionando como sumidero libre, en la figura 4-78 se indica con las etiquetas de las velocidades que se presentan al ingreso y a la salida, de las cuales la mayor velocidad se presenta en la zona del sumidero, con un valor de 0.72 m/s.

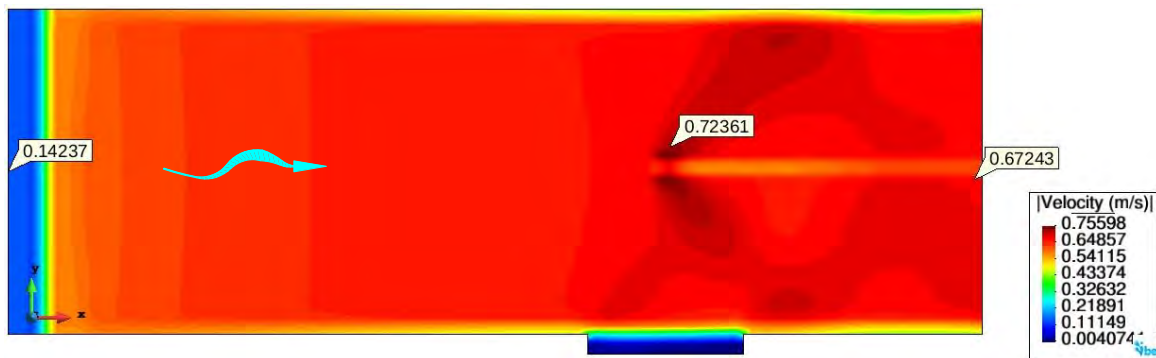


Figura 4-78 Mapa de velocidad del sumidero libre con tapa de concreto.

4.2.1.3 Simulación del Sumidero libre con la rejilla de hierro fundido.

Para la simulación de este escenario de la rejilla de hierro fundido en sumidero libre en el modelo numérico IBER, se tomaron en cuenta las condiciones mostradas en la tabla 4-17. El tamaño de malla fue de 0.025 y el tiempo máximo de simulación de 1000 segundos (16.6 minutos), con un intervalo de resultados a cada 100 s (1.6 minutos).

Tabla 4-17 Condiciones para la simulación del sumidero libre con tapa de hierro fundido.

Hidrodinámica					Rugosidad		
Condiciones de contorno		Condiciones iniciales	Condiciones internas	Sumidero		n = 0.011 (concreto pulido)	
Entrada 2D		Calado=0.0 (seco)	Tipo de condición (m): Compuerta	Tipo: Pozo			
Entrada: Caudal total			Cota de compuerta (m): 0.0374	Diámetro (m): 0.115			
Régimen: crítico/subcrítico			Elevación del fondo (m): 0.0174	Área efectiva (%): 26.36			
Caudal total			Ancho de apertura compuerta (%): 100	Cd vertedero: 1.7			
Tiempo (s)	Q (m³/s)		Tipo de compuerta: Fija	Cd orificio: 0.62			
0.0	0.02		Cd compuerta libre: 0.6	Caudal de entrada			
Salida 2D			Cd compuerta anegada: 0.8	Tiempo (s)	Q (m³/s)		
Condición de flujo: Supercrítico/crítico				0.0	0.0013		

Los tirantes que se presentaron en la simulación del escenario de sumidero libre con la rejilla de hierro fundido de acuerdo con la escala del mapa de colores de la figura 4-79, a la entrada se presentó un tirante de 14.22 cm, en la zona de la tapa, un tirante de 2.7 cm y en la salida un tirante de 2.9 cm.

Mientras que, la cota del agua se muestra en la figura 4-80, en la cual se observan las cotas de 16 cm y 2.96 cm a la entrada y salida respectivamente, también se indica la dirección en la que se obtuvieron los perfiles de flujo a través de los cortes A-A' y B-B'.

Resultados

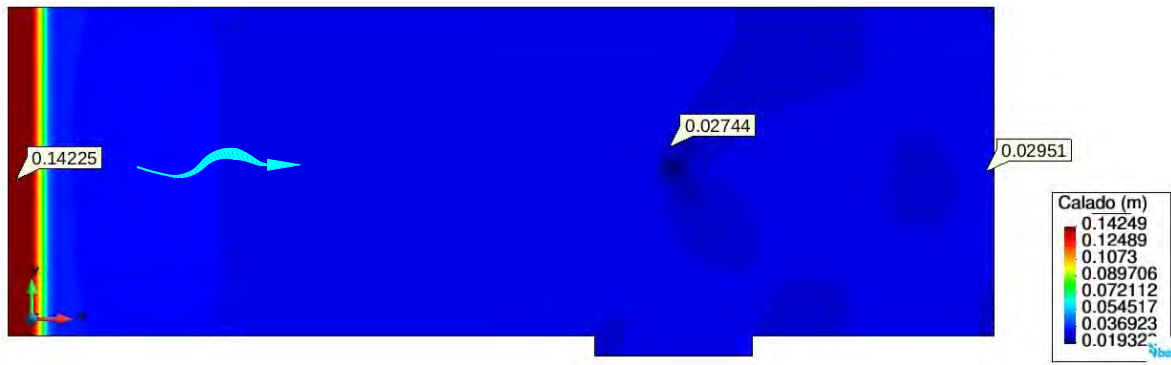


Figura 4-79 Mapa del Calado (tirante) del sumidero libre con la rejilla de hierro fundido

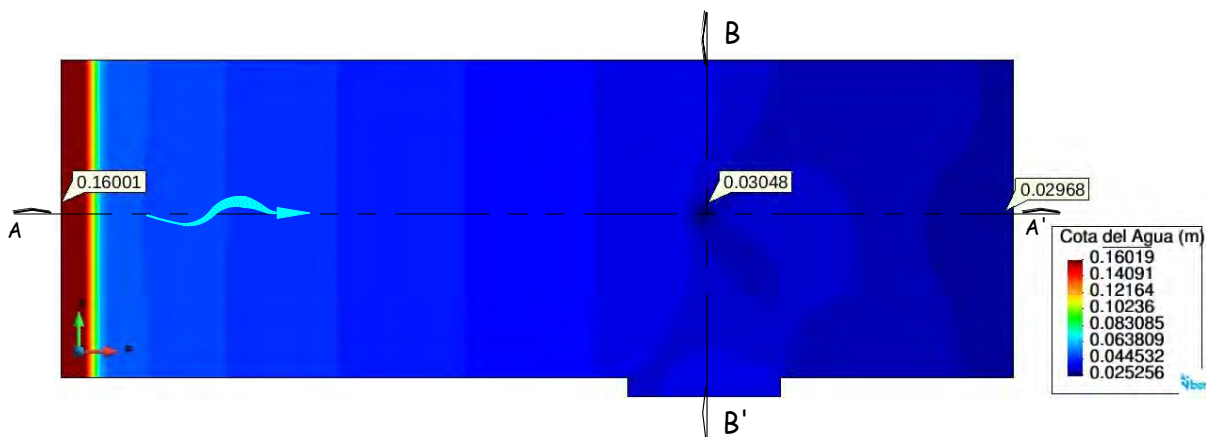


Figura 4-80 Mapa de la Cota del agua del sumidero libre con la rejilla de hierro fundido.

En la Figura 4-81, se muestra el perfil de flujo longitudinal (corte A-A'), donde se observa el perfil de las cotas de agua para el sumidero libre con la rejilla de hierro fundido, el uniformizador de flujo genera un remanso con una cota de 16 cm.

A manera de resumen, para los tres casos del brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de hierro fundido, existe consistencia en las cotas en el brocal las cuales se mantienen en los 3 cm (Figura 4-82).

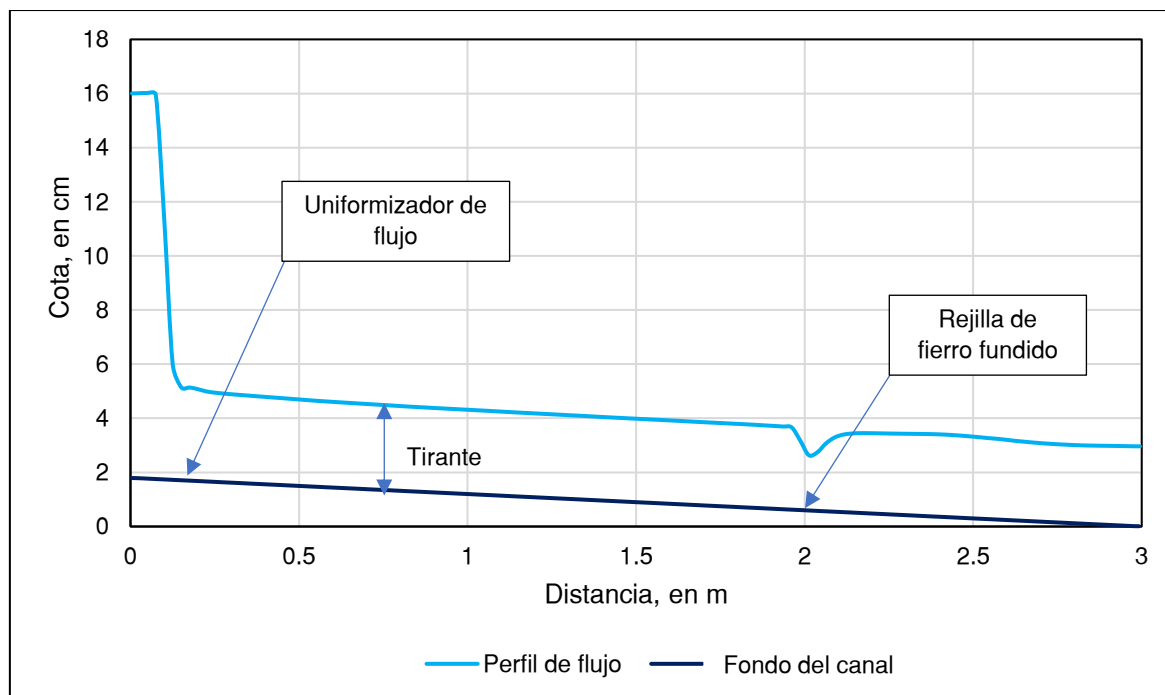


Figura 4-81 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') del sumidero libre con la rejilla de hierro fundido.

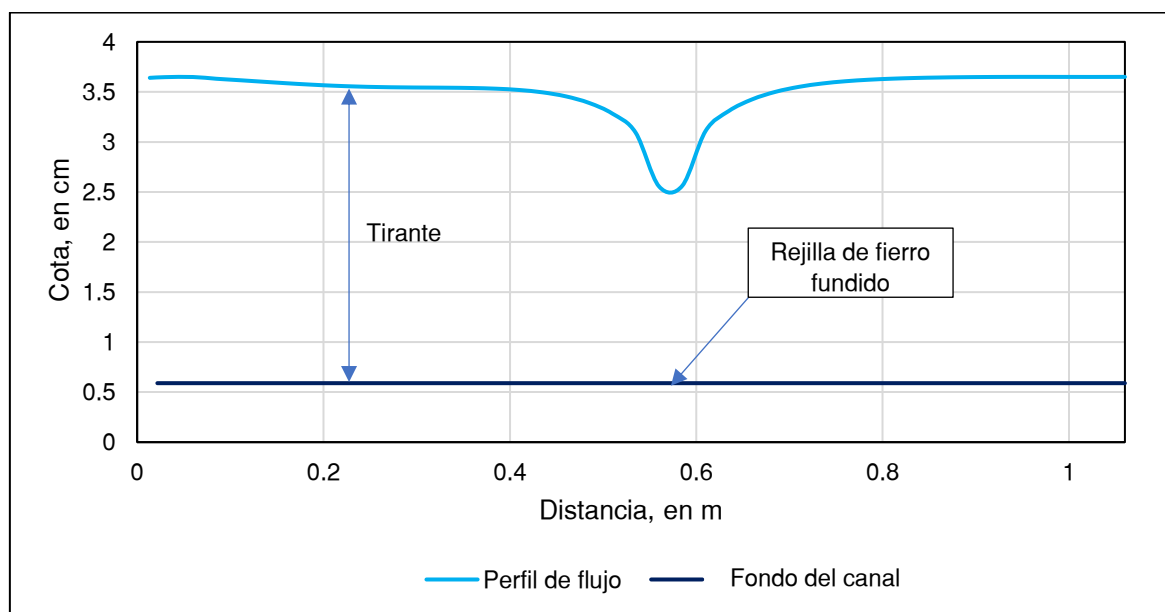


Figura 4-82 Perfil de flujo transversal (corte B-B') del sumidero libre con rejilla de hierro fundido.

Resultados

De igual forma para el número de Froude existe consistencia en los tres casos modelados para el escenario 1, con régimen lento antes de la compuerta (uniformizador), y a la salida se presentó un régimen supercrítico (Figura 4-83).

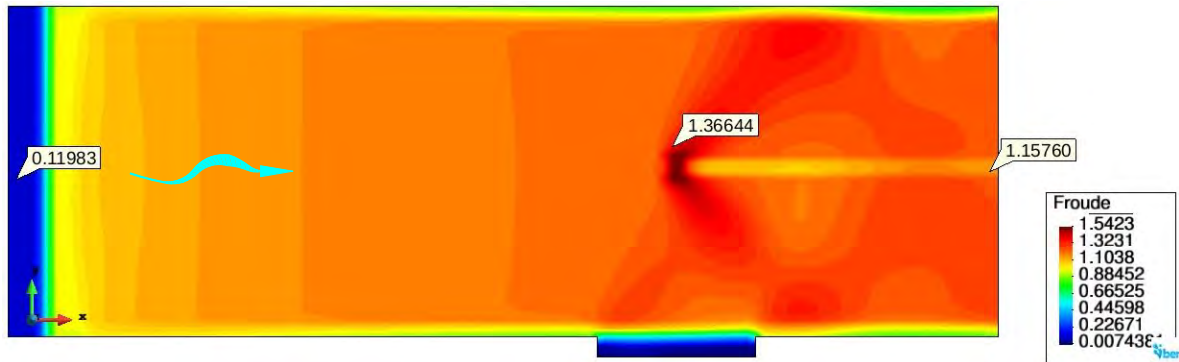


Figura 4-83 Mapa del Número de Froude del sumidero libre con rejilla de hierro fundido

En este caso la rejilla de hierro fundido captó un caudal unitario de 1.3 l/s, el caudal que ingresó al sistema es de 20 l/s y salió un caudal de 18.33 l/s debido a que es puntual, se presenta variación en las etiquetas a la salida del modelo (Figura 4-84).

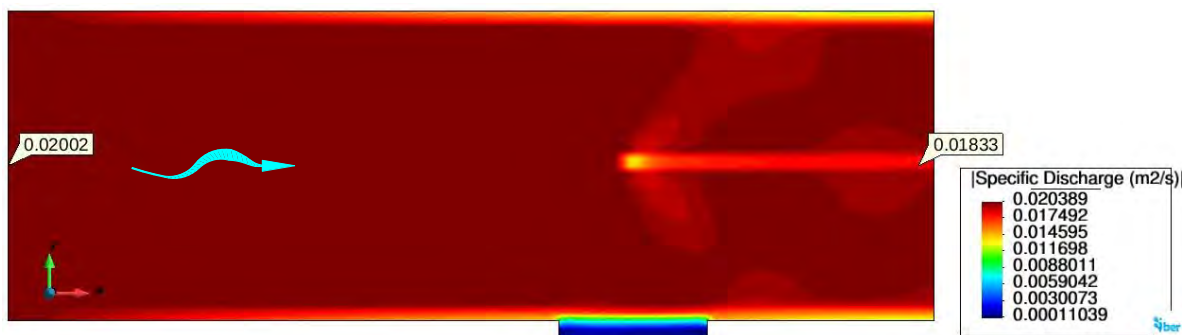


Figura 4-84 Mapa del caudal específico del Escenario 1 con la rejilla de hierro fundido.

En la Figura 4-85, se presenta el caudal específico que ingresa de 20 l/s y sale un caudal del orden de 18.33 l/s, los resultados que se obtuvieron en la simulación en comparación con el modelo físico se tiene una diferencia de 0.3 l/s.

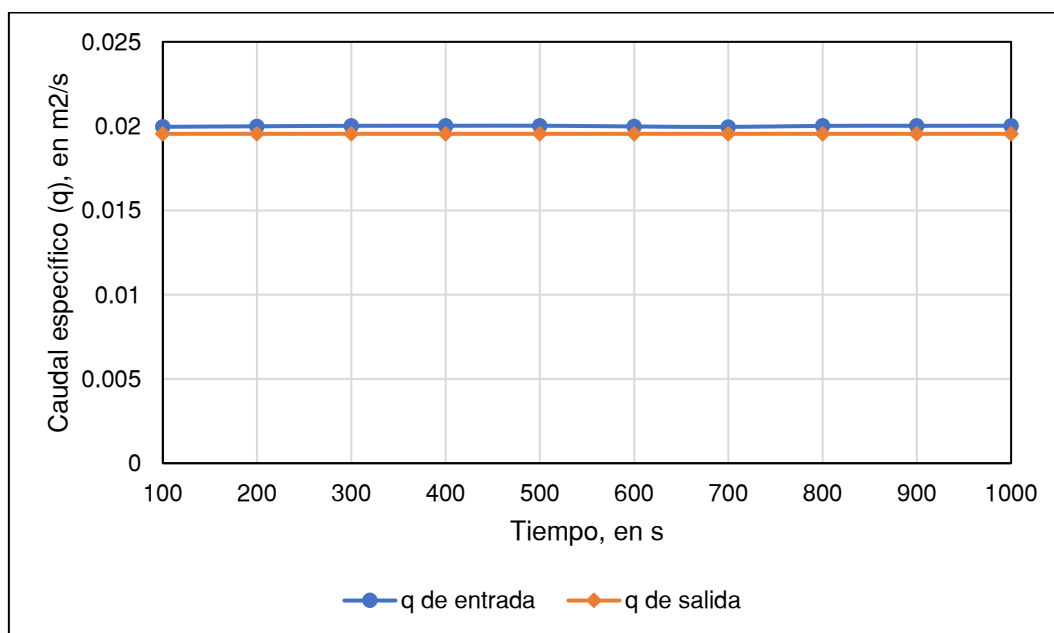


Figura 4-85 Caudal específico de entrada y salida del Escenario 1 con la rejilla de hierro fundido.

Con respecto al comportamiento de la velocidad para los tres casos, la máxima velocidad se presenta en la zona del sumidero y presentó un valor de 0.75 m/s (Figura 4-86).

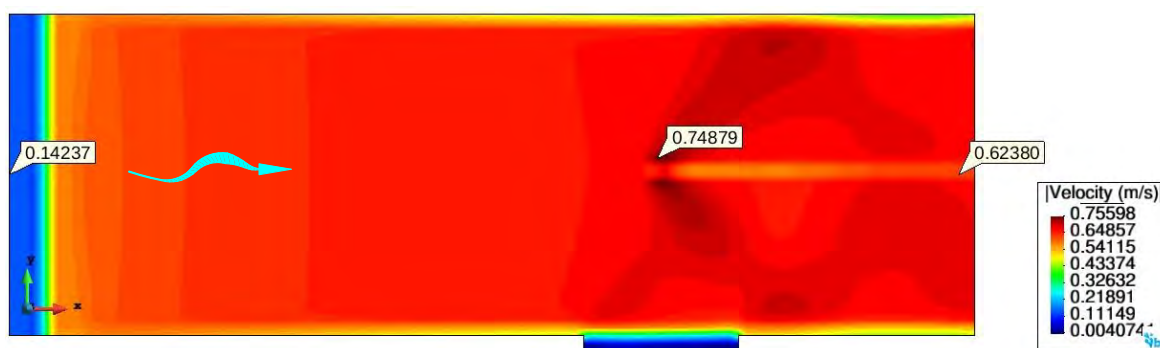


Figura 4-86 Mapa de velocidad del sumidero libre con la rejilla de hierro fundido.

4.2.2 Resultados de la simulación en IBER, para los diferentes casos del Escenario 2.

El escenario 2 considera el sumidero ahogado, para provocar este escenario se colocó la condición inicial un tirante de 10 cm y en las condiciones internas se colocó la compuerta aguas abajo para garantizar el ahogamiento en los tres casos; brocal sin tapa, tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido.

4.2.2.1 Simulación del Sumidero ahogado en el brocal sin tapa.

Para la simulación de este escenario, caso del brocal sin tapa en el modelo numérico IBER, se tomaron en cuenta las condiciones mostradas en la tabla 4-18. La malla empleada fue estructurada de tamaño 0.025 y tiempo máximo de simulación de 1000 segundos (16.6 minutos), con un intervalo de resultados a cada 100 segundos (1.6 minutos).

Tabla 4-18 Condiciones para la simulación del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.

Hidrodinámica				Rugosidad
Condiciones de contorno	Condiciones iniciales	Condiciones internas	Sumidero	
Entrada 2D	Calado=0.1 m	Tipo de condición (m): Compuerta	Tipo: Pozo	
Entrada: Caudal total		Cota de compuerta (m): 0.0166	Diámetro (m): 0.115	
Régimen: crítico/subcrítico		Elevación del fondo (m): 0	Área efectiva (%): 100	
Caudal total		Ancho de apertura compuerta (%): 100	Cd vertedero: 1.7	
Tiempo (s)		Tipo de compuerta: Fija	Cd orificio: 0.62	
0.0		Cd compuerta libre: 0.6	Caudal de entrada	
Salida 2D		Cd compuerta anegada: 0.8	Tiempo (s)	Q (m³/s)
Condición de flujo: Supercrítico/crítico			0.0	0.0013

n = 0.011
(concreto pulido)

Los tirantes que se presentaron en las condiciones de sumidero ahogado y con el brocal sin tapa son de 11.28 cm en la entrada del sistema y 3.22 cm a la salida, en el punto donde se ubica el brocal se presentó un tirante de 11.67 cm (Figura 4-87).



Figura 4-87 Mapa del Calado (tirante) del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.

En estas condiciones el brocal sin tapa presenta un caudal de entrada de 19.98 l/s, mientras que, el brocal captó 3.97 l/s, esto se demuestra dado que solo salen 16.03 l/s (Figura 4-88).

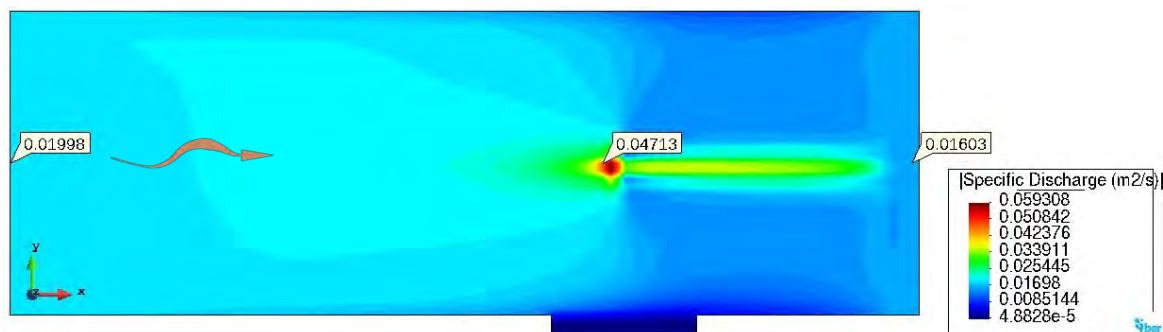


Figura 4-88 Mapa del caudal específico del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.

La información de la Figura 4-89, corrobora lo presentado en el mapa de colores del caudal específico (q), del caudal específico que entra y el que sale, para los 1000 s que se simularon se observa estabilidad entre el caudal específico de entrada y salida con resultados a cada 100 s, es decir se mantiene un flujo uniforme.

Resultados

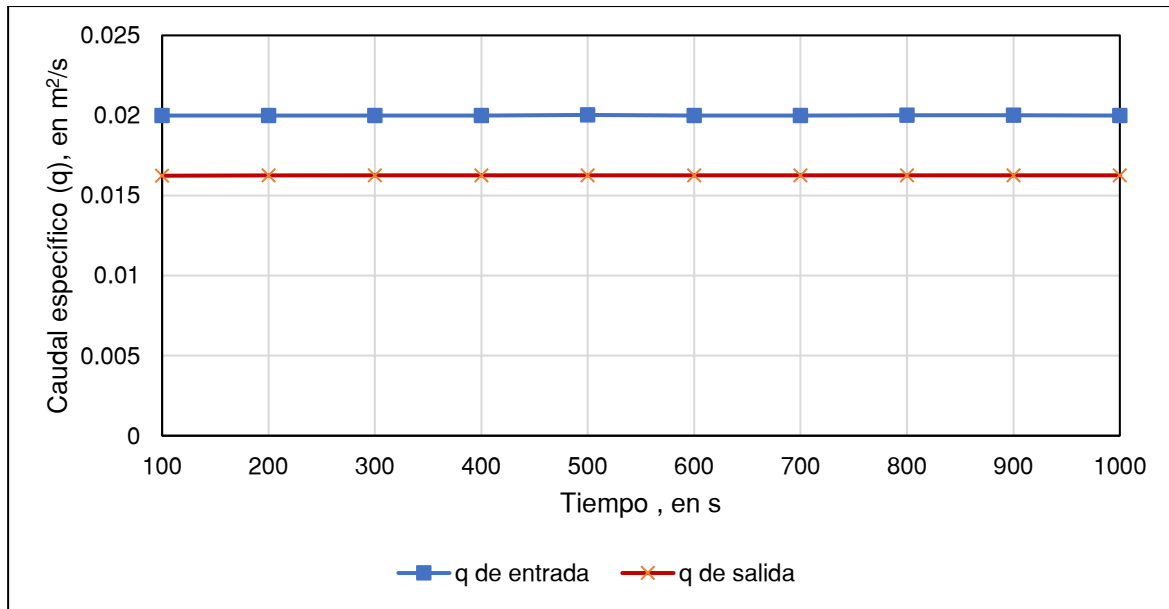


Figura 4-89 Caudal específico de entrada y salida del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.

Respecto a las cotas que se presentan estas se miden con referencia a la cota de la plantilla, estableciendo un nivel de referencia al final del canal, en este punto se establece la cota cero. Por ello, a la entrada del modelo se tiene 13 cm, en el pozo (brocal), 12 cm y a la salida 2.8 cm (Figura 4-90).

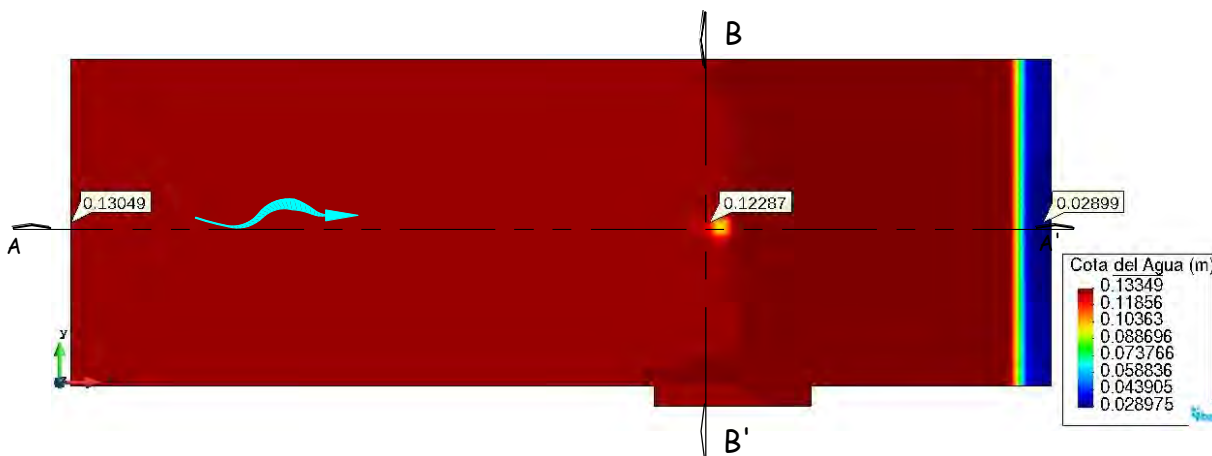


Figura 4-90 Mapa de la Cota de agua del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.

La Figura 4-91 muestra el perfil de flujo longitudinal (corte A-A'), en dicha figura el remanso inicia aguas abajo generado por el uniformizador de flujo en el modelo físico, en IBER se colocó una compuerta con lo cual se cumple con las condiciones del escenario 2. Así mismo se observa el descenso del nivel en el brocal, alcanzando un tirante de 10 cm.

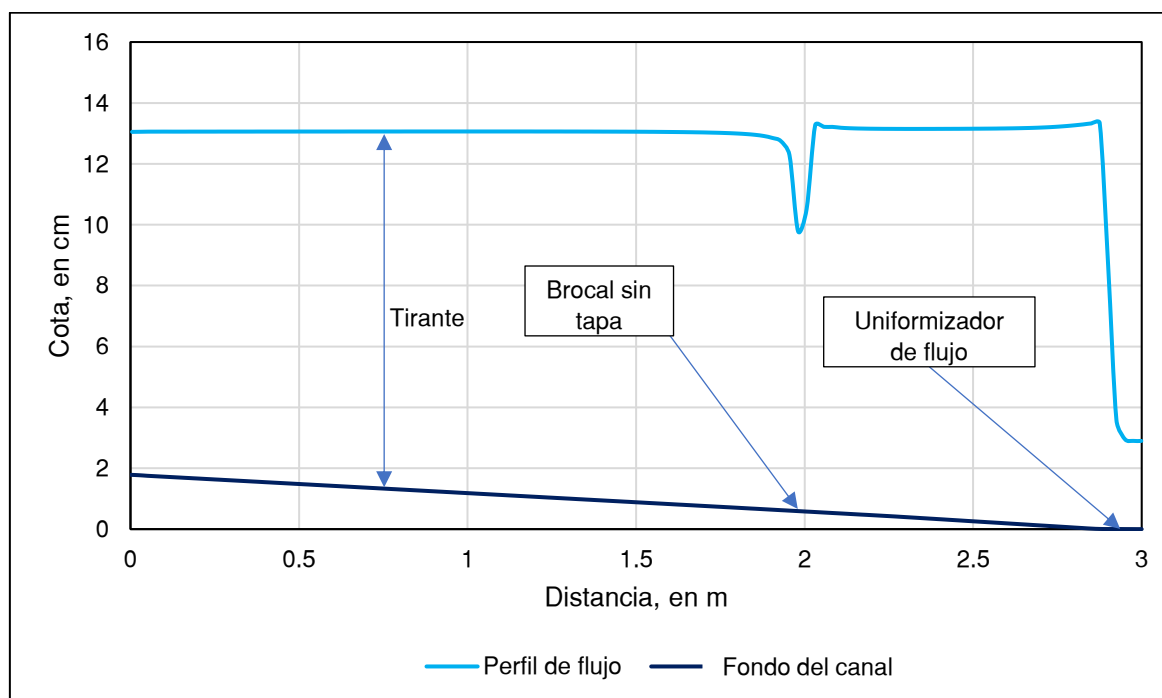


Figura 4-91 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.

También se incluye el perfil de flujo transversal (Corte B-B'), considerando el ancho de 1.06 m y el corte al centro del brocal y en la margen derecha del canal también se ubica la ventana de acrílico del modelo físico.

Resultados

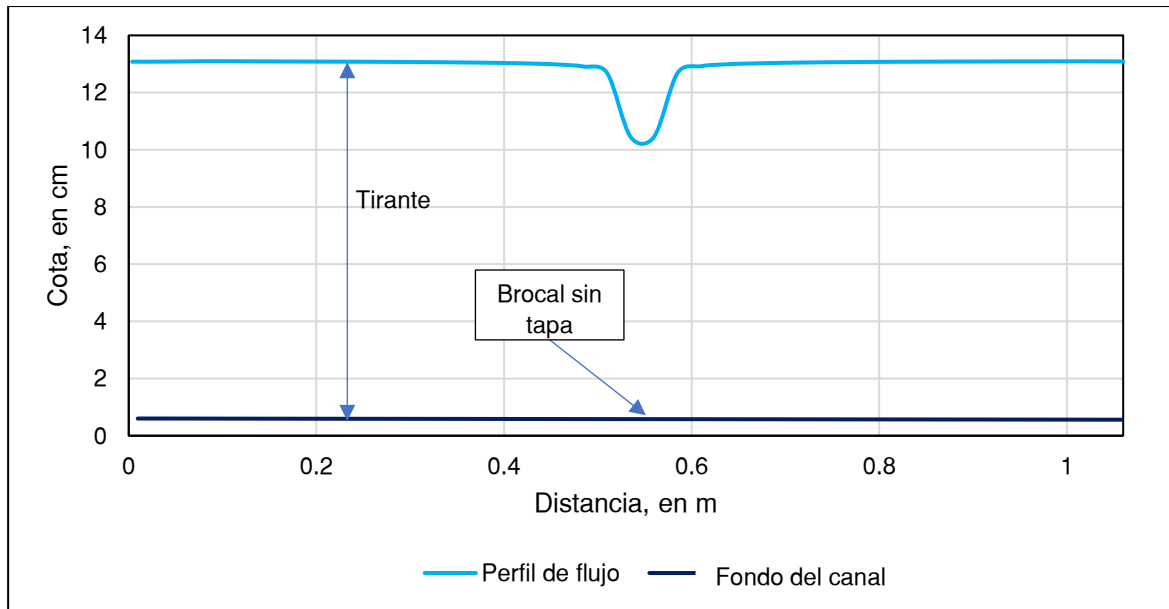


Figura 4-92 Perfil de fujo transversal (corte B-B') del sumidero ahogado en el brocal sin tapa

Respecto al tipo de flujo, prácticamente en todo el canal (Figura 4-93) debido al remanso generado por el uniformizador colocado aguas abajo del brocal, se presenta un régimen subcrítico ($Fr < 1$), mientras que en la descarga, así como en el sumidero, se presenta un régimen supercrítico ($Fr > 1$) esto se debe al aumento de velocidad en esos puntos.

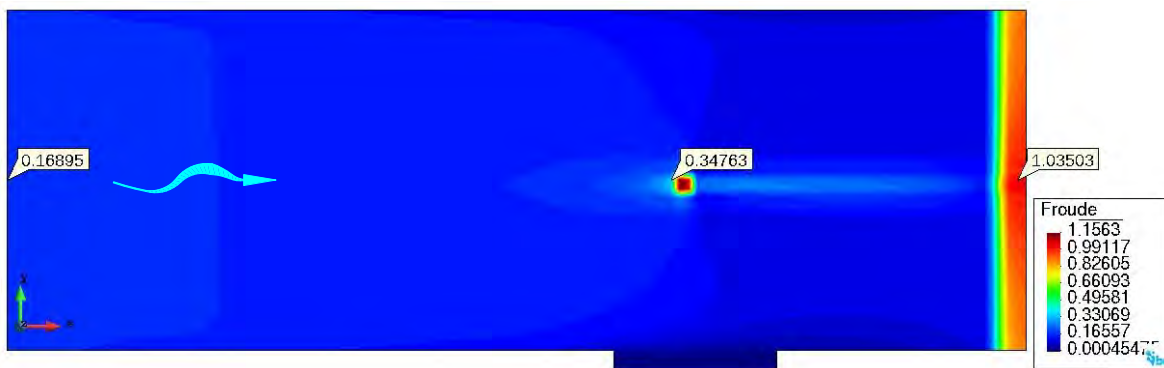


Figura 4-93 Mapa del Número de Froude del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.

Respecto a la velocidad que predomina en el canal esta es de 0.17 m/s aumentando en el sumidero hasta 0.75 m/s y en la descarga del canal se presenta una velocidad de 0.55 m/s. (Figura 4-94)

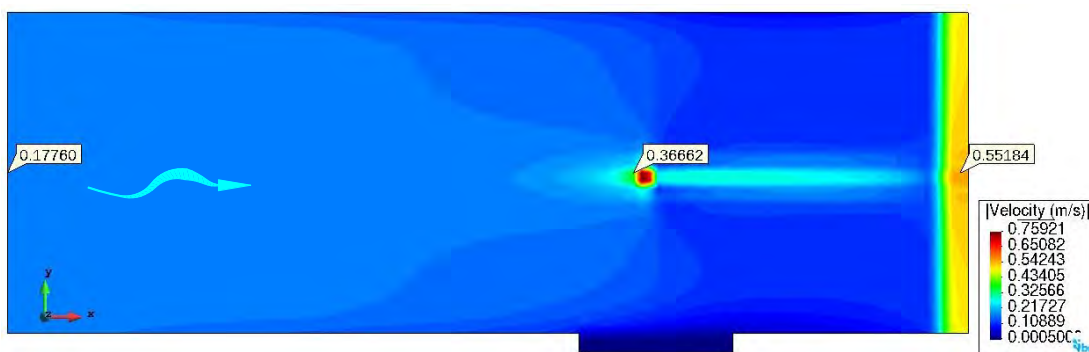


Figura 4-94 Mapa de velocidad del sumidero ahogado en el brocal sin tapa.

4.2.2.2 Simulación del Sumidero ahogado en la tapa de concreto.

Para la simulación de este escenario de la tapa de concreto en sumidero ahogado en el modelo numérico IBER, se tomaron en cuenta las condiciones mostradas en la Tabla 4-19. El tamaño de malla es de 0.025 y el tiempo máximo de simulación fue de 1000 segundos (16.6 minutos), con un intervalo de resultados a cada 100 s (1.6 minutos).

Tabla 4-19 Condiciones para la simulación del sumidero ahogado en la tapa de concreto.

Hidrodinámica				Rugosidad
Condiciones de contorno	Condiciones iniciales	Condiciones internas	Sumidero	n = 0.011 (concreto pulido)
Entrada 2D	Calado=0.1 m	Tipo de condición (m): Vertedor	Tipo: Pozo	
Entrada: Caudal total		Cota de vertedor (m): 0.018	Diámetro (m): 0.115	
Régimen: crítico/subcrítico		Ancho de apertura de vertedor (%): 100	Área efectiva (%): 17	
Caudal total		Cd vertedor: 1.7	Cd vertedero: 1.7	
Tiempo (s)			Cd orificio: 0.15	
Q (m ³ /s)			Caudal de entrada	
0.0			Tiempo (s)	
0.02			Q (m ³ /s)	
Salida 2D			0.0	
Condición de flujo: Supercrítico/crítico			0.00048	

Resultados

Para este escenario, el tirante que se presentó a la entrada del canal es de 4.6 cm, en el punto donde se ubica la tapa de concreto un tirante de 5.87 cm y a la salida del canal se presentó un tirante de 3.18 cm de acuerdo con la escala de colores de la figura 4-95, se observa la variación de los tirantes a lo largo del canal.

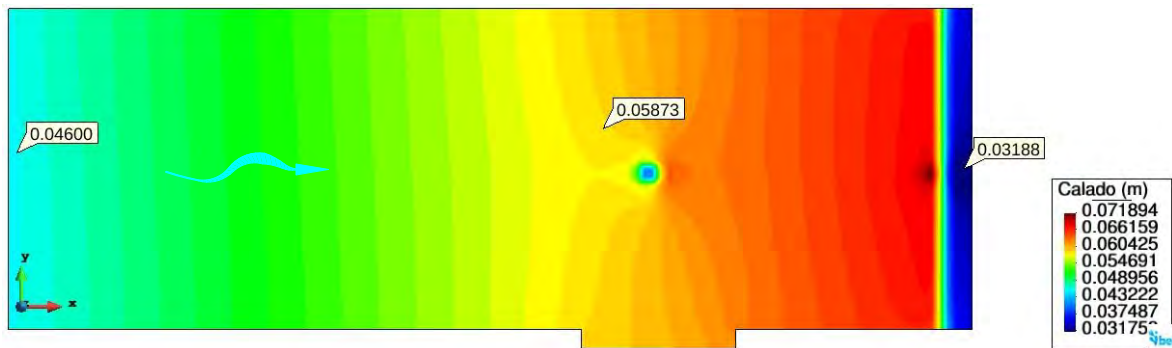


Figura 4-95 Mapa del Calado (tirante) del sumidero ahogado en la tapa de concreto

Para la cota de agua se le suma al tirante de desnivel del canal, el cual tiene una pendiente longitudinal $S_o = 0.006$ por lo que, a la salida del canal tanto el tirante como la cota del agua tienen el mismo valor de 3.2 cm y a la entrada del canal de 6.64 cm (Figura 4-96).

