



FACULTAD DE INGENIERIA

Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

Protocolo de Operación Hidráulica con Compuertas en Alcantarillados

Presentado por:

Ing. Henry Alberto Córdoba Romero

Director

Ing. William Clavijo Sanabria, MSc.

Bogotá D.C.

Mayo de 2012

Carta de Aprobación

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “PROTOCOLO DE OPERACIÓN HIDRÁULICA CON COMPUERTAS EN ALCANTARILLADO, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil, para optar el Título de Magister en ingeniería Civil, fue aprobado por:

Director

Ing. Hector William Clavijo Sanabria

Jurado 1

Ing. Juan Carlos Penagos

Jurado 2

Ing. Felipe Hernandez Cruz

Protocolo de Operación Hidráulica con Compuertas en Alcantarillados

Henry Alberto Córdoba Romero

La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores-investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi padres quienes me dieron su apoyo y espacio para la realización de este trabajo, también a la Pontificia Universidad Javeriana y a la Dirección Ingeniería Especializada del Acueducto de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá por la información suministrada, por último pero no menos importante al Ingeniero William Clavijo quien con su paciencia y dedicación colaboró de manera activa en la realización de este proyecto.

RESUMEN

Incluir los dispositivos de control hidráulico en las redes de alcantarillado mejora el funcionamiento de una red, evitando el almacenamiento de sedimentos y controlando los niveles de agua para eventos históricos. Por esta razón las investigaciones se enfocan en el lavado de sedimentos por medio de compuertas sin tener en cuenta los niveles de sobrecarga sobre la red.

Para la operación con compuertas deslizantes verticales se realizan dos análisis, el primero verificando niveles creados por el movimiento en la compuerta (local) y el segundo es una red de alcantarillado de una zona específica (global). Estas compuertas se colocaron a la salida de la red, cuya operación se basa en los caudales máximos analizados en la red y verificando los niveles hacia aguas arriba, logrando lavados importantes.

A nivel local se realizó un análisis con respecto a los niveles que se generan aguas arriba y aguas abajo en flujo permanente y flujo gradualmente variado. El análisis aguas arriba de la compuerta se utilizó para verificar los niveles del agua que se forman sobre una red y los cuales no deben ser mayores a la mitad de la altura máxima de los manholes o pozos de inspección, adicionalmente se realizó un modelo físico con el cual se experimentó la operación de la compuerta y realizar comparaciones con las condiciones hidráulicas encontradas con los análisis en flujo gradualmente variado.

Los resultados a nivel local determinan una serie de perfiles hidráulicos que no coinciden con el modelo físico, por el contrario se observó un flujo orificio, el cual se crea al tener aperturas baja de la compuerta y fue base para realizar un análisis del arrastre de sedimentos, mientras que para el análisis global sobresalen los niveles bajos de agua en la red para aperturas medias y altas de compuerta.

Finalmente se consolida un protocolo de operación con compuertas dando solución con respecto a los efectos generados a nivel local y global. En algunos casos la operación generaría un almacenamiento en la tubería, pero en un corto tiempo se lograría un buen lavado de sedimentos, creando también condiciones aguas arriba de la compuerta que genere niveles que no sean más altos que la mitad del manhole.

Palabras claves: Protocolo de operación, compuertas deslizantes verticales, control en alcantarillados, lavados de sedimentos.

ABSTRACT

Control devices include hydraulic sewer networks improves the functioning, avoiding the storage of sediment and controlling water levels in a network, historic events. For this reason, the recent research focuses on the sediment flush by control devices as hydraulic gates, without analysis on system water levels.

For operation with vertical slide gates are performed two analyzes, the first verify levels created by the movement in the gate (local) and the second is a sewerage system in a specific area (global). These gates were placed at the output of the network, whose operation is based on peak flows analyzed in the network and verifying the level upstream, making washes on the drainage system.

At the local level was analyzed with respect to levels that are generated upstream and downstream in constant flow and gradually varied flow. The analysis upstream of the gate was used to check water levels that form over a network and which should not be greater than half the maximum height of manholes or inspection wells additionally conducted a physical model experiment which the operation of the gate and make comparisons with the hydraulic conditions found with the gradually varied flow analysis.

The local results identify a number of hydraulic profiles that do not match the physical model, on the contrary, observed a flow orifice, which is created by having lower openings of the gate and was the basis for analysis of sediment transport, while for the global analysis protrude low water levels in the network for middle and upper openings gate.

Finally, consolidated operating protocol with gates giving solution with respect to the effects generated locally and globally. In some cases generate a storage operation in the pipeline, but in a shorter time would achieve a good washing of sediments, also creating conditions upstream of the gate I generated levels that are higher than half the manhole.

Keywords: Protocol operation, vertical slide gates, sewage control, washed sediment

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	16
1.1.	ANTECEDENTES	16
1.2.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2.1.	Problema	19
1.2.2.	Justificación	19
1.3.	OBJETIVOS	20
1.3.1.	Objetivo General	20
1.3.2.	Objetivos Específicos	20
2.	MARCO TEÓRICO	20
2.1.	CONCEPTOS GENERALES	20
2.1.1.	Condiciones a flujo libre en tuberías	21
2.1.2.	Energía específica	22
2.1.3.	Momentum	22
2.1.4.	Resalto hidráulico	23
2.1.5.	Flujo gradualmente variado	24
2.1.6.	Análisis dimensional	25
2.1.7.	Ecuaciones de continuidad	26
2.2.	ESTRATEGIAS DE CONTROL	27
2.2.1.	Concepto general	27
2.2.2.	Tipos de control	28
2.2.3.	Objetivos del control	29
2.3.	COMPUERTAS PARA REDES DE ALCANTARILLADOS	30
2.3.1.	Tipos de compuerta	30
2.3.2.	Aplicación de las compuertas en los alcantarillados	34
2.4.	Sedimentos en los alcantarillados	37

3.	METODOLOGIA.....	40
3.1.	ANÁLISIS LOCAL.....	41
3.1.1.	Resalto hidráulico.....	41
3.1.2.	Análisis con flujo gradualmente variado.....	42
3.1.3.	Aplicativo computacional.....	44
3.1.4.	Modelo físico.....	49
3.2.	ANÁLISIS GLOBAL.....	54
3.2.1.	Zona de implementación del análisis.....	55
3.2.2.	EPA SWMM 5.0.....	62
3.2.3.	Condiciones admisibles de operación.....	63
4.	RESULTADOS.....	65
4.1	Análisis local.....	65
4.1.1.	Esquemas de operación.....	65
4.1.2.	Esquemas de operación cualitativos.....	67
4.1.3.	Arrastre de sedimentos.....	76
4.2.	Análisis Global - Local.....	78
4.2.1.	Modelo en EPASWMM.....	78
4.2.2.	Análisis Dimensional.....	92
5.	PROTOCOLO DE OPERACIÓN HIDRÁULICA.....	97
5.1.	Condiciones de operación.....	97
5.2.	Objetivos de operación.....	97
5.3.	Reglas de operación.....	98
6.	CONCLUSIONES.....	92
7.	RECOMENDACIONES.....	93
8.	REFERENCIAS.....	94
9.	ANEXOS.....	97
A.	ANÁLISIS LOCAL.....	98

B.	FUNCIONES DE VISUAL BASIC PARA EL APLICATIVO OPERACIONAL.....	114
C.	GRAFICOS TIPO DE RESALTO CONTRA APERTURA DE COMPUERTA Y RESALTO HIDRÁULICO	117
D.	TABLAS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Perfiles del agua y del sedimento después de la apertura de la compuerta. Fuente: (Creaco, 2009)	17
Figura 2-2. Esquema de resalto hidráulico, Fuente: (Sturm, 2001)	24
Figura 2-3. Perfil de flujo gradualmente variado en un canal prismático, Fuente: (Chow 1959)..	25
Figura 2-4. Ciclo de operación reactivo y predictivo. Fuente: (Schutze et al. 2004)	29
Figura 2-5. Derecha, compuerta de desplazamiento vertical descendente . Izquierda, compuerta de desplazamiento horizontal. Fuente: (Meza 2008)	32
Figura 2-6. Derecha, compuerta de desplazamiento vertical ascendente. Izquierda, compuerta de desplazamiento axial de sector. Fuente: (Meza 2008)	32
Figura 2-7. Derecha, compuerta de desplazamiento axial tipo clapeta de eje inferior. Izquierda, compuerta de desplazamiento axial tipo clapeta de eje superior. Fuente: (Meza 2008)	33
Figura 2-8. Derecha, compuerta de desplazamiento axial tipo obturador. Izquierda, compuerta de desplazamiento axial al final de la descarga. Fuente: (Meza 2008).....	34
Figura 2-9. Derecha, compuerta de autolimpieza con desplazamiento axial cerrada. Izquierda, compuerta de autolimpieza con desplazamiento axial abierta. Fuente: (Meza 2008).....	34
Figura 2-10. Hydrass Gate, lavado (izquierda). Fuente (Ashley et al. 2005).....	35
Figura 2-11. Flap Gate, compuerta usada para los sistemas Hydrosel. Fuente (Meza, 2008)	36
Figura 2-12. Carga total de sedimentos en alcantarillados. Fuente (Ashley et al. 2005).	38
Figura 3-1. Esquema del resalto hidráulico, después de la operación de la compuerta hidráulica.	40
Figura 3-2. Diagrama de flujo del análisis local.	43
Figura 3-3. Pantalla inicial del aplicativo operacional de compuertas en alcantarillado.	44
Figura 3-4. Esquema de cálculo para el análisis de Runge-Kutta. Adaptado de (Chow, 1994)	45
Figura 3-5. Muestra inicial del aplicativo operacional de compuertas en alcantarillado, página de ingreso de datos.	46
Figura 3-6. Pantalla cálculo niveles después de la compuerta y nomenclatura de los perfiles hidráulicos.	46
Figura 3-7. Resultados de las características hidráulicas de cada una de los niveles encontrados.	47
Figura 3-8. Perfil resultado del aplicativo computacional.	47
Figura 3-9. Resultados del aplicativo computacional. Esquema de operación de la compuerta a partir del caudal del sistema.	48
Figura 3-10. Esquema conceptual con los valores esquemáticos del análisis.	49
Figura 3-11. Esquema del modelo físico.	50

Figura 3-12. Fotografía del montaje del circuito de tuberías de donde se extrae el agua para el ensayo.	50
Figura 3-13. Fotografía de modelo físico	51
Figura 3-14. Fotografía de la prueba realizada con el modelo físico.	52
Figura 3-15. Fotografía de la prueba realizada con el modelo físico.	52
Figura 3-16. Fotografía de la prueba realizada con el modelo físico.	53
Figura 3-17. Diagrama de flujo del análisis global.....	56
Figura 3-18. Zona de análisis ciudad de Bogotá D.C.- Colombia. Google earth. Recuperado en marzo 16 de 2012	55
Figura 3-19. Red pluvial y pozos de la red de alcantarillado de las UGAs 99, 60 y 61. Información de la EAAB. Archivo GvSig.	57
Figura 3-20. Ubicación de las estaciones pluviométricas. Google earth. Recuperado en marzo 16 de 2012.	58
Figura 3-21. Hietograma de entrada Estación Usaqué Santa Ana.	59
Figura 3-22. Hietograma de entrada Estación Laboratorio la Hormona.	59
Figura 3-23. Hietograma de entrada Estación Salitre Casa de Bombas.	59
Figura 3-24. Hietograma de entrada Estación San Luis.	60
Figura 3-25. Malla vial de la zona de afectación en la ciudad de Bogotá.....	61
Figura 3-26. Zona de implementación. En morado las áreas de afectación de cada estación sobre la zona de análisis. Vista en GvSig.	61
Figura 3-27. Zona de implementación. Red de alcantarillado que tiene la zona de afectación con los pozos principales que reciben el agua lluvia. Modelo en EPASWMM 5.0.	62
Figura 3-28. Zona de implementación. Áreas aferentes. Modelo en EPASWMM 5.0.....	63
Figura 4-1. Perfil del agua después de la compuerta (azul) y del resalto hidráulico (rojo) para una profundidad con una pendiente suave. Las líneas mostradas son, perfil supercrítico, la cota inferior de la tubería, la cota superior de la tubería, nivel crítico, el perfil subcrítico, la profundidad norma y el nivel aguas arriba.....	67
Figura 4-2. Esquema de operación 1, apertura antes del nivel crítico, pendiente horizontal y nivel aguas arriba $0.5d < Y1$	68
Figura 4-3. Esquema de operación 2, apertura antes del nivel crítico, pendiente horizontal y nivel aguas arriba entre la mitad y 1,2 veces el diámetro. $0.5d < Y1 < 1.2d$	69
Figura 4-4. Esquema de operación 3, apertura antes del nivel crítico, pendiente horizontal y nivel agua arriba mayor a 1.2 veces el diámetro. $Y1 > 1.2d$	69
Figura 4-5. Esquema de operación 5, apertura en zona 1, pendiente suave, para cualquier altura aguas arriba ($y1$).....	70

Figura 4-6. Esquema de operación 7, apertura en zona 3, pendiente suave, nivel de aguas arriba menor de la mitad del diámetro ($y_1 < D$).	70
Figura 4-7. Esquema de operación 8, apertura en zona 3, pendiente suave, nivel de aguas arriba entre la mitad del diámetro y 1.2 veces el diámetro ($0.5D < y_1 < 1.2D$).	71
Figura 4-8. Esquema de operación 9, apertura en zona 3, pendiente suave, nivel de aguas arriba mayor a 1.2 veces el diámetro ($y_1 > 1.2D$). A la Derecha perfil analítico, izquierda perfil conceptual.	71
Figura 4-9. Esquema de operación 10, apertura en zona 1, pendiente empinada, para cualquier nivel aguas arriba. Abajo el perfil analítico, arriba el perfil conceptual.	72
Figura 4-10. Esquema de operación 11, apertura en zona 2, pendiente empinada, nivel de aguas arriba entre 0 a 1.2 veces el diámetro ($0 < Y_1 < 1.2d$). Abajo el perfil analítico, arriba el perfil conceptual.	73
Figura 4-11. Esquema de operación 12, apertura en zona 2, pendiente empinada, nivel de aguas arriba mayor a 1.2 veces el diámetro ($Y_1 > 1.2d$). Abajo el perfil calculado, arriba el perfil conceptual.	73
Figura 4-12. Esquema de operación 13, apertura en zona 3, pendiente empinada, nivel de aguas arriba menor a la mitad del diámetro ($Y_1 < 0.5d$). A la Derecha perfil analítico, izquierda perfil conceptual.	74
Figura 4-13. Esquema de operación 14, apertura en zona 3, pendiente empinada, nivel de aguas arriba entre la mitad y 1,2 veces el diámetro ($0.5d < Y_1 < 1.2d$). A la Derecha perfil calculado, izquierda perfil conceptual.	75
Figura 4-14. Esquema de operación 15, apertura en zona 3, pendiente empinada, nivel de aguas arriba mayor a 1,2 veces el diámetro ($Y_1 > 1.2d$). A la Derecha perfil analítico, izquierda perfil conceptual.	75
Figura 4-15. Gráfica de fase I del nivel aguas arriba versus el tiempo. Con una apertura de compuerta constante (línea roja, son los datos medidos y línea azul, datos calculados).	76
Figura 4-16. Gráfica de fase II caudales y porcentaje de apertura contra el tiempo. Con una apertura de compuerta que se va moviendo en el tiempo.	77
Figura 4-17. Esquema de cálculo para la fase I y la fase II con la metodología de Runge-Kutta. Adaptado de (Chow et al., 1994)	79
Figura 4-18. Modelación de la red de alcantarillado, caudales que recorren la red con los eventos máximos ingresados.	80
Figura 4-19. Simulación de una compuerta con una apertura baja (20%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 30s.	81
Figura 4-20. Simulación de una compuerta con una apertura baja (20%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 1:30min.	81