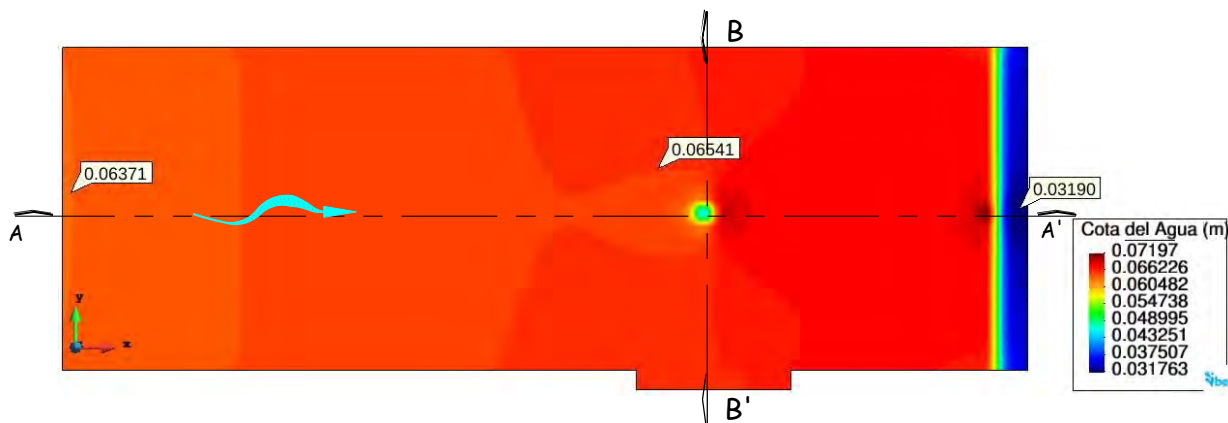


Figura 4-96 Mapa de la Cota de agua del sumidero ahogado en la tapa de concreto.

Mientras que en la figura 4.97, se muestra el perfil longitudinal correspondiente al corte A-A' indicado en la figura 4-96, los tirantes del perfil corresponden a los presentados en la figura de la cota del agua para el escenario 2 con tapa de concreto.

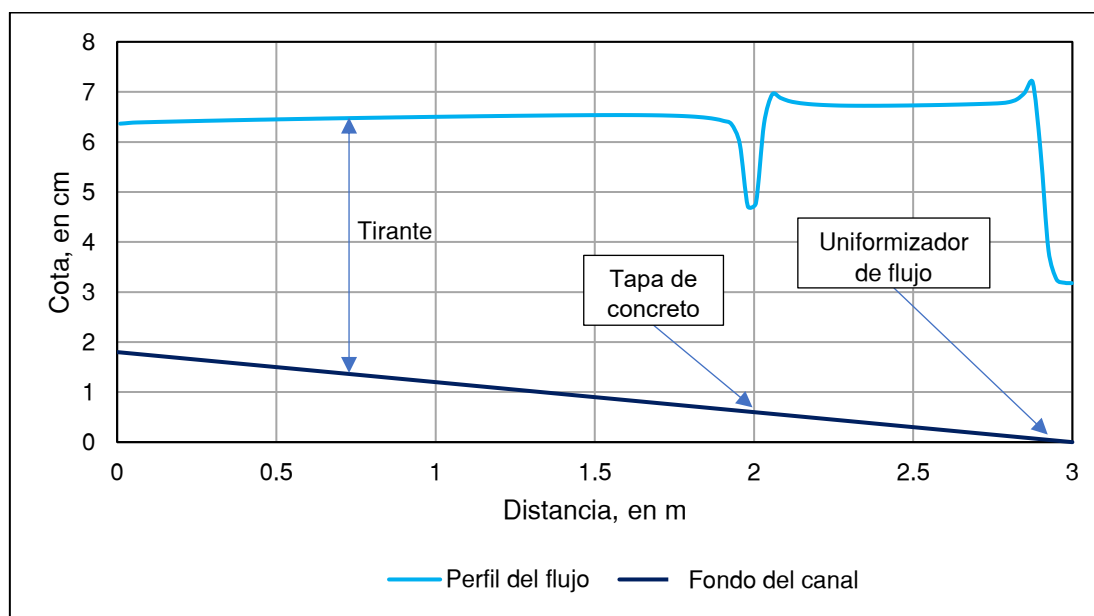


Figura 4-97 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') del sumidero ahogado en la tapa de concreto.

Respecto al perfil de flujo transversal, este se realiza en el corte B-B', donde se observa que los tirantes que se presentan en las márgenes del canal son 6 cm en ambas y en el centro descende hasta 4 cm esto se debe a que en este punto se ubica la tapa de concreto y abate el nivel del agua (Figura 4-98).

En lo que respecta al número de Froude, el cual indica en que régimen de flujo se encuentra en cada tramo, prácticamente todo encuentra en régimen subcrítico, sólo a la salida del uniformizador del flujo y en punto donde se ubica el sumidero para la tapa de concreto se presenta el régimen supercrítico (Figura 4-99).

Resultados

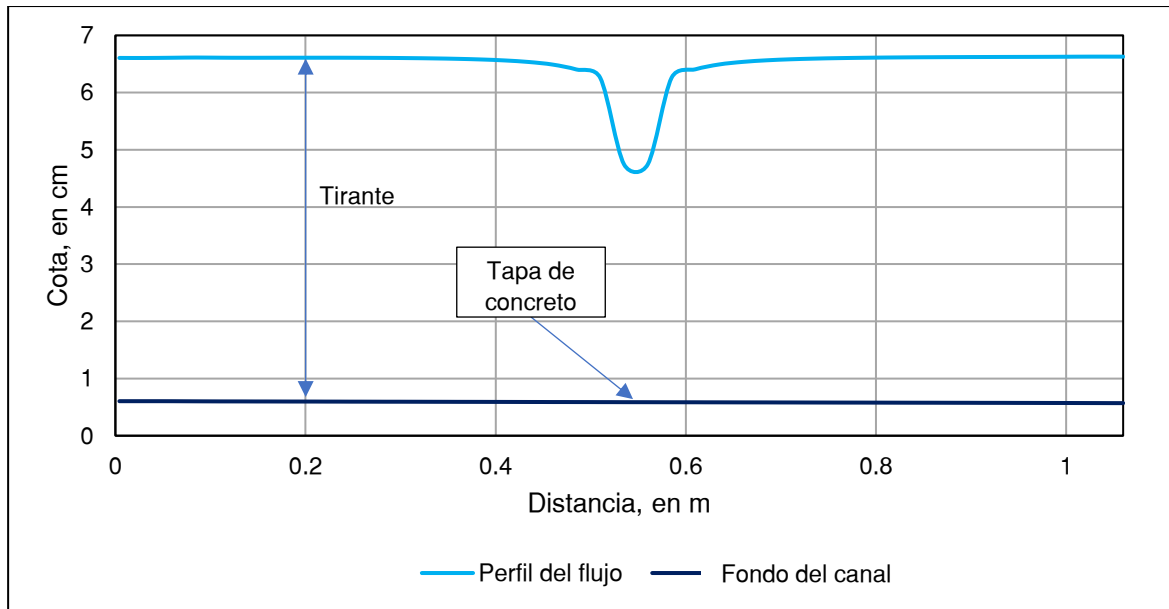


Figura 4-98 Perfil de flujo transversal (corte B-B') del sumidero ahogado en la tapa de concreto

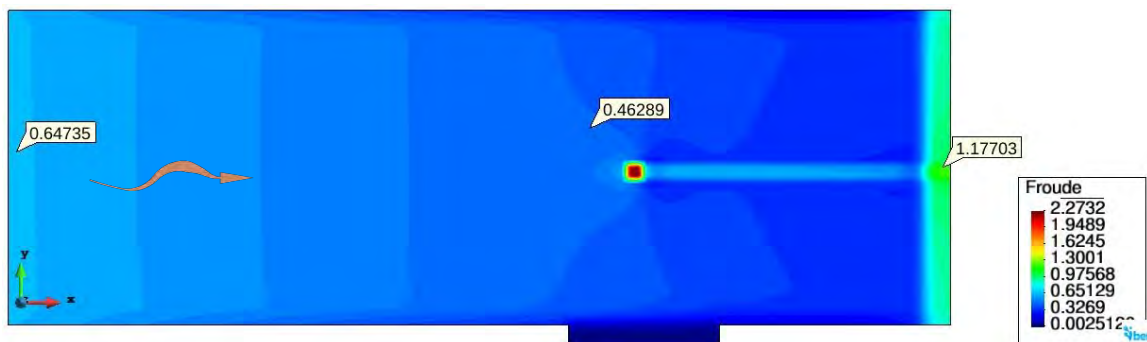


Figura 4-99 Comportamiento del Número de Froude del sumidero ahogado en la tapa de concreto

Respecto al caudal específico que se transitó, en este caso fue de $0.02 \text{ m}^2/\text{s}$, de los cuales la tapa capta $0.0014 \text{ m}^2/\text{s}$ y llegan a la salida $0.0185 \text{ m}^2/\text{s}$ (Figura 4-100).

En la figura 4-101, se muestra el comportamiento de los caudales específicos de entrada y salida y presentan estabilidad lo cual garantiza un buen comportamiento al realizar la modelación de este caso.

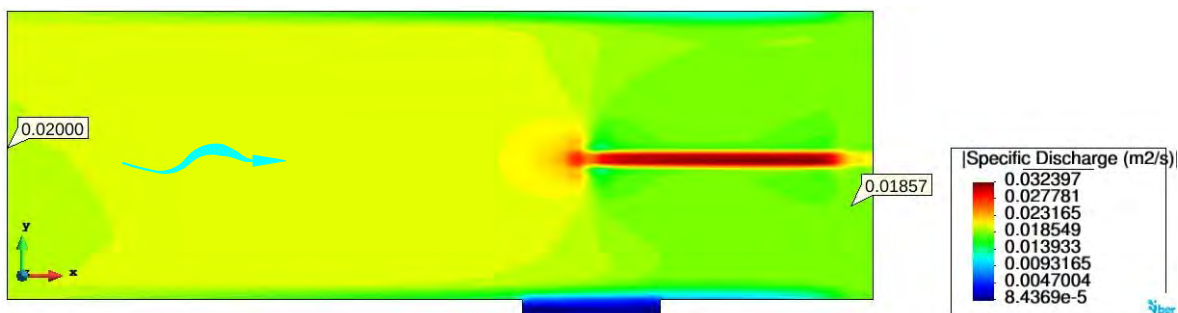


Figura 4-100 Mapa del caudal específico del sumidero ahogado en la tapa de concreto.

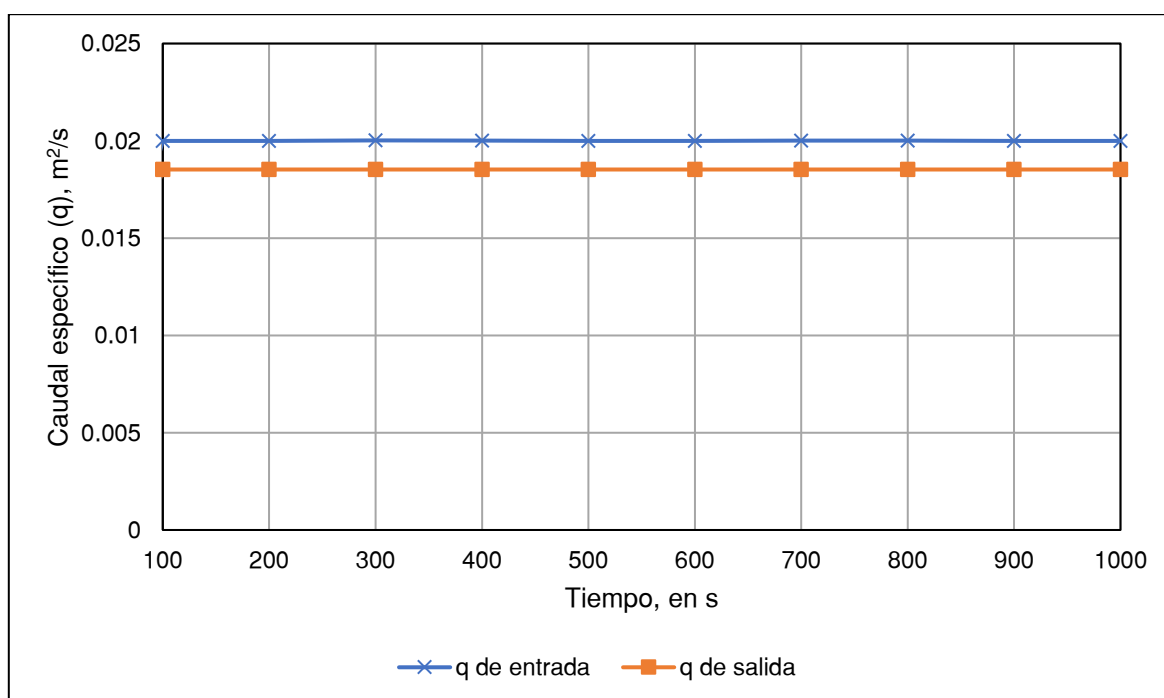


Figura 4-101 Caudal específico de entrada y salida del sumidero ahogado en la tapa de concreto.

Mientras que, la máxima velocidad se presenta al ingresar el agua por la tapa de concreto es de 0.93 m/s, en la entrada del canal es de 0.43 m/s y a la salida del canal de 0.65 m/s (Figura 4-102).

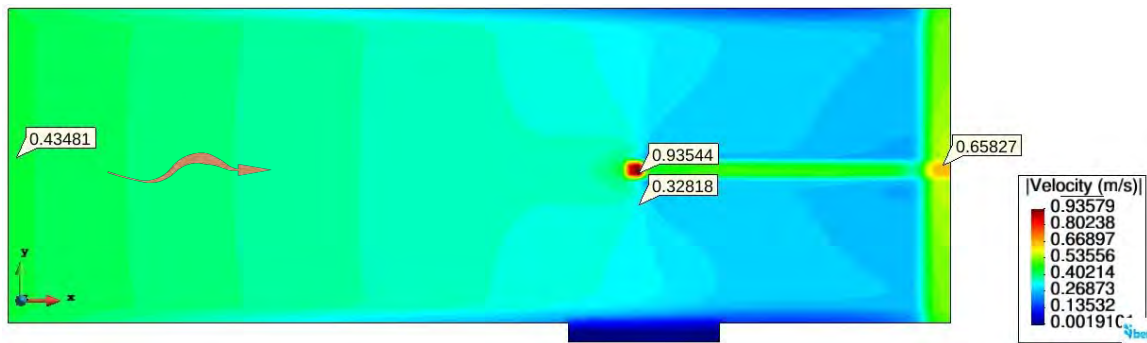


Figura 4-102 Mapa de velocidad del sumidero ahogado en la tapa de concreto.

4.2.2.3 Simulación del sumidero ahogado con la rejilla de fierro fundido.

Para la simulación de este escenario del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido en el modelo numérico IBER, se tomaron en cuenta las condiciones mostradas en la tabla 4-20. El tamaño de malla es de 0.025 y el tiempo máximo de simulación fue de 1000 segundos (16.6 minutos), con un intervalo de resultados a cada 100 s (1.6 minutos).

Los tirantes que se presentan en este caso se muestran en la figura 4-103, en la cual mediante etiquetas se indican los valores a la entrada que son de 9.36 cm, en la ubicación de la rejilla de fierro fundido de 10.22 cm.

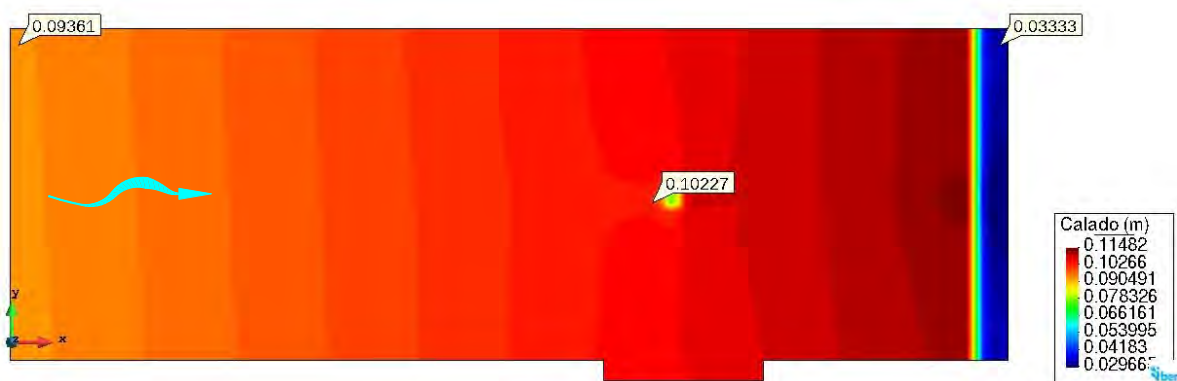


Figura 4-103 Mapa del Calado (tirante) del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido

Tabla 4-20 Condiciones para la simulación del sumidero ahogado en la rejilla de hierro fundido.

Hidrodinámica				Rugosidad
Condiciones de contorno	Condiciones iniciales	Condiciones internas	Sumidero	n = 0.011 (concreto pulido)
Entrada 2D	Calado=0.1 m	Tipo de condición (m): Compuerta	Tipo: Pozo	
Entrada: Caudal total		Cota de compuerta (m): 0.0189	Diámetro (m): 0.115	
Régimen: crítico/subcrítico		Elevación del fondo (m): 0	Área efectiva (%): 26	
Caudal total		Ancho de apertura compuerta (%): 100	Cd vertedero: 1.7	
Tiempo (s)		Tipo de compuerta: Fija	Cd orificio: 0.48	
0.0		Cd compuerta libre: 0.6	Caudal de entrada	
0.02		Cd compuerta anegada: 0.8	Tiempo (s)	
Salida 2D			Q (m³/s)	
Condición de flujo: Supercrítico/crítico			0.0	0.00291

Mientras que, la cota del agua considera el desnivel del canal ubicando a la salida del canal y al inicio del canal un desnivel total de 1.8 cm. Por eso, en la salida del canal la cota es igual al tirante y en la entrada se tiene una cota de agua de 11.12 cm (Figura 4-104).

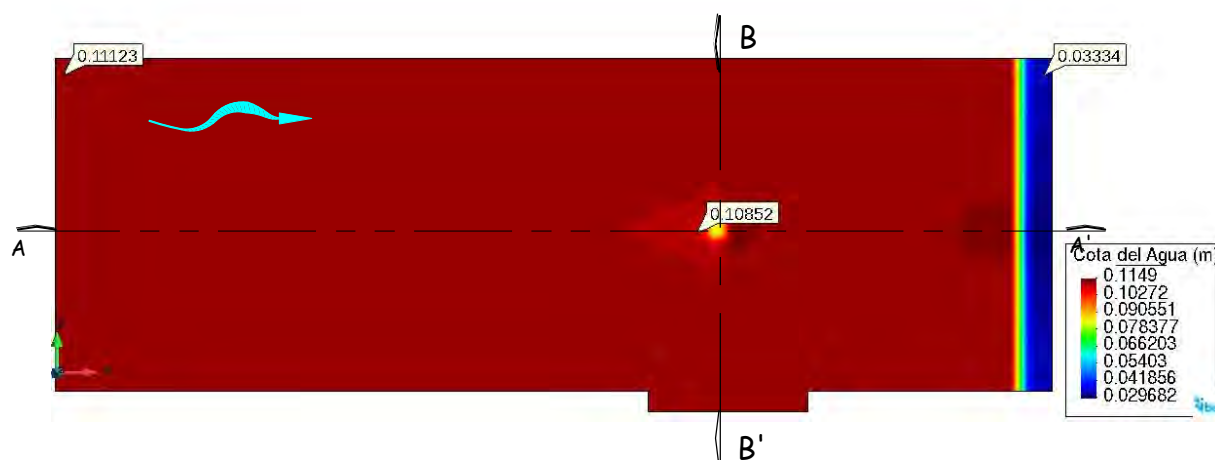


Figura 4-104 Mapa de la Cota del agua del sumidero ahogado en la rejilla de hierro fundido.

Resultados

El perfil de flujo que se presenta en la figura 4-105, es el perfil de flujo longitudinal donde se observa el remanso que se presenta a la salida del canal, provocado por la compuerta colocada en IBER que se ubica aguas abajo, garantizando así el remanso que genera el ahogamiento, la función que realiza el uniformizador de flujo en el modelo físico.

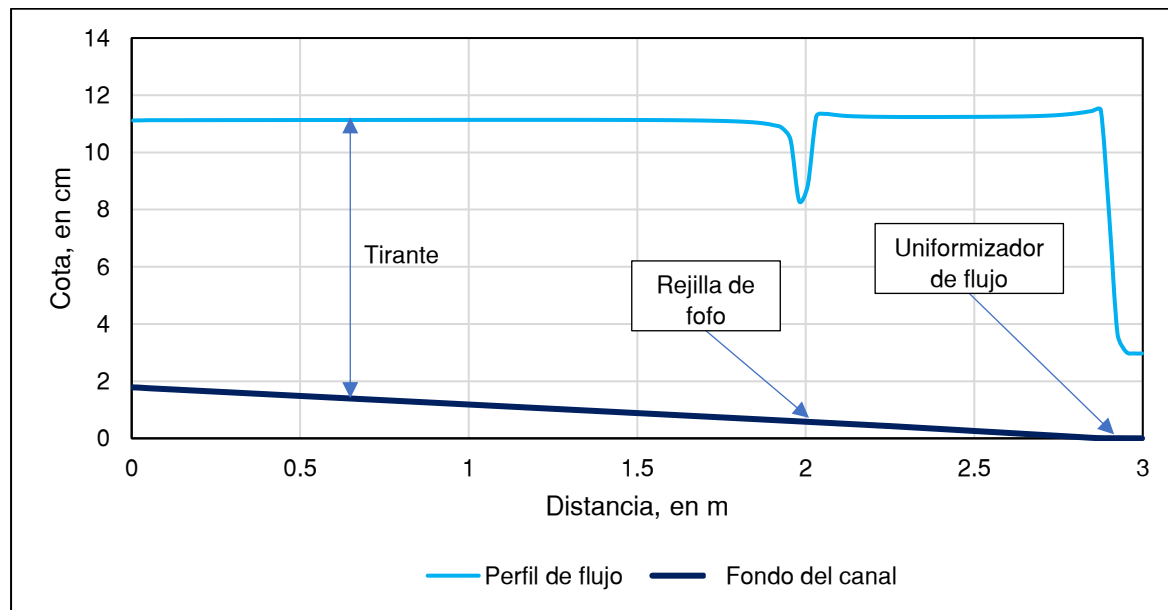


Figura 4-105 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.

Por otra parte, y en complementación con las figuras 4-104 y 4-105, en la Figura 4-106, se muestra el perfil de flujo transversal, de acuerdo con el corte B-B', de donde se presenta un tirante de 10 cm en ambas márgenes.

En la figura 4-107 y figura 4-108, hacen referencia al caudal específico que entra al canal y el que sale (ver etiquetas de la figura 4-108 y los valores de la figura 4-109) la diferencia indica el caudal que capta la rejilla de fierro fundido que es del orden de los 3 l/s.

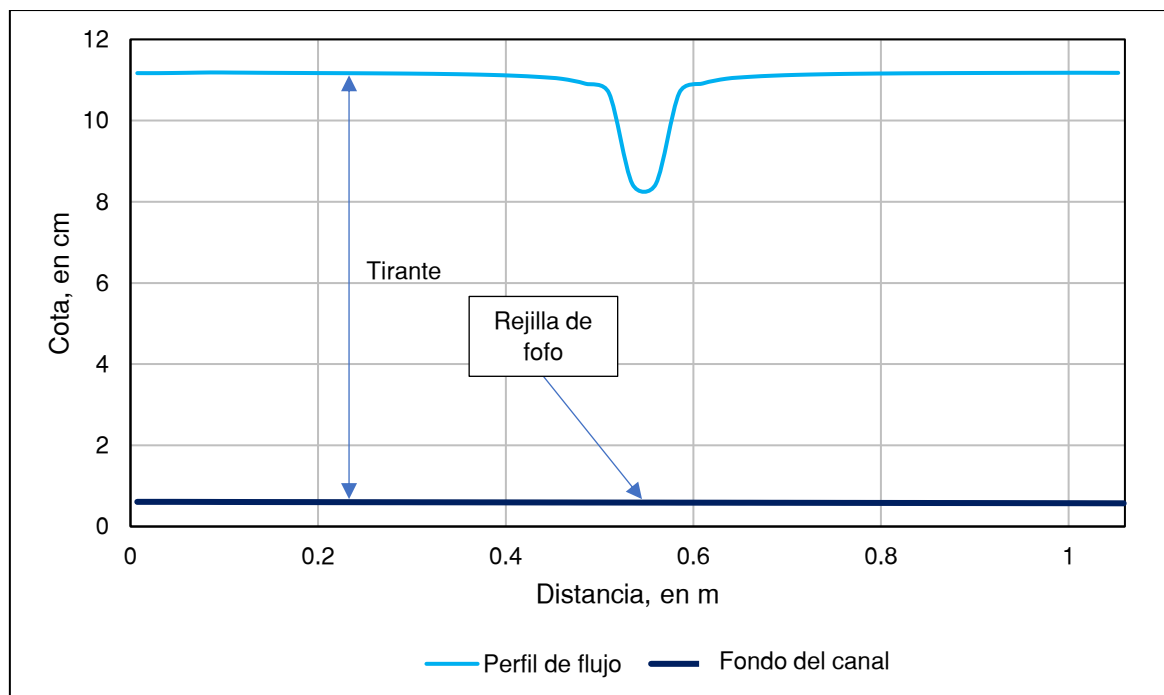


Figura 4-106 Perfil de flujo transversal (corte B-B') del sumidero ahogado en la rejilla de hierro fundido.

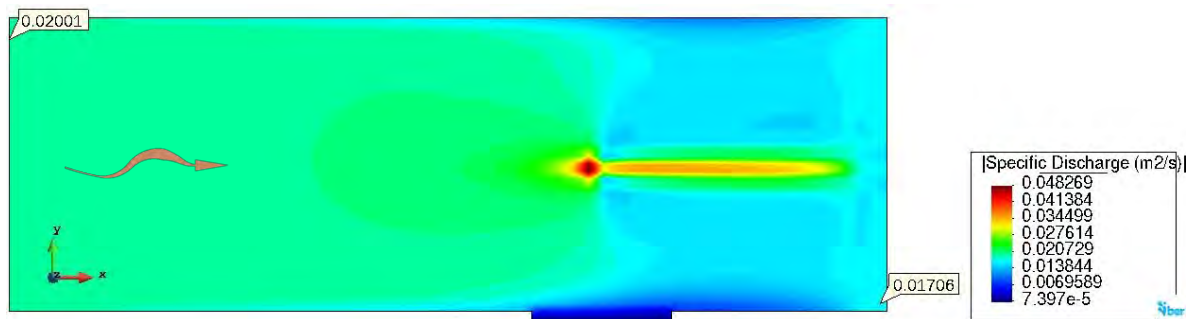


Figura 4-107 Mapa del caudal específico del sumidero ahogado en la rejilla de hierro fundido.

Resultados

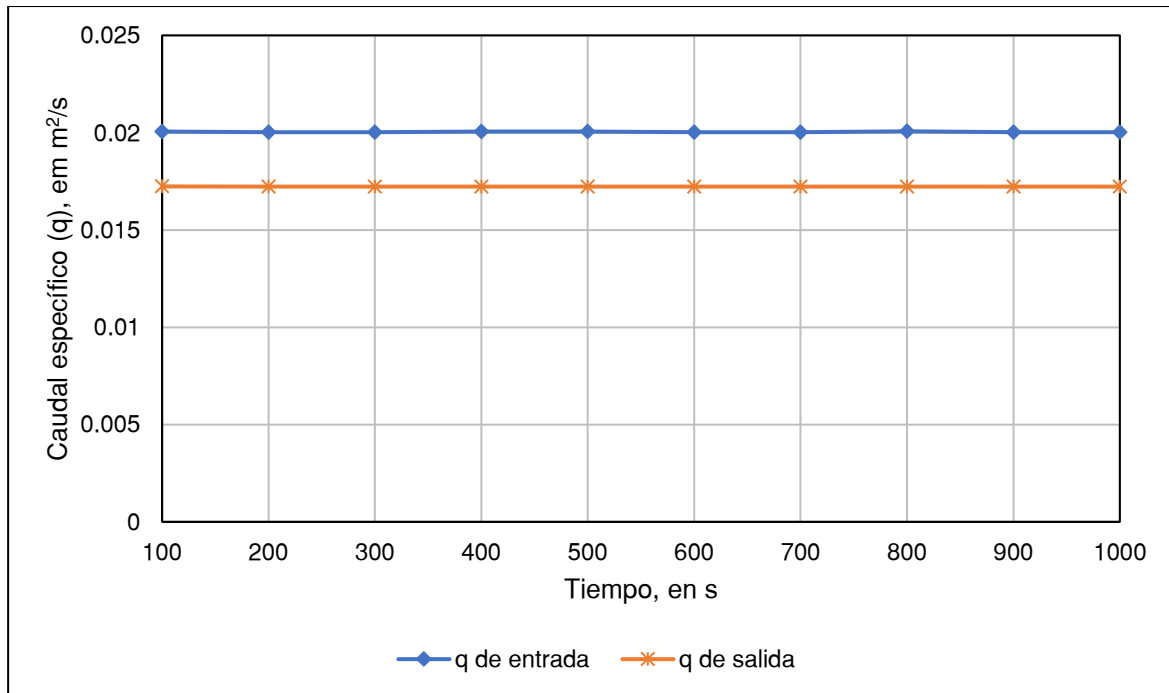


Figura 4-108 Caudal específico de entrada y salida del sumidero ahogado en la rejilla de hierro fundido.

Para los tres casos: brocal sin tapa y de la tapa de concreto y rejilla de hierro fundido, a lo largo del canal y debido al remanso, se presenta un régimen subcrítico con números de Froude menores a 1, sólo en el punto de sumidero y en la salida de la calle se presenta un régimen supercrítico en donde el número de Froude es mayor a 1 (Figura 4-109).

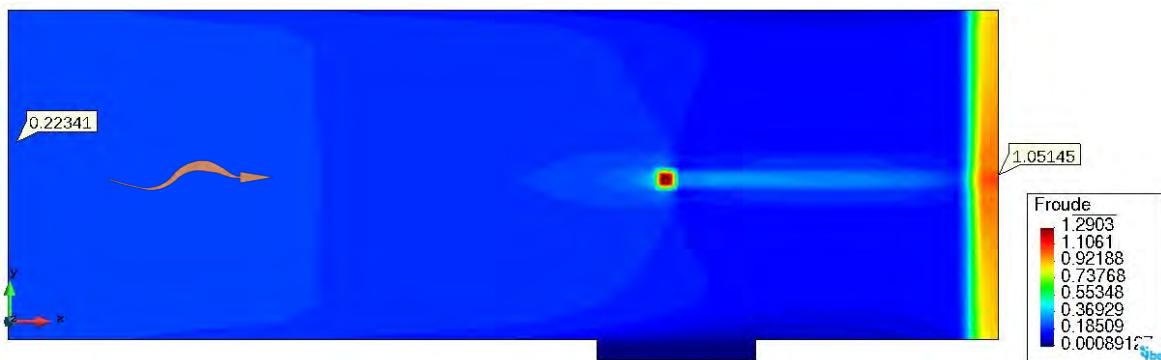


Figura 4-109 Mapa del Número de Froude del sumidero ahogado en la rejilla de hierro fundido

Para el caso de las velocidades en los tres casos son velocidades del orden de los 0.21 m/s, y la máxima velocidad se presenta en la entrada del agua en la rejilla de fierro fundido se obtuvo un valor de 0.76 m/s y en la salida una velocidad de 0.51 m/s (Figura 4-110).

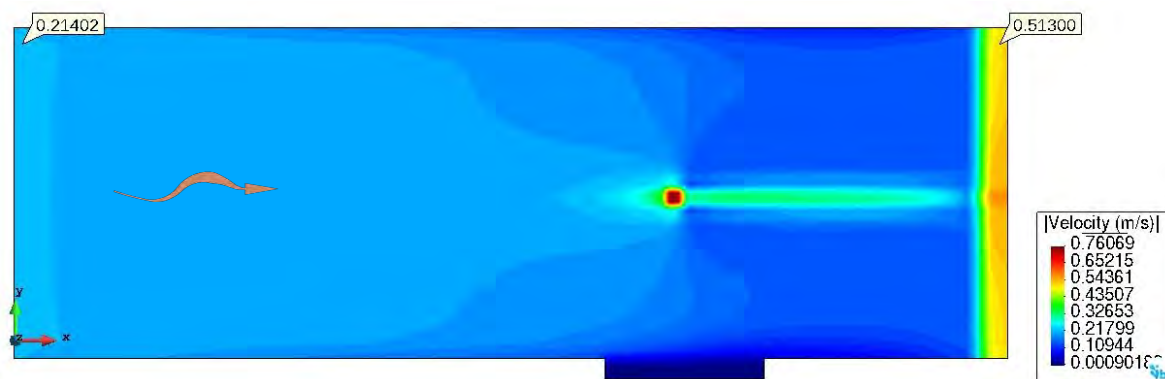


Figura 4-110 Mapa de velocidad del sumidero ahogado en la rejilla de fierro fundido.

4.2.3 Resultados de la simulación en IBER, en condiciones del Escenario 3.

El escenario 3 considera surgencia ahogada, para provocar este escenario se colocó en la condición inicial un tirante de 10 cm y en las condiciones internas se colocó la compuerta aguas abajo para generar el remanso y garantizar el ahogamiento para los tres casos; brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido.

4.2.3.1 Simulación del brocal sin tapa en surgencia ahogada.

Para la simulación de la surgencia ahogada del brocal sin tapa en el modelo numérico IBER, se tomaron en cuenta las condiciones mostradas en la tabla 4-21. El tamaño de malla fue de 0.025 y el tiempo máximo de simulación fue de 1000 segundos (16.6 minutos), con un intervalo de resultados a cada 100 segundos (1.6 minutos).

Tabla 4-21 Condiciones para la simulación de surgencia ahogada en el brocal sin tapa.

Hidrodinámica					Rugosidad	
Condiciones de contorno		Condiciones iniciales	Condiciones internas	Fuente		n = 0.011 (concreto pulido)
Entrada 2D		Calado=0.1 m	Tipo de condición (m): Compuerta	Tiempo (s)	Q (m³/s)	
Entrada: Caudal total			Cota de compuerta (m): 0.045	0	0.0381	
Régimen: crítico/subcrítico			Elevación del fondo (m): 0			
Caudal total			Ancho de apertura compuerta (%): 100			
Tiempo (s)	Q (m³/s)		Tipo de compuerta: Fija			
0.0	0.02		Cd compuerta libre: 0.6			
Salida 2D			Cd compuerta anegada: 0.8			
Condición de flujo: Supercrítico/crítico						

Para este escenario los tirantes que se obtuvieron en el canal resultado de las simulaciones, aguas arriba se presenta un tirante de 5.84 cm y aguas abajo de 4.07 cm, resultando el tirante más alto justamente en el punto del brocal con un tirante de 6.11 cm (Figura 4-111), lo que demuestra que existe surgencia.

Para el caso de la cota del agua se explica con las figuras 4-112 y 4-113 en la parte del canal de aguas abajo se tiene el valor de tirante (calado) igual a la cota del agua, debido a que la cota cero se ubica precisamente en este punto.

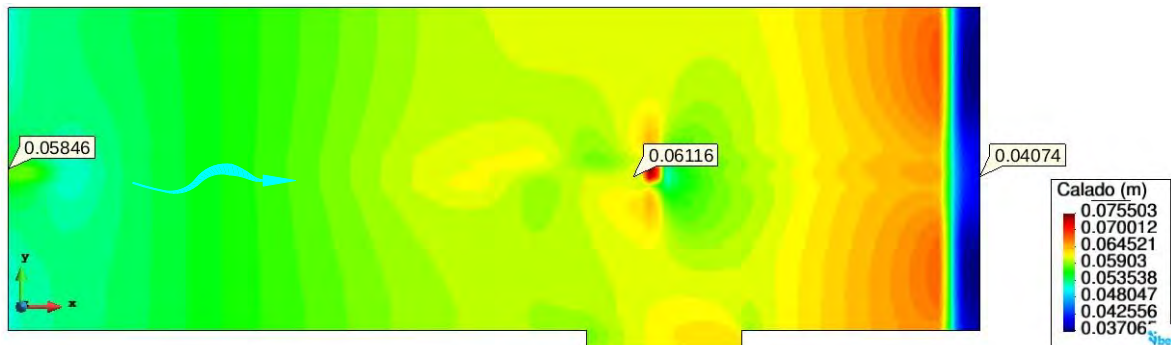


Figura 4-111 Mapa del Calado (tirante) de surgencia ahogada en el brocal sin tapa.

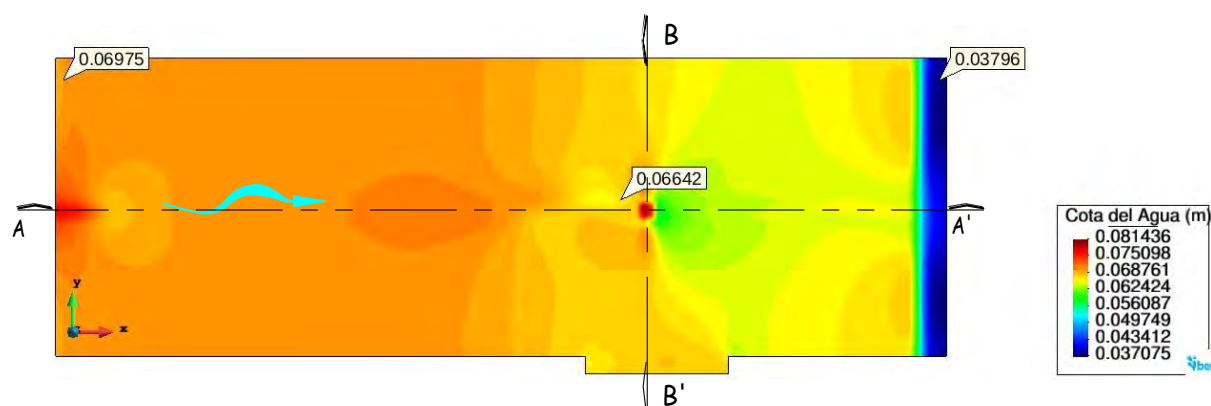


Figura 4-112 Mapa de la Cota de agua de surgencia ahogada en el brocal sin tapa.

El perfil de flujo longitudinal que se presenta al centro del canal de acuerdo como se indica la vista en la Figura 4-113, aguas abajo se tiene un tirante de 4 cm y aguas arriba un tirante de 6 cm y en el punto del brocal se observa de forma clara la surgencia, con un tirante de hasta 8 cm.

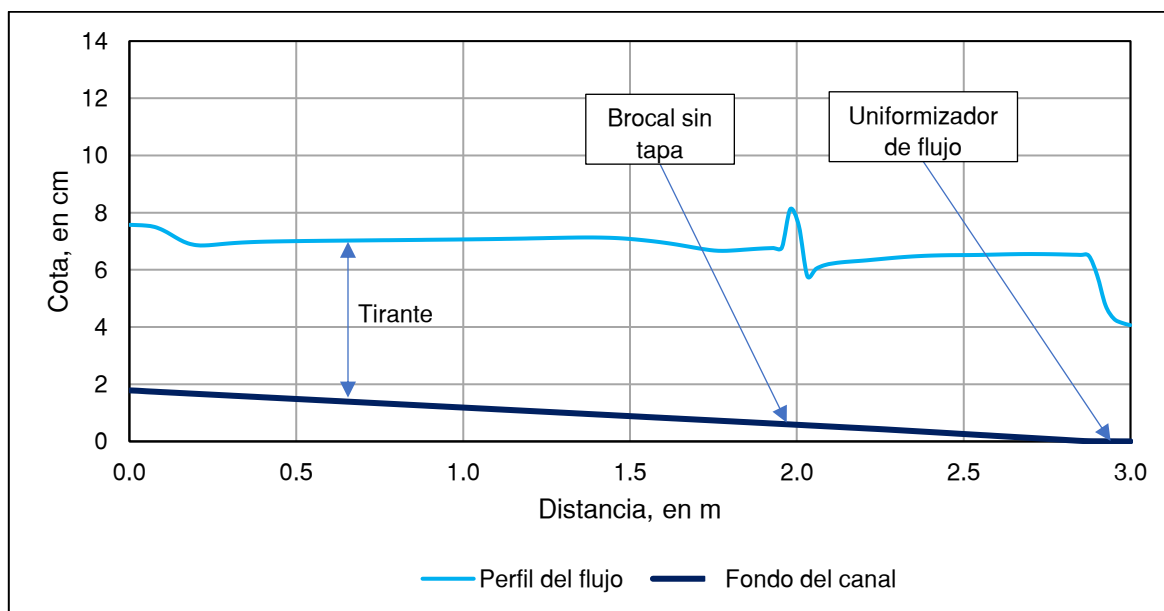


Figura 4-113 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') de surgencia ahogado en el brocal sin tapa

Resultados

Mientras que para el perfil de flujo transversal (corte B-B'), se presenta el mismo tirante que en el perfil longitudinal, en la zona de surgencia de 8 cm y en las márgenes un tirante de 6 cm. (Figura 4-114).