Figura 4-21. Simulación de una compuerta con una apertura baja (20%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 2:30 min.	82
Figura 4-22. Simulación de una compuerta con una apertura baja (20%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 3:30 min.	82
Figura 4-23. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 30s.	83
Figura 4-24. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 1:30 min.	83
Figura 4-25. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 2:30 min.	84
Figura 4-26. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 3:30 min.	84
Figura 4-27. Simulación de una compuerta con una apertura alta (45%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 30 s.	85
Figura 4-28. Simulación de una compuerta con una apertura alta (45%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 1:30 min.	85
Figura 4-29. Simulación de una compuerta con una apertura alta (45%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 2:30 min.	86
Figura 4-30. Simulación de una compuerta con una apertura alta (45%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 3:30 min.	86
Figura 4-31. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 30 s.	87
Figura 4-32. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 1:30 min.	87
Figura 4-33. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 2:30 min.	88
Figura 4-34. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 3:30 min.	88
Figura 4-35. Simulación de la zona de implementación con un caudal máximo hidráulico de 742 l/s.	89
Figura 4-36. Simulación de una compuerta con una apertura baja (25%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 30 s, para un caudal menor al 50% del caudal máximo.	90
Figura 4-37. Simulación de una compuerta con una apertura baja (25%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 1:30 min, para un caudal menor al 50% del caudal máximo.	90
Figura 4-38. Simulación de una compuerta con una apertura baja (25%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 2:30 min, para un caudal menor al 50% del caudal máximo.	91

Figura 4-39. Simulación de una compuerta con una apertura baja (25%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 3:30 min, para un caudal menor al 50% del caudal máximo.	91
Figura 4-40. Simulación de una compuerta con una apertura baja (25%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 3:30 min, para un caudal menor al 50% del caudal máximo.	92
Figura 4-41. Relación dimensional entre y_1/D (relación aguas arriba) vs. y_2/D (relación de apertura de compuerta con respecto al diámetro, siendo las curvas los números de Froude equivalente)	94
Figura 4-42. Relación dimensional entre y_3/D (nivel del resalto respecto al diámetro) vs. y_2/D (apertura de la compuerta, respecto al diámetro.). Siendo las curvas los números de Froude equivalente	95
Figura 4-43. Relación dimensional entre tipo de resalto vs. y_2/D y tipo de resalto vs. y_3/D , para un valor equivalente al Froude de 0.439.	96
Figura 5-1. Esquema de operación con compuertas para una red troncal.	99
Figura 5-2. Esquema final protocolo de operación con compuertas para una red principal.	100
Figura B-1. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo del nivel aguas abajo.	114
Figura B-2. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo del caudal.	114
Figura B-3. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo del nivel aguas arriba.	115
Figura B-4. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo del nivel crítico.	115
Figura B-5. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo de la profundidad normal	116
Figura B-6. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo del tipo de resalto.	116
Figura C-1. Relación dimensional entre tipo de resalto vs. y_2/D y tipo de resalto vs. y_3/D , para un valor equivalente al Froude de 0.243.	117
Figura C-2. Relación dimensional entre tipo de resalto vs. y_2/D y tipo de resalto vs. y_3/D , para un valor equivalente al Froude de 0.386.	117
Figura C-3. Relación dimensional entre tipo de resalto vs. y_2/D y tipo de resalto vs. y_3/D , para un valor equivalente al Froude de 0.579.	118
Figura C-4. Relación dimensional entre tipo de resalto vs. y_2/D y tipo de resalto vs. y_3/D , para un valor equivalente al Froude de 0.579.	118

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. Tipos de resalto hidráulico (Chow 1959).	23
Tabla 2-2. Requisitos para la implementación de compuertas en la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá. Fuente (Meza, 2008).	36
Tabla 2-2. Requisitos para la implementación de compuertas en la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá. Fuente (Meza, 2008).	53
Tabla 3-1. Coordenadas de las estaciones.	58
Tabla 4-1. Resumen de operación y características hidráulicas ($D=1$) ($Q= 0.45\text{m}^3/\text{s}$)	65
Tabla 4-2. Resumen de operación y características hidráulicas ($D=1$) ($Y_1= 0.65\text{m}$)	66
Tabla 4-3. Numeración de los esquemas conceptuales de operación según la zona en que se encuentre la compuerta.	68
Tabla 4-4. Porcentaje de arrastre de sedimento según apertura de compuerta según la metodología de STSim (Schlütter, 1999) y la Fase I y Fase II de operación.	77
Tabla 5-1. Tabla de protocolos de operación hidráulica, con Pendiente subcrítica.	90
Tabla 5-2. Tabla de protocolos de operación hidráulica, con Pendiente subcrítica.	91
Tabla A-1. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q), la apertura de la compuerta (y_2), diámetro de la tubería de 0.5 m pendiente suave.	98
Tabla A-2. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y_2) con un diámetro de la tubería de 0.5m y pendiente suave.	99
Tabla A-3. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y_2) con un diámetro de la tubería de 0.5m y pendiente empinada.	100
Tabla A-4. Tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y_1) y la apertura de la compuerta (y_2) con un diámetro de la tubería de 0.5m y pendiente empinada.	101
Tabla A-5. Tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y_1) y la apertura de la compuerta (y_2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente empinada.	102
Tabla A-6. Continuación de la tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y_1) y la apertura de la compuerta (y_2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente empinada.	103
Tabla A-7. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y_2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente empinada.	104
Tabla A-8. Tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y_1) y la apertura de la compuerta (y_2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente suave.	105
Tabla A-9. Continuación de la tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y_1) y la apertura de la compuerta (y_2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente suave.	106

Tabla A-10. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente suave.	107
Tabla A-11. Tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente empinada.	108
Tabla A-12. Continuación tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente empinada.	109
Tabla A-13. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente empinada.....	110
Tabla A-14. Tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente suave.....	111
Tabla A-15. Continuación tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente suave. ..	112
Tabla A-16. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente suave.	113
Tabla D-1. Tabla de la operación de la compuerta en el modelo físico.	119
Tabla D-2. Tabla de la operación de la compuerta en el canal con pendiente horizontal.....	120
Tabla D-3. Tabla de la operación de la compuerta en el canal con pendiente horizontal.....	121

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Desde comienzos del siglo XIX en Europa (Francia e Inglaterra) se dio importancia a los controles en una red de alcantarillado. Lo anterior motivó en primer lugar medida el uso de tanques para deposición de sedimentos, cuyo mantenimiento en forma discontinua conllevó a una serie de problemas como la disminución de la capacidad hidráulica. Desde entonces, surgió la necesidad de incorporar reglas de operación en las redes de drenaje para mejorar las condiciones hidráulicas con las cuales son diseñadas las redes de alcantarillado (Bertrand-Krajewski, Bardin, Gibello, & Laplace, 2003).

También, la limpieza sobre la superficie de las calles y las campañas de concientización de la comunidad (Butler & Parkinson, 1997); además de la creación de nuevas tecnologías, se dio un giro de los conceptos que se manejaban en el siglo XIX que incluyeron nuevos temas como: ciclos de control (control loops), modelos de operación basados en la operación de dispositivos de control hidráulico tales como (Schutze et al. 2004): bombeos, compuertas y válvulas.

Los sistemas de control hidráulico en los países Europeos se han implementado con sistemas de control en tiempo real (RTC), cuyos modelos se basan en el proceso de datos para la toma de decisiones a partir de actuadores (compuertas, válvulas, bombas, etc.).

Las investigaciones que asocian el manejo de estos dispositivos de control hidráulico al lavado de los sedimentos dentro de la tubería, para hacer de los sistemas de alcantarillado autosostenibles y amigables con el medio ambiente (Delleur, 2003).

(Bertrand-Krajewski et al., 2003), (Campisano, Creaco, & Modica, 2004), han investigado los sistemas de control y regulación, teniendo como tema central las compuertas para autolavados. Empezando por las Hydrass gate, cuya implementación se realizó en la ciudad de Lyon – Francia (Ashley, Bertrand-Krajewski, Hvitved-Jacobsen, & Verbanck, 2005), con un análisis hidráulico y con respecto a unas modelaciones a partir de conceptos matemáticos basado en las ecuaciones de Saint-Venant, con las cuales demostraron la verificación de los perfiles del agua y del sedimento al momento del lavado (Bertrand-Krajewski, 2003).

En base a las compuertas implementadas en el sistema de alcantarillado francés, se revisó el comportamiento de los perfiles del agua y del sedimento, teniendo en cuenta que para hacer esta comparación se simuló una acumulación de sedimentos de 36 meses. Seguido, se verificó los fenómenos producidos por la compuerta en dos fases: i) con la compuerta cerrada y con un

almacenamiento aguas arriba, ii) con la descarga el agua almacenada, creando los perfiles hacia aguas abajo (figura 1.1) (Creaco & Bertrand-Krajewski, 2009).

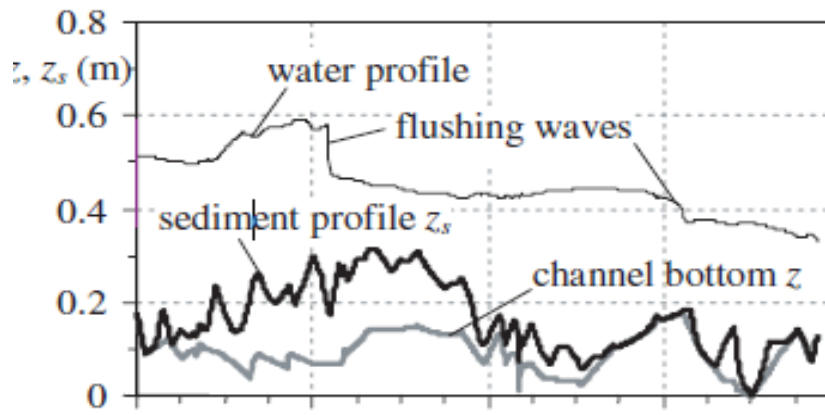


Figura 1-1. Perfiles del agua y del sedimento después de la apertura de la compuerta. Fuente: (Creaco & Bertrand-Krajewski, 2009)

La figura 1.1 es el perfil encontrado a partir de la modelación que se hace después de la compuerta, empezando con el movimiento del agua el cual se ve en línea continua delgada y más abajo se muestra el perfil del movimiento del sedimento, el cual se ve con una línea continua gruesa. Estos perfiles fueron verificados con respecto a las ecuaciones de arrastre de sedimento de Meyer Peter y Muller, Nilsen, Lacassagne y Kalinske (Creaco & Bertrand-Krajewski, 2009).

Por otro lado, las compuertas deslizantes también se han implementado para el estudio del lavado de los sedimentos en el laboratorio de la Universidad de Catania (Campisano et al., 2004), cuyo modelo montado consta con un canal rectangular con 39 m de largo. Experiencia que se realizó en dos partes, la primera sin sedimento para verificar y comparar el comportamiento de los niveles de agua con el modelo matemático estudiado que contiene las formulas de Meyer Peter y Muller y Kalinskey; luego, se adiciona piedras volcánicas simulando los sedimentos que se producen en un sistema de alcantarillado (Campisano, Creaco, & Modica, 2006).

Los modelos matemáticos que se estudiaron, verificaron y compararon los datos medidos en laboratorio, realizando en diferentes puntos del absidado hacia aguas abajo las medida y el pico más alto, concluyendo que entre más distancia menor arrastre (Campisano et al., 2004). Por otro lado, para el lavado en los alcantarillados también se concluyó que entre más pequeña sea la apertura hay un mejor lavado, operación que se realiza varias veces y registra mejores resultados

(Campisano, Creaco, & Modica, 2007).

Aunque no todas las investigaciones con compuertas se han usado para el lavado en las tuberías, también en Barcelona-España en 1998, la empresa Clavegueram de Barcelona S.A. implementó un sistema de control por medio de compuertas cuya regulación incorpora los siguientes elementos: medida de variables en distinto puntos de la red, adquisición de datos en el centro de control y análisis y decisión de las acciones a realizar por los actuadores en función de un modelo hidráulico (Ballester, Martí, & Salamero, 1998).

Estas decisiones que se toman para operar las compuertas, provienen de cuatro estrategias: donde la primera se verifica a partir de un monitoreo establecido en cada punto donde este la compuerta; la segunda decide el control debido al episodio de lluvia después de 5 minutos y verifica que compuerta debe abrirse y/o cerrarse; la tercera estrategia es la verificación de la lluvia en alguna de las zonas, donde se programa para volver abrir otra compuerta y cerrar las que estaba abierta, la estrategia final es la no realización de más movimientos porque la estrategia es optima (Ballester et al., 1998).

Con lo dicho, Europa en la última década del siglo XX ha sido un gran precursor de los modelos de control con compuertas con investigadores como Balleste (1998), Bertrand-Krajewski (2003), Barraud (2000), Schutze (2004), Campisano (2007), donde se cumplen objetivos específicos, tales como: lavados y la regulación del sistema. Controles que se enfocan en implementaciones numéricas que evalúan el cumplimiento de los objetivos.

En Asia también se han realizado trabajo afines cuyo objetivo es relacionar los datos de la red con una condición de operación (Zhou et al., 2007), simulaciones que se realizaron en diferentes puntos para luego al analizar de manera global una serie de niveles las cuales están en función de los caudales que entran al sistema, de esta forma garantizar una operación en tiempo seco y así poder mantener la capacidad hidráulica en el sistema para la temporada de lluvias.

Las compuertas deslizantes verticales se encontrarán a la salida de una red de drenaje (Campisano et al., 2007), siendo activadas automática o manualmente. Son también reguladoras de paso funcionando como controles de paso para derivar el aguas hacia otras cuencas o salidas (Marsalek et al., 1993) evitando llenados que puedan generar reboses o problemas hidráulicos. Sin embargo, basados en análisis locales y globales se podría tener una verificación de las profundidades que se generan, para así evitar sobreniveles en la red.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema

La infraestructura de los sistemas de drenaje o alcantarillado, son una forma de poder brindar salud y calidad de vida; donde la óptima operación de los dispositivos de control hidráulico brinde un servicio que mejore y haga rentable los sistemas de alcantarillado (Delleur, 2003).

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), cuenta con un sistema de alcantarillado con una red de drenaje que se distribuye en un 98% de la ciudad, pero el crecimiento de la ciudad hace ver la necesidad de estudiar la implementación de dispositivos de control hidráulico, los cuales ayuden a mejorar el funcionamiento de una red de alcantarillado donde se pueda aprovechar la mayoría de la capacidad existente en un sector de la red (Meza, 2008).

Por lo tanto, como problema a resolver es la configuración de un protocolo basado en los análisis global y local que sirva para determinar aperturas de compuerta, con el fin de mitigar efectos de sobrecarga sobre los niveles de agua en el sistema y permitir una mejora en los lavados de los sedimentos, los cuales deben ser considerados en un sistema de alcantarillado, debido al depósito, que crea problemas como reducción de la capacidad hidráulica y un incremento en la rugosidad del conducto (Ashley et al., 2005).

1.2.2. Justificación

La ingeniería en los últimos 20 años ha adquirido un gran desafío como es la interacción con el ambiente, en un contexto de estética, salud, y economía (Butler & Parkinson, 1997); lo cual motiva al momento de realizar proyectos urbanos que tengan una buena operación, con el fin de buscar rentabilidad y óptimo servicio a la comunidad (Delleur, 2003).

Una óptima operación para un sistemas de alcantarillado debe cumplir con una serie de objetivos (Quejada, 2011) como: la eficiencia hidráulica y el control de los niveles en una red, logrando procesos que hagan de la operación del sistema un proceso eficiente, que ayude a la regulación del sistema de alcantarillado, con respecto al caudal o al nivel formado antes de la compuerta.

Por estos motivos el análisis hidráulico con compuertas deslizantes verticales, deberá por medio de protocolos que regulen un sistema de drenaje urbano y así asumir en un futuro procedimientos con operaciones controladas que den funcionamiento y beneficie la capacidad hidráulica del sistema de alcantarillado que se estudie.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Diseñar un protocolo de operación hidráulica en compuertas de control de alcantarillado aplicable al Acueducto de Bogotá.