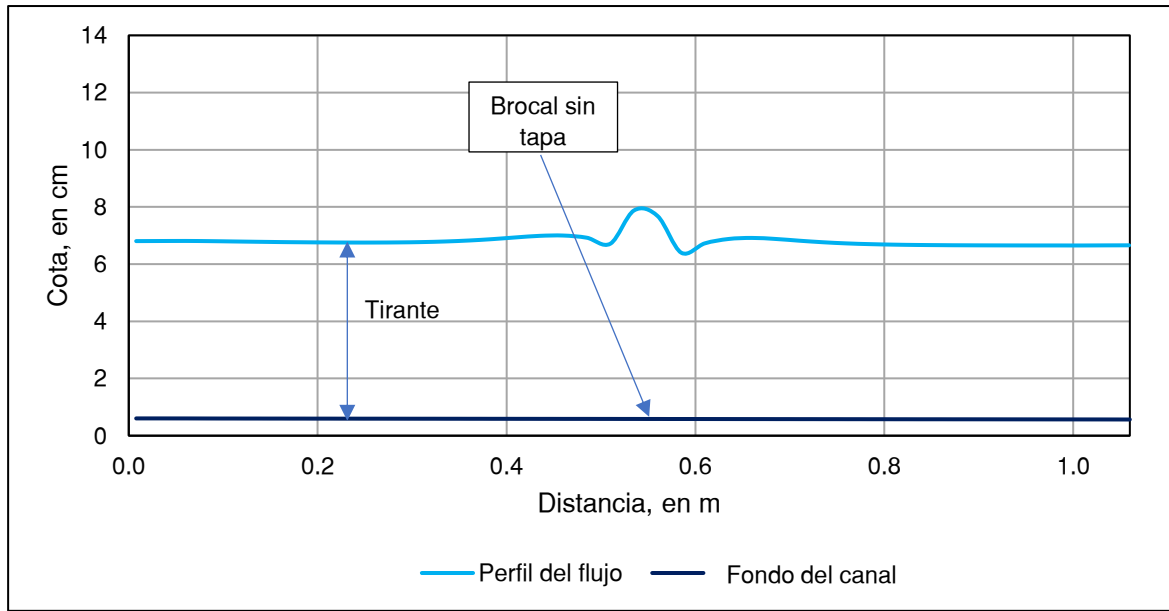


Figura 4-114 Perfil de flujo transversal (corte B-B') de surgencia ahogado en el brocal sin tapa

Como caudal de entrada al canal se tiene 20 l/s y por surgencia un caudal de 4.8 l/s por lo que, a la salida del canal se tiene un caudal de 24.8 l/s (Figura 4-115). Esto evidencia claramente la contribución del caudal por surgencia.

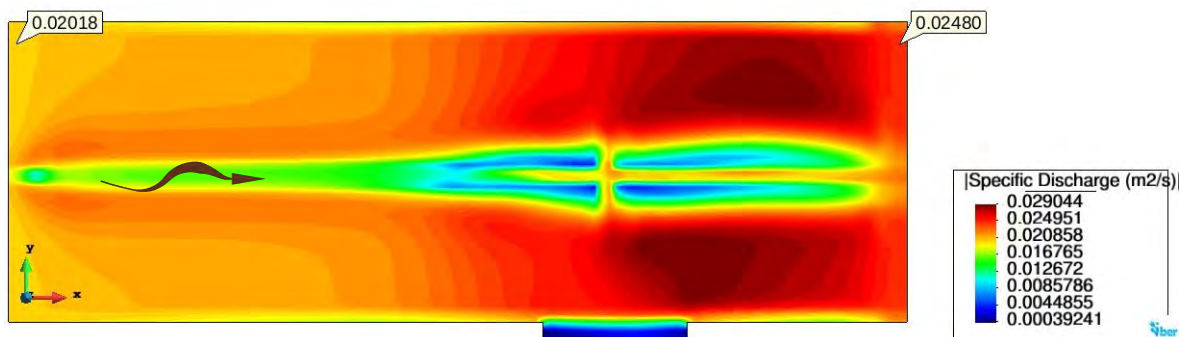


Figura 4-115 Mapa del caudal específico de surgencia ahogado en el brocal sin tapa.

En la Figura 4-116, se presenta el comportamiento del caudal específico, tanto de entrada como de salida, los cuales se presentan de manera estable. Esto indica que durante la simulación, inicialmente ingresa un caudal de 20 l/s, al cual se le añade posteriormente el caudal de surgencia de 4.8 l/s. Como resultado, el caudal total en la descarga asciende a 24.8 l/s.

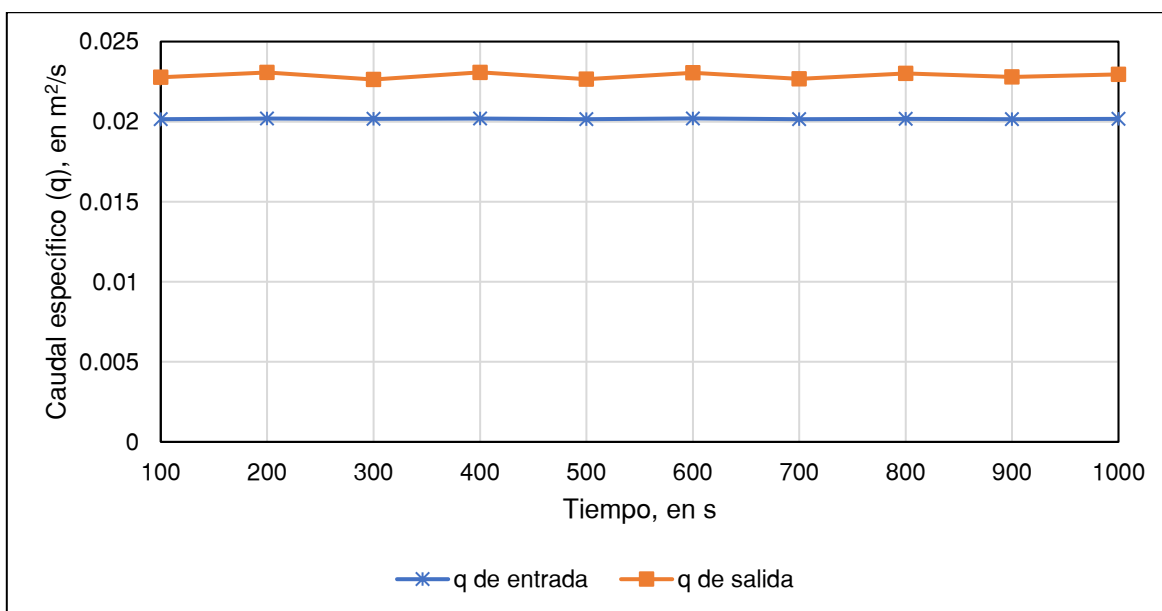


Figura 4-116 Comparación del caudal específico de entrada y salida de la surgencia con descarga ahogada del brocal sin tapa.

Respecto al tipo de flujo, en todo el canal se generó el remanso con el uniformizador colocado a la salida del canal, lo que provoca que se presente un régimen subcrítico en prácticamente todo el canal, y sólo en la salida del canal se presentan condiciones de flujo en régimen supercrítico (Figura 4-117).

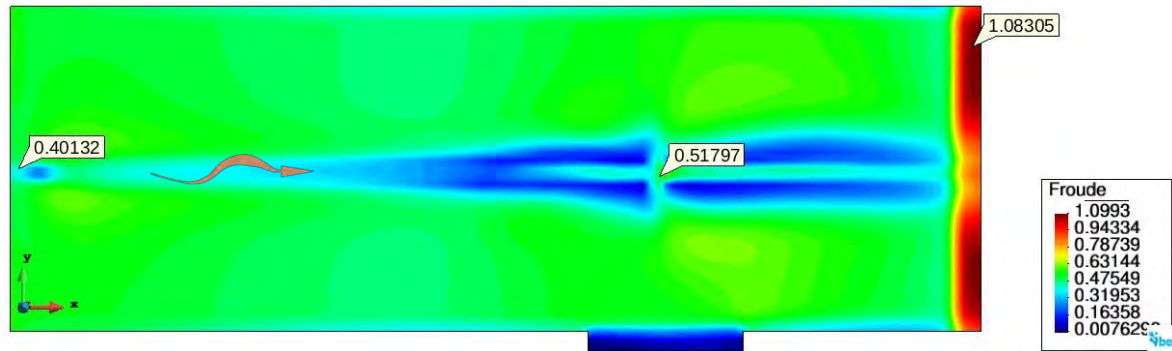


Figura 4-117 Comportamiento del Número de Froude de la surgencia con descarga ahogada del brocal sin tapa.

La Figura 4-118 ilustra el comportamiento de las velocidades en el canal, permitiendo determinar que a la entrada se presenta una velocidad de 0.39 m/s. En la descarga del canal, está velocidad aumenta a 0.65 m/s, mientras que en el punto del brocal sin tapa se registra una velocidad intermedia de 0.47 m/s.

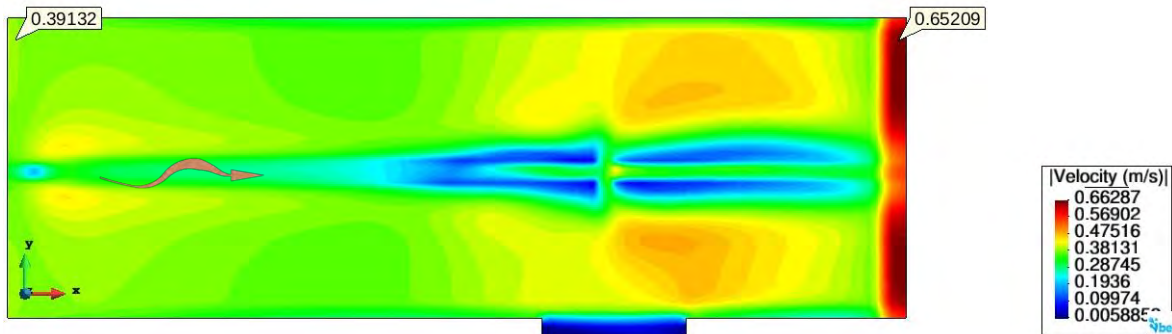


Figura 4-118 Mapa de velocidad de la surgencia con descarga ahogada del brocal sin tapa.

4.2.3.2 Simulación de la tapa de concreto trabajando a surgencia ahogada.

En la simulación de este escenario mediante el modelo numérico IBER, se instala una compuerta aguas abajo de la posición de la tapa de concreto. Además, se consideraron las condiciones detalladas en la Tabla 4-22. La discretización de la malla se estableció en 0.025, y el tiempo

máximo de simulación se fijó en 1000 segundos (equivalente a 16.6 minutos), con intervalos de resultados registrados cada 100 segundos (o 1.6 minutos).

Tabla 4-22 Condiciones para la simulación de la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto

Hidrodinámica						Rugosidad
Condiciones de contorno		Condiciones iniciales	Condiciones internas	Fuente		n = 0.011 (concreto pulido)
Entrada 2D		Calado=0.1 m	Tipo de condición (m): Compuerta	Tiempo (s)	Q (m³/s)	
Entrada: Caudal total			Cota de compuerta (m): 0.0189	0	0.00293	
Régimen: crítico/subcrítico			Elevación del fondo (m): 0			
Caudal total			Ancho de apertura compuerta (%): 100			
Tiempo (s)	Q (m³/s)		Tipo de compuerta: Fija			
0.0	0.018		Cd compuerta libre: 0.6			
Salida 2D			Cd compuerta anegada: 0.8			
Condición de flujo: Supercrítico/crítico						

En la Figura 4-119, se muestra el tirante calculado para todo el modelo mediante un mapa de colores. Este mapa indica que, en la entrada del canal, el tirante alcanza los 15.31 cm, mientras que en el punto donde se encuentra la tapa de concreto se registra un tirante de 16.3 cm. Finalmente, a la salida del canal, el tirante disminuye a 3.83 cm.



Figura 4-119 Comportamiento del tirante en la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto.

Resultados

La cota de agua a la entrada del canal se sitúa en 17.08 cm, mientras que en el punto donde se localiza la tapa de concreto es de 16.86 cm. En la salida del canal, la cota coincide con el tirante representado en la Figura 4-120. Además, se han indicado los cortes A-A' y B-B' a través de los cuales se obtienen los perfiles de flujo, presentados detalladamente en las Figuras 4-121 y 4-122.

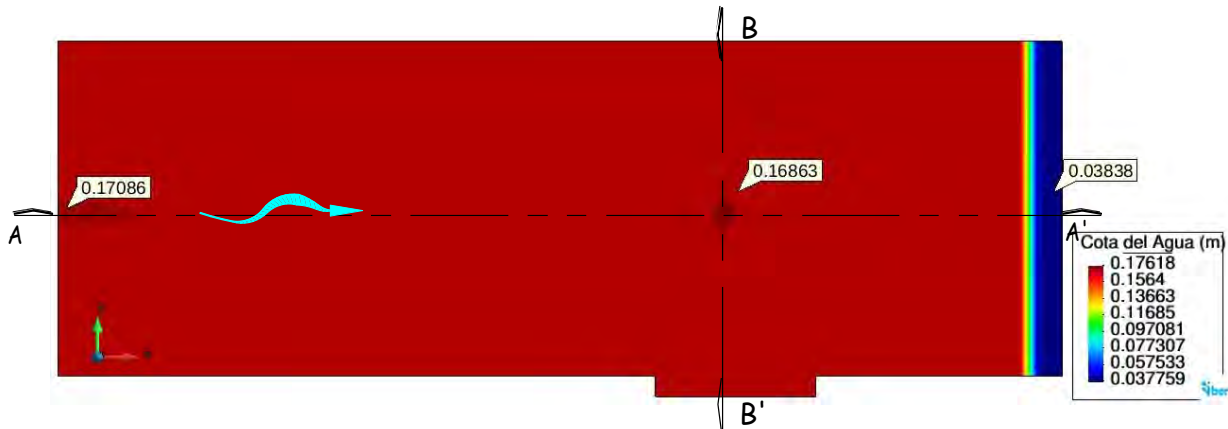


Figura 4-120 Mapa de la cota del agua en la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto

La Figura 4-121 presenta el perfil de flujo longitudinal para un caudal de 18.9 l/s, al cual se añaden 2.93 l/s debido a la surgencia, resultando en un caudal total de salida de 21.8 l/s. Además, se representa el remanso generado como resultado del uniformizador de flujo instalado aguas abajo y la fuente ahogada generada por la surgencia.

La Figura 4-122 presenta el nivel alcanzado por el agua en las condiciones del escenario 3. Además, se observa la fuente generada por un caudal por surgencia de 2.93 l/s, la cual se ve afectada por el caudal en la calle de 21.8 l/s, generando una surgencia ahogada.

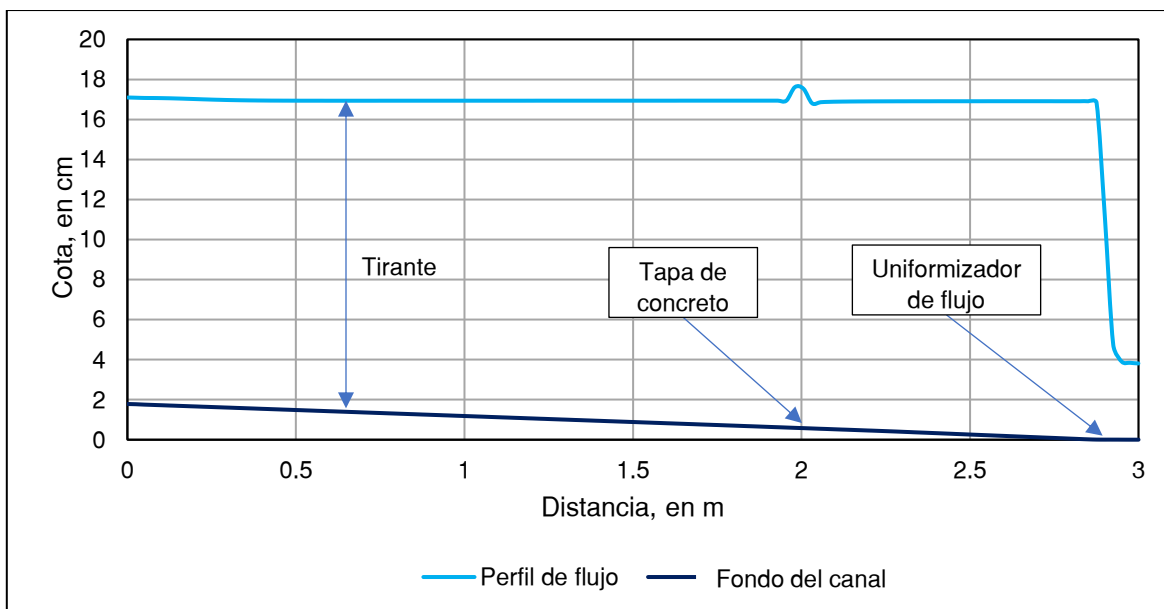


Figura 4-121 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') para un caudal de 21.83 l/s en la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto.

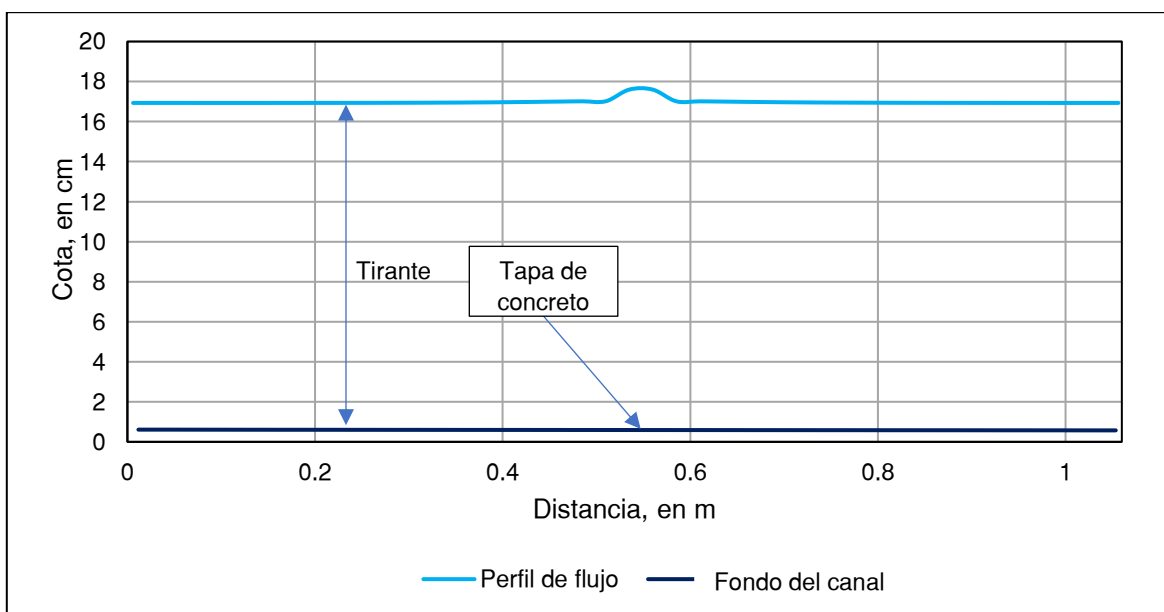


Figura 4-122 Perfil de flujo transversal (corte B-B') para un caudal de 21.83 l/s en la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto.

Resultados

El número de Froude que se presenta en el canal es menor a 1, lo que indica que es un régimen subcrítico debido al remanso que se provoca por el uniformizador, a la salida del canal se presenta el régimen supercrítico (Figura 4-123).

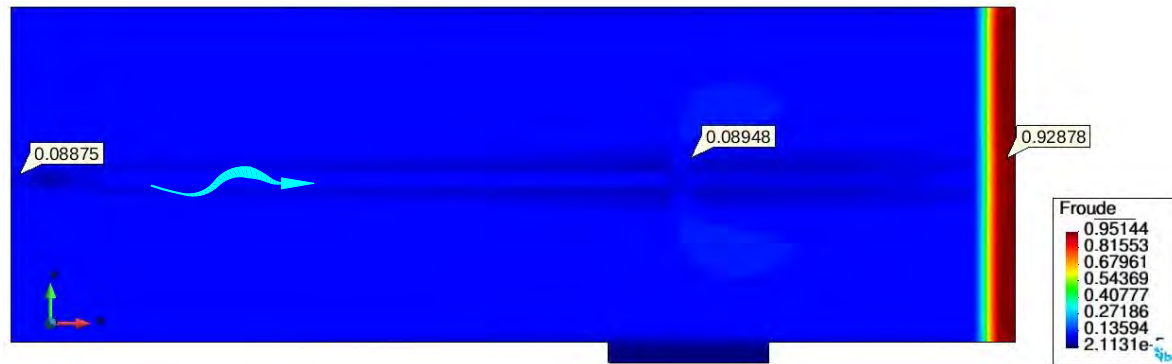


Figura 4-123 Comportamiento del Número de Froude de la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto.

El caudal específico en la entrada es de $0.0189 \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que a la salida es de $0.02181 \text{ m}^2/\text{s}$, como se evidencia en el comportamiento presentado en la Figura 4-124. Esto demuestra el equilibrio de la surgencia, que aportó un caudal adicional de 2.93 l/s .

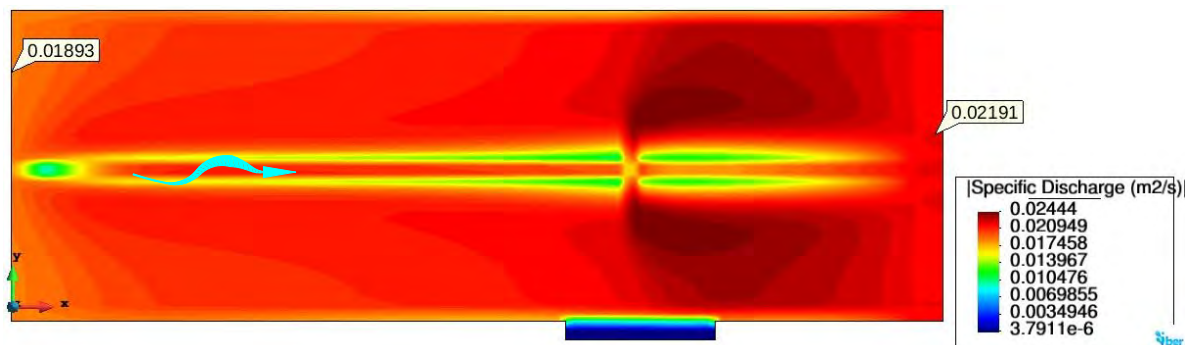


Figura 4-124 Mapa del caudal específico de la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto.

La figura 4-125 muestra la estabilidad de la simulación al tratarse de surgencia sale un caudal mayor al que ingresa aguas arriba.

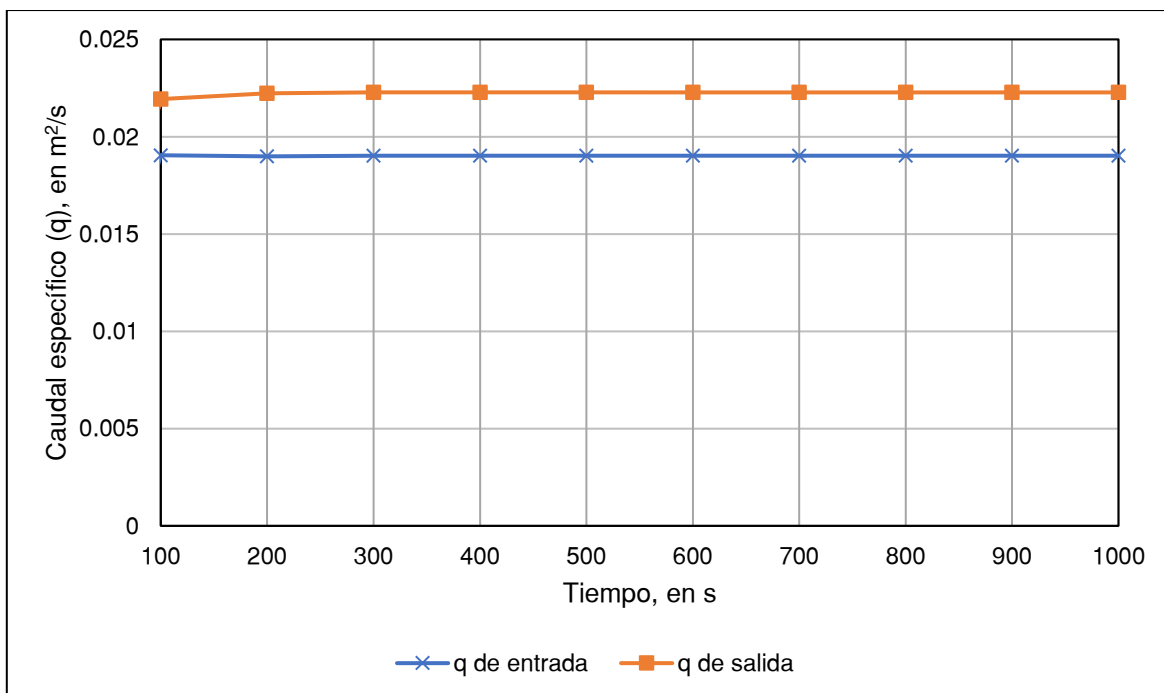


Figura 4-125 Comparación del caudal específico de entrada y salida de la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto.

En todo el canal, la velocidad es prácticamente constante, manteniéndose en el orden de 0.1 m/s. Al salir del canal a través de la compuerta que simula el funcionamiento del uniformizador, el agua alcanza una velocidad de 0.57 m/s, como se observa en la Figura 4-126.



Figura 4-126 Mapa de velocidad de la surgencia con descarga ahogada de la tapa de concreto.

4.2.3.3 Simulación de la rejilla de hierro fundido trabajando a surgencia ahogada.

Para la simulación de este escenario, que involucra una surgencia ahogada en la rejilla de hierro fundido, se consideraron las condiciones detalladas en la Tabla 4-23 en el modelo numérico IBER. Se utilizó una malla con un tamaño de 0.025 y se estableció un tiempo máximo de simulación de 1000 segundos (equivalente a 16.6 minutos), con intervalos de resultados registrados cada 100 segundos (o 1.6 minutos).

Tabla 4-23 Condiciones para la simulación de surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido.

Hidrodinámica					Rugosidad	
Condiciones de contorno		Condiciones iniciales	Condiciones internas	Fuente		n = 0.011 (concreto pulido)
Entrada 2D		Calado=0.1 m	Tipo de condición (m): Compuerta	Tiempo (s)	Q (m³/s)	
Entrada: Caudal total			Cota de compuerta (m): 0.034	0	0.003	
Régimen: crítico/subcrítico			Elevación del fondo (m): 0			
Caudal total			Ancho de apertura compuerta (%): 100			
Tiempo (s)	Q (m³/s)		Tipo de compuerta: Fija			
0.0	0.02		Cd compuerta libre: 0.6			
Salida 2D			Cd compuerta anegada: 0.8			
Condición de flujo: Supercrítico/crítico						

En la Figura 4-127 se muestra el comportamiento del tirante en el canal mediante un mapa de colores. A la entrada del canal, se observa un tirante de 6 cm, mientras que en el punto donde se encuentra la tapa de concreto, el tirante se incrementa a 6.9 cm, indicando un aumento de 0.9 cm debido a la surgencia. A la salida del canal, se registra un tirante de 3.88 cm.

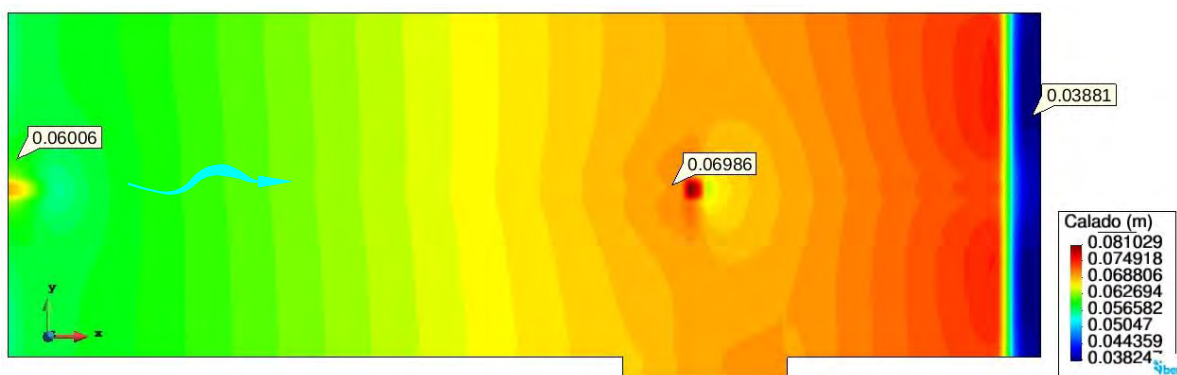


Figura 4-127 Mapa del Calado de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido.

En cuanto a la cota de agua, a la entrada del canal se registra un nivel de 7.39 cm, mientras que en el punto donde se ubica la rejilla de hierro fundido, la cota asciende a 7.63 cm. En la salida del canal, la cota se reduce a 3.9 cm. Además, se señalan los cortes A-A' y B-B', los cuales fueron utilizados para obtener los perfiles de flujo en IBER, como se observa en la Figura 4-128.

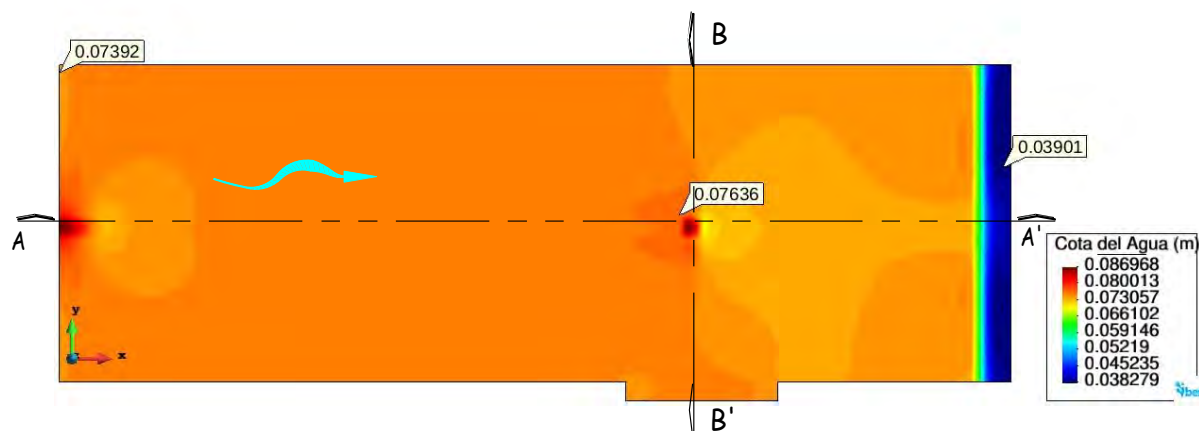


Figura 4-128 Mapa de la Cota del agua de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido.

En el perfil de flujo correspondiente a un caudal total de 23.12 l/s, se visualiza claramente el remanso ocasionado por la compuerta implementada en IBER para simular dicho fenómeno (ver Figura 4-129). Además, se presenta la altura del nivel del agua generada por la surgencia, confirmando que la simulación reproduce de manera precisa este fenómeno.

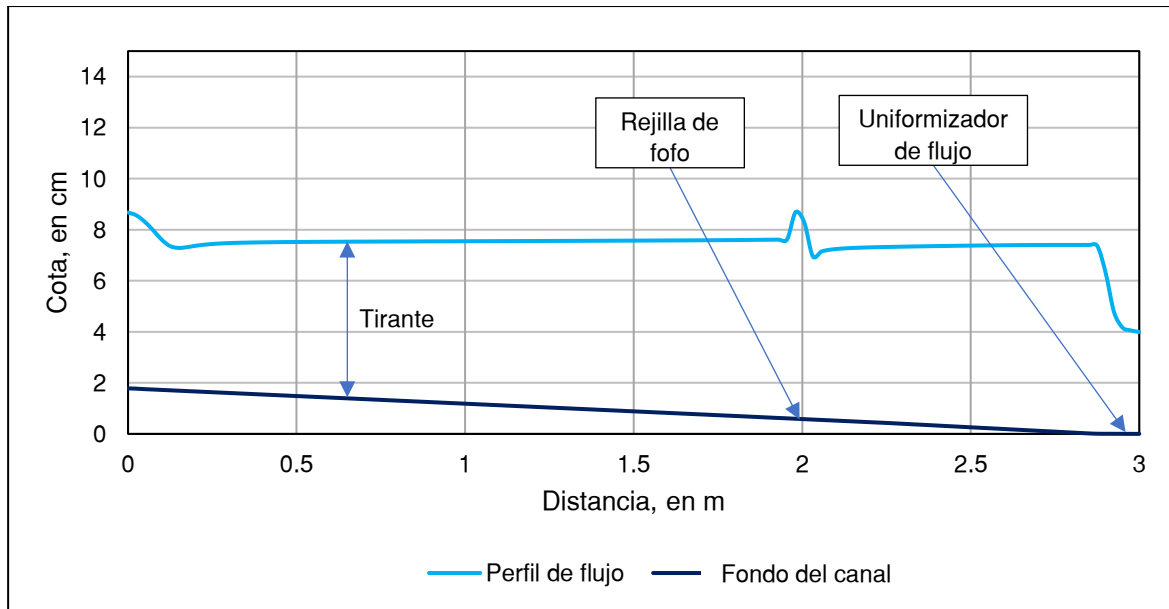


Figura 4-129 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') para un caudal de 23.12 l/s de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido.

En relación al perfil de flujo de la sección transversal al centro de la rejilla de hierro fundido, se presenta en la Figura 4-130. En este perfil, se observa de manera clara la presencia de la surgencia, incluso cuando la descarga de la rejilla de hierro fundido se encuentra ahogada.

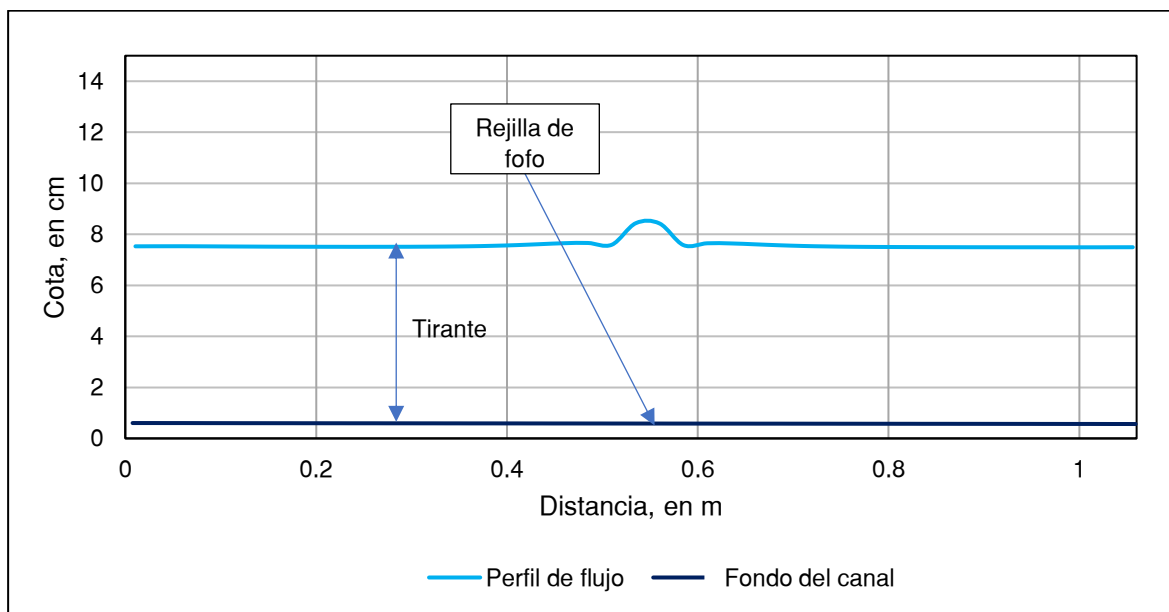


Figura 4-130 Perfil de flujo longitudinal (corte B-B') para un caudal de 23.12 l/s de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido.

En cuanto al caudal unitario que entra al canal, se sitúa en el orden de los 20 l/s, y el caudal que sale, considerando la aportación de la surgencia, asciende a 23 l/s (ver Figura 4-131). Por lo tanto, se determina que el caudal de surgencia es de 3 l/s.

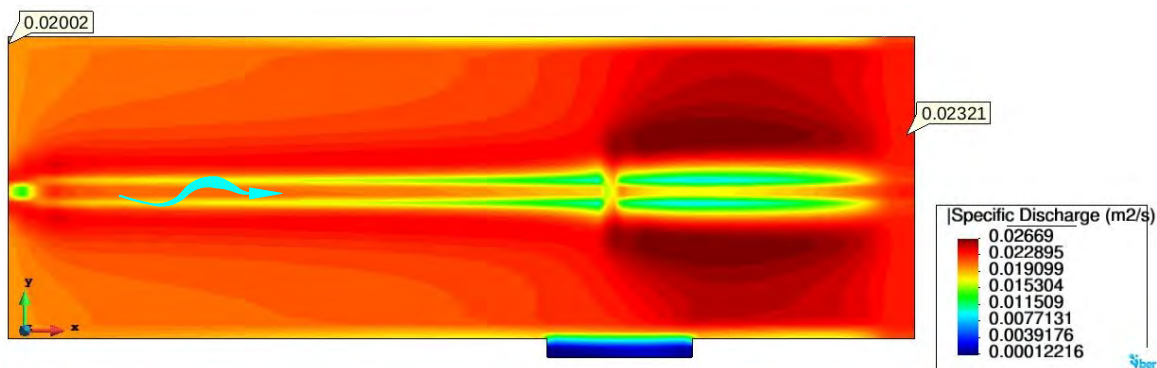


Figura 4-131 Comportamiento del caudal específico de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido.

Según se observa en la Figura 4-132, la simulación exhibe un comportamiento estable tanto para el caudal de entrada como para el caudal de salida del canal en todos los intervalos de tiempo de 100 segundos, durante los cuales se registraron los resultados.

El número de Froude que se observa en el canal es menor a 1, indicando la presencia de un régimen subcrítico, influenciado por el remanso generado por la compuerta. En contraste, a la salida del canal se manifiesta un régimen supercrítico, tal como se representa en la Figura 4-133.

La velocidad en la entrada del canal es de 0.36 m/s, disminuye a 0.13 m/s en el punto donde se encuentra la tapa y aumenta nuevamente a 0.59 m/s a la salida, como se muestra en la Figura 4-134.