1.3.2. Objetivos Específicos

Aplicar los datos hidrológicos e hidráulicos en función de un sistema de alcantarillado.

Realizar el análisis dimensional de los parámetros del proceso de control hidráulico de las compuertas.

Modelar en flujo permanente, flujo gradualmente variado y resalto hidráulico una compuerta en funcionamiento.

Estructurar las reglas de operar un sistema de compuertas.

2 MARCO TEÓRICO

2.1. CONCEPTOS GENERALES

Las aguas que llevan las redes de alcantarillado tienen varios orígenes entre las cuales se encuentran:

- Aguas residuales domesticas
- Aguas residuales industriales
- Aguas lluvias.

Esta última proviene de la precipitación pluvial, cuyas aguas pueden contener una gran cantidad de contaminantes por la escorrentía superficial antes de llegar al sistema, contaminantes que pueden depositarse a lo largo de la tubería. Dependiendo del sistema y del tipo de alcantarillado los depósitos pueden ser mayores.

Existen tres tipos de sistemas de alcantarillado según el tipo de agua que se conduzca: sanitario, pluvial o combinado. Siendo los dos primeros la mejor opción para la conducción de las aguas residuales y lluvias por aparte, debido a que el caudal generado es diferente para cada sistema.

Por otro lado, los sistemas combinados; por ser éstos los más económicos, son ampliamente utilizados en los sistemas de drenaje de las grandes ciudades. Sin embargo genera reboses debido a los sedimentos y a los caudales que se pueden producir en temporada de lluvia.

En cada uno de los sistemas de alcantarillados, el análisis a flujo libre es una forma de verificar los niveles y el comportamiento del agua en los puntos de control. Comportamientos que pueden variar de diferentes formas y cuyo análisis depende de las condiciones de flujo que se formen.

En los sistemas a flujo libre, el cálculo de los niveles formados por un dispositivo de control hidráulico se realiza para estructurar las reglas y verificar los fenómenos formados desde un análisis local. La operación de la compuerta se definen con conceptos hidráulicos como: energía específica, cantidad de movimiento, resalto hidráulico y flujo gradualmente variado, para la verificación de los niveles del agua por el movimiento de la compuerta.

Luego se definen los caudales que cumplan las condiciones de operación para lograr identificar las estrategias que se utilicen, de esta forma cumplir los objetivos que definan como realizar un control con una compuerta. Por tratarse especialmente de la operación con compuertas se hace una reseña sobre el uso y los tipos de compuertas que hay en el mercado (ERBISTI, 2003), por otro lado al ser uno de los objetivos el lavado de los sedimentos se hace un recuento de los sedimentos en la red de alcantarillado.

Los conceptos mencionados se explican para ser usados y así establecer los pasos que se siguieron, para resolver el problema del protocolo de operación para compuertas.

2.1.1. Condiciones a flujo libre en tuberías

Por los cambios de nivel que se generan con respecto al flujo se puede hacer una clasificación de los tipos de flujo en canales abiertos con respecto al tiempo y al espacio. La clasificación se resume de la siguiente manera:

1. Flujo permanente
 - ✓ Flujo uniforme
 - ✓ Flujo variado
 - Flujo gradualmente variado
 - Flujo rápidamente variado
2. Flujo no permanente
 - ✓ Flujo informe no permanente

- ✓ Flujo no permanente
 - Flujo gradualmente variado no permanente
 - Flujo rápidamente variado no permanente

La diferencia entre los flujos permanente y no permanente se basa en el análisis que se realiza en tiempo y en el espacio con respecto a la variación de la profundidad, aunque para muchos casos de estudio se modela en flujo permanente, por otro lado los efectos que se crean en las corrientes naturales como crecientes y oleadas se verifican por medio del flujo no permanente (Chow, 1959).

Para esta investigación, el análisis usado para calcular los niveles del agua, se basan en el caudal o a en un nivel aguas arriba establecido con respecto a la energía específica del sistema.

2.1.2. Energía específica

Se define como la suma de la altura del nivel del agua y la cabeza de velocidad.

$$E = y + \frac{v^2}{2g} \quad [1]$$

Donde E = energía específica (m), y = es la altura del nivel del agua (m); v = es la velocidad (m/s), g = gravedad (m/s²).

Este concepto que se utilizó para calcular el nivel aguas arriba de la compuerta o el caudal del sistema, teniendo en cuenta que cualquiera de estos dos datos se tiene como dato de entrada. Para el análisis se estableció que antes y en la compuerta tiene la misma energía, debido a que se asumió que no hay una pérdida entre estas dos zonas de análisis. Los cálculos estarían en función de la apertura de la compuerta.

Al haber diferentes variaciones de niveles que se pueden generar por el movimiento de la compuerta en un punto específico donde se encuentre estructuras de control, que puedan generar resaltos hidráulicos.

2.1.3. Momentum

Este concepto es un complemento de las ecuaciones de energía, debido a que, hay un volumen definido y desconocimiento en las pérdidas. Si existen fuerzas externas actuantes que generan cambios en el momentum y por lo general cambios de nivel, el fenómeno del resalto hidráulico se analiza desde este concepto y con mayor razón si no se estudia en un canal prismático.

El momentum, a partir de la segunda ley de Newton que menciona las fuerzas externas que actúan en el flujo y generan variación de la cantidad de movimiento o momentum, como caso especial el flujo a través de una compuerta: donde existe una variación de alturas que hace necesario cuantificar el fenómeno en estudio, para verificación y/o control de las profundidades del flujo.

$$M = \bar{z}A + \frac{Q^2}{Ag} \quad [2]$$

Donde M = momentum, $\bar{z}$ = eje de referencia al centroide (m), A = área de la sección transversal (m^2), Q = caudal (m^3/s) y g = gravedad (m/s^2).

2.1.4. Resalto hidráulico

El concepto anterior se aplicó para verificar el fenómeno del resalto, por haber una variación abrupta desde un nivel bajo a un nivel alto (figura 2.2) en un sección transversal circular, adicional por el cambio en el tipo de flujo (supercrítico a subcrítico), los fenómenos locales en puntos críticos deben ser controlados para evitar deficiencias hidráulicas o daños en la estructura.

Estos fenómenos locales producen variaciones repentinas en el nivel del agua, fenómeno que ocurre con frecuencia a la salida de las compuertas de control y se puede caracterizar a partir del número de Froude de la siguiente forma:

Tabla 2-1. Tipos de resalto hidráulico (Chow 1959).

Tipo de resalto	Número de Froude		Descripción
	Menor	Mayor	
Crítico	0	1	No se forma resalto.
Ondulante	1	1.7	Presenta ondulaciones.
Débil	1.7	2.5	Se desarrolla una serie de remolinos, pero hacia aguas abajo permanece uniforme.
Oscilante	2.5	4.5	Se produce un resalto hasta la superficie y se devuelve sin ninguna periodicidad. Puede causar daños.
Estable	4.5	9	Ocorre prácticamente en la misma sección vertical. La acción y la posición del resalto lo hacen menos sensible a la variación del resalto hacia aguas abajo.
Fuerte	9	Mayores	La acción del resalto es brusca pero efectiva como dissipador de energía.

Para el cálculo del resalto siempre se requiere que la cantidad de movimiento en el punto donde el flujo es afectado por una compuerta y la cantidad de movimiento al final del resalto sea igual.