Resultados

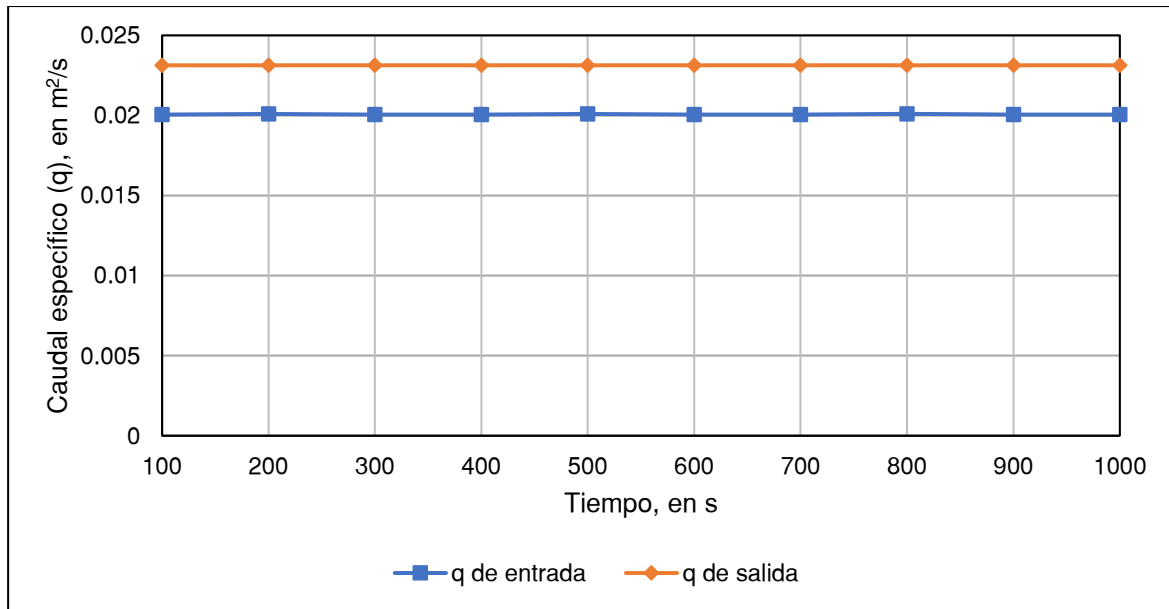


Figura 4-132 Caudal específico de entrada y salida de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido.

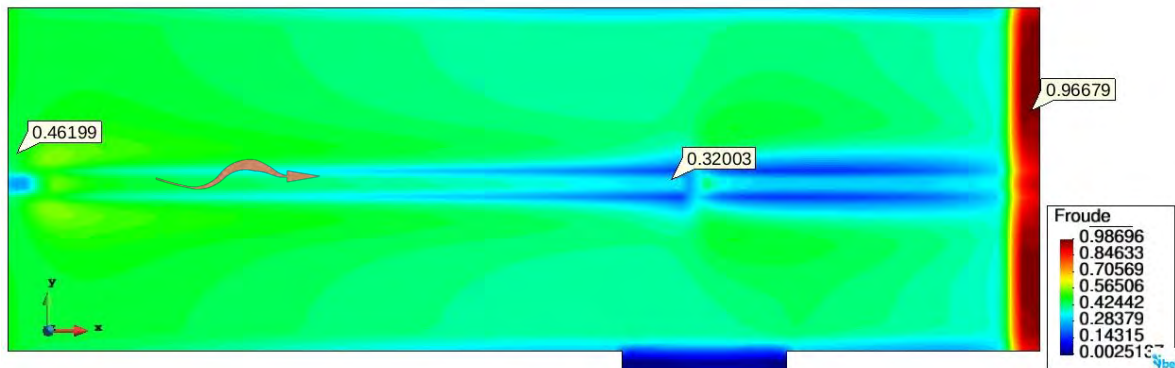


Figura 4-133 Comportamiento del Número de Froude de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de hierro fundido.

4.2.4 Resultados de la simulación en IBER, en condiciones del Escenario 4: Surgencia Libre.

El Escenario 4 aborda la surgencia libre. Para inducir esta situación, se estableció una condición inicial de terreno seco, permitiendo únicamente la entrada de caudal a través de la surgencia mediante el elemento de fuente. Este escenario fue aplicado a tres casos específicos: brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de hierro fundido.

El escenario 4 considera surgencia libre, para provocar este escenario se colocó una condición inicial seco y sólo se tiene caudal de entrada por surgencia mediante el elemento de fuente, esto aplica para los tres casos: brocal sin tapa, tapa de concreto y para la rejilla de fierro fundido.

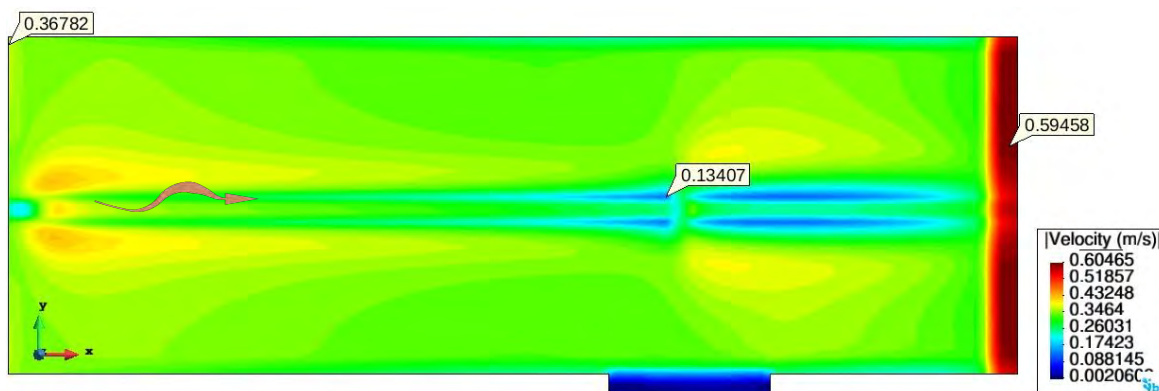


Figura 4-134 Mapa de velocidad de la surgencia con descarga ahogada de la rejilla de fierro fundido

4.2.4.1 Simulación de la descarga del brocal sin tapa en Surgencia libre.

En la simulación de este escenario, específicamente para el caso del brocal sin tapa en el modelo numérico IBER, se consideraron las condiciones detalladas en la Tabla 4-24. Se utilizó una malla con un tamaño de 0.025 y se fijó un tiempo máximo de simulación de 1000 segundos (equivalente a 16.6 minutos), con intervalos de resultados registrados cada 100 segundos (o 1.6 minutos).

Los tirantes obtenidos en los resultados de la simulación cuando el brocal sin tapa, opera en condiciones de surgencia libre presentan el siguiente comportamiento: a la entrada del canal, el tirante es de 1.8 cm, mientras que a la salida del canal se reduce a 1.28 cm. En la fuente generada por la surgencia, la altura alcanza los 5.8 cm, como se ilustra en la Figura 4-135.

Resultados

Tabla 4-24 Insumos para IBER para la simulación de la descarga en surgencia libre del brocal sin tapa

Hidrodinámica			Rugosidad
Condiciones de contorno	Condiciones iniciales	Fuente	
Entrada 2D	Calado = 0.0 m	Tiempo (s)	Q (m³/s)
Entrada: Caudal total		0	0.00543
Régimen: crítico/subcrítico			
Caudal total			
Tiempo (s)			
0.0			
Q (m³/s)			
0.0			
Salida 2D			
Condición de flujo: Supercrítico/crítico			
			n = 0.011 (concreto pulido)

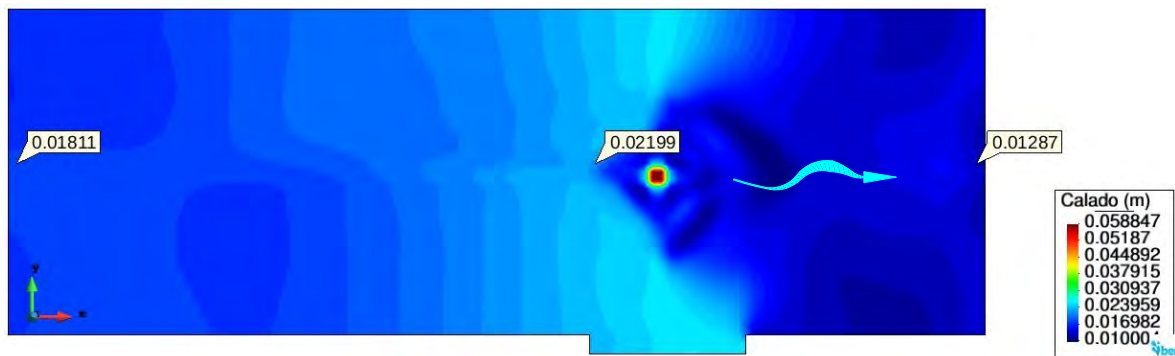


Figura 4-135 Mapa del Calado de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.

La cota del agua en la salida del canal se mantiene constante, coincidiendo con el tirante, con un valor de 1.28 cm. En la entrada del canal, la cota es de 3.58 cm, según se muestra en la Figura 4-136. En la misma figura, se señalan los cortes A-A' y B-B', los cuales se utilizan para obtener los perfiles de flujo longitudinal y transversal. Estos perfiles se generan para un caudal máximo de 5.75 l/s, el cual constituye la máxima capacidad de descarga libre del brocal sin tapa en condiciones de surgencia.

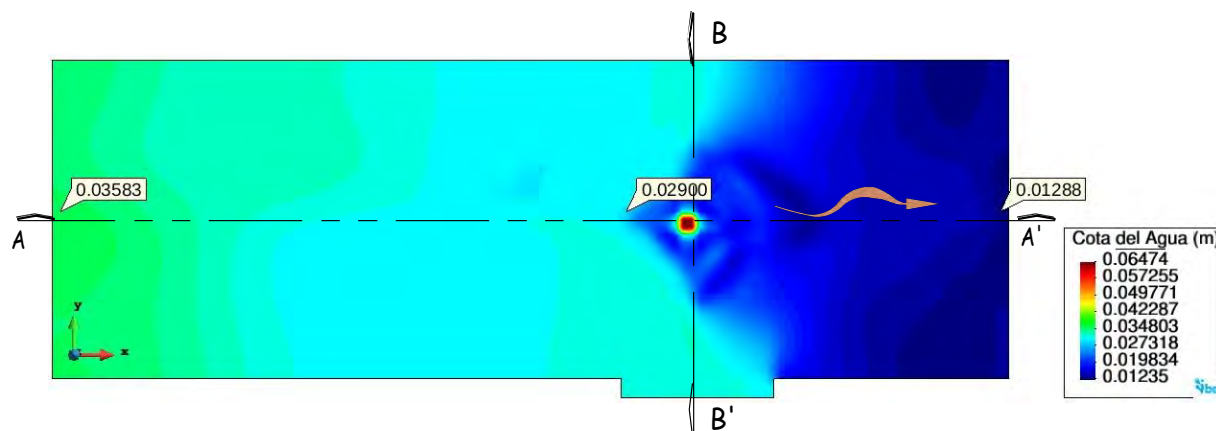


Figura 4-136 Mapa de la Cota de agua de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.

En el perfil de flujo longitudinal de la Figura 4-137, correspondiente al corte A-A', se representa de manera clara la fuente generada por la surgencia del caudal que descarga el brocal sin tapa hacia la calle. Además, se evidencia la turbulencia que se genera en la periferia de la fuente. La altura de la fuente alcanza los 6 cm, mientras que los tirantes en la entrada y salida del canal son de 1.8 cm y 1.2 cm, respectivamente.

El perfil de flujo transversal representado en la Figura 4-138, obtenido para un caudal de 5.75 l/s, corresponde al corte B-B' indicado en la Figura 4-136. En este perfil, se identifican claramente el perímetro de abatimiento generado por la surgencia, así como la fuente resultante que alcanza una altura de más de 6 cm. Además, se observa que los tirantes en las márgenes del canal tienen una altura de 2.5 cm.

El régimen de flujo que se manifiesta en la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa se identifica como supercrítico, evidenciado por un número de Froude mayor a 1. En contraste, en la zona de aguas arriba, se observa un régimen subcrítico, ya que el flujo va a contrapendiente. Es importante destacar que, para este escenario, no ingresa agua por el canal; el único caudal presente es aquel que se envía a través de la surgencia, como se muestra en la Figura 4-139.

Resultados

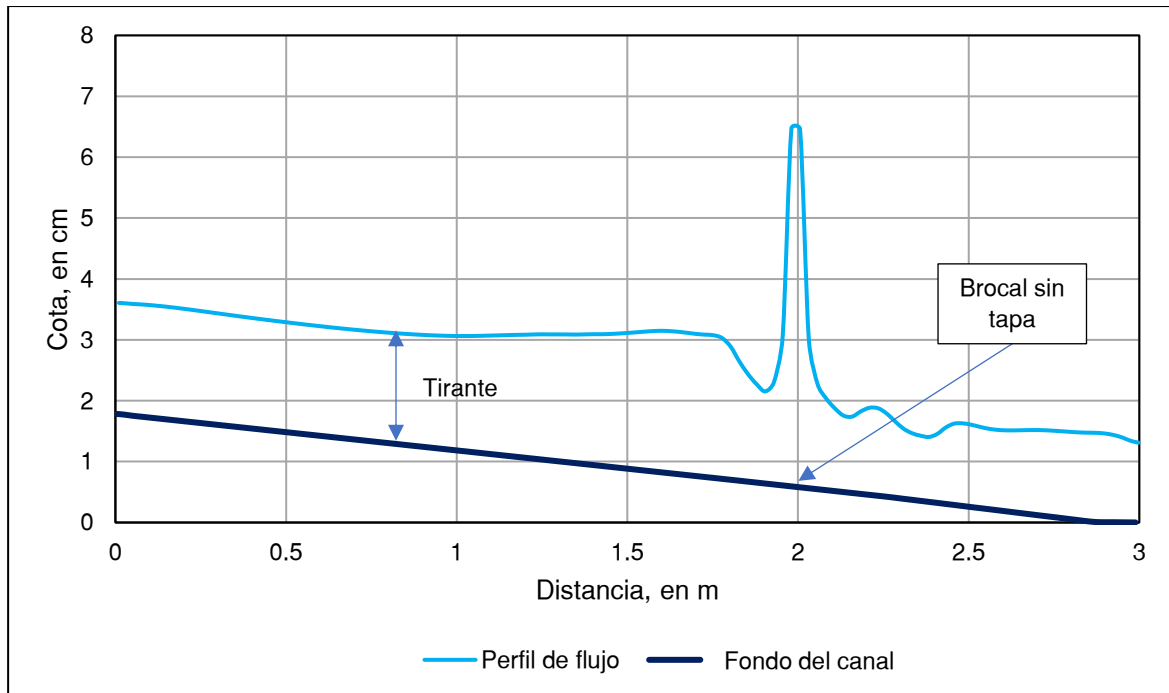


Figura 4-137 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') para un caudal de 5.75 l/s de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.

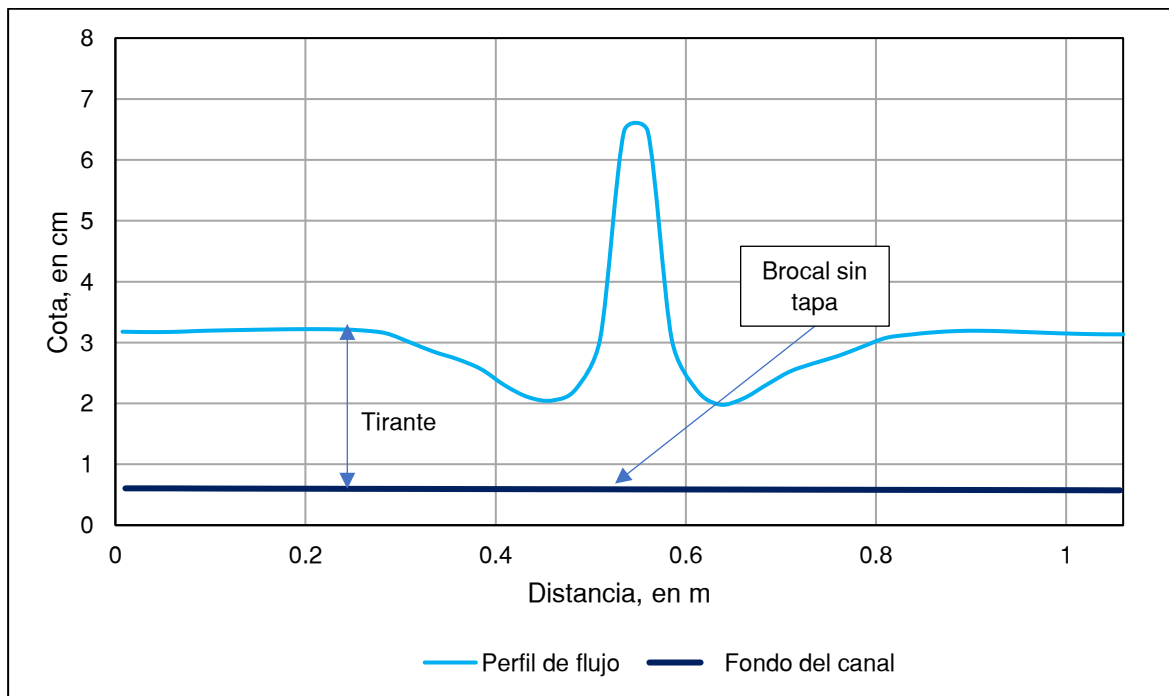


Figura 4-138 Perfil de flujo transversal (corte B-B') para un caudal de 5.75 l/s de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa

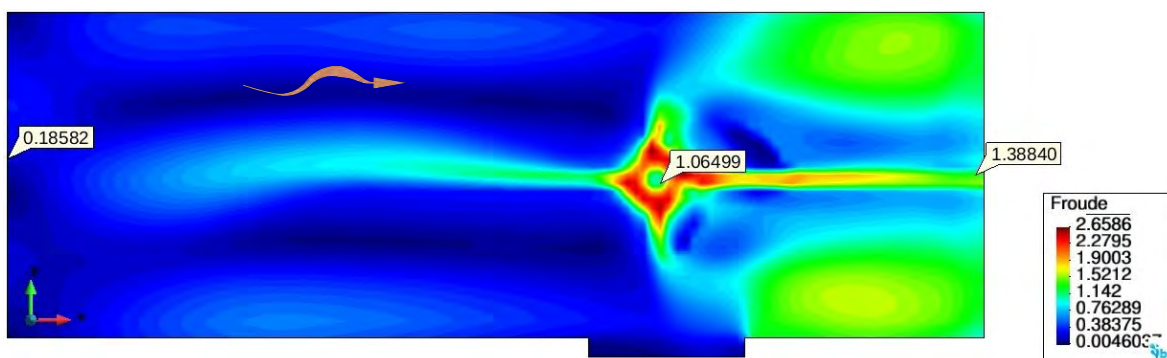


Figura 4-139 Comportamiento del Número de Froude de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.

El caudal específico registrado en la salida del canal es equivalente al caudal enviado por la surgencia, que es de 5.75 l/s, un dato obtenido a partir del modelo físico. Este caudal se utiliza como entrada para el modelo de simulación en IBER, representando así la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa. Los resultados del caudal específico se presentan en la Figura 4-140, mostrando las variaciones de acuerdo con la escala de colores.

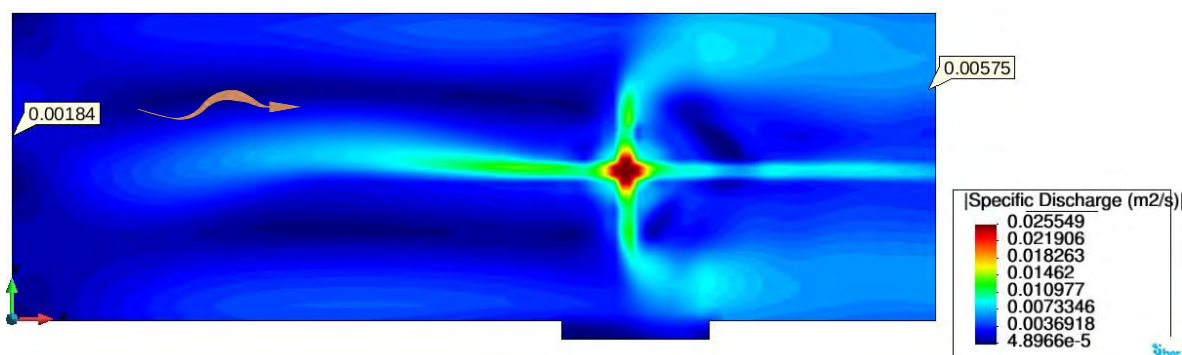


Figura 4-140 Mapa del caudal específico con descarga libre en el brocal sin tapa.

En la Figura 4-141 se presenta el comportamiento del caudal específico a lo largo del tiempo de simulación, situándose en el rango de 0.00575 a 0.0064 m²/s. Las variaciones observadas se atribuyen al fenómeno en el cual el agua que se acumula aguas arriba del canal, finalmente

Resultados

retorna por gravedad y se suma al caudal enviado de manera constante por la surgencia a través del brocal sin tapa.

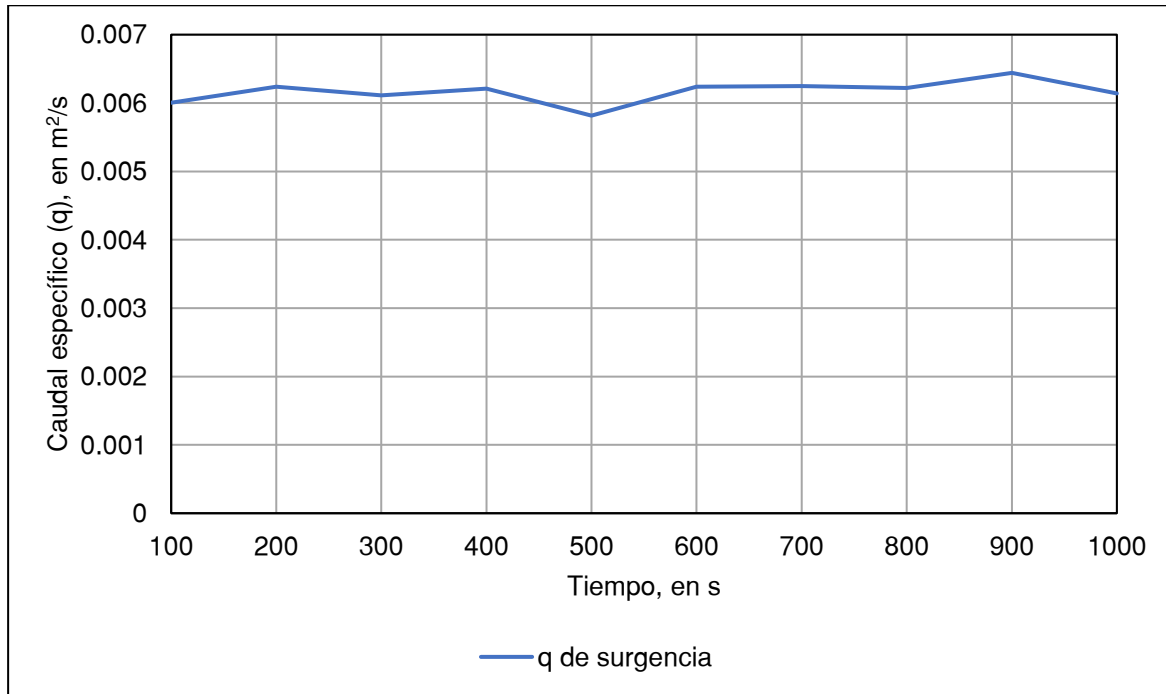


Figura 4-141 Caudal específico de surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.

El agua que se descarga del brocal sin tapa presenta una velocidad de 0.95 m/s, y esta velocidad disminuye a 0.5 m/s a la salida del canal. El comportamiento de las velocidades se interpreta según la escala de colores que se muestra en la Figura 4-142, confirmando que el agua que fluye a contrapendiente y llega hasta la entrada del canal alcanza una velocidad de 0.095 m/s.

4.2.4.2 Simulación de la descarga de la tapa de concreto en surgencia libre.

En la simulación de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto, se consideraron las condiciones detalladas en la Tabla 4-25 para garantizar la representación precisa de este escenario en el modelo numérico IBER. Asimismo, se empleó un tamaño de malla de 0.025 y

se estableció un tiempo máximo de simulación de 1000 segundos (equivalente a 16.6 minutos), con intervalos de resultados registrados cada 100 segundos (o 1.6 minutos).

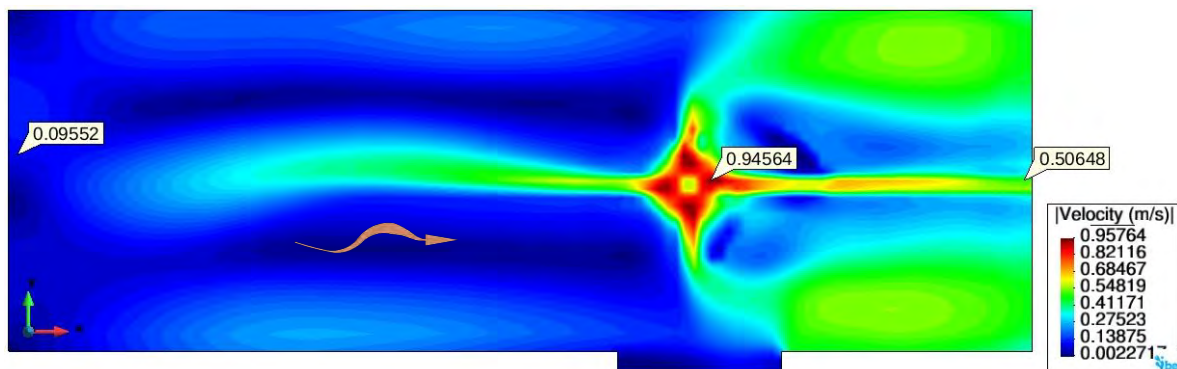


Figura 4-142 Mapa de velocidad del de la surgencia con descarga libre del brocal sin tapa.

Tabla 4-24 Condiciones para la simulación de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.

Hidrodinámica				Rugosidad	
Condiciones de contorno		Condiciones iniciales	Fuente		n = 0.011 (concreto pulido)
Entrada 2D		Calado = 0.0 m	Tiempo (s)	Q (m³/s)	
Entrada: Caudal total			0	0.0014	
Régimen: crítico/subcrítico					
Caudal total					
Tiempo (s)	Q (m³/s)				
0.0	0.0				
Salida 2D					
Condición de flujo: Supercrítico/crítico					

El tirante o calado, se mantiene constante en todo el canal con una altura de 1 cm, variando únicamente en la fuente generada por la surgencia, donde alcanza una altura de 2.6 cm. Además, se observa que el agua que fluye a contrapendiente, en dirección aguas arriba, no logra llegar

Resultados

hasta la entrada, manteniendo esa parte del canal en un estado seco, como se aprecia en la Figura 4-143.

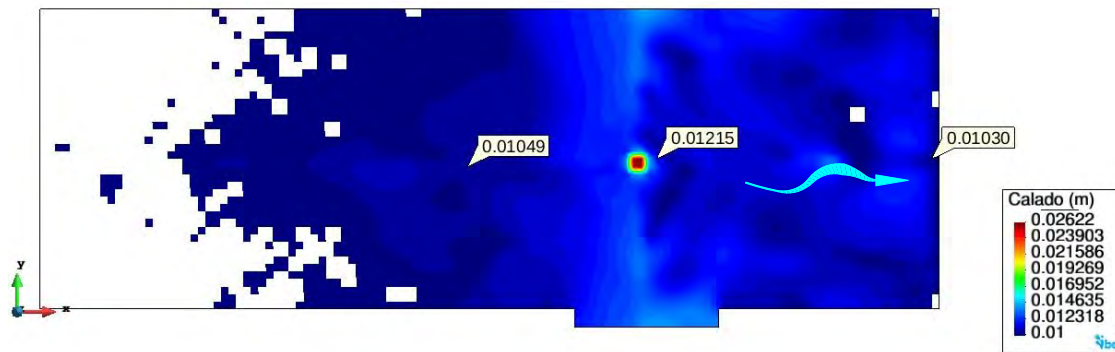


Figura 4-143 Comportamiento del tirante en la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.

En la Figura 4-144, se presentan los valores de las cotas del agua en todo el canal. Es importante destacar que la cota cero se estableció en la salida del canal. Tanto el tirante (calado) como la cota del agua en la salida tienen el mismo valor de 1.03 cm. Los valores de las cotas de agua en la zona donde se ubica el brocal con la tapa de concreto y aguas arriba del brocal con la tapa de concreto toman en cuenta el desnivel del canal, correspondiente a su pendiente longitudinal.

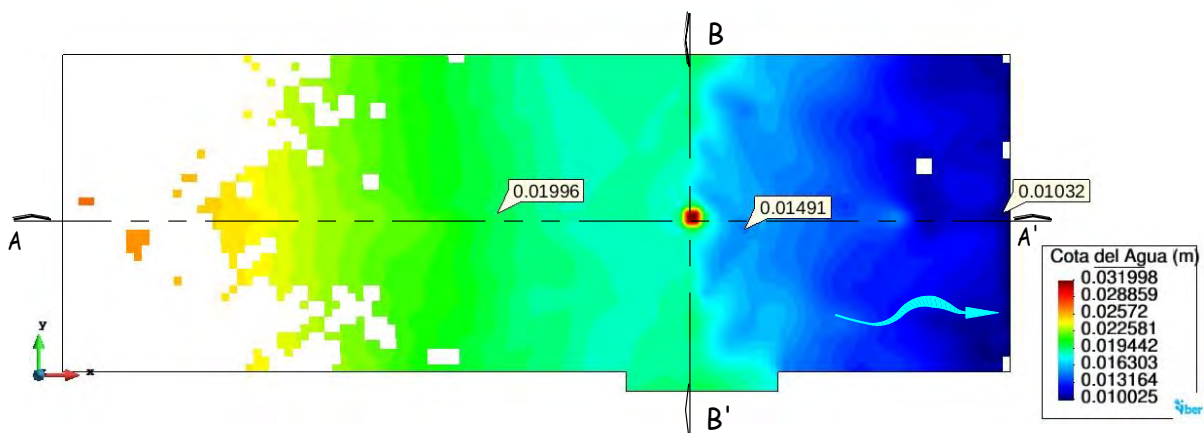


Figura 4-144 Mapa de la cota del agua en la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.

Los perfiles de flujo desempeñan un papel fundamental en la comprensión del fenómeno de surgencia. La Figura 4-145 representa el perfil de flujo longitudinal para un caudal de 1.4 l/s. Este perfil se obtuvo a lo largo del corte A-A', el cual está indicado en planta en la Figura 4-144. El perfil de flujo refleja el comportamiento del agua, donde se observa una discontinuidad en la distancia de 0 a 0.5 m. En este tramo, no se forma un perfil de flujo debido a que el agua que retorna solo llega hasta ese punto, es decir, no alcanza la entrada, la cual está ubicada aguas arriba en el modelo de simulación.

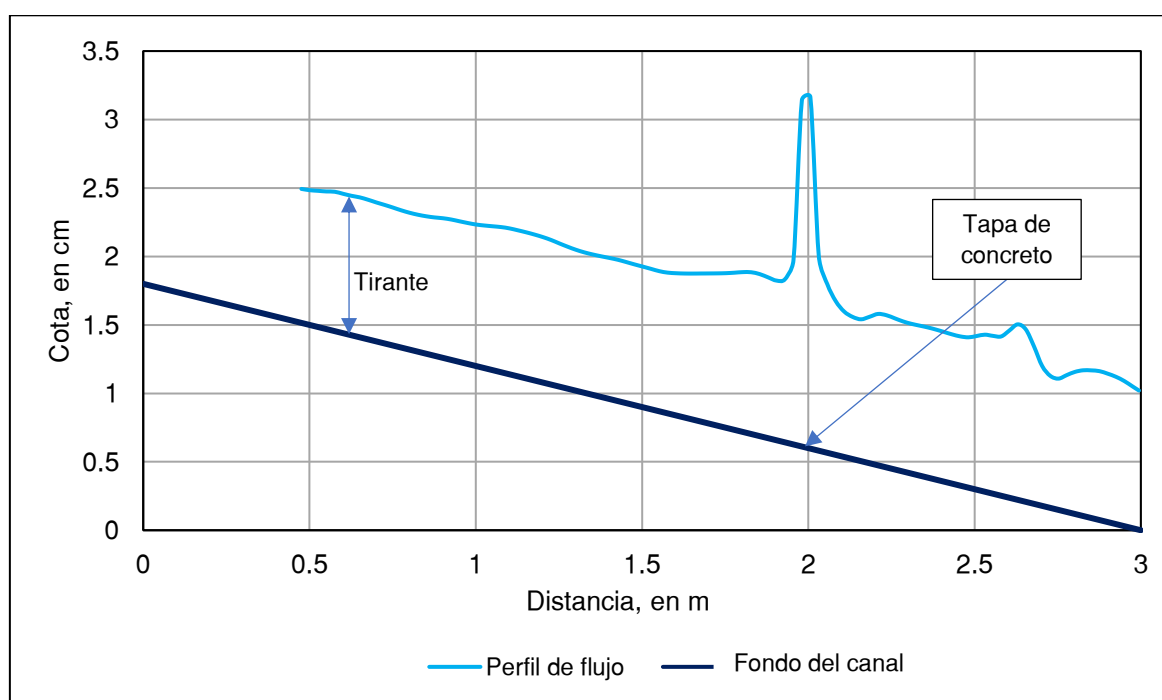


Figura 4-145 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.

En la Figura 4-146 se presenta el perfil de flujo para un caudal de 1.4 l/s, según el corte transversal B-B' indicado en la Figura 4-144. El perfil de flujo en sentido transversal revela que los tirantes en las márgenes del canal tienen un valor de 1.9 cm, mientras que la fuente alcanza una altura superior a 3 cm.

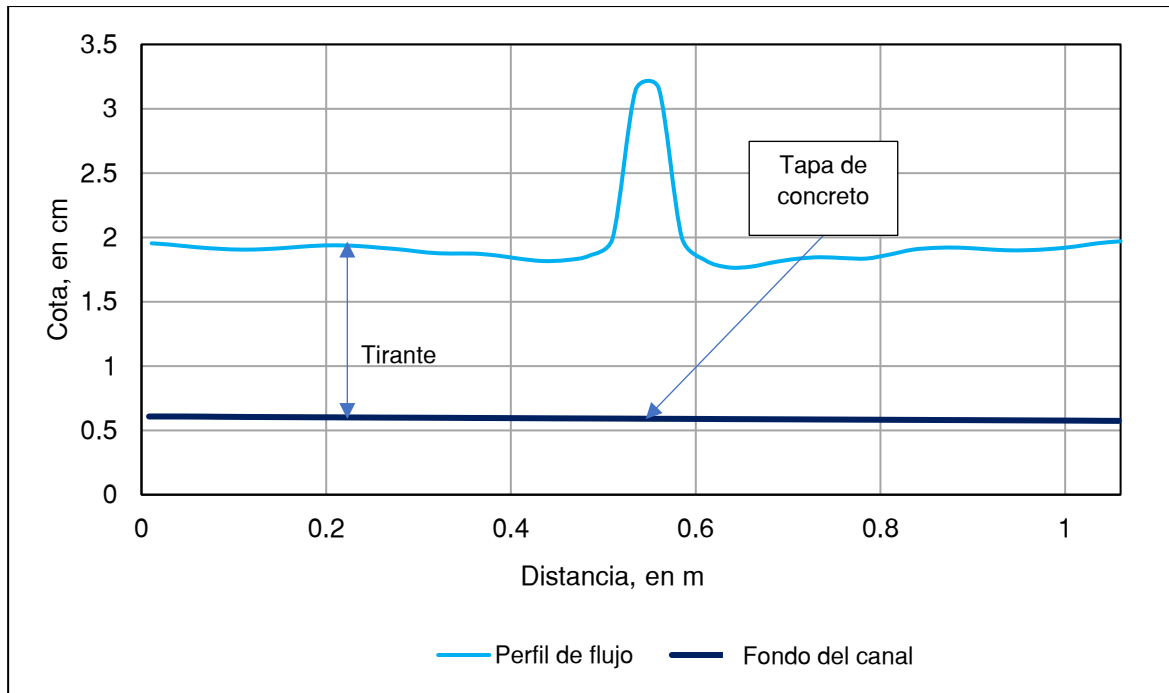


Figura 4-146 Perfil de flujo transversal (corte B-B') de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.

El número de Froude proporciona información sobre el régimen de flujo que prevalece en la simulación. En este caso, se observa que en el canal predomina el régimen de flujo subcrítico, mientras que, únicamente en la salida del flujo (surgencia) se presenta el régimen supercrítico. Esta transición se debe a la turbulencia generada en la salida del flujo, como se observa en la Figura 4-147.

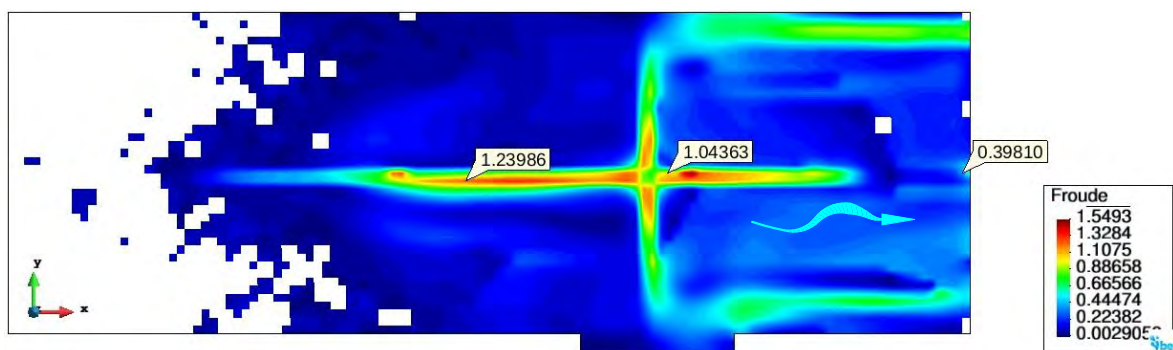


Figura 4-147 Comportamiento del Número de Froude de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto

El caudal específico que se registra en la salida del canal, como se muestra en la Figura 4-148, es equivalente al caudal enviado por surgencia, que es de 1.4 l/s. Este dato fue obtenido en los experimentos con el modelo físico y se utiliza como entrada para el modelo de simulación en IBER, representando así el escenario 4 de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.

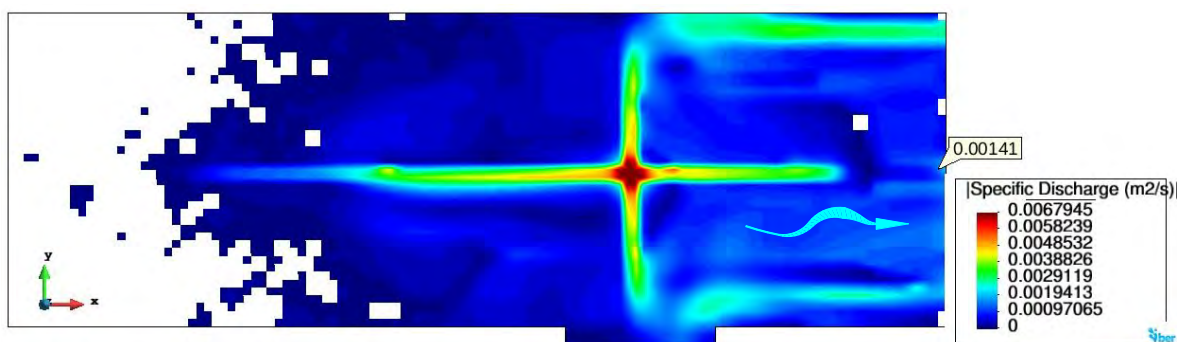


Figura 4-148 Caudal específico de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.

En este escenario, el comportamiento del caudal específico se presenta de forma inestable, como se ilustra en la Figura 4-149. Esta inestabilidad se atribuye al área hidráulica limitada que proporciona la tapa de concreto, siendo esta la de menor área disponible en comparación con el brocal sin tapa y la rejilla de fierro fundido.

La simulación ha sido fundamental para comprender el comportamiento de la velocidad en la zona del brocal con la tapa de concreto, ya que esta información no se puede medir en todos los puntos en el modelo físico. Los resultados se presentan de manera detallada en la Figura 4-150, donde se especifica puntualmente que la velocidad en la salida del canal es de 0.12 m/s, y en la ubicación de la tapa de concreto, donde se origina la surgencia, la velocidad alcanza los 0.33 m/s.

4.2.4.3 Simulación de la descarga de la rejilla de fierro fundido en surgencia libre.

En la simulación de este escenario en el modelo numérico IBER, ahora se incorpora la rejilla de fierro fundido. Se han considerado las condiciones detalladas en la Tabla 4-25, así como un

Resultados

tamaño de malla de 0.025 y un tiempo máximo de simulación de 1000 segundos (equivalente a 16.6 minutos), con intervalos de resultados registrados cada 100 segundos (o 1.6 minutos).

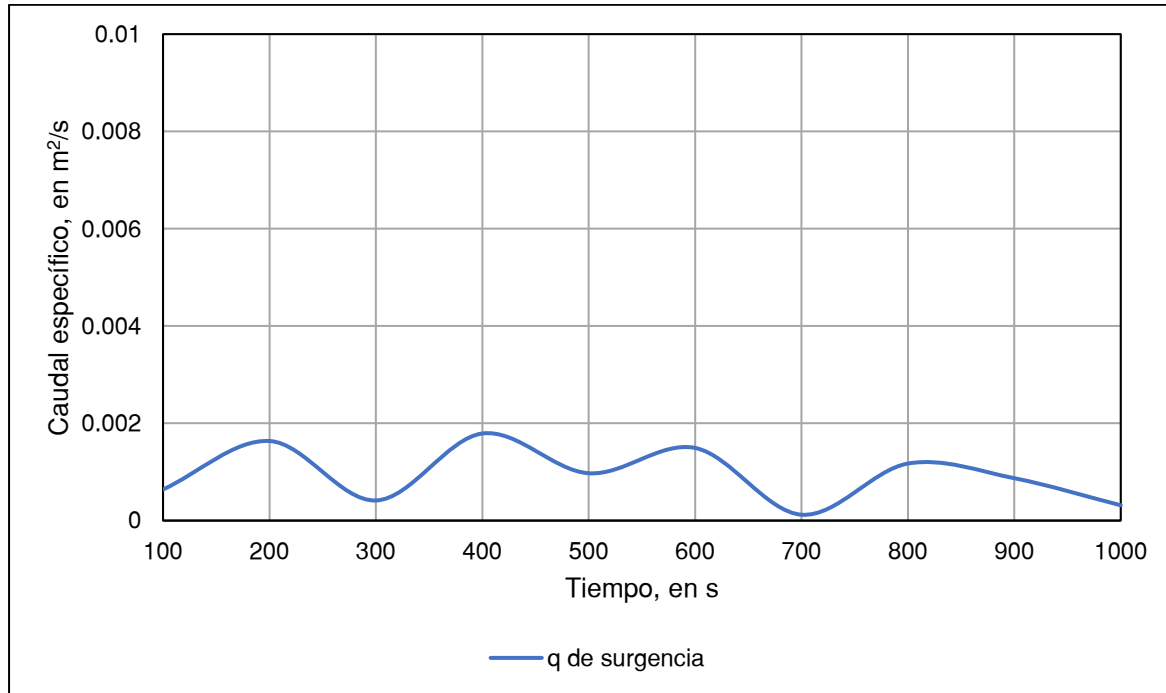


Figura 4-149 Caudal específico de surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.

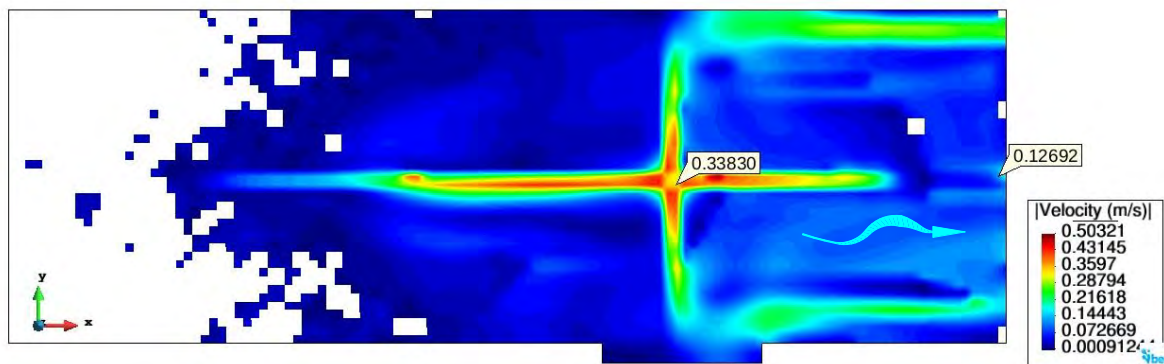


Figura 4-150 Mapa de velocidad de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto.

Tabla 4-25 Condiciones para la simulación de surgencia con descarga libre de la rejilla de hierro fundido.

Hidrodinámica				Rugosidad	
Condiciones de contorno		Condiciones iniciales	Fuente		n = 0.011 (concreto pulido)
Entrada 2D		Calado = 0.0 m	Tiempo (s)	Q (m³/s)	
Entrada: Caudal total			0	0.0037	
Régimen: crítico/subcrítico					
Caudal total					
Tiempo (s)	Q (m³/s)				
0.0	0.0				
Salida 2D					
Condición de flujo: Supercrítico/crítico					

El tirante (calado, según la terminología de IBER) que se observa a la entrada del modelo es de 1.18 cm, mientras que en la salida del modelo se registra un tirante de 1.05 cm. En la ubicación del brocal con la rejilla de hierro fundido, se genera una fuente que alcanza una altura de 4.6 cm, como se muestra en la Figura 4-151.

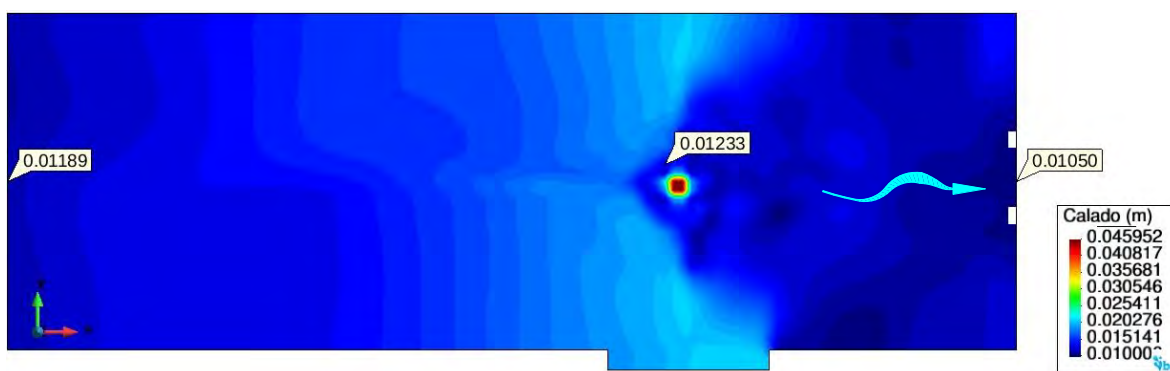


Figura 4-151 Mapa del Calado (tirante) de la surgencia con descarga libre de la rejilla de hierro fundido

Resultados

La cota del agua en el canal, según los resultados de la simulación, se presenta en el mapa de la Figura 4-152, el cual está acompañado de su respectiva escala de colores. A la salida del canal, la cota es de 1.05 cm, mientras que en el perímetro del brocal donde se instaló la rejilla de hierro fundido, se presenta una cota de 1.8 cm. En la fuente generada por la surgencia, la cota alcanza una altura de 5.18 cm.

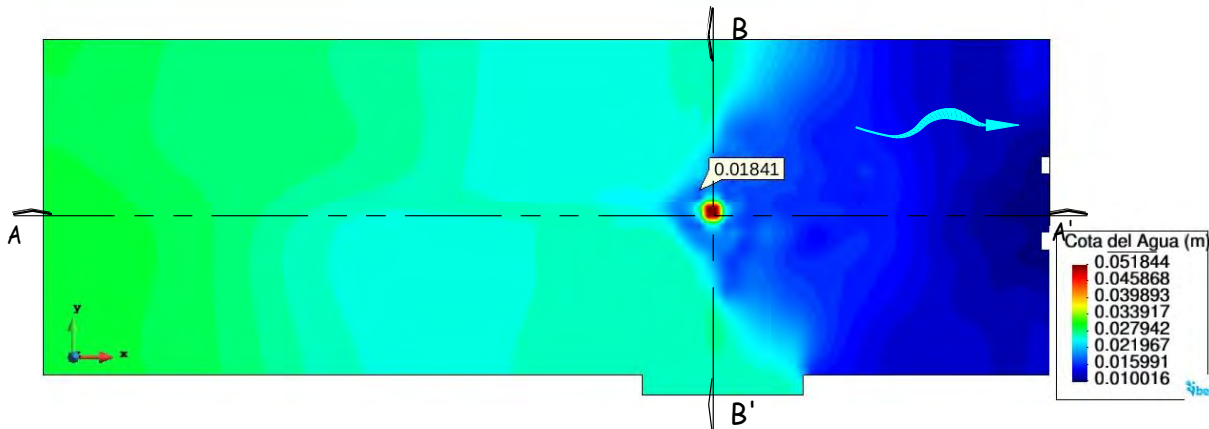


Figura 4-152 Comportamiento de la Cota del agua para la surgencia con descarga libre de la rejilla de hierro fundido.

El perfil de flujo longitudinal, obtenido para un caudal de 5.43 l/s según el corte A-A', refleja el comportamiento del agua a lo largo del canal. Este perfil complementa la Figura 4-152, que ilustra el comportamiento de las cotas de agua. En el perfil de flujo, se destaca de manera más precisa la fuente generada por la surgencia con descarga libre. Esta fuente alcanza una altura de 5.18 cm, como se muestra en la Figura 4-153.

Una perspectiva adicional de la fuente generada por la surgencia se presenta a través del perfil de flujo transversal, conforme al corte B-B' indicado en la Figura 4-152. En este perfil, se observa el comportamiento del tirante, el cual alcanza los 2 cm en las márgenes del canal. Destaca que la fuente originada por la surgencia alcanza una altura de 5.18 cm, tal como se muestra en la Figura 4-155.

Si bien el régimen subcrítico predomina en todo el canal, es importante señalar que en la zona de la surgencia y en las proximidades de las márgenes del canal, aguas abajo de la ubicación de

la rejilla de hierro fundido (como se ilustra en la Figura 4-155), se presenta un régimen supercrítico.

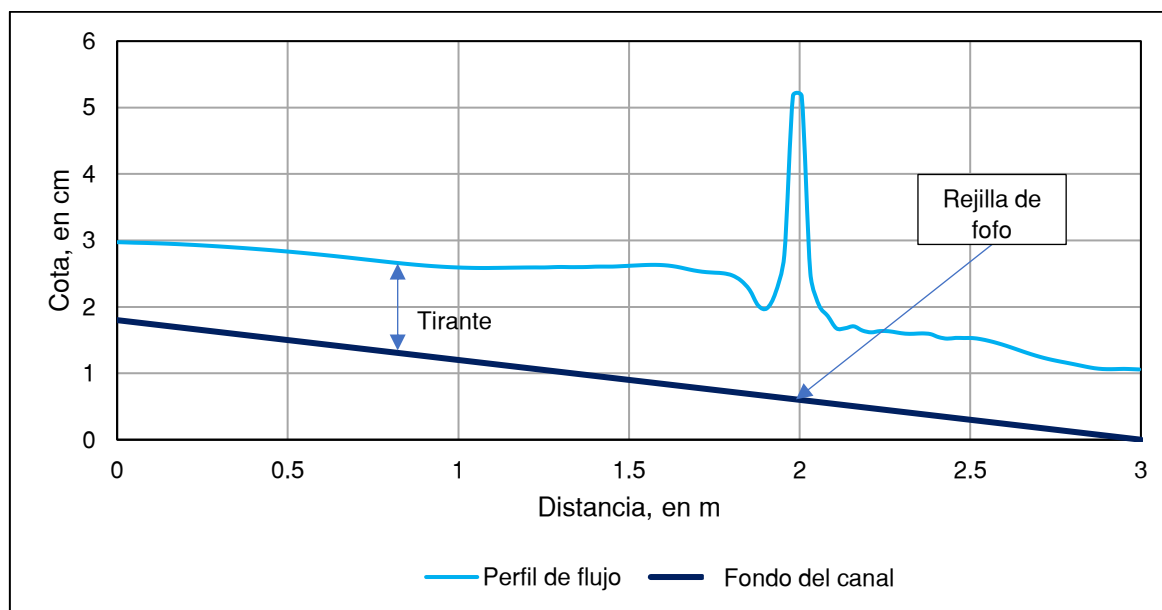


Figura 4-153 Perfil de flujo longitudinal (corte A-A') para un caudal de 5.43 l/s, de la surgencia con descarga libre de la rejilla de hierro fundido.

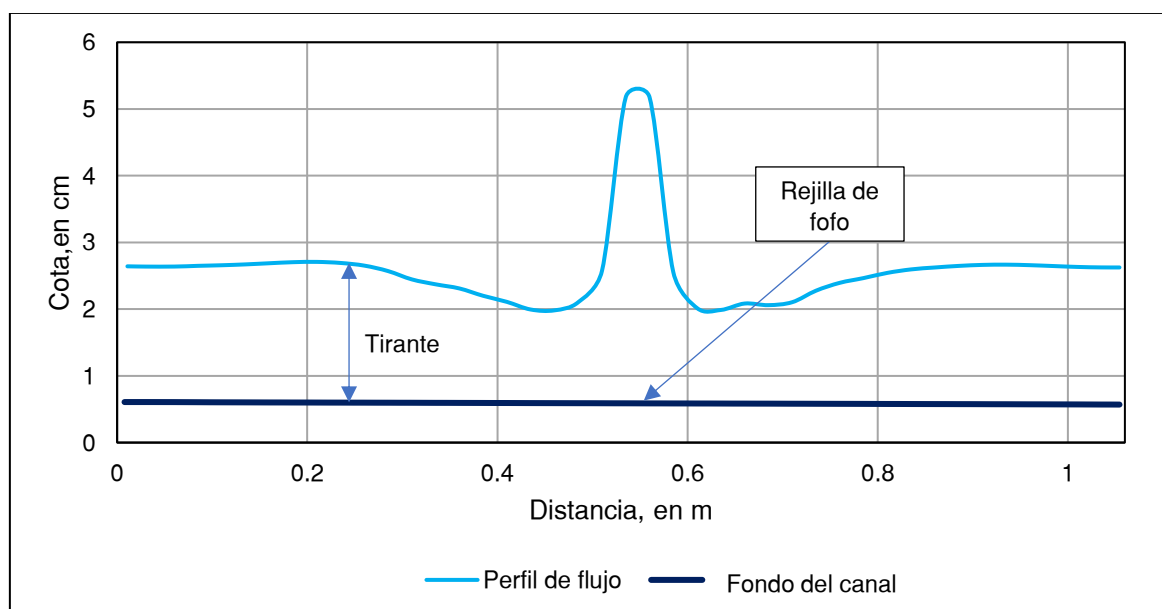


Figura 4-154 Perfil de flujo transversal (corte B-B') para un caudal de 5.43 l/s, de la surgencia con descarga libre de la rejilla de hierro fundido.

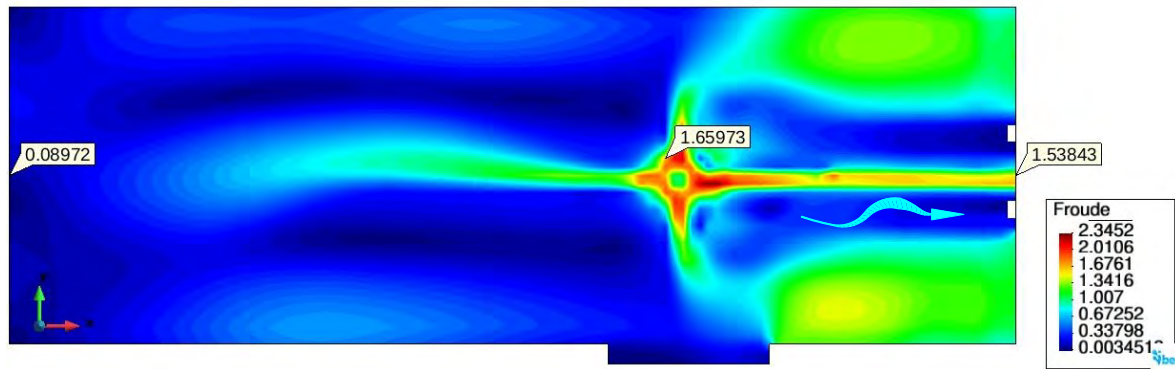


Figura 4-155 Comportamiento del número de Froude de la surgencia con descarga libre en la rejilla de hierro fundido

El caudal específico, derivado de la simulación de este escenario particular asociado a la surgencia con descarga libre desde la rejilla de fierro fundido, se presenta visualmente a través del mapa de colores. Cabe destacar que el caudal ingresado al canal debido a la surgencia es de 5.43 l/s, como se muestra en la Figura 4-156.

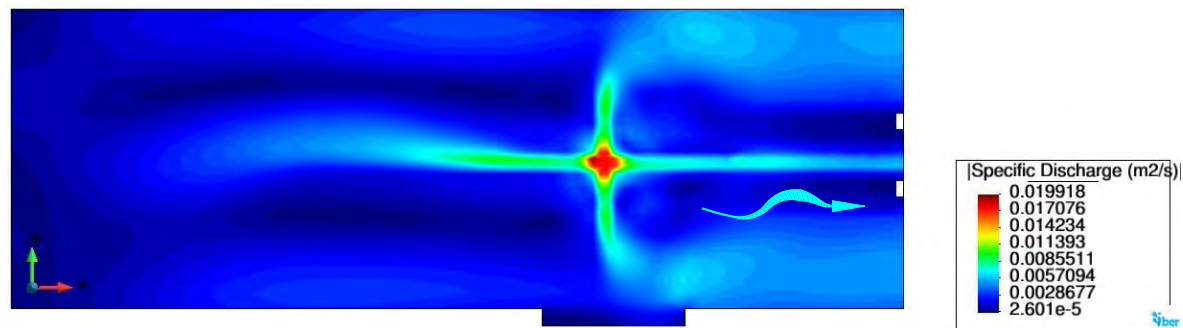


Figura 4-156 Caudal específico de la surgencia con descarga libre de la rejilla de hierro fundido.

El comportamiento del caudal unitario se mantiene estable a lo largo de la simulación, como se ilustra en la Figura 4-157. Las variaciones iniciales se deben a que, en primer lugar, el agua inunda todo el canal y luego regresa hacia la salida.

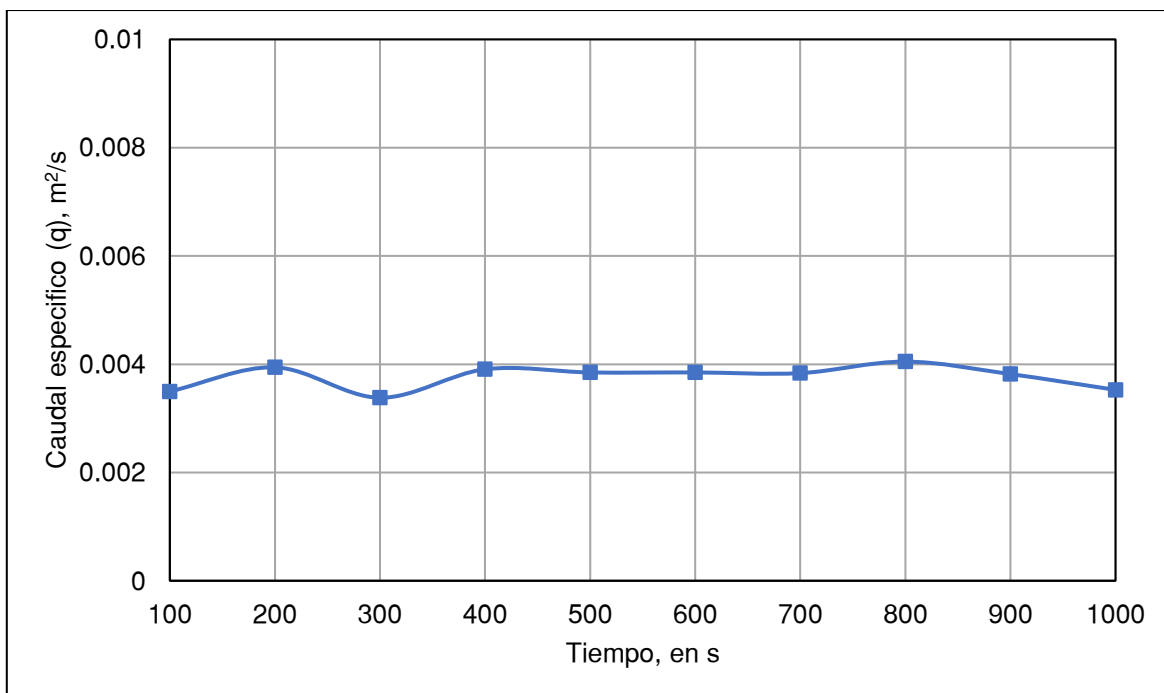


Figura 4-157 Caudal específico de surgencia con descarga libre en la rejilla de hierro fundido.

El comportamiento de las velocidades es consistente en los tres escenarios: brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de hierro fundido. La velocidad máxima, bajo esta condición de surgencia es de 0.8 m/s, se observa en la ubicación del brocal con la rejilla de hierro fundido, mientras que en las márgenes se presenta una velocidad de 0.35 m/s, como se representa en la Figura 4-158.

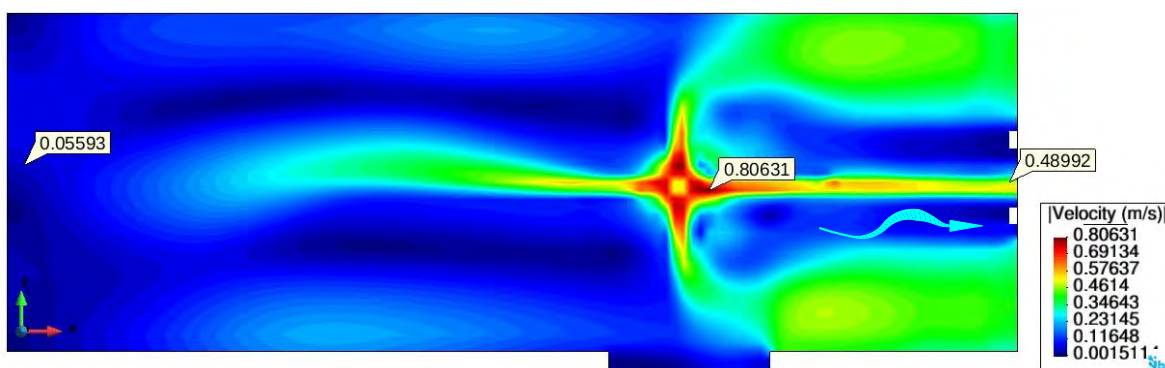


Figura 4-158 Mapa de velocidad de la surgencia con descarga libre de la rejilla de hierro fundido.

4.2.5 Resultados de la simulación del prototipo en IBER

Para comprobar lo simulado en el modelo, se realizaron las simulaciones para el prototipo, con los máximos caudales que se trabajó en el modelo físico 20 l/s, caudal escalado son $1.77 \text{ m}^3/\text{s}$, solo se trabajó con el escenario 1 y 4 con el brocal sin tapa y la tapa de concreto, respectivamente. Para las simulaciones se tomaron en cuenta los datos de la tabla 4-26.

Con el objetivo de verificar las simulaciones realizadas en el modelo, se llevaron a cabo también simulaciones en el software IBER, considerando las dimensiones del prototipo. Para estas simulaciones los máximos caudales empleados en el modelo físico, fueron del orden de los 20 l/s. Este caudal, escalado al prototipo, equivale a $1.77 \text{ m}^3/\text{s}$. Se focalizó exclusivamente en los escenarios 1 y 4, que involucran el brocal sin tapa y la tapa de concreto, respectivamente. Los datos utilizados para estas simulaciones se encuentran detallados en la tabla 4-26.

Tabla 4-26 Datos empleado para la simulación del prototipo en IBER

Rugosidad de Manning	$n=0.15$ (Asfalto)
Caudal	$1.77 \text{ m}^3/\text{s}$
Velocidad régimen subcrítico	1.47 m/s
Velocidad régimen supercrítico	2.25 m/s
Condición inicial	Calado (tirante) = 0.0 m

4.2.5.1 Simulación de la descarga del brocal sin tapa para sumidero libre en el prototipo.

En condiciones reales, el brocal sin tapa muestra un comportamiento conforme se ilustra en la Figura 4-159, con un tirante de 15.88 cm en la zona cercana al brocal. Este valor concuerda con el tirante medido en el modelo físico después de escalar, el cual alcanza los 15.3 cm.

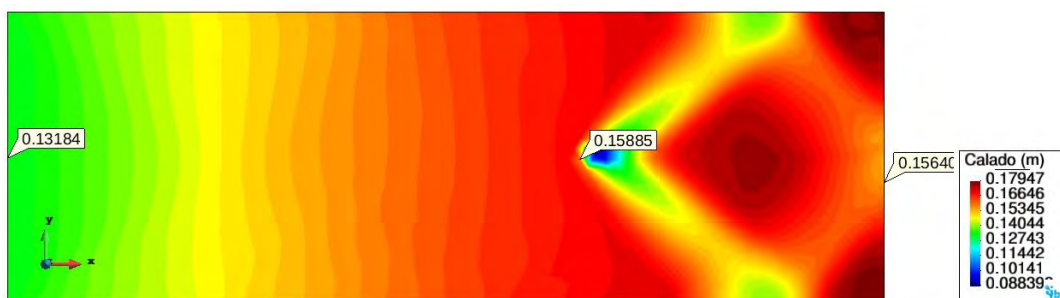


Figura 4-159 Mapa de calado (tirante) del brocal sin tapa con dimensiones del prototipo, trabajando como sumidero libre.

El número de Froude confirma que el régimen de flujo es supercrítico. No obstante, en la descarga del brocal sin tapa se observan los valores más elevados para el número de Froude, como se representa en la Figura 4-160. Este régimen de flujo coincide tanto con las observaciones realizadas en el modelo físico como con las simulaciones correspondientes en el software IBER.

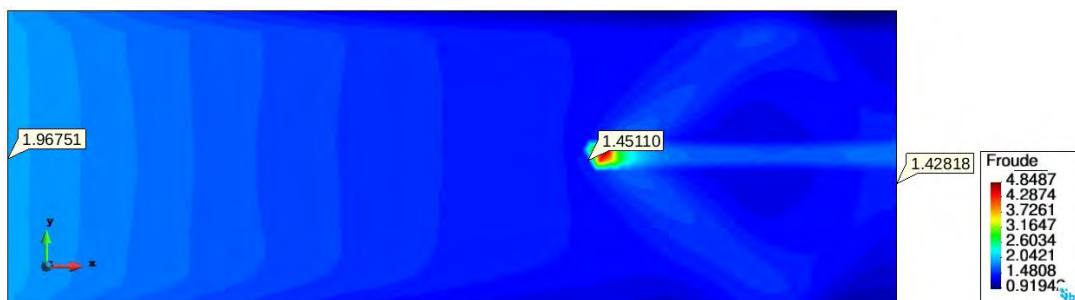


Figura 4-160 Comportamiento del número de Froude del brocal sin tapa con dimensiones del prototipo, trabajando como sumidero libre.

En relación con el caudal específico, se debe multiplicar por el ancho de la calle, que en este caso es de 6 metros, dando como resultado $(0.029001 \text{ m}^2/\text{s}) * (6 \text{ m}) = 1.74 \text{ m}^3/\text{s}$. Es relevante señalar que estos caudales coinciden con los datos obtenidos durante la campaña de experimentación, escalados a prototipo, que ascienden a $1.77 \text{ m}^3/\text{s}$, como se muestra en la Figura 4-161.

Resultados

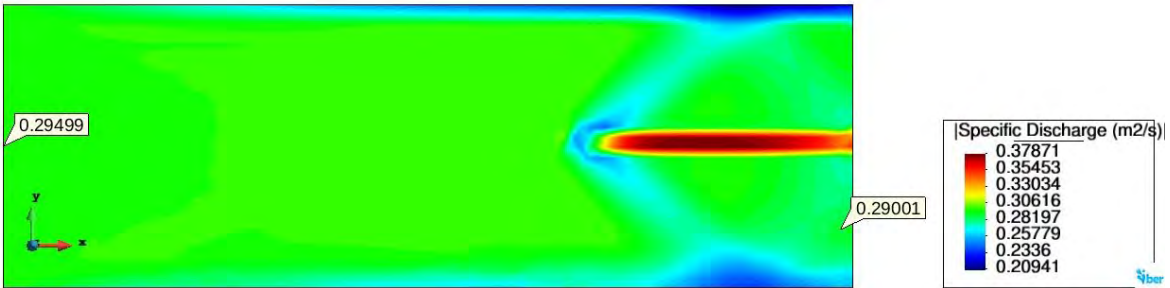


Figura 4-161 Mapa del caudal específico del brocal sin tapa con dimensiones del prototipo, trabajando como sumidero libre.

Para el caudal modelado ($Q_c = 1.77 \text{ m}^3/\text{s}$), también se ha obtenido el perfil de flujo, como se muestra en la Figura 4-162. En la zona del brocal sin tapa, se observa un tirante de 13.0 cm, mientras que el tirante escalado a partir de los datos experimentales es de 12.7 cm, dando lugar a una diferencia de 3 mm.

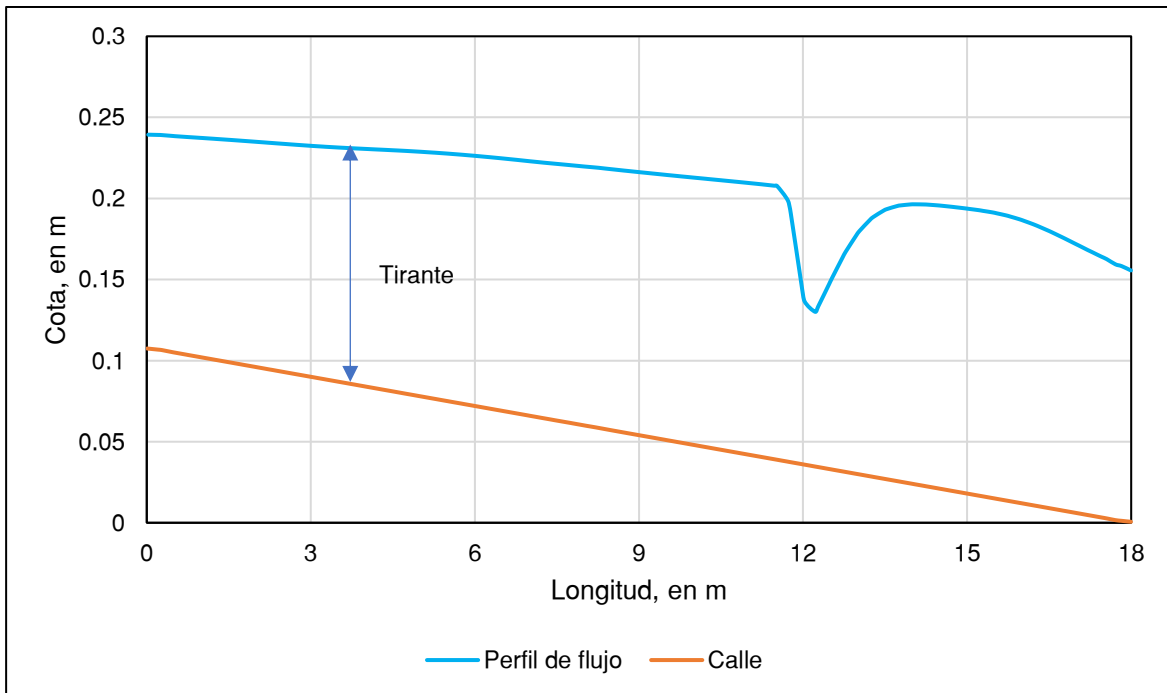


Figura 4-162 Perfil de flujo para un caudal de $1.77 \text{ m}^3/\text{s}$ del brocal sin tapa con dimensiones del prototipo, trabajando como sumidero libre.

En la Figura 4-163 se muestran los caudales unitarios de ingreso ($0.29 \text{ m}^2/\text{s}$) y salida ($0.23 \text{ m}^2/\text{s}$) del tramo de calle que fue modelado. La diferencia entre estos caudales representa la cantidad captada por el brocal sin tapa.

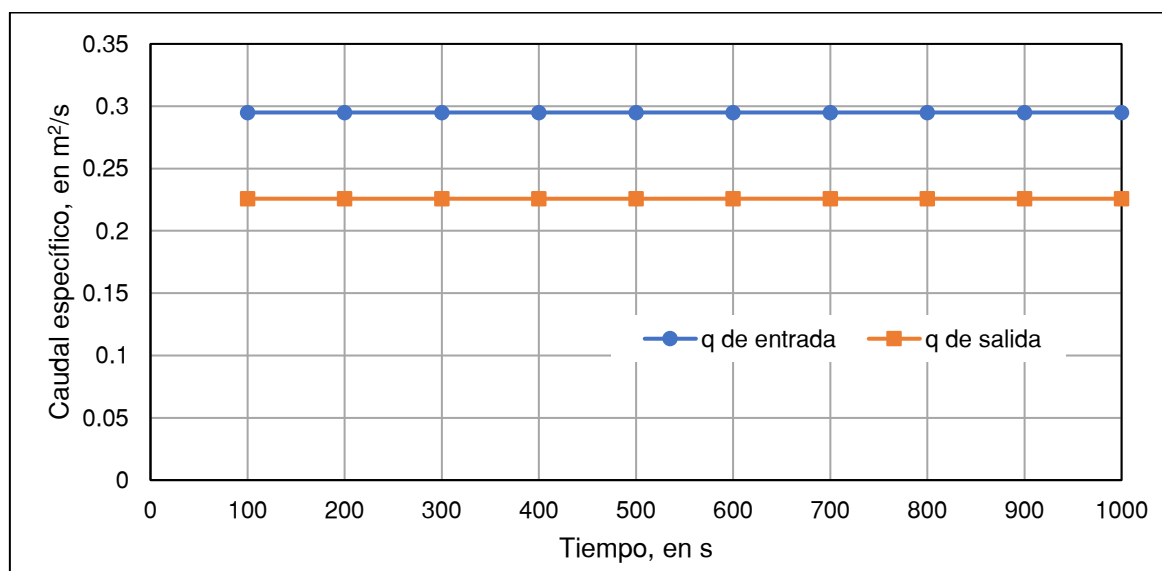


Figura 4-163 Caudal específico de entrada y salida en la calle con dimensiones del prototipo.

La velocidad registrada es de 2.23 m/s , la cual concuerda con la velocidad medida durante los experimentos. Una vez escalada, esta velocidad alcanza los 2.25 m/s , mostrando una diferencia de apenas 0.02 m/s , como se aprecia en la Figura 4-164.

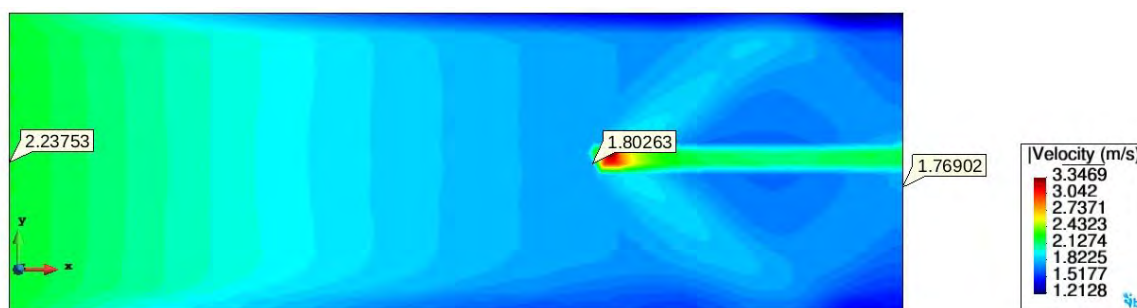


Figura 4-164 Mapa de velocidad el brocal sin tapa con dimensiones del prototipo, trabajando como sumidero libre.

4.2.5.2 Simulación de la descarga de la tapa de concreto en Surgencia libre en el prototipo.

Para el escenario de la surgencia con la tapa de concreto, se presentan los tirantes en la Figura 4-165. Se observa que el agua recircula hacia aguas arriba y luego regresa hacia la salida por gravedad. En este caso, la tapa de concreto descarga un caudal de surgencia de $0.123 \text{ m}^3/\text{s}$, resultando en un tirante en el perímetro del brocal de 0.078 m . Este valor coincide con el tirante medido experimentalmente, y una vez escalado, se obtiene un tirante de 0.078 m , igual al obtenido en IBER.

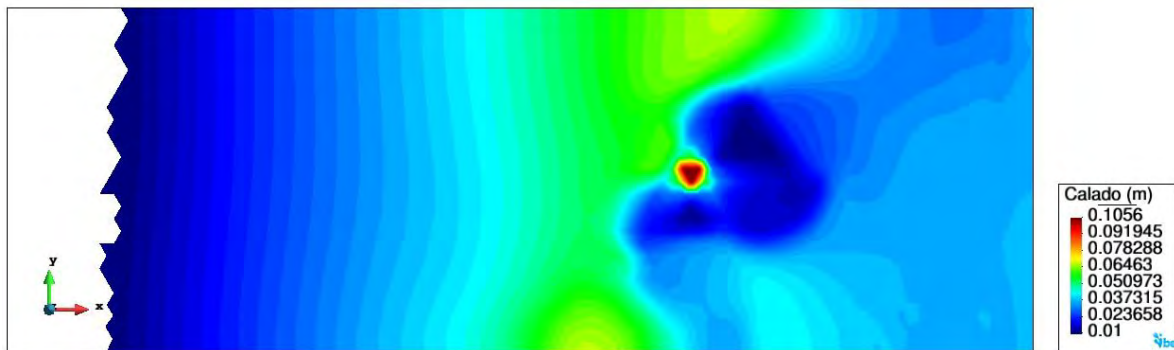


Figura 4-165 Mapa de calado (tirante) de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.

En esta condición de surgencia, se determinó que el número de Froude, antes de llegar a la parte seca, indica un régimen subcrítico (lento). Sin embargo, justo en la zona de la surgencia donde se encuentra la tapa de concreto, se evidencia un cambio hacia un régimen supercrítico, como se muestra en la Figura 4-166.

Asimismo, en relación con el caudal específico (Figura 4-167), los resultados del caudal de surgencia deben multiplicarse por el ancho de la calle, obteniéndose un valor de $(0.02084 \text{ m}^2/\text{s}) * (6 \text{ m}) = 0.125 \text{ m}^3/\text{s}$. Al comparar este valor con el obtenido experimentalmente para el mismo escenario, un caudal igual a $0.123 \text{ m}^3/\text{s}$ una vez escalado, se observa una diferencia de $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$.

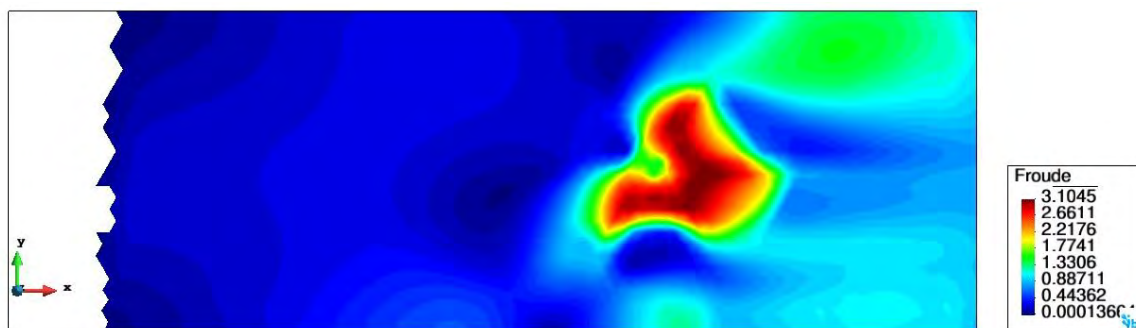


Figura 4-166 Comportamiento del número de Froude de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.

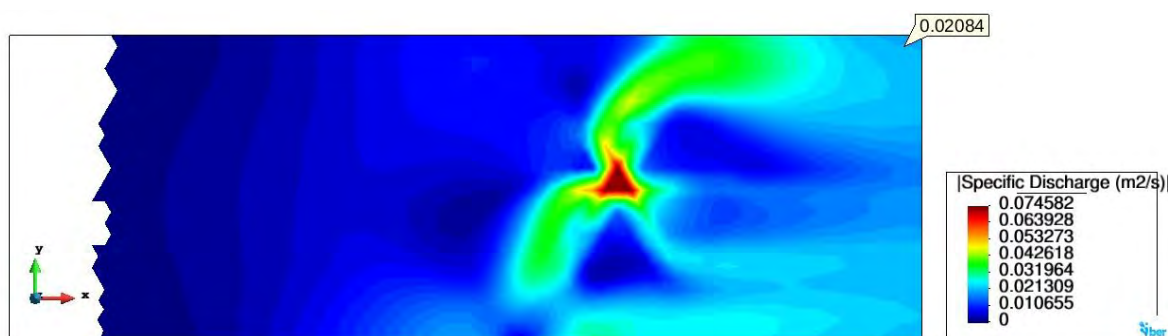


Figura 4-167 Mapa de caudal específico de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.