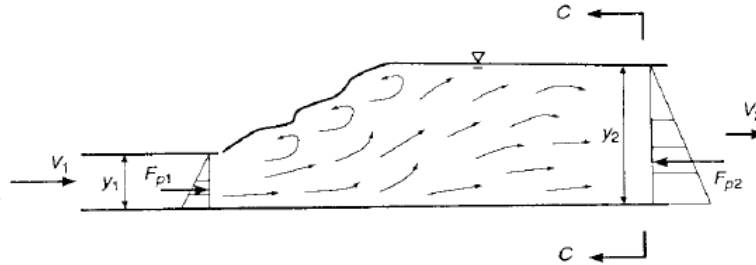


Figura 2-1. Esquema de resalto hidráulico, Fuente: (Sturm & Tuzson, 2001)

La longitud del resalto se calculó con la metodología de Silvester (ecuación 3) (1964) (García García, 2009), cuyos resultados han sido ajustados en el trabajo realizado por García, donde se midieron distintos tipos de resaltos entre libres y sumergidos, cuyos resultados fueron calibrados con los medidos.

$$L_r = 9.75 * (Fr_2 - 1)^{1.01} \quad [3]$$

Donde L_r = longitud del resalto (m) y Fr = número de Froude aguas abajo.

Después del análisis con flujo permanente, es necesario verificar la variación de los niveles que se producen después de la conformación del resalto, y el cual viaja a través de un conducto. Estos niveles se clasifican dependiendo de la profundidad crítica y la profundidad normal, debido a esto se hace un análisis de flujo gradualmente variado, para establecer el comportamiento del flujo en la red.

2.1.5. Flujo gradualmente variado

Es un tipo de flujo no uniforme en el que la variación en la profundidad en dirección del movimiento es lo suficientemente gradual para que la distribución de presiones pueda ser considerada como hidrostática, la dirección del flujo puede ser analizada en una sola dimensión y la metodología que desarrolla este tipo de flujos puede ser encontrada en regiones hacia aguas abajo después de algún control o estructura hidráulica en dirección del flujo (Sturm, 2001).

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_o - S_f}{1 - Fr^2} \quad [4]$$

Donde S_o = pendiente del canal (m/m), S_f = pendiente final (m/m) con respecto a la ecuación de Manning y Fr = número de Froude.

La variación de los niveles hacia aguas abajo muestra que para este tipo de flujo se tiene como caso general la diferencia de pendientes entre el lecho y la pendiente de la superficie de flujo, por otro lado la variación de energía con respecto al nivel depende de las propiedades hidráulicas del número de Froude. Por lo tanto la ecuación [4] muestra la forma de evaluar los niveles en flujo gradualmente variado donde depende de la geometría del canal.

Estas variaciones producen unas características con respecto al fondo del canal, los cuales crean dos casos posibles: el primer caso es un tipo de flujo subcrítico, cuando la altura del agua está por encima del nivel crítico, se tenga una pendiente empinada o suave; otro caso es el flujo supercrítico, que ocurre cuando el nivel está por debajo del nivel crítico.

Los niveles crítico y normal dependen de un caudal específico y de las condiciones del canal como: la pendiente y la geometría, estos niveles pueden clasificar los tipos de perfil formados, dependiendo de la ubicación del nivel del agua con respecto al nivel crítico y normal, cada uno de estos niveles se pueden denominar de 1 a 3; otro tipo de clasificación del perfil tiene que ver con la pendiente con las letras H, M y C que describen a una pendiente horizontal, suave y crítica respectivamente (figura 2-3).

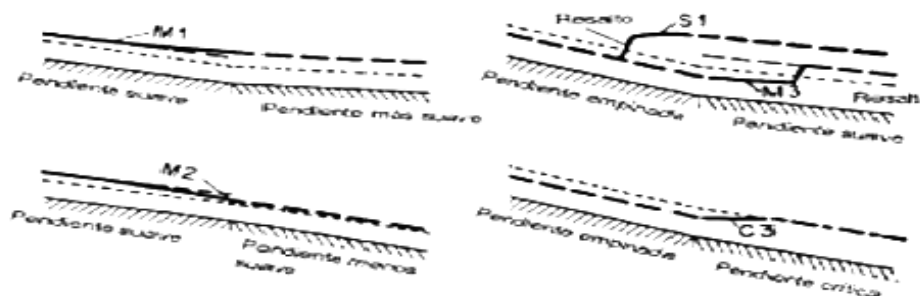


Figura 2-2. Perfil de flujo gradualmente variado en un canal prismático, Fuente: (Chow, 1959).

2.1.6. Análisis dimensional

Por otro lado los cálculos con los conceptos anteriores, muestran una serie de datos que se pueden clasificar con respecto a los caudales, diámetros y niveles aguas arriba; lo cual, no ayuda a dar claridad de un concepto que generalice el comportamiento de los niveles calculados. Razón

por la que se generaliza el comportamiento de los niveles del agua antes y después de la compuerta con un análisis dimensional.

Para generalizar los comportamientos de los niveles del agua al momento de operar una compuerta, se destaca: los niveles de agua antes y después de la compuerta, velocidad, las propiedades físicas del material, etc. Pero no solamente tener en cuenta las metodologías de cálculo será suficiente, debido a que entender la relación que puede haber entre cada variable, facilita el entendimiento del fenómeno y explica procedimientos experimentales que vinculan las diferentes formas de operar la compuerta.

La metodología utilizada es por medio del Teorema de Π de Buckingham que expresa: un problema que contenga n magnitudes en las que hay m dimensiones fundamentales, se puede agrupar en $n-m$ parámetros adimensionales. Las dimensiones fundamentales son: la masa (M), longitud (L) y tiempo (T) escogidas así porque la fuerza está relacionada con la masa, la longitud y el tiempo están relacionados con la teoría de movimiento de Newton. (Streeter et al. 1988).

Por otro lado el análisis no solamente es en base a una compuerta, sino también a evaluar una red de alcantarillado para encontrar los caudales que se forman en la red, las cuales servirán como condiciones de operación para una compuerta. Por lo cual, se usa metodologías a partir de las ecuaciones de continuidad, calculadas en base a análisis numéricos largos y complejos los cuales se evalúan en softwares especializados como el EPASWMM 5.0.

2.1.7. Ecuaciones de continuidad

Este tipo de ecuaciones son utilizadas en sistemas globales en donde la complejidad del sistema a modelar es un factor importante, también la influencia de estos modelos en la predicción de los fenómenos como por ejemplo, la influencia que se tiene aguas arriba de un sistema interconectado (Creaco, 2009).

La intención base es buscar un volumen de almacenamiento en un determinado tiempo que este comprendido entre abscisas, durante un instante de tiempo, obteniendo lo siguiente:

$$\frac{\partial A(x,t)}{\partial t} - \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = q(t) \quad [5]$$

Considerando la expresión cinco (5), en donde A = área transversal de la sección (m^2), Q =caudal líquido (m^3/s), x =distancia entre abscisas (m), t =el tiempo y el q =caudal exterior respectivamente, a partir de esta expresión se puede modelar tomando pequeñas cantidades homogéneas, adicional a las fuerzas de equilibrio y a las que están sometida la partícula que hacen

suponer un flujo incompresible. De igual forma esta expresión es la fase inicial para simular una onda dinámica, donde la principal deformación del perfil de la corriente, cuya frontera hacia aguas abajo es la fase de avance, de tal manera que cada intervalo de tiempo determina una función de gasto calculado en un punto sobre la longitud de avance. (Weyand, 2002).

Al estar considerando un flujo unidimensional se obtiene un sistema, de cinco incógnitas más conocido como el sistema de Barré De Saint-Venant:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) + (\varepsilon - 1)q \frac{U}{S} \quad [6]$$

Donde las variables son: U = velocidad media del sistema (m/s), t = tiempo (s), h = altura del agua (m), x = abscisa, I = pendiente (m/m), J = pérdida de carga (m/m), S = sección mojada (m²).

Con las ecuaciones 5 y 6 tenemos un sistema que para resolverlo se tendrá que hacer una serie de simplificaciones las cuales dependerá en gran parte a la metodología que se use como análisis, como por ejemplo: para la onda dinámica se eliminan los dos últimos términos de la ecuación 6 por ser este un modelo inercial y de rozamientos pequeños, la onda cinemática se eliminan los tres primeros términos de la ecuación 6, por este modelo que se rige por la inercia del sistema y menos por las fuerzas de rozamiento que actúan en el sistema. De lo anteriormente mencionado el modelo que más se utiliza es el de la onda cinemática por simular satisfactoriamente el funcionamiento de las redes de saneamiento mientras que el de la onda dinámica corresponde a ondas de alta frecuencia.