En relación con el perfil de flujo para un caudal de $0.123 \text{ m}^3/\text{s}$, se observa un comportamiento similar al de la simulación equivalente en el modelo físico y también en IBER (modelo a escala), así como en los datos experimentales para el mismo escenario (Figura 4-168). Al llegar a la tapa de concreto, se presenta un tirante de 6 cm, mientras que el tirante medido experimentalmente, una vez escalado, es de 7 cm. La diferencia de 1 cm se atribuye a la turbulencia que se presenta en el modelo físico al tomar las lecturas.

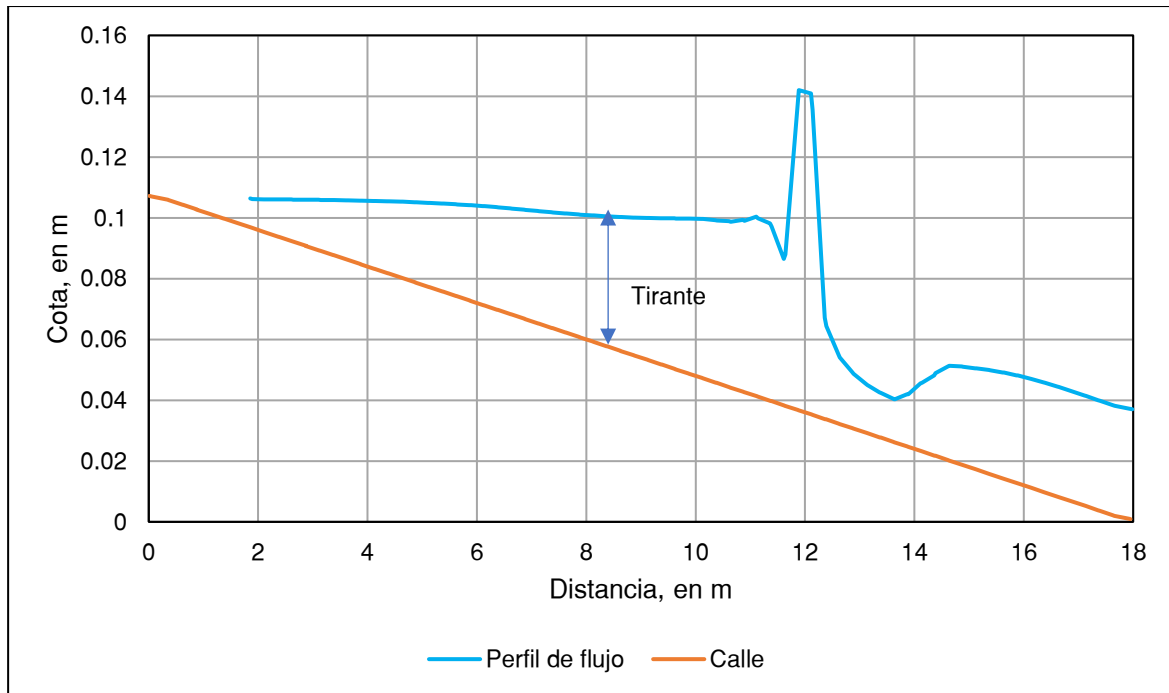


Figura 4-168 Perfil de flujo para un caudal de $0.123 \text{ m}^3/\text{s}$, de la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.

El comportamiento del caudal muestra estabilidad, con un valor de $(0.02 \text{ m}^2/\text{s}) * (6 \text{ m}) = 0.12 \text{ m}^3/\text{s}$, en las simulaciones para este escenario. Además, se puede afirmar que el caudal que entra es igual al que sale, tanto por la ley de continuidad como por ser una surgencia libre, como se ilustra en la Figura 4-169.

La velocidad en condiciones reales o del prototipo, con un valor de 1.48 m/s , concuerda con la velocidad medida en el modelo físico una vez escalada, la cual es igual a 1.47 m/s , en condiciones de flujo subcrítico, como se muestra en la Figura 4-170.

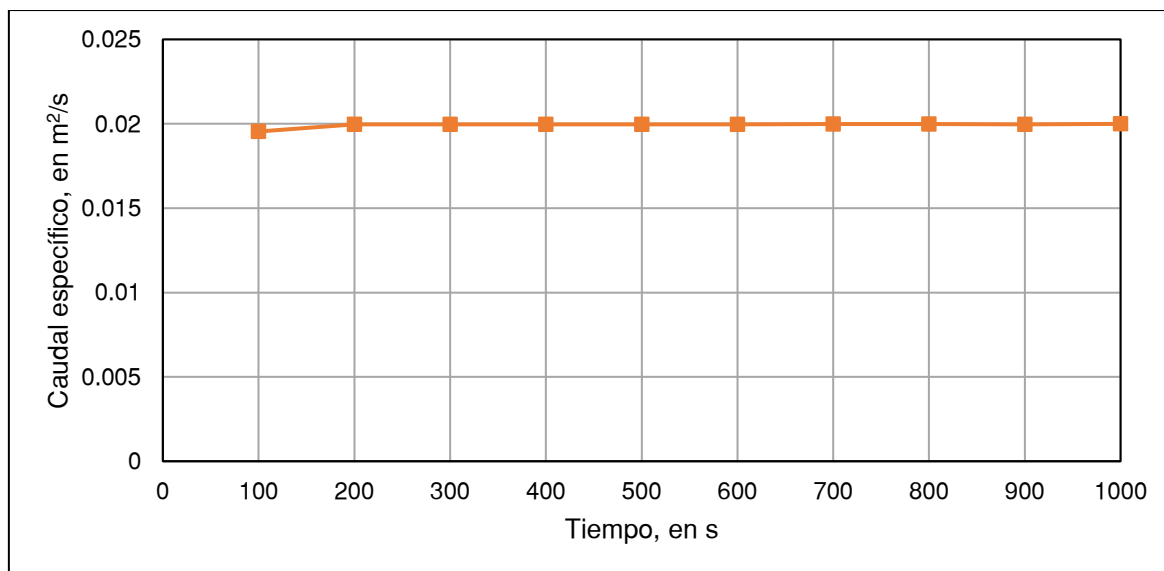


Figura 4-169 Caudal específico de surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.

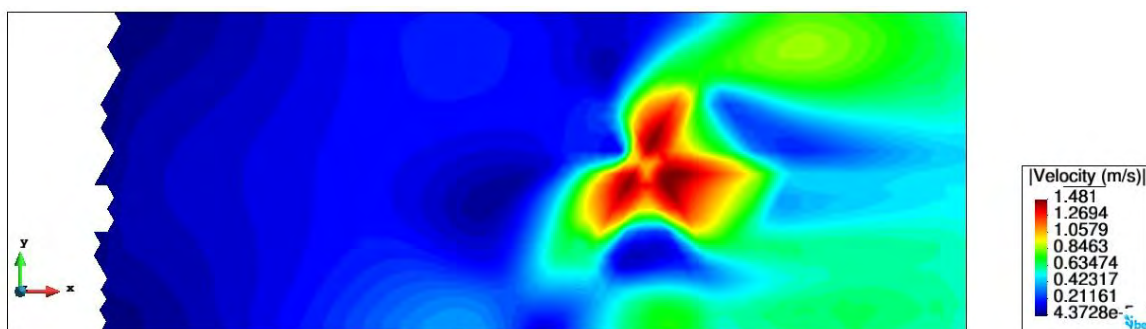


Figura 4-170 Comportamiento de la velocidad en la surgencia con descarga libre de la tapa de concreto con dimensiones del prototipo.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Análisis de resultados obtenidos en el modelo físico

El análisis de los resultados se llevó a cabo mediante una comparativa entre los datos obtenidos en los experimentos realizados en el modelo físico. Para la modelación, se examinaron las diferencias, centrándose en el caudal captado para cada caso: brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de hierro fundido, teniendo en cuenta los cuatro escenarios.

5.1.1 Análisis de los resultados del escenario 1: sumidero libre en el brocal sin tapa

En la Figura 5-1 se presenta de manera comparativa los caudales captados del flujo que circula la calle. En el brocal sin tapa, se captaron 3.3 l/s de los 20 l/s que se enviaron por la calle. Siguiendo el orden de captación, la rejilla de hierro fundido captó un caudal del orden de los 1.7 l/s de los 20 l/s enviados, mientras que la tapa de concreto solo captó un caudal del orden de los 0.4 l/s de los 20 l/s que circulan por la calle.

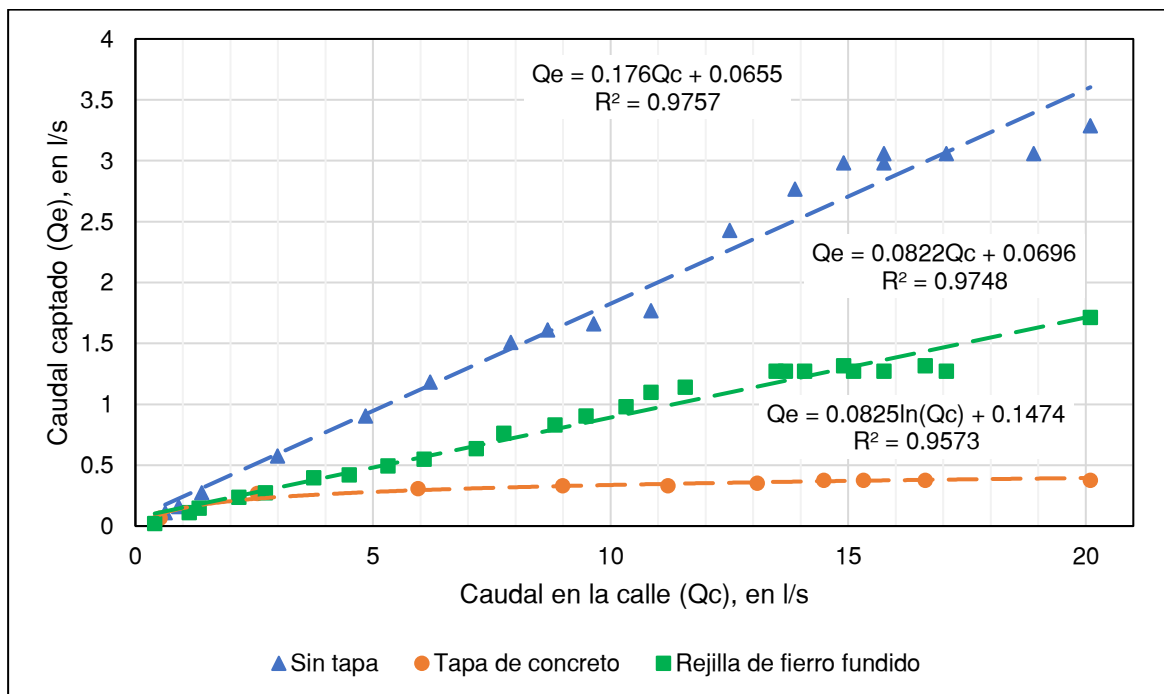


Figura 5-1 Comparativa del caudal captado por el del brocal sin tapa, la rejilla de hierro fundido y la tapa de concreto en condiciones del escenario 1.

En cuanto a las eficiencias, en el escenario 1 se obtuvieron los siguientes resultados (Figura 5-2): para el brocal sin tapa, la eficiencia fue del 18%; para la rejilla de hierro fundido, se logró una eficiencia del 9%; y para la tapa de concreto, se obtuvo una eficiencia del 2%, considerando un caudal en la calle de 20 l/s.

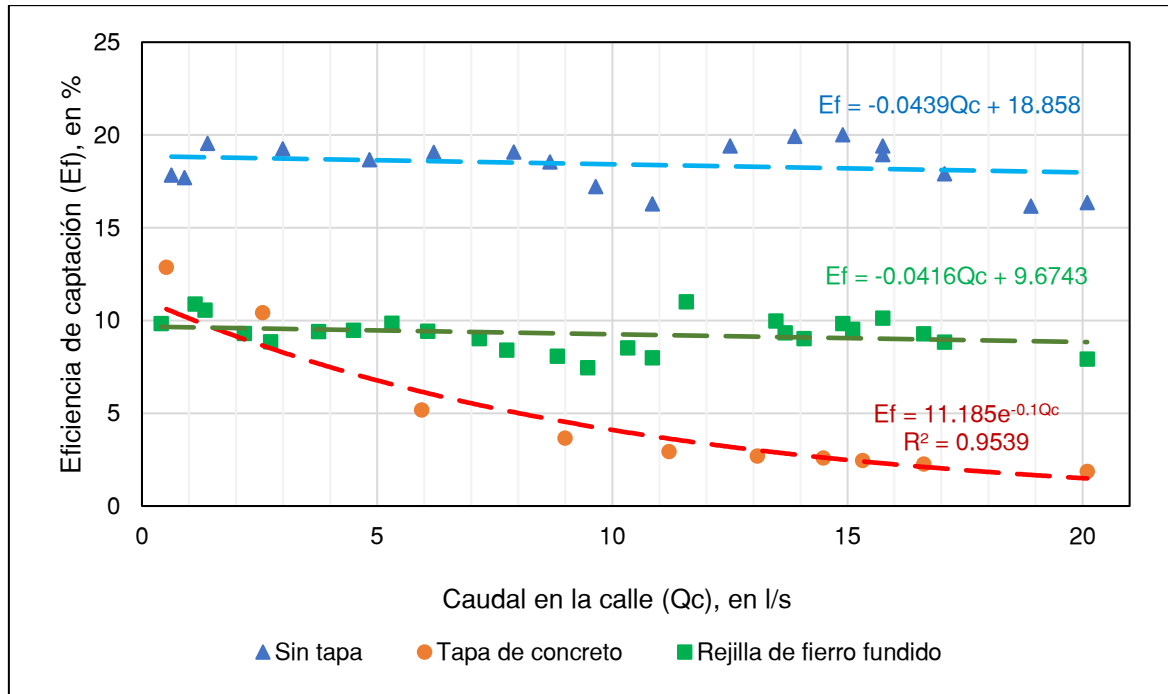


Figura 5-2 Comparativa de la eficiencia del brocal sin tapa, la rejilla de hierro fundido y la tapa de concreto en condiciones del escenario 1.

En cuanto al coeficiente de descarga, según se muestra en la Figura 5-3, se observa su comportamiento. Como se esperaba, el valor más bajo corresponde a la tapa de concreto, presentando una diferencia de más del 50% en comparación con la captación del brocal sin tapa y la rejilla de hierro fundido. Esto demuestra que la tapa no está diseñada para captar agua de lluvia circulando en una calle o en condiciones de inundación.

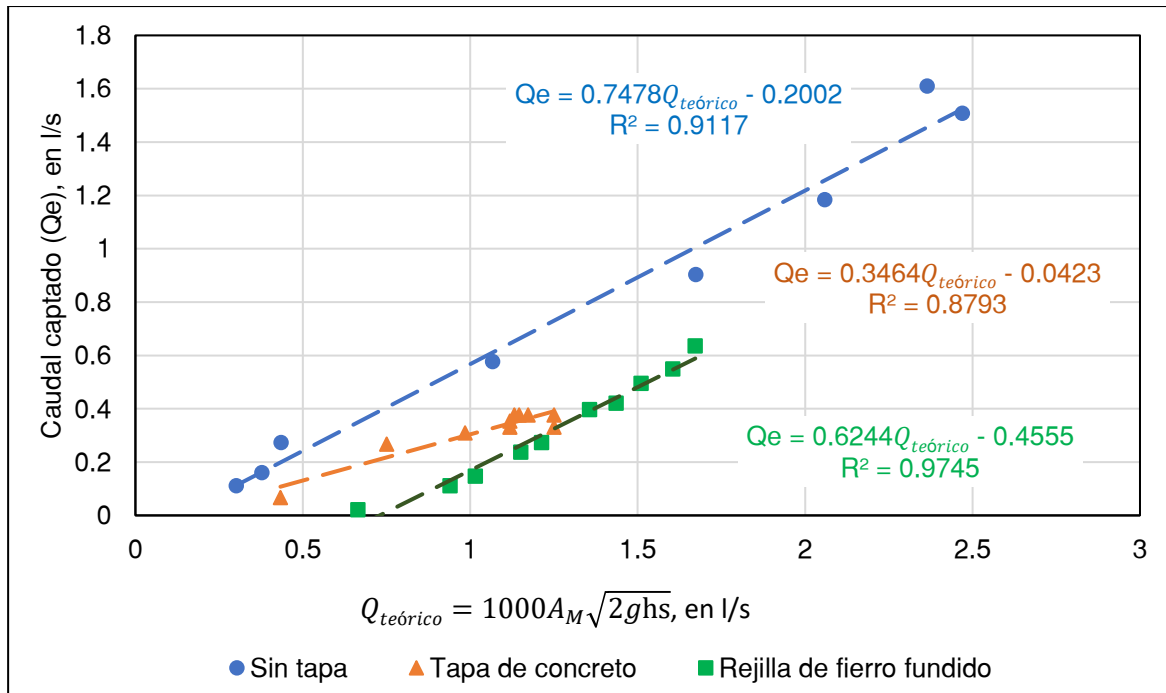


Figura 5-3 Comparativa de los coeficientes de descarga del brocal sin tapa, la rejilla de hierro fundido y la tapa de concreto en condiciones del escenario 1.

A modo de comparación, en la Tabla 5-1 se presentan las ecuaciones de las líneas de tendencia que ofrecen el mejor ajuste para obtener el coeficiente de descarga. La ecuación del caudal de intercambio (Q_e) está en función del caudal teórico ($Q_{teórico}$) y, para determinar el caudal de intercambio (de captación para este escenario), la ecuación está en función del tirante medido en la calle. Las ecuaciones se proporcionan para los tres casos: brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de hierro fundido.

5.1.2 Análisis de los resultados del escenario 2

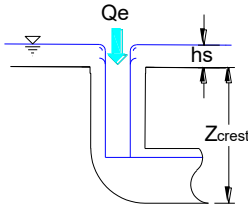
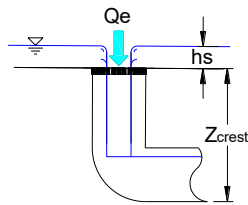
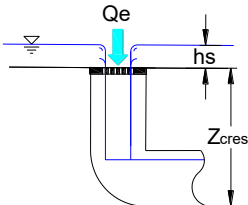
En el escenario 2, debido al remanso que se provoca para ahogar la descarga, a partir de los 10 l/s, la capacidad de captación se estabiliza (Figura 5-4) en los siguientes caudales: para el brocal sin tapa, capta 3.5 l/s, y no importa que el caudal que se envía por la calle aumente de 10 hasta 20 l/s. Para la rejilla de hierro fundido, capta 2.8 l/s, un caudal que tiende a ser constante independientemente de que el caudal que se envía por la calle aumente de 10 hasta 20 l/s. En el

caso de la tapa de concreto, capta 0.1 l/s, y no importa que el caudal que se envía por la calle cambie, ya que el caudal de captación permanece constante.

La eficiencia para el caso del escenario 2, en función de los caudales más bajos (Figura 5-5), aumenta en el caso del brocal sin tapa. Cuando se envían por la calle 5 l/s, se obtiene una eficiencia del 60%, disminuyendo hasta llegar a un valor del 20% cuando se envían 20 l/s por la calle. Para la rejilla de fierro fundido, cuando se envían por la calle 5 l/s, se obtiene una eficiencia del 40%, disminuyendo hasta llegar a un valor del 15% cuando se envían 20 l/s por la calle. La eficiencia para la tapa de concreto es del 1% y permanece constante. Esta reducción de la eficiencia se debe a la velocidad del flujo en la calle, lo que representa que a menor velocidad mayor captación y a mayor velocidad menor captación.

Análisis de resultados

Tabla 5-1 Resumen de los resultados del escenario 1, Sumidero libre

Figura	Fenómeno real	Variables	Modelo	R ²
 Brocal sin tapa		hs , carga hidráulica, en cm. Q_e , Caudal de captación, en l/s	$Q_e = 0.4547hs^2 + 0.0512hs + 0.0461$	0.91
		Q_e , Caudal de captación, en l/s $Q_{teórico}$ Caudal teórico, en l/s	$Q_e = 0.7478Q_{teórico} - 0.2002$	0.91
 Tapa de concreto		Q_e , Caudal de captación, en l/s hs , carga hidráulica, en cm.	$Q_e = -0.0822hs^2 + 0.3545hs - 0.0191$	0.94
		Q_e , Caudal de captación, en l/s $Q_{teórico}$ Caudal teórico, en l/s	$Q_e = 0.3464Q_{teórico} - 0.0423$	0.87
 Rejilla de hierro fundido		Q_e , Caudal de captación, en l/s hs , carga hidráulica, en cm.	$Q_e = 0.6179hs - 0.3293$	0.92
		Q_e , Caudal de captación, en l/s $Q_{teórico}$ Caudal teórico, en l/s	$Q_e = 0.6244Q_{teórico} - 0.455$	0.97

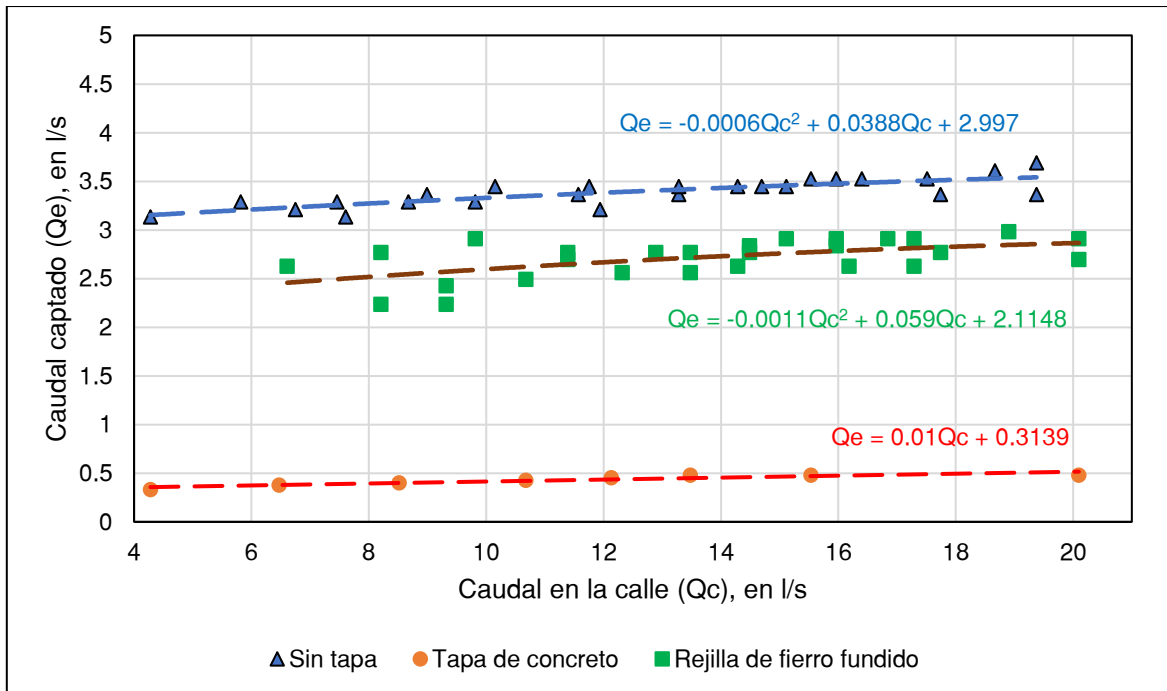


Figura 5-4 Comparativa del caudal captado por el brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de hierro fundido trabajando como sumidero ahogado.

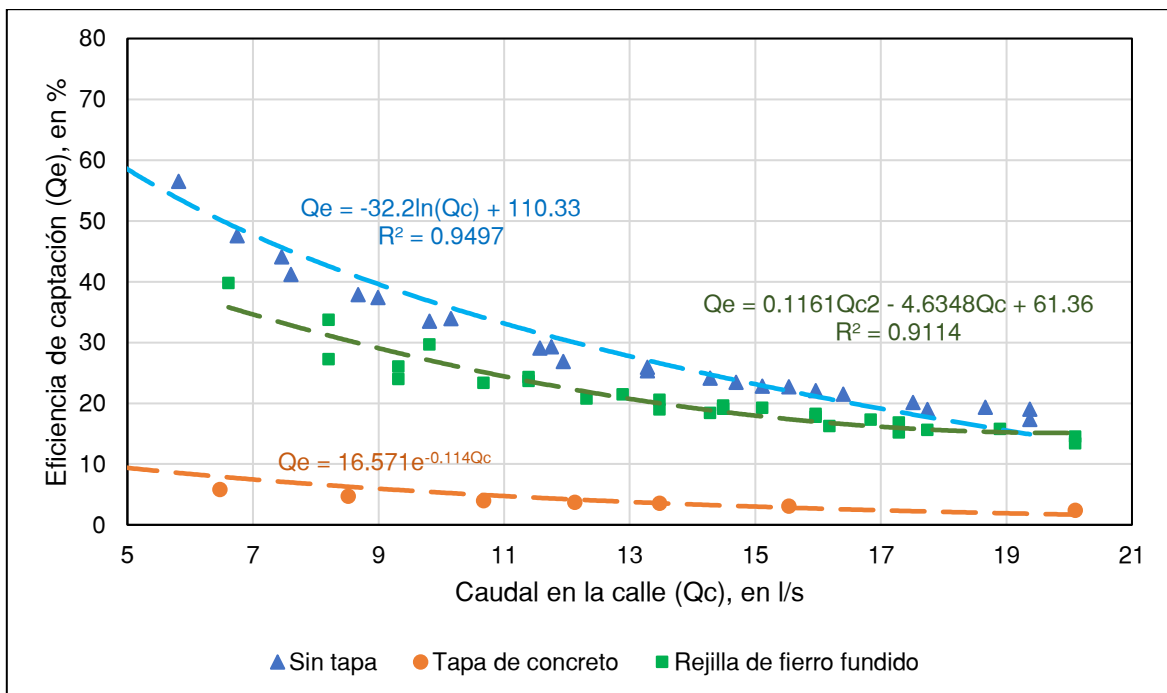


Figura 5-5 Comparativa de la eficiencia de captación del brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de hierro fundido trabajando como sumidero ahogado.

Análisis de resultados

Los coeficientes para la descarga ahogada son los siguientes: para el brocal sin tapa, es de 0.11; para la tapa de concreto, el coeficiente es de 0.15; y para la rejilla de fierro fundido, su coeficiente de descarga es 0.62 (Figura 5-6).

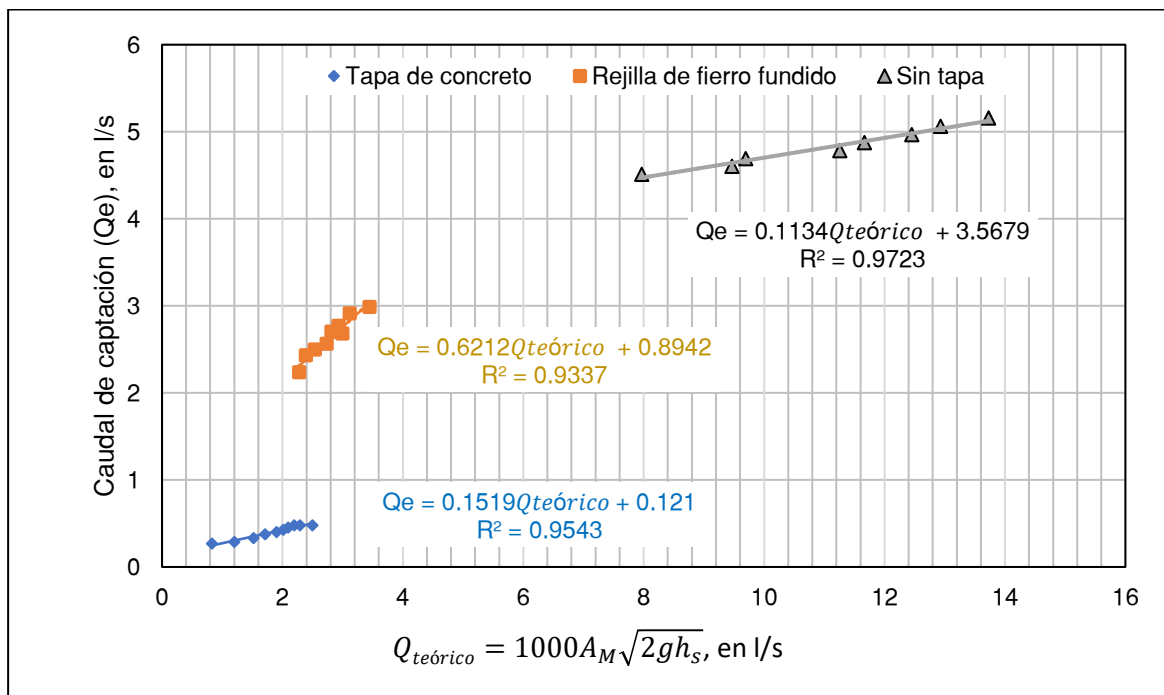
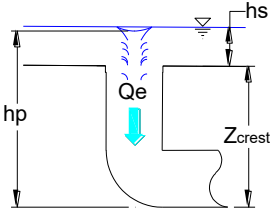
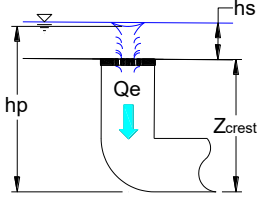
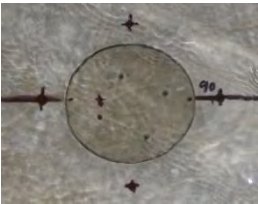
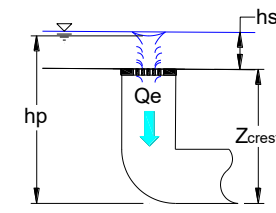


Figura 5-6 Comparativa de los coeficientes de descarga del brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido trabajando como sumidero ahogado.

En la Tabla 5-2, se presenta la ecuación que proporcionó el mejor ajuste, según el coeficiente de determinación, para obtener el coeficiente de descarga. La ecuación del caudal de intercambio (Q_e) está en función del caudal teórico ($Q_{teórico}$), separando para el caso de funcionamiento como vertedor se obtiene un coeficiente (C_w) y para el funcionamiento como orificio se tiene el coeficiente (C_o). Para determinar el caudal de intercambio (de captación para este escenario), la ecuación está en función del tirante o también conocido como carga hidráulica. Las ecuaciones se presentan para los tres casos: brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido.

Tabla 5-2 Resumen de los resultados del escenario 2, Sumidero ahogado.

Figura	Fenómeno Real	Variables	Modelo	R ²
 Brocal sin tapa		Qe , Caudal de captación, en l/s hs , carga hidráulica, en cm.	$Qe = -0.0062hs^4 + 0.1584hs^3 - 1.4532hs^2 + 5.7852(hs) - 3.7341$	0.98
		Qe , Caudal de captación, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	Vertedor $Qe = 0.452Q_{teórico} + 0.992$	0.95
			Orificio $Qe = 0.1134Q_{teórico} + 3.5679$	0.97
 Tapa de concreto		Qe , Caudal de captación, en l/s hs , carga hidráulica, en cm.	$Qe = -0.0015hs^2 + 0.0442hs + 0.2041$	0.96
		Qe , Caudal de captación, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Qe = 0.1519Q_{teórico} + 0.121$	0.95
 Rejilla de hierro fundido		Qe , Caudal de captación, en l/s hs , carga hidráulica, en cm.	$Qe = 0.0012hs^3 - 0.0844hs^2 + 1.0477hs - 0.6716$	0.97
		Qe , Caudal de captación, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	Vertedor $Qe = 0.5218Q_{teórico} + 0.0357$	0.98
			Orificio $Qe = 0.6212Q_{teórico} + 0.8942$	0.93

5.1.3 Análisis de los resultados del escenario 3: surgencia ahogada

En el escenario de surgencia ahogada para el brocal sin tapa, cuando se envía un caudal por la calle de 8 l/s, el coeficiente de descarga es de 0.51. Para un caudal en la calle de 20 l/s, el coeficiente de descarga aumenta a 0.68, como se muestra en la Figura 5-7.

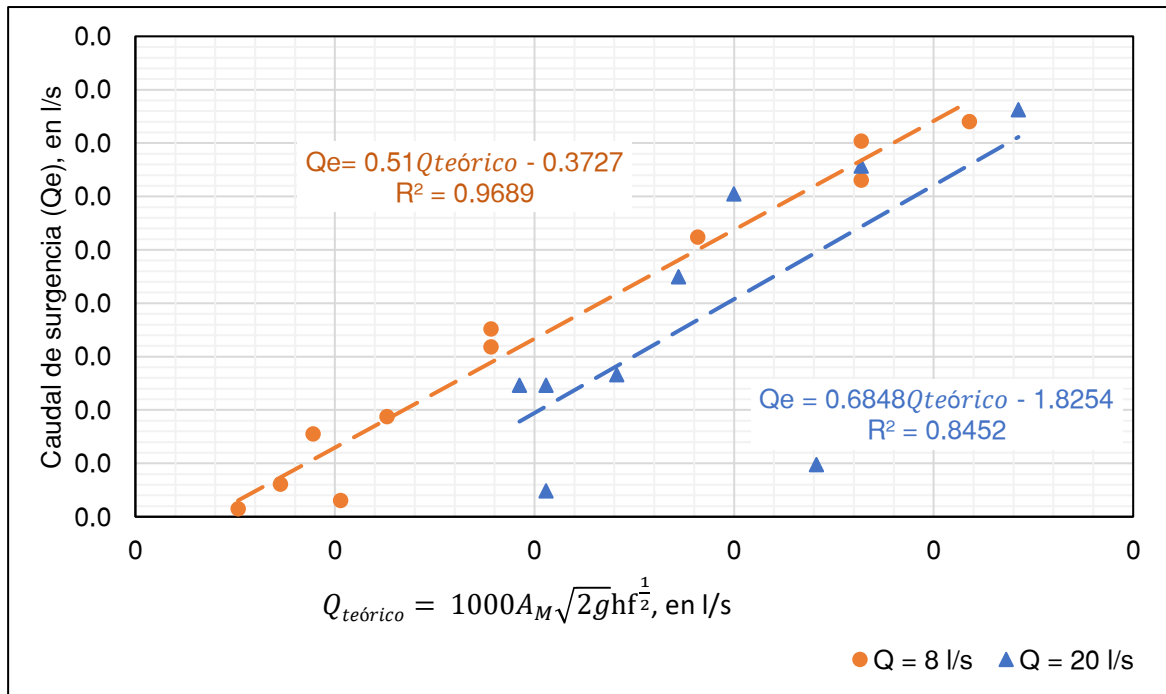


Figura 5-7 Comparativa de los coeficientes de descarga para surgencia ahogada del brocal sin tapa para diferentes caudales de ahogamiento.

En la Figura 5-8, se presenta de manera comparativa los coeficientes de descarga de la tapa de concreto para diferentes caudales que transitan por la calle, abarcando un rango de 0.57 a 18.9 l/s. Los coeficientes de descarga obtenidos varían en un rango de 0.18 a 0.66.

Mientras tanto, en la Figura 5-9, se exhiben de forma comparativa los coeficientes de descarga de la rejilla de fierro fundido para diversos gastos de inundación que transitan por la calle, en un rango de 0.86 a 20 l/s. Los coeficientes de descarga obtenidos se sitúan en un rango de 0.4 a 0.64.

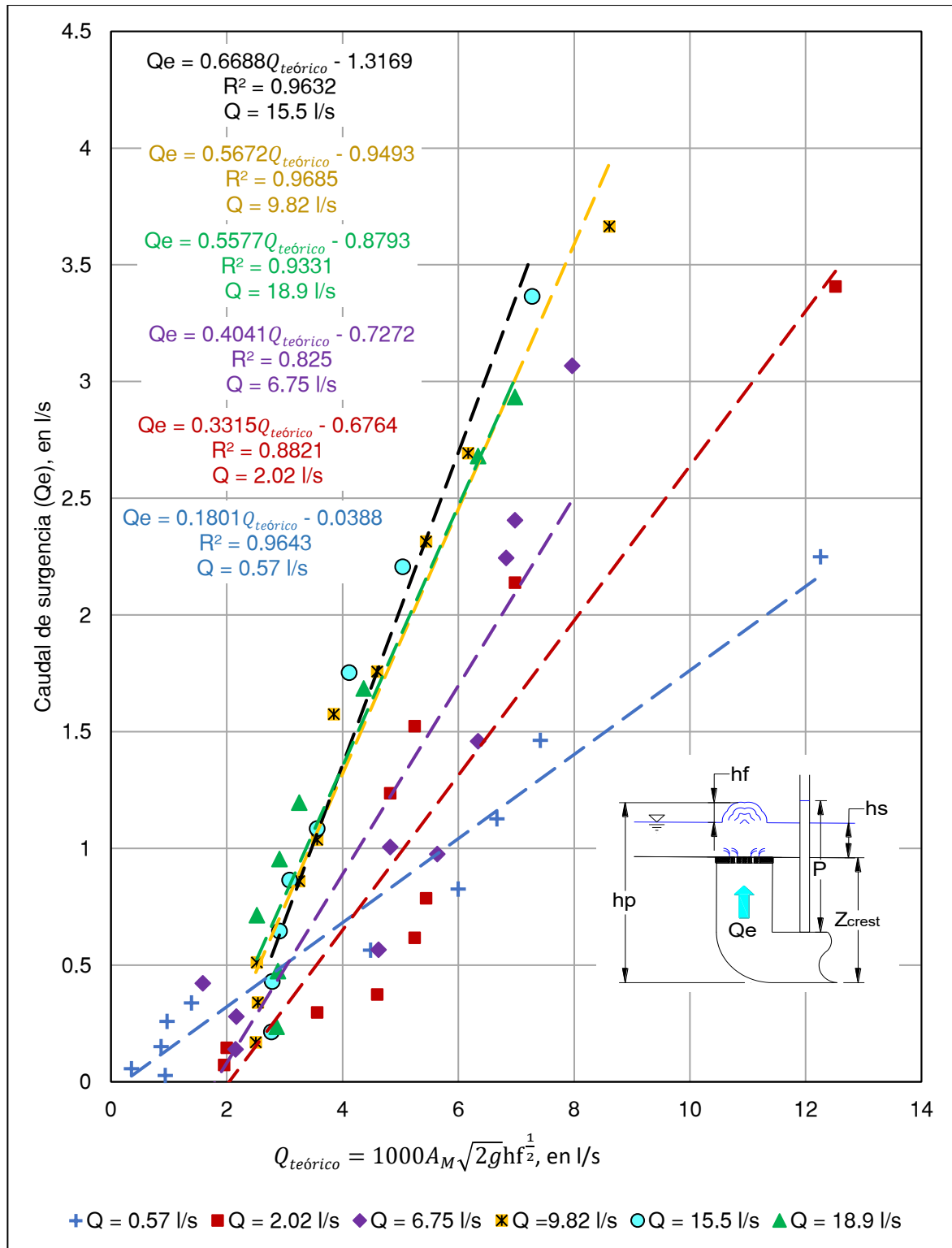


Figura 5-8 Comparativa de los coeficientes de descarga para surgencia ahogada de la tapa de concreto para diferentes caudales de ahogamiento.