Con los anteriores conceptos se calculan los caudales que vayan por la red, los cuales se convierten en las condiciones de operación para el protocolo de operación de la compuerta y que van a definir como estrategias para cumplir objetivos dentro de una red de drenaje urbano.

2.2. ESTRATEGIAS DE CONTROL

2.2.1. Concepto general

Las estrategias de control se definen como una secuencia de controles que se deben seguir para una operación de un sistema y de esta forma cumplir con los objetivos propuestos en la red de un sistema de drenaje urbano en el caso particular que se está estudiando (Rodés, 1998).

Un sistema integrado de drenaje urbano contiene aspectos importantes como la variación de volúmenes y contaminación en su flujo, las cuales dependen del estado en que se encuentre la red. Para mantener un óptimo estado de operación se ponen estructuras hidráulicas en la entrada

y la salida de la red. Estas estructuras dependiendo de su función hacen tener variaciones en el flujo, las cuales deben ser monitoreadas y analizadas para un buen funcionamiento del sistema.

Todo el sistema de drenaje contiene una entrada, la red y la entrega que por lo general es una planta de tratamiento, cada uno de estos subsistemas contienen varios actuadores para realizar un control a partir de los niveles de los colectores y los niveles de lluvia de la zona (Meza, 2008).

Entre los actuadores más importantes hay (Schutze et al. 2004):

- Bombeos.
- Compuertas.
- Válvulas.
- Mecanismos para dosificación de químicos.
- Mecanismos de aireación.

Realizar un estricto control sobre los actuadores, exige mantener definida una serie de parámetros o secuencias que sirvan para un fin, por otro lado, las estrategias de control se han definido como pasos a seguir para una operación óptima y de esta forma conseguir los objetivos propuestos en la red de alcantarillado, para el caso particular que se está estudiando (Ballester, Martí, and Salamero 1998).

2.2.2. Tipos de control

Se pueden aplicar dos metodologías tales como un control global o local, siendo la ventaja de control local que los dispositivos de control hidráulico son más rápidos y seguros y a nivel global las decisiones pueden tomarse en varios puntos de la red sin importar cuando se implementen (Meza 2008).

Para implementar alguno de los análisis se debe tener un modelo de operación de acuerdo a comportamientos temporales o espaciales, debido a la gran variación que se tiene por ejemplo en los niveles de lluvia. Para citar un ejemplo; los tiempos de lluvia tienen niveles diferentes al tiempo seco, por lo tanto es necesario tener varios esquemas o procesos de operación para cada uno de estos eventos sin importar el tipo de control (local o global) (Quejada, 2011).

Estos procesos pueden ser esquematizados por medio de control loop (circuitos de control), los cuales se pueden implementar por medio de hardware que incluyen sensores, actuadores (monitores de evolución), dispositivos de control hidráulico

Este diagrama ilustra un sistema de control híbrido que integra un control reactivo y un control predictivo. El flujo principal de información es el siguiente:

- Un **Sensor** (representado por un cuadrado azul) recibe la señal de salida del sistema y la envía al **Procesador** (un rectángulo naranja).
- El **Procesador** envía la señal al otro **Sensor** (cuadrado azul), que a su vez envía la información al **Actuador** (un rectángulo rojo).
- El **Actuador** envía la señal al **Controlador** (un rectángulo amarillo).
- El **Controlador** envía la señal al **Procesador**.

Además, el sistema incluye dos bucles de retroalimentación:

- Un bucle **Reactivo** que toma las **Perturbaciones Registradas** (señal de entrada) y las envía directamente al **Controlador**.
- Un bucle **Predictivo** que toma los **Procesos Registrados** (señal de salida) y los envía directamente al **Controlador**.

Finalmente, el **Controlador** recibe una **Set point** (punto de ajuste) que sirve como referencia para el sistema.

La operación feedback o reactivo depende de obtener datos locales en el sistema y se compara con los set-point con lo cual se generan desviaciones para ser usadas en las respectivas ordenes de operación, por otro lado la operación feedforward o predictivo integra mediciones anticipadas para anticipar perturbaciones con respecto al set-point o también se usa una mezcla de ambos (Schutze et al., 2004). Lo anterior se puede integrar a las compuertas como: sistemas que restringen el flujo en un alcantarillado o a la salida de un tanque de detención.

Dentro de esos servicios se encuentra la red de drenaje urbano la cual debe cumplir una serie de requisitos frente a episodios de lluvia o cambios repentinos de caudal, en donde una regulación

hidráulica tenga la posibilidad de controlar los siguientes aspectos en espacio y tiempo: Criterio de inundaciones, Operación y mantenimiento de la red y Reducir la contaminación medioambiental (Marsalek et al., 1993).

Cada uno de estos aspectos son tenidos en cuenta para la aplicación de un análisis local o global, para un actuador específico como las compuertas y en donde se aplican diferentes estrategias y así encontrar la mejor distribución de flujo en una red de drenaje urbano.

Las aplicaciones prácticas tienen como principales objetivos (Schutze et al., 2004): Evitar las crecientes, evitar la igualación de los picos de descarga que llegan a las plantas de tratamiento y la reducción de los sedimentos retenidos en la tubería.

Con todos los objetivos anteriores se puede mencionar que el objetivo primordial es encontrar una reducción de costos, a costa de una buena operación en cada una de las zonas de la red (Schutze et al. 2004).

Para cumplir con cada uno de los objetivos y conseguir una optimización en la operación de la red de drenaje urbano, se debe tener en cuenta el tipo de actuador que se va a usar y la zona en que se encuentre como se mencionó anteriormente.

2.3. COMPUERTAS PARA REDES DE ALCANTARILLADOS

Las compuertas son dispositivos hidráulicos-mecánicos empleados para regular el paso de agua en la tubería, en un canal, presas, esclusas u otras estructuras hidráulicas. Permiten diferentes estrategias de control en un sistema de alcantarillado.

2.3.1. Tipos de compuerta

Las compuertas pueden tener varias maneras de ser agrupadas; entre otras los siguientes criterios de clasificación pueden ser: propósito, movimiento, paso del agua, composición de la hoja, ubicación y forma de la compuerta (ERBISTI, 2003).

1. Propósito

De acuerdo a su propósito operacional se utilizan generalmente para regulación de flujo o de los niveles de agua, también para cerrar el flujo de agua en conductos o canales y bajo presiones balanceadas de agua cuya función principal es la de mantener vacío el conducto o el canal para hacer mantenimiento en la red, es muy usado cuando hay equipo como: turbinas, bombas u otras compuertas.

2. Movimiento

De acuerdo al movimiento de la puerta se hace referencia a cómo puede cada compuerta deslizarse o rota la hoja a lo largo de la guía y supera la fricción al deslizarse entre las partes embebidas o móviles a través de placas de apoyo.

3. Paso del agua

De acuerdo a la forma de paso del agua en relación a la posición de la hoja, pueden ocurrir las siguientes situaciones: Descarga sobre la hoja de la compuerta, bajo la hoja de la compuerta, descarga abajo y arriba de la hoja.

4. Composición de la puerta

Las puertas pueden ser planas, mixtas o dobles, dependiendo entre el tipo de elementos que comprende la hoja. Las puertas planas tienen solamente un elemento. La hoja principal tiene en lo alto una puerta de aleta. Muchas aplicaciones son conocidas como segmentos, rueda-fija, rodillo y combinado con puertas de solapa.

5. Ubicación

Meza (2008), en su trabajo de tesis propone una tabla (tabla 2-2) en donde resume los requisitos generales para la implementación de las compuertas en la red de Bogotá, 14 características diferentes en donde se tienen en cuenta la parte estructural, hidráulica y topológicas para la colocación de una compuerta.

6. Forma del plato

Las compuertas pueden ser planas o radiales, de acuerdo a la forma de la puerta. Estos tipos de compuertas pueden ser diseñadas dependiendo, si la compuerta es plana o radial.