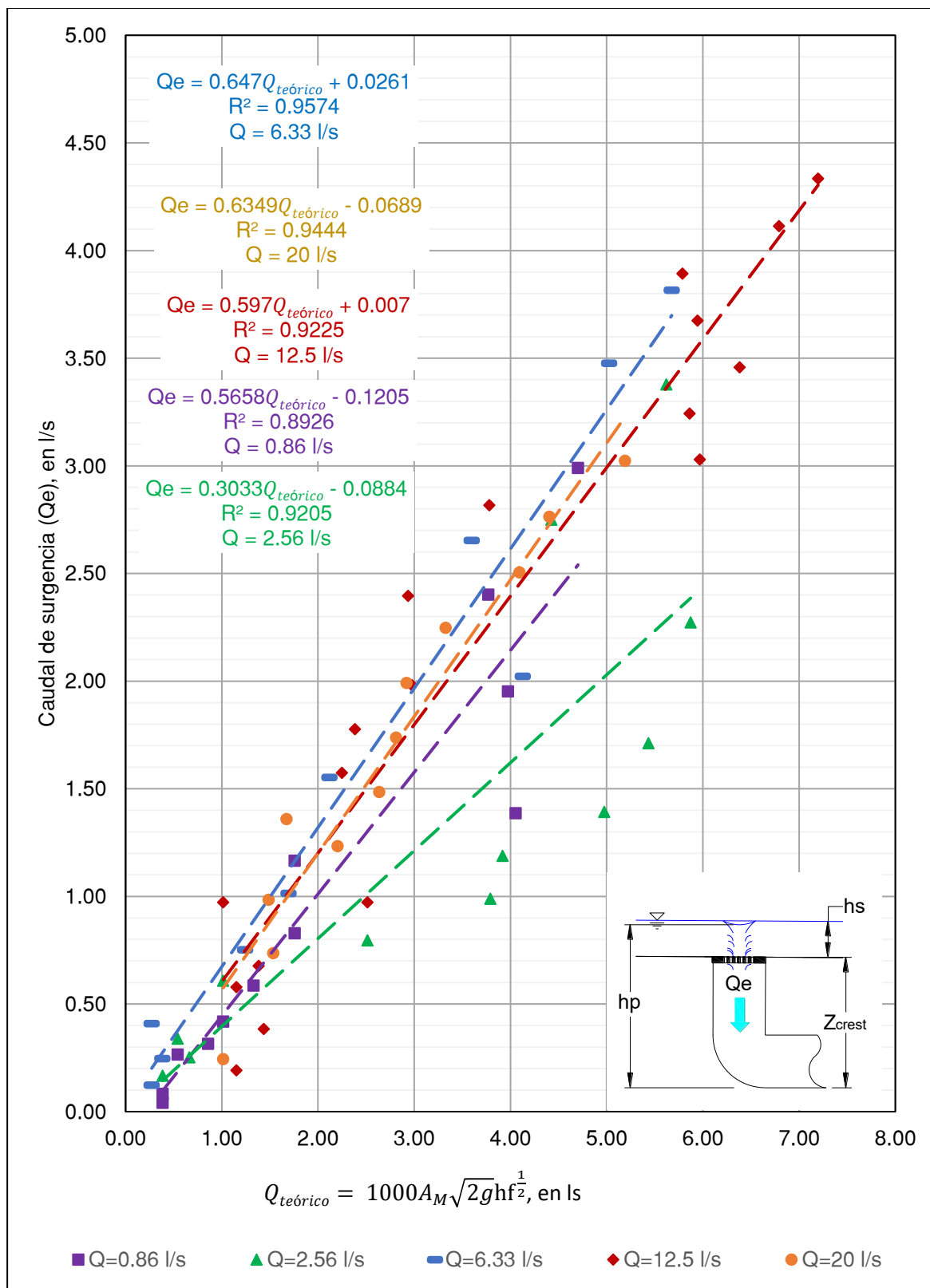


Figura 5-9 Comparativa de los coeficientes de descarga para surgencia ahogada de la rejilla de hierro fundido para diferentes caudales de ahogamiento.

En la comparativa de los coeficientes realizada para un caudal de ahogamiento de 20 l/s, se obtuvieron los siguientes coeficientes: un coeficiente de descarga sin tapa (C_o) de 0.649; para la rejilla de fierro fundido, $C_o = 0.634$; y para la tapa de concreto, se obtuvo un coeficiente $C_o = 0.55$. Estos resultados indican que, para la surgencia ahogada, el brocal sin tapa descarga más agua, mientras que la tapa de concreto es la que menos agua descarga (Figura 5-10).

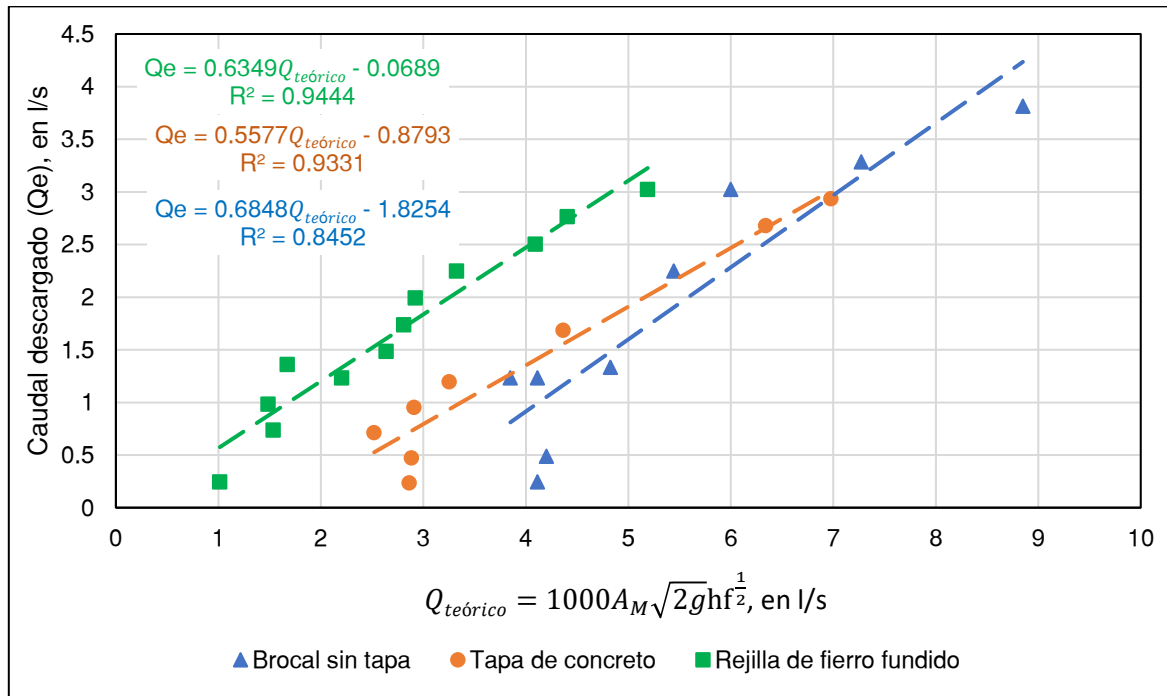


Figura 5-10 Comparativa de los coeficientes de descarga en surgencia ahogada del brocal sin tapa, la tapa de concreto y de la rejilla de fierro fundido.

Para la presión con la que se desplazan la tapa y la rejilla, se observó que a partir de los 36 cmca se inició el desplazamiento de la tapa de concreto, mientras que la rejilla de fierro fundido inició su abertura a partir de los 39 cmca. La tapa de concreto fue desplazada completamente del brocal; sin embargo, dado que se trata de una descarga ahogada, la presión continúa aumentando hasta alcanzar 45 cmca. En el caso de la rejilla de fierro fundido, esta continuó abriendo la rejilla, y debido a la bisagra, no fue posible desplazar completamente la rejilla del brocal. No obstante, al mantener la rejilla en el brocal, representa una obstrucción y la presión continúa aumentando hasta alcanzar un valor de 47 cmca (Figura 5-11), todos estos datos son para los caudales máximos de surgencia experimentados, acotado que si se sigue aumentando el caudal de surgencia la presión aumenta, pero de forma diferencial.

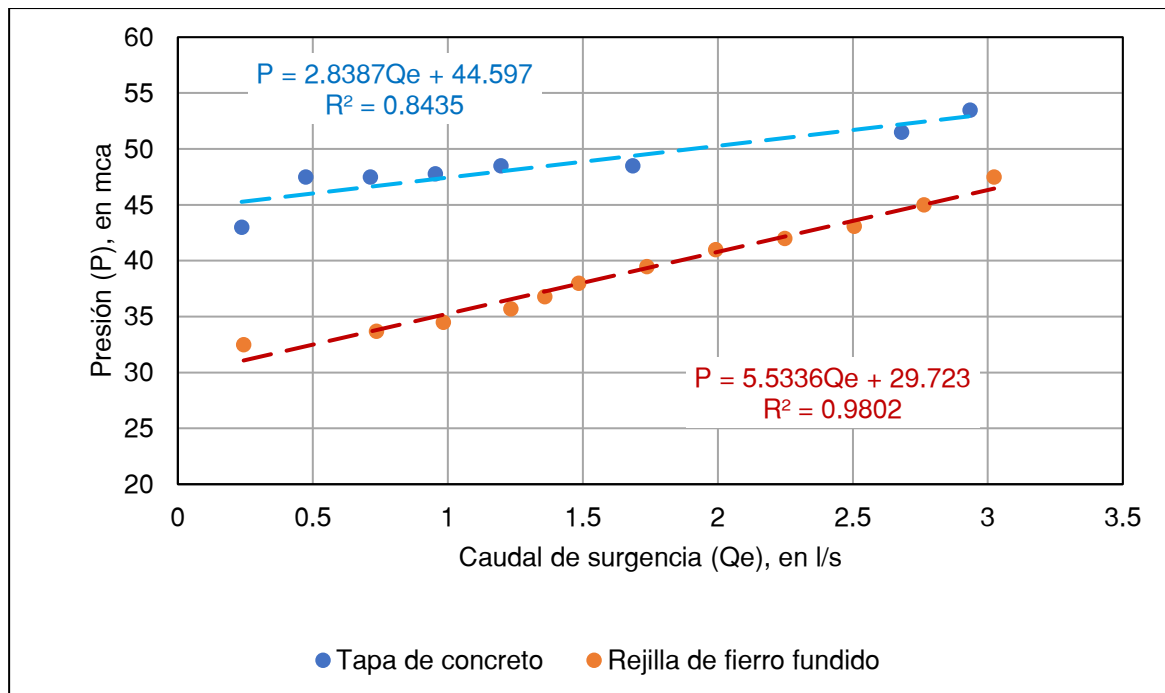
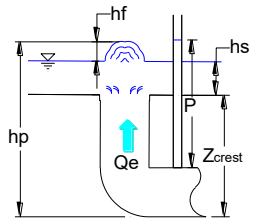
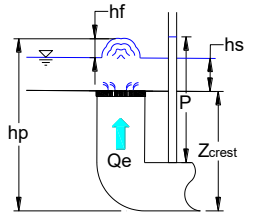


Figura 5-11 Comparativa de la presión en surgencia ahogada con un caudal en la calle de 20 l/s de la tapa de concreto y la rejilla de hierro fundido.

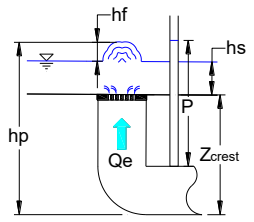
Para el escenario 3, en la Tabla 5-3 se presentan las ecuaciones empleadas para determinar los coeficientes de descarga. Estas ecuaciones representan el caudal de intercambio (Q_e) y están en función del caudal teórico ($Q_{teórico}$). Los coeficientes están representados para cada caso de caudal de ahogamiento y son directamente proporcionales al caudal que se envía por la calle (Caudal de ahogamiento). Las ecuaciones se presentan para los tres casos: brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de hierro fundido.

Tabla 5-3 Resumen de los resultados del escenario 3.

Figura	Imagen	Variables	Modelo	R ²
 Brocal sin tapa		Q_c , caudal en la calle hf , altura de surgencia, en cm Q_e , Caudal de surgencia, en l/s	$Q_c = 8 \text{ l/s}$ $Q_e = -0.3754hf^2 + 2.2598hf + 0.1721$	0.96
		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 20 \text{ l/s}$ $Q_e = -0.466hf^2 + 3.1066hf - 1.3368$	0.88
		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 8 \text{ l/s}$ $Q_e = 0.51Q_{teórico} - 0.3727$	0.96
		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 20 \text{ l/s}$ $Q_e = 0.6848Q_{teórico} - 1.8254$	0.84
		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 0.57 \text{ l/s}$ $Q_e = 0.1801Q_{teórico} - 0.0388$	0.96
		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 2.03 \text{ l/s}$ $Q_e = 0.3315Q_{teórico} - 0.6764$	0.88
 Tapa de concreto		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 6.74 \text{ l/s}$ $Q_e = 0.4041Q_{teórico} - 0.7272$	0.82
		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 9.18 \text{ l/s}$ $Q_e = 0.5672Q_{teórico} - 0.9493$	0.96
		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 15.5 \text{ l/s}$ $Q_e = 0.6688Q_{teórico} - 1.3169$	0.96
		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 18.9 \text{ l/s}$ $Q_e = 0.5577Q_{teórico} - 0.8793$	0.93
		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 0.57 \text{ l/s}$ $Q_e = 0.1801Q_{teórico} - 0.0388$	0.96
		Q_c , Caudal en la calle, en l/s Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_c = 2.03 \text{ l/s}$ $Q_e = 0.3315Q_{teórico} - 0.6764$	0.88

Análisis de resultados

Tabla 5-3 (continuación)

Figura	Imagen	Variables	Modelo	R ²
 Rejilla de hierro fundido		Qc, Caudal en la calle, en l/s	$Qc = 0.86 \text{ l/s}$	0.89
		Qe, Caudal de surgencia, en l/s	$Qe = 0.5658Q_{teórico} - 0.1205$	
		$Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Qc = 2.56 \text{ l/s}$ $Qe = 0.3033Q_{teórico} + 0.0884$	0.92
			$Qc = 6.33 \text{ l/s}$ $Qe = 0.6387Q_{teórico} + 0.0852$	0.95
			$Qc = 12.5 \text{ l/s}$ $Qe = 0.597Q_{teórico} + 0.007$	0.92
			$Qc = 20 \text{ l/s}$ $Qe = 0.6349Q_{teórico} - 0.0689$	0.94

5.1.4 Análisis de los resultados del escenario 4: surgencia libre

En el escenario 4 correspondiente a la surgencia ahogada, los coeficientes obtenidos son los siguientes: para el brocal sin tapa, se obtuvo un coeficiente de descarga de 0.59; para la tapa de hierro fundido, el coeficiente fue de 0.55; y finalmente, para la tapa de concreto, se obtuvo un coeficiente de 0.107 (Figura 5-12).

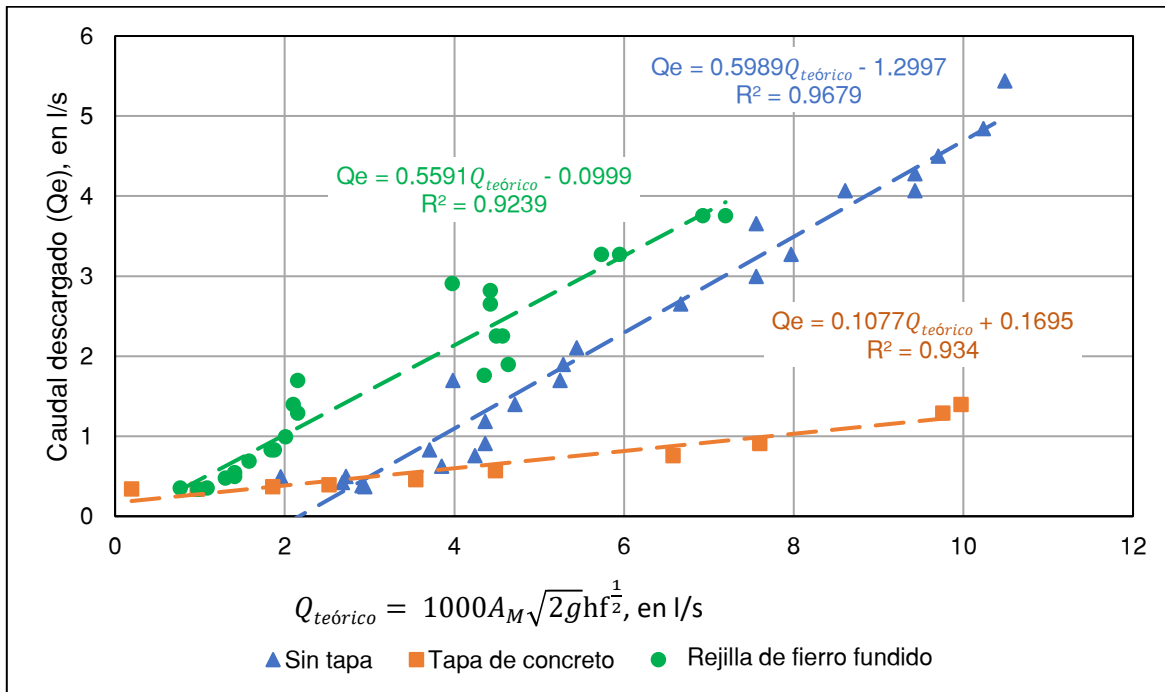


Figura 5-12 Comparativa de Coeficientes de descarga para surgencia libre, del brocal sin tapa, la tapa de concreto y la rejilla de hierro fundido

En el caso de la descarga libre, a partir de 35 cmca, se inicia con la abertura de la rejilla de hierro fundido. Para la tapa de concreto, se observa que es desplazada a una presión de 42 cmca, y a partir de ese punto, la presión disminuye. Respecto a la rejilla de hierro fundido, inicia su abertura con una presión de 34 cmca y se continuó enviando caudal de surgencia hasta alcanzar una presión de 51 cmca, asociada a un caudal de surgencia de 3.8 l/s (Figura 5-13).

En la Tabla 5-4 se presentan las ecuaciones empleadas para determinar los coeficientes de descarga. Estas ecuaciones representan el caudal de intercambio (Q_e) y están en función del caudal teórico ($Q_{teórico}$). También se incluyen las ecuaciones para obtener el caudal de

Análisis de resultados

intercambio (Q_e) en función de la altura de surgencia (h_f). Las ecuaciones se presentan para los tres casos: brocal sin tapa, tapa de concreto y rejilla de fierro fundido.

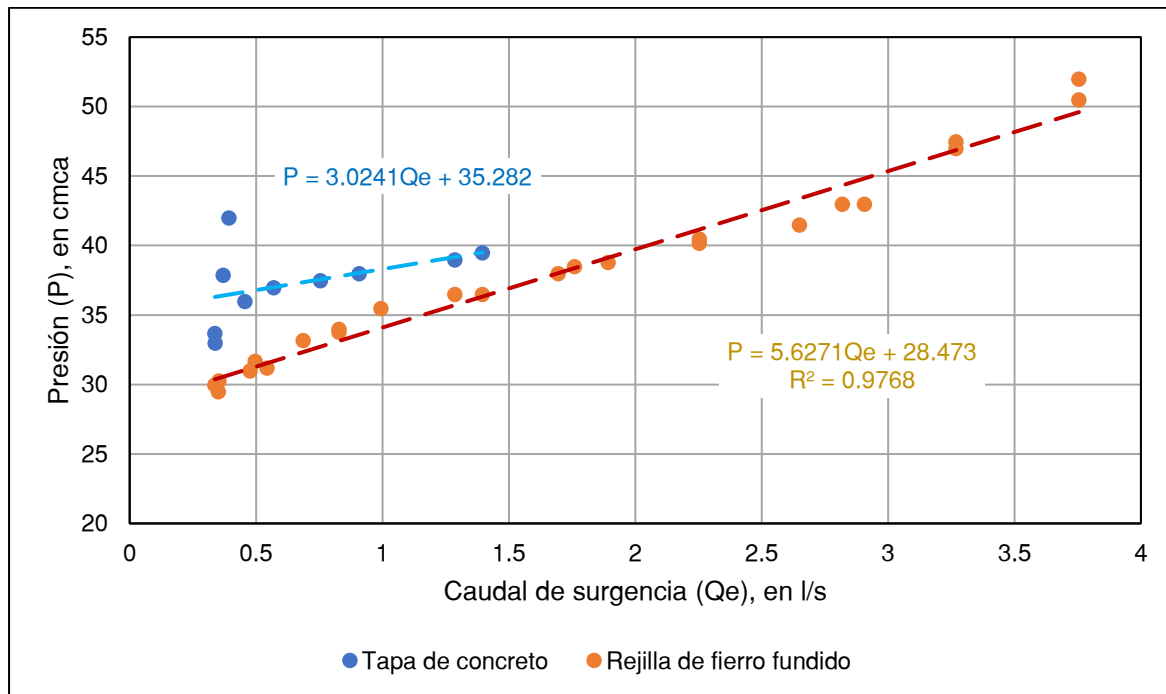
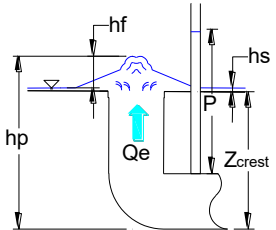
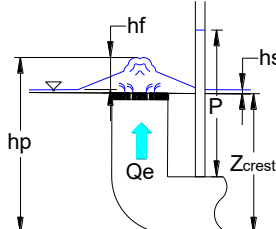
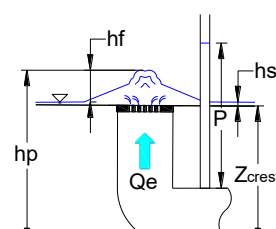


Figura 5-13 Comparativa presión piezométrica de la tapa de concreto y la rejilla fierro fundido trabajando en surgencia libre.

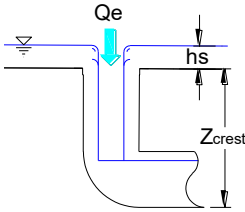
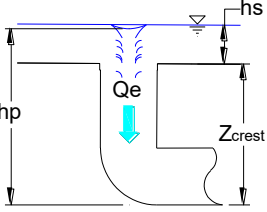
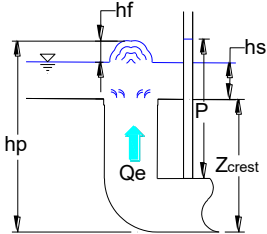
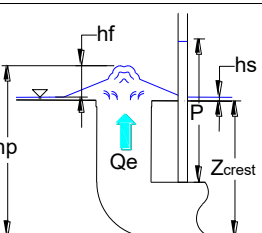
Tabla 5-4 Resumen de los resultados del escenario 4: surgencia libre

Figura	Fenómeno real	Variables	Modelo	R ²
 Brocal sin tapa		Q_e , Caudal de surgencia, en l/s hf , altura de surgencia, en cm	$Q_e = -0.0839hf^2 + 1.4103hf - 0.0064$	0.97
		Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_e = 0.5989Q_{teórico} - 1.2997$	0.96
 Tapa de concreto		hs , tirante en la calle, en cm. Q_e , Caudal de surgencia, en l/s	$Q_e = 0.0203hf^4 - 0.1707hf^3 + 0.4715hf^2 - 0.4135hf + 0.3618$	0.98
		Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_e = 0.103Q_{teórico} + 0.196$	0.94
 Rejilla de hierro fundido		Q_e , Caudal de surgencia, en l/s hs , tirante en la calle, en cm.	$Q_e = 0.1319hf^3 - 0.4844hf^2 + 0.7414hf + 0.0681$	0.90
		Q_e , Caudal de surgencia, en l/s $Q_{teórico}$, Caudal teórico, en l/s	$Q_e = 0.5591Q_{teórico} - 0.0999$	0.92

5.1.5 Resumen de los coeficientes de descarga

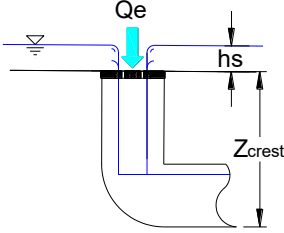
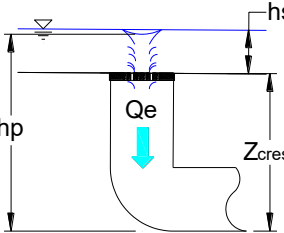
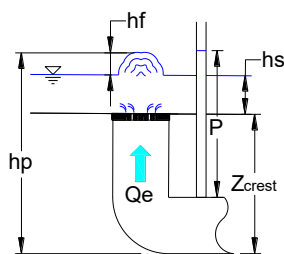
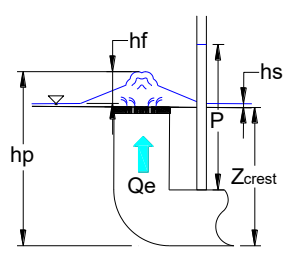
En la Tabla 5-5 se presenta un resumen de los coeficientes de descarga para el brocal sin tapa, considerando su funcionamiento como vertedor (C_w) y como orificio (C_o), en los cuatro escenarios. Estos coeficientes fueron obtenidos a través de experimentos realizados en el modelo físico.

Tabla 5-5 Coeficientes de descarga para el brocal sin tapa

Brocal sin tapa	Escenario	Coeficiente de descarga
	 Sumidero libre	$C_w=0.7478$
	 Sumidero ahogado	$C_w=0.452$
		$C_o=0.1134$
	 Surgencia ahogada	$Q_c=8 \text{ l/s}$ $C_o=0.51$
		$Q_c=20 \text{ l/s}$ $C_o=0.68$
	 Surgencia libre	$C_o=0.5989$

Mientras que, en la Tabla 5-6 se presenta un resumen de los coeficientes de descarga para para el brocal con tapa de concreto, considerando su funcionamiento como vertedor (Cw) y como orificio (Co), en los cuatro escenarios. Estos coeficientes fueron obtenidos mediante experimentos realizados en el modelo físico.

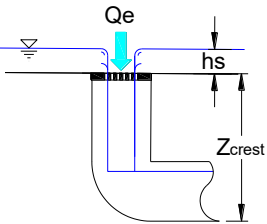
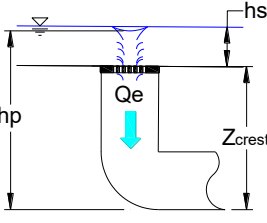
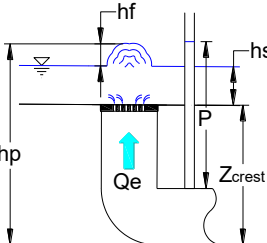
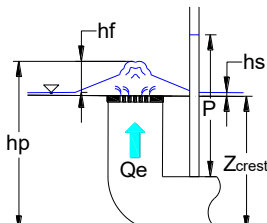
Tabla 5-6 Coeficientes de descarga para la tapa de concreto

Brocal con tapa	Escenario	Coeficiente de descarga	
	 Sumidero libre	Cw=0.3464	
	 Sumidero ahogado	Co=0.1519	
	 Surgencia ahogada	Qc=0.57 l/s	Co=0.1801
		Qc=2.03 l/s	Co=0.3315
		Qc=6.74 l/s	Co=0.4041
		Qc=9.81 l/s	Co=0.5672
		Qc=15.5 l/s	Co=0.6688
		Qc=18.9 l/s	Co=0.5577
	 Surgencia libre	Co=0.103	

Análisis de resultados

Por otra parte, en la Tabla 5-7 se presenta un resumen de los coeficientes de descarga para la rejilla de fierro fundido, considerando su funcionamiento como vertedor (C_w) y como orificio (C_o) en los cuatro escenarios. Estos coeficientes fueron obtenidos mediante experimentos realizados en el modelo físico.

Tabla 5-7 Coeficientes de descarga para la rejilla de fierro fundido

Brocal con rejilla de fierro fundido	Escenario	Coeficiente de descarga	
	 Sumidero libre	$C_w=0.6244$	
	 Sumidero ahogado	$C_w=0.5218$	
	 Surgencia ahogada	$Q_c=0.86 \text{ l/s}$	$C_o=0.5658$
		$Q_c=2.56 \text{ l/s}$	$C_o=0.3033$
		$Q_c=6.33 \text{ l/s}$	$C_o=0.6387$
		$Q_c=12.5 \text{ l/s}$	$C_o=0.597$
		$Q_c=20 \text{ l/s}$	$C_o=0.6349$
	 Surgencia libre	$C_o=0.6514$	

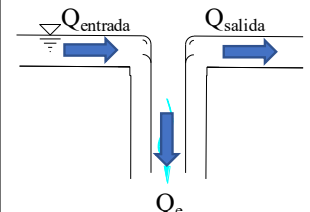
5.2 Análisis de resultados obtenidos en el modelo numérico IBER

Los resultados obtenidos en las simulaciones mostraron una similitud notable con los tirantes y caudales medidos en los experimentos físicos. En cuanto a los coeficientes de descarga, que fueron los datos utilizados para alimentar el modelo en los escenarios 1 y 2, fue posible cargar estos coeficientes en el modelo, por lo que no se presenta su comparación. Para los escenarios 3 y 4, solo se trabajó con los caudales asignados al elemento fuente, ya que el modelo aún no cuenta con la capacidad de cargar los valores de los coeficientes para los casos de surgencia.

5.2.1 Comparación de resultados obtenidos en el modelo numérico IBER contra los datos experimentales del escenario 1.

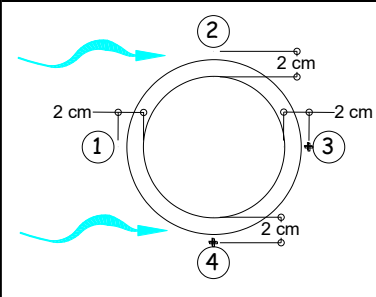
En la Tabla 5-8, se presentan los caudales que se midieron en el modelo físico y fueron los datos con los que se alimentó el modelo numérico IBER, para el brocal sin tapa, las diferencias que se presentan con respecto a los datos experimentales presentando una diferencia del 0.3%.

Tabla 5-8 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 1.

	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_e (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_e (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	20.1	3.07	17.03	20.03	3.06	16.97

En la Tabla 5-9, se comparan los tirantes medidos en el modelo físico con los tirantes obtenidos en el modelo numérico IBER. Se observa que los puntos 1 y 4 presentan la máxima diferencia, del orden de 4 mm. Estas diferencias se atribuyen a la turbulencia generada alrededor del brocal.

Tabla 5-9 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 1.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.026	0.03	2.6	3
	2	0.023	0.024	2.3	2.4
	3	0.025	0.027	2.5	2.7
	4	0.021	0.025	2.1	2.5

En el caso de la tapa de concreto, la diferencia en el caudal captado es de 0.1 l/s. Esta discrepancia se debe a las características de la tapa de concreto al definir su área hidráulica en el modelo numérico IBER, indicando que la tapa de concreto realmente no capta agua (Tabla 5-10).

En cuanto al tirante, se observa que presenta una máxima diferencia en el punto 1, de 5 mm. Esta discrepancia se atribuye a la turbulencia presente en esa zona en el modelo físico, lo que dificulta la medición precisa de los tirantes y contribuye a las diferencias observadas (Tabla 5-11).

Tabla 5-10 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, de la tapa de concreto en condiciones del escenario 1.

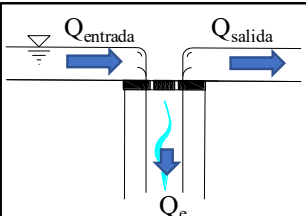
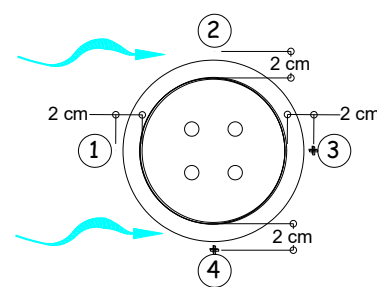
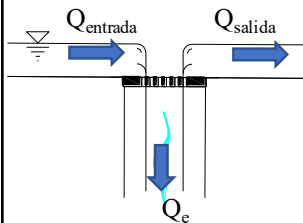
	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_e (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_e (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	20.01	0.3	19.71	20.02	0.2	19.82

Tabla 5-11 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER, de la tapa de concreto en condiciones del escenario 1.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.025	0.03	2.5	3
	2	0.025	0.025	2.5	2.47
	3	0.024	0.028	2.4	2.8
	4	0.025	0.024	2.5	2.4

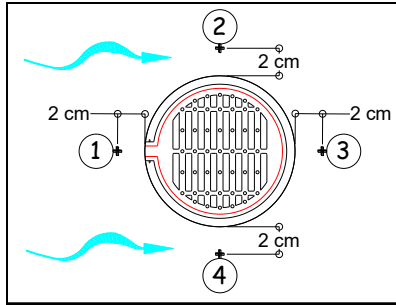
En el caso de la rejilla de fierro fundido, se observa una diferencia de 0.38 l/s entre el caudal captado en el modelo físico y la simulación con IBER. La comparación detallada de los resultados obtenidos se presenta en la Tabla 5-12.

Tabla 5-12 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 1.

	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_c (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_c (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	20.1	1.31	18.79	20.02	1.69	18.33

En la comparación de los tirantes (Tabla 5-13), se observa que el punto 1 presenta la máxima diferencia de 0.3 cm, debido a la turbulencia en la zona del brocal. Por otro lado, el punto 2 muestra la mínima diferencia de 0.05 cm.

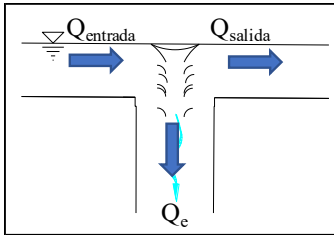
Tabla 5-13 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER, de la rejilla de hierro fundido en condiciones del escenario 1.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.028	0.025	2.8	2.5
	2	0.027	0.026	2.65	2.6
	3	0.028	0.025	2.75	2.5
	4	0.027	0.025	2.65	2.5

5.2.2 Comparación de resultados obtenidos en el modelo numérico IBER contra los datos experimentales del escenario 2.

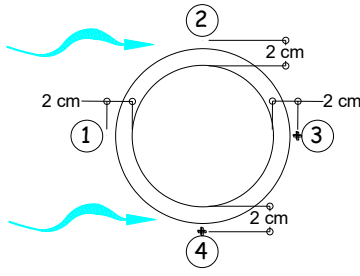
Para el caso del brocal sin tapa y bajo las condiciones del escenario 2 (Sumidero ahogado), se presentan en la Tabla 5-14 los caudales medidos en el modelo físico, los cuales fueron utilizados como datos de entrada para el modelo IBER. No obstante, en IBER la captación aumenta en 0.5 l/s. Esta discrepancia puede deberse al hecho de que el diámetro del modelo físico se reduce aguas abajo, lo que posiblemente influya en que la captación sea menor en el modelo físico.

Tabla 5-14 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 2.

	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_c (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_c (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	19.37	3.36	16.01	19.98	3.95	16.03

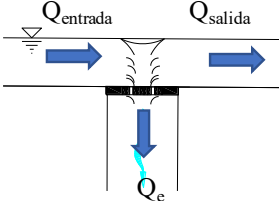
En cuanto a los tirantes, la comparación se muestra en la Tabla 5-15 con una diferencia de 1 cm. A pesar de esta discrepancia, los caudales de entrada y salida son prácticamente iguales en ambos modelos, lo que indica la existencia de continuidad. Además, las diferencias pueden estar relacionadas con la rugosidad del modelo a escala y la definida en IBER.

Tabla 5-15 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 2.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.089	0.11	8.9	11
	2	0.081	0.09	8.1	9
	3	0.082	0.09	8.2	9
	4	0.081	0.09	8.1	9

En el caso de la tapa de concreto, la diferencia entre los caudales se presenta en la Tabla 5-16. Se observa que el caudal de captación es mayor en el modelo de IBER, con una diferencia de 0.5 l/s. Esta discrepancia se considera que puede deberse a la reducción del diámetro aguas abajo en la captación.

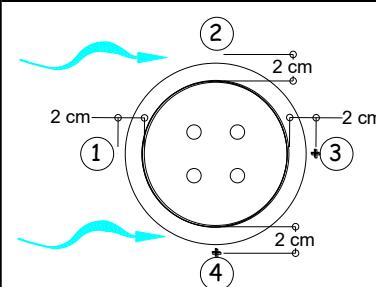
Tabla 5-16 Comparación de caudales del modelo físico vs IBER, de la tapa de concreto en condiciones del escenario 2.

	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_e (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_e (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	20.1	0.48	19.62	20.1	1	19.1

En cuanto a los tirantes, se observa una diferencia máxima de 1.2 cm en el punto 3 y una diferencia mínima de 0.2 cm en el punto 1. Estos tirantes son del orden de 8.5 cm sobre la tapa de concreto, como se muestra en la Tabla 5-17.

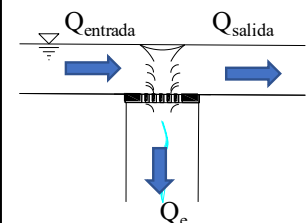
Análisis de resultados

Tabla 5-17 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER, de la tapa de concreto en condiciones del escenario 2.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.085	0.083	8.5	8.3
	2	0.088	0.086	8.8	8.6
	3	0.100	0.088	10.0	8.8
	4	0.088	0.084	8.8	8.4

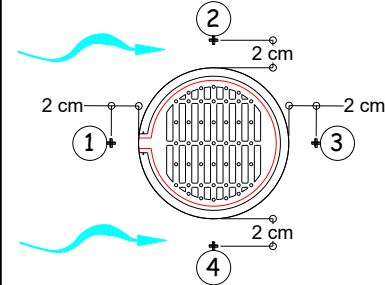
En lo que respecta a la rejilla de hierro fundido, los caudales de captación en ambos modelos son iguales, con un valor de 2.9 l/s que son captados por la rejilla de hierro fundido de los 20 l/s que se envían por la calle, llegando a la salida 17.1 l/s, según se muestra en la Tabla 5-18.

Tabla 5-18 Comparación de caudales del modelo físico vs IBER, de la rejilla de hierro fundido en condiciones del escenario 2.

	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_e (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_e (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	20.1	2.91	17.19	20.01	2.95	17.06

En la Tabla 5-19 se observa que en el punto 1 hay una diferencia entre los tirantes de 0.4 cm, mientras que en el punto 3 se presenta la mínima diferencia de 0.1 cm. Estas diferencias se atribuyen a la forma de medición en el modelo físico, lo que resalta la necesidad de utilizar equipo de precisión para obtener mediciones más exactas en los modelos físicos.

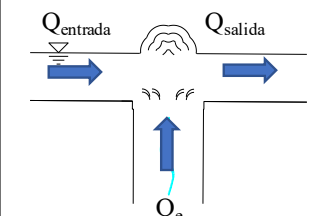
Tabla 5-19 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER, de la rejilla de hierro fundido en condiciones del escenario 2.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.071	0.075	7.1	7.5
	2	0.074	0.077	7.4	7.7
	3	0.081	0.082	8.1	8.2
	4	0.074	0.076	7.4	7.6

5.2.3 Comparación de resultados obtenidos en el modelo numérico IBER contra los datos experimentales del escenario 3.

En el escenario de surgencia ahogada para el caso del brocal sin tapa, se observa que el caudal enviado por la surgencia es de 3.81 l/s, sumándose a los 20.1 l/s que ingresan por la calle. Como resultado, a la salida del modelo se obtiene un caudal total de 24 l/s, según se muestra en la Tabla 5-20.

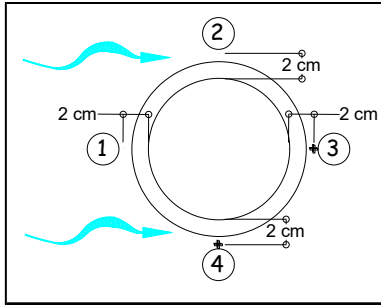
Tabla 5-20 Comparación de caudales del modelo físico vs IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 3

	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_e (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_e (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	20.1	3.81	23.91	20.1	3.9	24

En la Tabla 5-21, se observa que los tirantes en ambos modelos son prácticamente iguales en términos prácticos. Es importante mencionar que en el perímetro del brocal se presenta turbulencia debido a la surgencia, lo que dificulta su medición en el modelo físico. Esta dificultad no se presenta en el modelo numérico. A pesar de ello, se deduce que los resultados obtenidos con IBER se reproducen adecuadamente, lo que podría ser de gran ayuda en la simulación de otros escenarios.

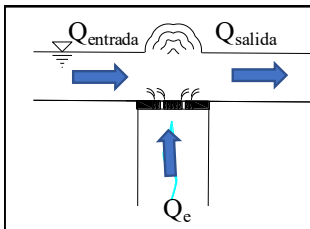
Análisis de resultados

Tabla 5-21 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 3.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.060	0.06	6.0	6
	2	0.060	0.06	6.0	6
	3	0.060	0.059	6.0	5.9
	4	0.060	0.063	6.0	6.3

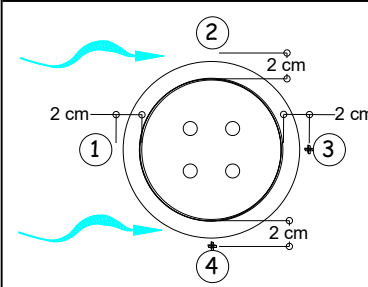
En cuanto a la tapa de concreto en el escenario de surgencia, los caudales obtenidos experimentalmente coinciden prácticamente con los resultados obtenidos mediante el modelo de simulación IBER, presentando diferencias mínimas de 0.07 l/s, como se muestra en la Tabla 5-22. Esto demuestra que cuando se reduce la turbulencia, la medición experimental se vuelve más factible comparada con los resultados de la simulación.

Tabla 5-22 Comparación de caudales del modelo físico vs IBER, de la tapa de concreto en condiciones del escenario 3.

	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_e (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_e (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	18.9	2.93	21.83	18.9	3	21.9

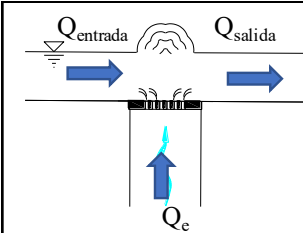
En cuanto a los tirantes, se observa que los puntos 1 y 3 presentan una diferencia de 0.2 cm, mientras que los puntos 2 y 4 muestran una diferencia de 0.4 cm. Estos valores corresponden a tirantes del orden de los 16 cm en la zona donde se realizaron las mediciones, como se detalla en la Tabla 5-23

Tabla 5-23 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER, de la tapa de concreto en condiciones del escenario 3.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.165	0.163	16.5	16.3
	2	0.160	0.164	16.0	16.4
	3	0.160	0.162	16.0	16.2
	4	0.160	0.164	16.0	16.4

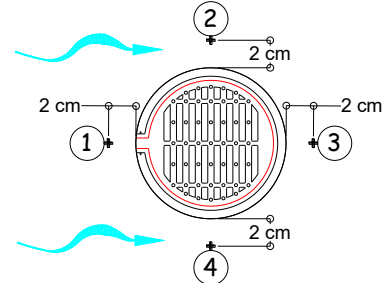
En el caso de la rejilla de fierro fundido con respecto al caudal de surgencia, se observa una diferencia de 0.017 l/s. Además, en el caudal de entrada se presenta una diferencia de 0.08 l/s, y en el caudal de salida, una diferencia de 0.09 l/s (Tabla 5-24). Estas discrepancias se consideran adecuadas, ya que son menores al 10%.

Tabla 5-24 Comparación de caudales del modelo físico vs IBER, de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 3.

	$Q_{entrada}$ (l/s) en el modelo físico	Q_e (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	$Q_{entrada}$ (l/s) en el modelo IBER	Q_e (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	20.1	3.02	23.12	20.02	3.19	23.21

Debido a la turbulencia generada por el caudal de surgencia que descarga la rejilla de fierro fundido, se observan discrepancias en los tirantes medidos en comparación con los resultados de la simulación. La diferencia máxima se registra en el punto 3, alcanzando hasta 1 cm (Tabla 5-25), lo que representa una discrepancia máxima del 16%. Esta variación se atribuye a las condiciones de medición.

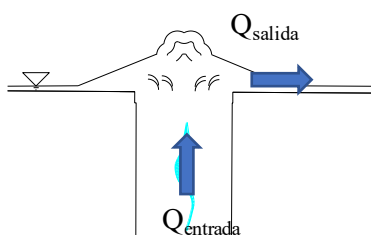
Tabla 5-25 Comparación de tirantes del modelo físico vs IBER, de la rejilla de hierro fundido en condiciones del escenario 3.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.057	0.06	5.7	6
	2	0.052	0.06	5.2	6
	3	0.050	0.06	5	6
	4	0.055	0.06	5.5	6

5.2.4 Comparación de resultados obtenidos en el modelo numérico IBER contra los datos experimentales del escenario 4.

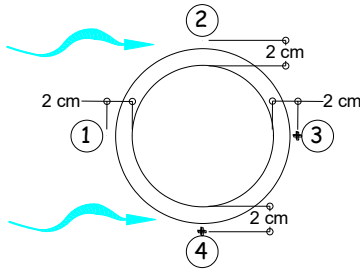
La Tabla 5-26 refleja las discrepancias en los caudales descargados en surgencia libre en el brocal sin tapa, evidenciando una diferencia de 0.32 l/s. Esta variación, que representa menos del 10%, sugiere que los resultados del modelo numérico son aceptables.

Tabla 5-26 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 4.

	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	5.43	5.43	5.75	5.75

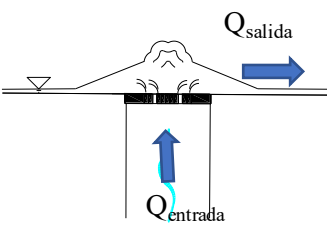
En cuanto a los tirantes, muestran una discrepancia constante de 0.5 cm, atribuible a la turbulencia generada por el caudal de surgencia en el modelo físico, lo que dificulta la lectura precisa con el limnómetro (Tabla 5-27).

Tabla 5-27 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, del brocal sin tapa en condiciones del escenario 4.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.029	0.024	2.9	2.4
	2	0.029	0.024	2.9	2.4
	3	0.029	0.024	2.9	2.4
	4	0.029	0.024	2.9	2.4

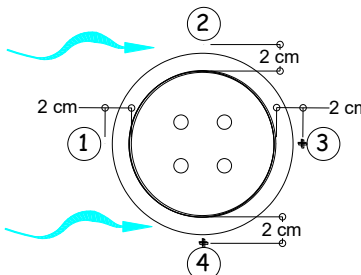
Para el caso de la tapa de concreto en el escenario 4 (surgencia en descarga libre), los caudales coinciden en ambos modelos (Tabla 5-28). Esto se atribuye a los caudales pequeños.

Tabla 5-28 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, de la tapa de concreto en condiciones del escenario 4.

	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	1.4	1.4	1.4	1.4

Para los tirantes, la diferencia es constante de 0.2 cm, debido a la turbulencia que genera este fenómeno (Tabla 5-29), sin embargo, los resultados son aceptables.

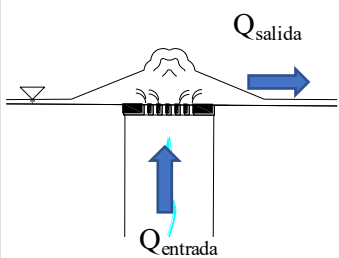
Tabla 5-29 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER, de la tapa de concreto en condiciones del escenario 4.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.010	0.012	1.0	1.2
	2	0.010	0.012	1.0	1.2
	3	0.010	0.012	1.0	1.2
	4	0.010	0.012	1.0	1.2

Análisis de resultados

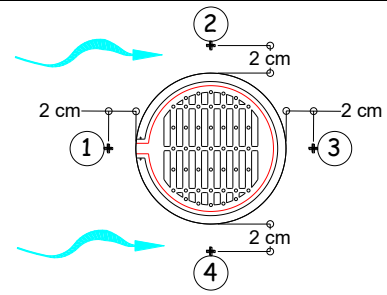
Para la rejilla de fierro fundido, los caudales presentan una diferencia de 0.05 l/s, por lo que se puede decir que es prácticamente el mismo en ambos modelos (Tabla 5-30), es decir diferencias menores al 5%, los que se puede deducir que los resultados son los mismos.

Tabla 5-30 Comparación de caudales del modelo físico vs. IBER, de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 4.

	Q_{entrada} (l/s) en el modelo físico	Q_{salida} (l/s) en el modelo físico	Q_{entrada} (l/s) en el modelo IBER	Q_{salida} (l/s) en el modelo IBER
	3.75	3.75	3.7	3.7

Además, los tirantes entre los modelos coinciden en los puntos 1 y 2, el punto 3 presenta la máxima diferencia de 0.8 cm y para el punto 4 se presenta una diferencia de 0.1 cm (Tabla 5-31), en el caso del punto 3 es donde se presentó mayor inestabilidad del flujo, lo que dificulta su medición, sin embargo, los puntos 1 y 2 que son los laterales no presentan diferencia.

Tabla 5-31 Comparación de tirantes del modelo físico vs. IBER, de la rejilla de fierro fundido en condiciones del escenario 4.

	Punto	Dato experimental de tirante (m)	IBER (m)	Dato experimental de tirante (cm)	IBER (cm)
	1	0.019	0.019	1.9	1.9
	2	0.019	0.019	1.9	1.9
	3	0.011	0.019	1.1	1.9
	4	0.018	0.019	1.8	1.9

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados obtenidos en la campaña de experimentación y las simulaciones con el modelo hidrodinámico IBER, se da por concluido este trabajo y el documento en el que se plasmó toda la información obtenida, cumpliendo con los objetivos planteados, así mismo con los resultados y el análisis de estos, se comprobó la hipótesis, por lo que las principales conclusiones son las siguientes:

- ✓ Como conclusión principal se define que los coeficientes de descarga y en consecuencia la eficiencia depende del tirante que se presenta en la calle para los escenarios de sumidero libre, que por lo general terminó ahogándose para el caso de la tapa de concreto. Además, para los escenarios 3 y 4, los coeficientes de descarga dependen de la carga hidráulica.
- ✓ Respecto a la eficiencia se concluye que, para el brocal sin tapa, trabajando como sumidero libre, se obtiene una eficiencia del 20%, y para el escenario del sumidero ahogado, aumenta al 60% cuando el agua está prácticamente estancada. Sin embargo, a medida que se aumenta el caudal circulando por la calle hasta llegar a los 20 l/s, la eficiencia se reduce hasta el 20%, lo que demuestra que la velocidad en el flujo afecta la captación de agua por el brocal sin tapa, es importante en el análisis de las inundaciones en las calles.
- ✓ Para la tapa de concreto en sumidero libre, tiene una eficiencia del 2%, la cual para sumidero ahogado aumenta hasta el 10% cuando el agua está prácticamente estancada. Sin embargo, a medida que aumenta el caudal y la velocidad en la calle, la eficiencia tiende a bajar al 2%, demostrando que este tipo de tapas no están diseñadas para captar agua que fluye por la calle.
- ✓ Para la rejilla de fierro fundido funcionando como sumidero libre, presenta una eficiencia del 18%, y para sumidero ahogado se presenta una eficiencia de 40% en los caudales pequeños. Pero, a medida que aumentan los caudales, la eficiencia reduce al 18%, esto se produce debido al aumento de la velocidad del flujo. Aun así, este tipo de rejillas son adecuadas para la captación de agua pluvial. Demostrando que estas rejillas no son

adecuadas su uso en los brocales, que se requiere analizar su uso en las márgenes de las calles como bocas tormenta u otro tipo de rejillas que permitan mayor captación de agua.

- ✓ Respecto al coeficiente de descarga para el brocal sin tapa, operando como sumidero libre, resultó ser 0.74, mientras que para la tapa de concreto fue de 0.34, y para la rejilla de fierro fundido, 0.62, demostrando que la tapa de concreto no sirve para captar agua pluvial.
- ✓ Para el sumidero ahogada, los coeficientes de descarga para el brocal resultaron ser 0.11, para la tapa de concreto de 0.15, resultando no aptas para su uso en la captación de agua de lluvia. Mientras que, para la rejilla de fierro fundido, el coeficiente fue de 0.62, resultando ser el mismo coeficiente para sumidero libre y sumidero ahogado.
- ✓ Para el caso de la surgencia ahogada, tomando como referencia el caudal máximo de 20 l/s, en la calle, los coeficientes de descarga resultantes fueron de 0.68, 0.55 y 0.63, para el brocal sin tapa, la tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido, respectivamente. Donde la tapa de concreto, al ser desplazada solo parte de ella del brocal esto reduce parte del área hidráulica, motivo por el cual su coeficiente es bajo e incrementa la presión de surgencia en la tubería de drenaje.
- ✓ En el caso de la surgencia libre, se obtuvieron los coeficientes de descarga de 0.59, 0.10 y 0.55 para el brocal sin tapa, la tapa de concreto y la rejilla de fierro fundido, respectivamente. Las variaciones de los coeficientes de descarga de la tapa de concreto se deben a que, sus orificios no permiten la salida de flujo que lo que provoca que se aumente la presión en las tuberías cuando estas trabajan a presión.
- ✓ En surgencia ahogada, la tapa de concreto es removida del brocal cuando se tiene una presión de 39 cmca. Sin embargo, la rejilla de fierro fundido, al tener bisagra, no es removida del brocal, pero empieza a abrirse con una presión de 35 cmca. Además, la ubicación de la bisagra también afecta el rendimiento de la tapa.
- ✓ Cuando el sistema trabaja en surgencia libre, la tapa de concreto inicia su desplazamiento cuando se presenta una presión de 36 cmca, requiriendo de una presión de 39 cmca, para que sea removida del brocal. Mientras que la rejilla de fierro fundido inicia su abertura cuando se presenta una presión de 36 cmca. Estos valores son importantes en el análisis de

Conclusiones y recomendaciones

la interacción 1D-2D en el diseño de SUDS, ya que permiten identificar el momento en que empieza a circular flujo por surgencia sobre la calle.

- ✓ Respecto al uso del modelo de simulación bidimensional, alimentado con los datos experimentales, permitió reproducir de forma adecuada los fenómenos, lo que garantiza que los resultados sean confiables si se requiere realizar más escenarios con caudales diferentes en el modelo a escala.
- ✓ Respecto a las simulaciones con las dimensiones del prototipo, escalando los resultados de tirante, velocidad y caudal, así como la rugosidad se demostró que, con las escalas de semejanza utilizadas para alimentar el modelo de simulación, se obtuvieron resultados que confirman lo observado experimentalmente.

RECOMENDACIONES.

Una vez que se observaron las limitaciones para realizar los experimentos y desarrollar la presente investigación, se presentan las siguientes recomendaciones para complementar y ampliar el trabajo desarrollado.

- ✓ Realizar diferentes arreglos de rejillas y experimentar con ellas hasta obtener la geometría óptima, para el caso de la eficiencia de captación también considerar la orientación con la cual mejore su funcionamiento para los cuatro escenarios presentados en este trabajo.
- ✓ Para completar el estudio es necesario experimentar con diferentes tipos de rejillas boca de tormenta, para obtener la eficiencia en conjunto y su combinación con la rejilla al centro de la calle, y los efectos en el acoplamiento de sistemas 1D-2D.
- ✓ Se debe Implementar en el modelo físico caudalímetros, dispositivos electrónicos para medir presión y equipos de mayor precisión para medir los tirantes en la calle y en el perímetro del brocal, que sean de forma automática.
- ✓ Agregar sedimentos y partículas que simulen la basura en la experimentación para observar su comportamiento en los escenarios de sumidero libre y ahogado, así como trabajando en surgencia libre y ahogada.
- ✓ Incorporar los coeficientes de descarga en el diseño en un proyecto de drenaje pluvial (caso de estudio real), analizando los puntos proclives a inundación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referencias bibliográficas

- Alcantarillado de fierro fundido (19 de junio de 2023)., FARREMEX. <https://goo.su/BmMI37>
- Aragón, J. (2013). Modelación numérica integrada de los procesos hidráulicos en el drenaje urbano. [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya]. Repositorio institucional de la Universitat Politècnica de Catalunya <http://hdl.handle.net/2117/95059>
- Arreguin C. F. & Alcocer Y. V. H. (2011). Diseño hidráulico de vertedores. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Bates, P., & De Roo, A. P. J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of hydrology*, 236(1-2), 54-77. <https://n9.cl/kwbq4>
- Bazin, P. H., Nakagawa, H., Kawaike, K., Paquier, A., & Mignot, E. (2014). Modeling flow exchanges between a street and an underground drainage pipe during urban floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(10). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000917](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000917)
- Becerril J. M. (2020). *Diseño de una herramienta hidroeinformática de sistemas urbanos de drenaje sostenible* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México]
- Bertoni, J. C., & Maza, J. A. (2004). Aspectos asociados a las inundaciones urbanas en Argentina. *Inundaciones Urbanas en Argentina*, Bertoni, JC (org.). <https://acortar.link/cuOpXK>
- Bieri, M., Jenzer, J., Kantoush, SA., & Boillat, JL (2009, del 9-14 de agosto). Large scale particle image velocimetry applications for complex free surface flows in river and dam engineering [coferencia]. *33rd IAHR Congress: water engineering for a sustainable environment*. Vancouver, British Columbia, Canadá. <https://n9.cl/3tf01>
- Bradley, A., Kruger, A., Meselhe, E., & Muste, MV (2002). Flow measurement in streams using video imagery. *Water resources research*, 38(12). 51-1-51-8. <https://doi.org/10.1029/2002WR001317>
- Brocales de concreto: precio y características (19 de junio de 2023)., Tubos para Drenaje. <https://goo.su/BTiQzh1>
- Chail, T. & Draxler R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? –Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geosci. Model Dev.*, 7, 1247–1250, <http://doi:10.5194/gmd-7-1247-2014>
- Charlesworth, S. M., Harker, E. & Richard, S. (2003). A Review of Sustainable Drainage System (SUDS): A Soft Option for Hard Drainage Questions?. *Geography*, 99-107. <http://www.jstor.org/stable/40573828>
- Chen, A., Leandro, J., & Djordjević, S. (2015). Modelling sewer discharge via displacement of manhole covers during flood events using 1D/2D SIPSON/P-DWave dual drainage simulations. *Urban Water Journal*, 13(8), 830-840. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1041991>

- Chicco, D., Warrens, M. J., & Jurman, G. (2021). The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation. *PeerJ Computer Science*, 7, e623. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>
- Chocat, B. (1997). Aménagement urbain et hydrologie, *La Houille Blanche*, 83(7), 12-19. <https://doi.org/10.1051/lhb/1997057>
- Cengel, Y. A., & Cimbala J. M. (2018). *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. McGraw-Hill.
- Comisión Nacional del Agua (2015), Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Drenaje Pluvial Urbano (19). <http://cmx.org.mx/wp-content/uploads/MAPAS%202015/libros/SGAPDS-1-15-Libro19.pdf>
- Concha, R., y Gómez, M. (2009, del 27 al 28 de octubre). Una aproximación a la modelización del Drenaje Dual Urbano mediante EPA SWMM 5.0 [conferencia]. Jornadas de Ingeniería del Agua 2009, Madrid, España. <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2009/fs/CP07rev.pdf>
- Creutin, J, Muste, M., Bradley, A., Kim, S., & Kruger, A. (2003). River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River. *Journal of Hydrology* 277 (3-4), 182-194. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00081-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00081-7)
- Dawson, R., Speight, L., Hall, J., Djordjevic, S., Savic, D., y Leandro, J. (2008). Attribution of flood risk in urban areas. *Journal of Hydroinformatics*, 10(4), 275-288. <https://doi.org/10.2166/hydro.2008.054>
- Djordjević, S., Prodanović, D., & Maksimović, Č. (1999). An approach to simulation of dual drainage. *Water science and technology*, 39(9), 95-103. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00221-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00221-8)
- Djordjević, S., Prodanović, D., Maksimović, Č., Ivetić, M., & Savić, D. (2005). SIPSON—Simulation of Interaction between Pipe flow and Surface Overland flow in Networks. *Water Science and Technology*, 52(5), 275-283. <https://grafar.grf.bg.ac.rs/handle/123456789/94>
- Djordjević, S., Saul, A., Tabor, G., Blanksby, J., Galambos, I., Sabtu, N., & Sailor, G. (2013). Experimental and numerical investigation of interactions between above and below ground drainage systems. *Water Science and Technology*, 67(3), 535-542. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.570>
- Dolz J. y Gómez, M. (1994). Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores. *Ingeniería del agua*, 1(1), 55-66. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2631>
- Dongwoo, K. (2015). Mitigation Effects on Urban Flood by Installing an Underground Storage Box. <https://acortar.link/pkBT9q>
- Echávez A. G. (1996). Introducción a los Modelos Hidráulicos de Fondo Fijo y a la Ingeniería Experimental. Universidad Nacional Autónoma de México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, Asociación Mexicana de Hidráulica.

Referencias bibliográficas

- Falconer, R., Cobby, D., Smyth, P., Astle, G., Dent, J., & Golding, B. (2009). Pluvial flooding: new approaches in flood warning, mapping and risk management. *Journal of Flood Risk Management*, 2(3), 198-208. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2009.01034.x>
- Fernández, J. M., (2012). Técnicas numéricas en ingeniería de Fluidos. Reverté
- Fox, J., & Belcher, B. (2011). Comparison of macroturbulence measured using decomposition of PIV, ADV and LSPIV data. *Journal of Hydraulic Research*, 49 (1), 122-126. <https://doi.org/10.1080/00221686.2010.535704>
- Fraga, I. (2015). *Desarrollo de un modelo dual 1D/2D para el cálculo del drenaje urbano: Modelo numérico y validación experimental* [Tesis doctoral, Universidad da Coruña] Repositorio Universidad de Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/14727>
- Fujita, I., & Aya, S. (2000). Refinement of LSPIV technique for monitoring river surface flows. In *Building Partnerships* (pp. 1-9). <https://acortar.link/hQEY3e>
- Giles, R. V. (1969). Mecánica de los fluidos e hidráulica. McGraw-Hill.
- Giraldo Gómez, E. (2000). ¿Combinar o separar? Una discusión con un siglo de antigüedad y de gran actualidad para los bogotanos. *Revista de Ingeniería*, (11), 21-30. <https://acortar.link/fdL9Pm>
- Gómez, M., & Russo, B. (2010). Eficiencia hidráulica de rejillas transversales continuas [conferencia]. *Jornadas de Ingeniería del Agua 2009*, Madrid, España. <http://www.ingenieriadelagua.com/2004/JIA/Jia2009/fs/CP14rev.pdf>
- Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W., Bradley, A., Muste, M., Creutin, J.D., & Wilson, M. (2008). Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Based Method. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13 (2), 105-110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:2\(105\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(105))
- Jahanbazi, M., & Egger, U. (2014). Application and comparison of two different dual drainage models to assess urban flooding. *Urban Water Journal*, 11(7), 584-595. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2013.871041>
- Jang, J. H., Chang, T. H., & Chen, W. B. (2018). Effect of inlet modelling on surface drainage in coupled urban flood simulation. *Journal of Hydrology*, 562, 168-180. <https://acortar.link/ddvfSw>
- Jasek, M., Muste, M., & Ettema, R. (2001). Estimation of Yukon River discharge during an ice jam near Dawson City. *Canadian Journal of Civil Engineering* 28(5), 856-864. <https://doi.org/10.1139/101-050>
- Jiang, Y., Zevenbergen, C., & Ma, Y. (2018). Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and "sponge cities" strategy. *Environmental science & policy*, 80, 132-143. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.016>
- Kantoush, S., De Cesare, G., Boillat, J., & Schleiss, A. (2008). Flow field investigation in a rectangular shallow reservoir using UVP, LSPIV and numerical modelling. *Flow*

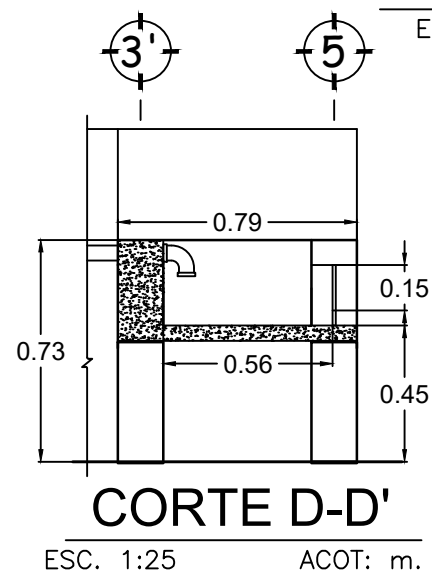
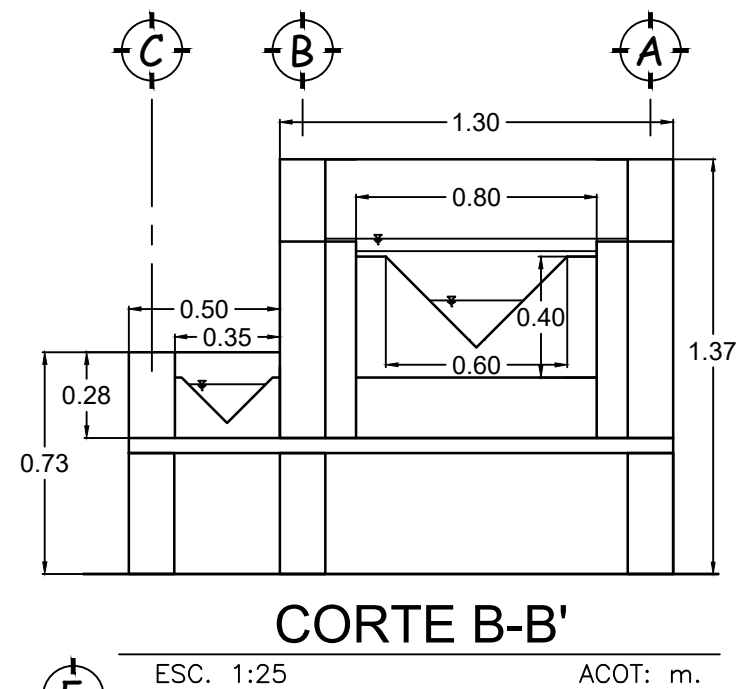
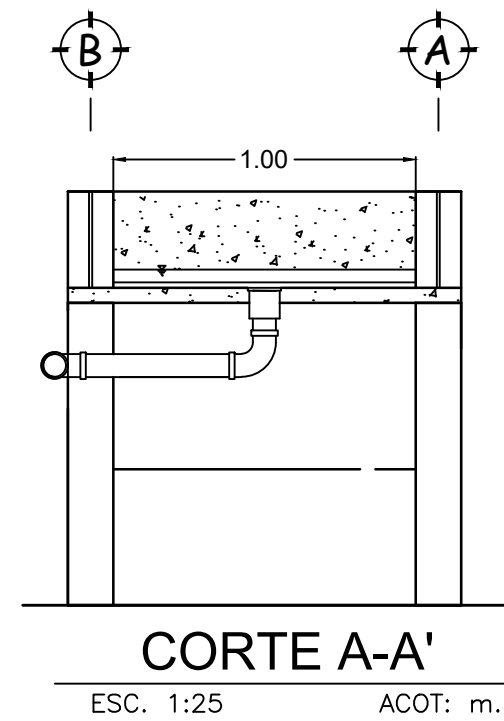
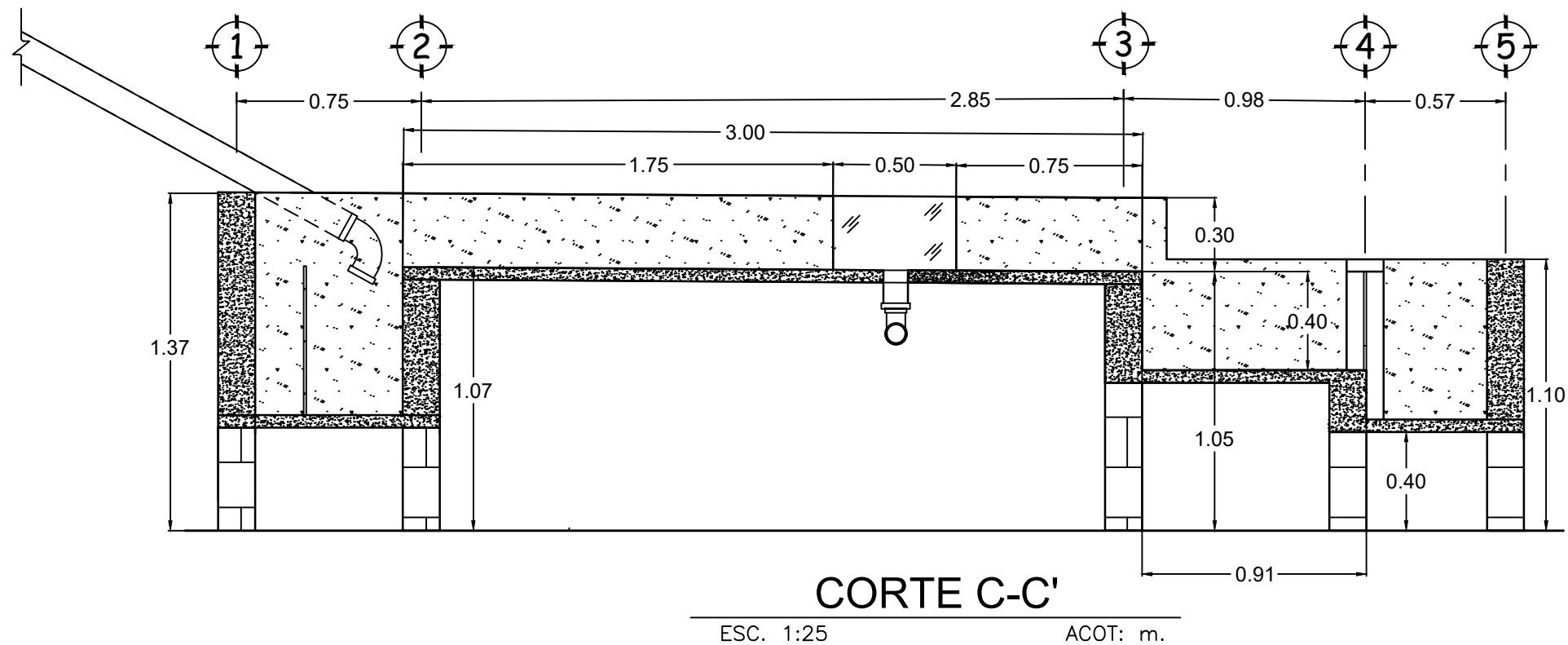
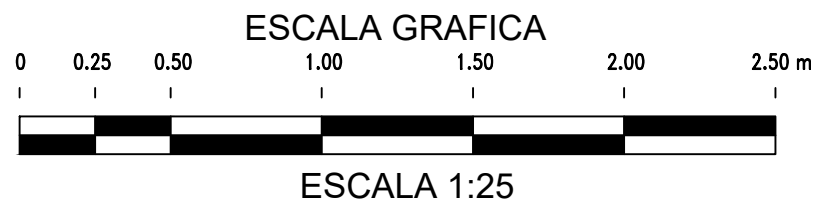
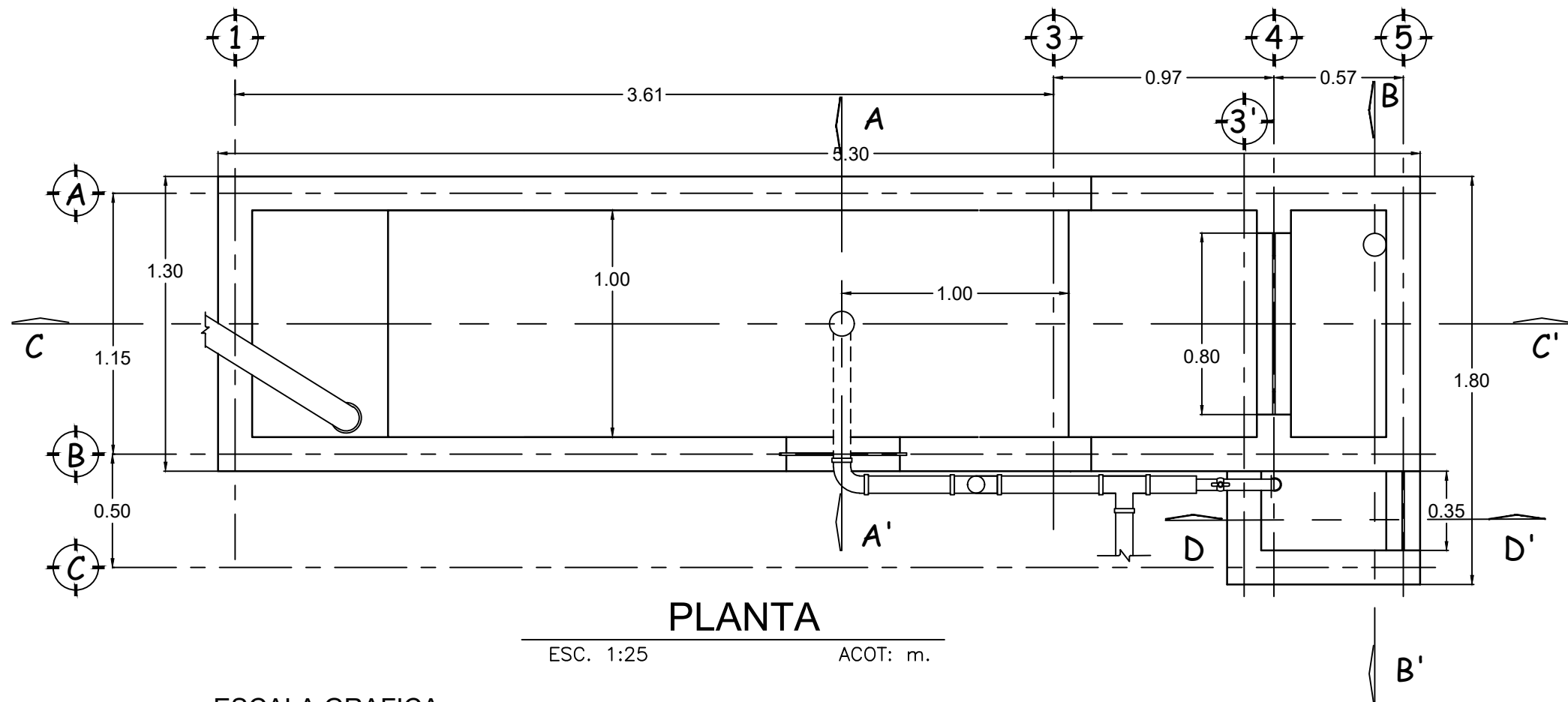
- measurement and Instrumentation*, 19(3-4), 139-144.
<https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2007.09.005>
- Leandro, J., Chen, A., Djordjević, S., & Savić, D. A. (2009). Comparison of 1D/1D and 1D/2D coupled (sewer/surface) hydraulic models for urban flood simulation. *Journal of hydraulic engineering*, 135(6), 495-504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000037](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000037)
- Leandro, J., Schumann, A., & Pfister, A. (2016). A step towards considering the spatial heterogeneity of urban key features in urban hydrology flood modelling. *Journal of Hydrology*, 535, 356-365. <https://acortar.link/cDg5DW>
- Lee, S., Nakagawa, H., Kawaike, K., & Zhang, H. (2012). Study on inlet discharge coefficient through the different shapes of storm drains for urban inundation analysis. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 68(4), I_31-I_36. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/68/4/68_6/_pdf
- Lee, S., Nakagawa, H., Kawaike, K., & Zhang, H. (2013). Experimental validation of interaction model at storm drain for development of integrated urban inundation model. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 69(4), I_109-I_114. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejhe/69/4/69_19/_pdf
- Lorenzetti, C. (2012). Propuesta de un programa de mantenimiento preventivo para la manutención, limpieza y recuperación hidráulica de las tuberías de alcantarillado sanitario y pluvial en las empresas sanitarias [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/302513/lorenzetti_lc-pub-delfos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. B., & Djordjević, S. (2004). Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. *Journal of hydrology*, 299(3-4), 284-299. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.014>
- Martins, R., Kesserwani, G., Rubinato, M., Lee, S., Leandro, J., Djordjević, S. & Shucksmith, J. D. (2017). Validation of 2D shock capturing flood models around a surcharging manhole. *Urban Water Journal*, 14(9), 892-899. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2017.1279193>
- Morales, R. V. (2016). *Análisis de estudios experimentales realizados por el Instituto Nacional de Hidráulica, Chile, sobre sumideros de aguas lluvias*. [Tesis de Licenciatura, Universidad de Chile] <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140494>
- Mur Abad, M. J. (2002). Estudio de la influencia de la geometría sobre la capacidad de captación de una reja/imbornal. <http://hdl.handle.net/2099.1/5822>
- Muste, M., Xiong, Z., Schöne, J., & Li, Z. (2004). Validation and Extension of Image Velocimetry Capabilities for Flow Diagnostics in Hydraulic Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (3), 175-185. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:3\(175\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:3(175))

Referencias bibliográficas

- Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environment. *Water Resources Research* 44 (4), 1-14. <https://doi.org/10.1029/2008WR006950>
- Muste, M., Ho, H. C., & Kim, D. (2011). Considerations on direct stream flow measurements using video imagery: Outlook and research needs. *Journal of Hydro-environment Research*, 5(4), 289-300. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2010.11.002>
- Neal, J., Fewtrell, T., & Trigg, M. (2009). Parallelisation of storage cell flood models using OpenMP. *Environmental Modelling & software*, 24(7), 872– 877. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.12.004>
- Pérez Díaz, J. M. (2015). Análisis de la eficiencia de rejillas de aguas pluviales mediante técnicas CFD [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Valencia] Repositorio Institucional UPV. <https://n9.cl/x0reo>
- Rubinatto, M. (2015). Physical scale modelling of urban flood systems. Department of Civil and Structural Engineering University of Sheffield. <https://core.ac.uk/download/pdf/30268289.pdf>
- Rubinatto, M., Martins, R., Kesserwani, G., Leandro, J., Djordjević, S., & Shucksmith, J. (2017). Experimental calibration and validation of sewer/surface flow exchange equations in steady and unsteady flow conditions. *Journal of Hydrology*, 552, 421-432. <https://acortar.link/SmEaco>
- Rubinatto, M., Martins, R., & Shucksmith, J. D. (2018). Quantification of energy losses at a surcharging manhole. *Urban Water Journal*, 15(3), 234-241. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2018.1424217>
- Rubinatto, M., Nichols, A., Peng, Y., Zhang, J. M., Lashford, C., Cai, Y. P., ... & Tait, S. (2019). Urban and river flooding: Comparison of flood risk management approaches in the UK and China and an assessment of future knowledge needs. *Water science and engineering*, 12(4), 274-283. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.12.004>
- Sanz Ramos, M., Cea Gómez, L., Bladé i Castellet, E., Lopez Gomez, D., Sañudo Costoya, E., Corestein Poupeau, G., ... & Aragón Hernández, J. L. (2022). Iber v3: manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones. [10.23967/iber.2022.01](https://doi.org/10.23967/iber.2022.01)
- Sañudo, E., Cea, L., & Puertas, J. (2020). Modelling pluvial flooding in urban areas coupling the models Iber and SWMM. *Water*, 12(9). 26-47. <https://doi.org/10.3390/w12092647>
- Schmitt, T., Thomas, M., & Ettrich, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of hydrology*, 299(3-4), 300-311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.012>
- Schreider, S. Y., Smith, D. I., & Jakeman, A. J. (2000). Climate change impacts on urban flooding. *Climatic Change*, 47, 91-115. <https://acortar.link/xL6z9h>
- Seyoum, S. D., Vojinovic, Z., Price, R. K., & Weesakul, S. (2012). Coupled 1D and noninertia 2D flood inundation model for simulation of urban flooding. *Journal of hydraulic engineering*, 138(1), 23-34. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000485](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000485)

- Sotelo, A. G. (2002). Hidráulica de Canales. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Sotelo, A. G. (2007). Hidráulica General I: Fundamentos. Limusa.
- Triola M. F. (2009). Estadística. Pearson educación.
- Tucci, C.E.M. (1994). Enchentes Urbanas no Brasil, Revista da Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 12/Nº 1, 117-136.
- USBR (1960). Design of Small Dams. A Water Resources Technical Publication. <https://luk.staff.ugm.ac.id/USBR/SmallDams.pdf>
- Vaca Umaña, M. A. (2016). Aplicación de un modelo probabilista para el estudio de eventos de inundación en una cuenca urbana [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59918>
- Wang, Y., Chen, A., Fu, G., Djordjević, S., Zhang, C., & Savić, D. (2018). An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information sources and urban features. Environmental modelling & software, 107, 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.010>
- Weather (2021). *Climate and Catastrophe Insight*. <https://www.aon.com/weather-climate-catastrophe/2021>
- Webster, A. L. (2001). Estadística aplicada a los negocios y la economía. McGraw-Hill.
- Willmott, C. J., & Matsuura K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate research, 30(1), 79-82. <https://www.int-res.com/abstracts/cr/v30/n1/p79-82>
- Yan, D., Lui, J., Shao, W., & Mei C. (2020). Evolution of Urban Flooding in China. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 383, 193-199. <https://piahs.copernicus.org/articles/383/193/2020/>
- Zhao, C. H., Zhu, D. Z., & Rajaratnam, N. (2004). Supercritical sewer flows at a combining junction: A model study of the Edworthy trunk junction, Calgary, Alberta. Journal of Environmental Engineering and Science, 3(5), 343-353. <https://doi.org/10.1139/s04-019>

Anexo A



 		
Universidad Autonoma del Estado de México Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua		
TÍTULO DEL PLANO: DISEÑO HIDRÁULICO		
Diseño y dibujó: Ing. Abel Santiago Fuentes Ced. Prof. 7115574		
Revisó: Dr. Humberto Salinas Tapia		
FECHA DE EMISIÓN: Agosto-2022	ADOTACIÓN: METROS ARCHIVO ELECTRONICO: ----	PLANO CLAVE: HID_01