Otro tipo de clasificación es dependiendo del control que se requiera en la red y los fines que se requieran, tales como: derivación, regulación, retención, antirreflujo y autolimpieza. Los funcionamientos de varios tipos de compuerta a partir de la empresa CLABSA de Barcelona, se pueden explicar de la siguiente forma. Fuente(Meza, 2008):

1. Las compuertas de desplazamiento vertical descendente: se accionan mediante un gato hidráulico, se mueve por un marco fijo. Esencialmente se utiliza para

seccionar colectores, controlar caudales máximos, es el tipo de compuerta más utilizado (figura 2.5).

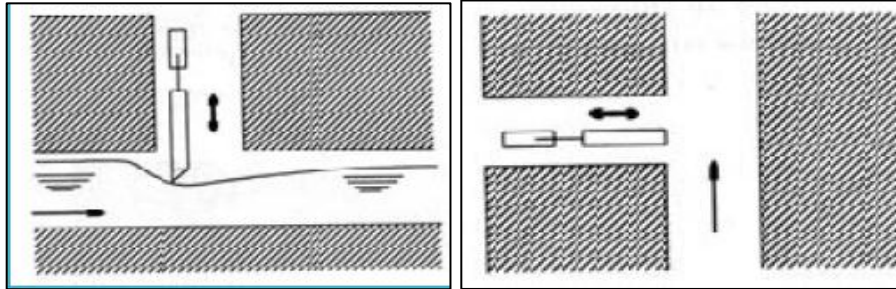


Figura 2-4. Derecha, compuerta de desplazamiento vertical descendente . Izquierda, compuerta de desplazamiento horizontal. Fuente: (Meza, 2008)

2. Compuerta de desplazamiento horizontal: accionada mediante un gato hidráulico o un tornillo. Se mueve horizontalmente por n marco fijo. Se usa para seccionar colectores cuando no se puede utilizar la compuerta horizontal (figura 2-5).
3. Compuerta de desplazamiento vertical ascendente: accionada por un gato hidráulico, se desplaza por un marco fijo, de abajo hacia arriba. Es utilizada para aliviaderos por su capacidad de maniobra y para retener el flujo aguas arriba de este (figura 2-6).

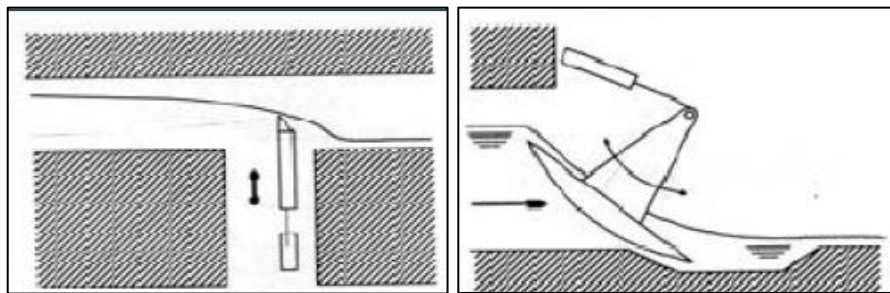


Figura 2-5. Derecha, compuerta de desplazamiento vertical asendente. Izquierda, compuerta de desplazamiento axial de sector. Fuente: (Meza, 2008)

4. Compuerta de desplazamiento axial: su movimiento es alrededor de su articulación, es accionada por un mecanismo hidráulico. Se usa especialmente

- para regular caudales o niveles de agua. Para retener el flujo o para disponer de un aliviadero (figura 2-6).
5. Compuerta de desplazamiento axial tipo clapeta de eje interior: su movimiento es alrededor de su articulación, es accionada por un mecanismo hidráulico. Se utiliza para regular caudales, o niveles de agua, pero no es eficiente para la retención de flujo, aunque permite disponer de un aliviadero autorregulable (figura 2-7).
 6. Compuerta de desplazamiento axial tipo clapeta de eje superior: compuerta accionada por un mecanismo hidráulico. Se suele usar para aislar caudales máximos y es recomendado para cuando no hay suficiente altura para una compuerta vertical (figura 2-7).

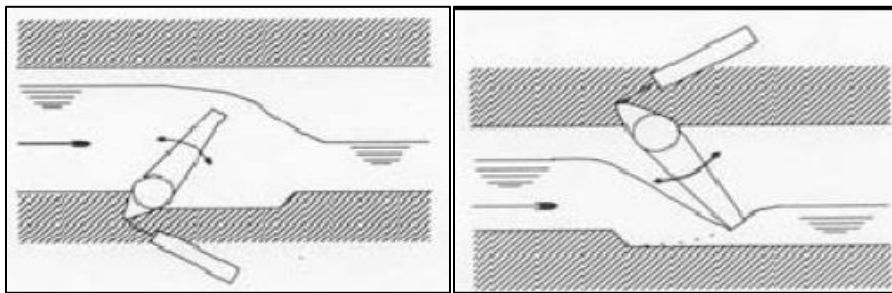


Figura 2-6. Derecha, compuerta de desplazamiento axial tipo clapeta de eje inferior. Izquierda, compuerta de desplazamiento axial tipo clapeta de eje superior. Fuente: (Meza, 2008)

7. Compuerta de axial tipo obturador: se acciona por la energía que imprime el agua, se usa para evitar contraflujos dentro de los colectores elevándose cuando los niveles agua abajo están muy bajos, aislando el sector de aguas arriba durante la creciente. Se ubican dentro de una cámara o una sección ancha especial (figura 2-8).
8. Compuerta de desplazamiento axial al final de la descarga: compuerta que se acciona automáticamente, por el mismo flujo. Se utiliza para evitar contraflujos dentro de los colectores y para aislarlos. Se colocan al final de la descarga para evitar represamientos por los grandes cuerpos de agua que generan por estar generalmente cerrados (figura 2-8).
9. Compuerta de desplazamiento axial: seleccionada automáticamente por le flujo. Se utiliza para generar autolimpieza en la red, generando represamiento del agua cuando el nivel es muy bajo, siendo la misma fuerza del agua la que genera el

empuje haciendo que esta adquiera mayor velocidad y fuerza para el arrastrar los sólidos (figura 2-9).

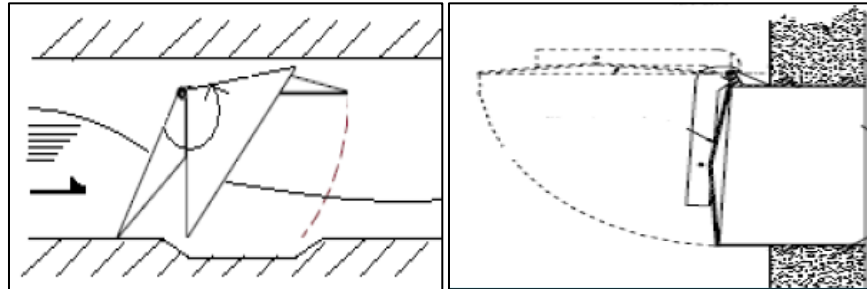


Figura 2-7. Derecha, compuerta de desplazamiento axial tipo obturador. Izquierda, compuerta de desplazamiento axial al final de la descarga. Fuente: (Meza, 2008)

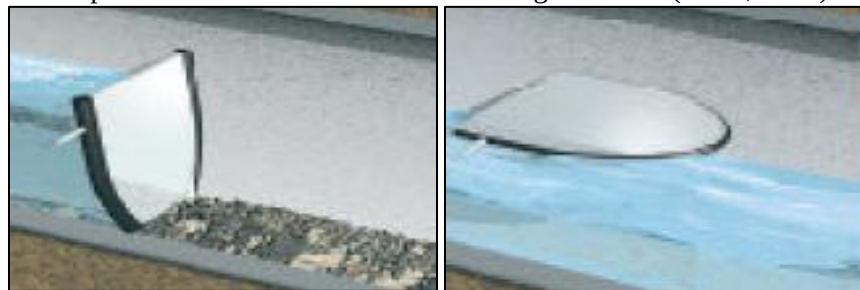


Figura 2-8. Derecha, compuerta de autolimpieza con desplazamiento axial cerrada. Izquierda, compuerta de autolimpieza con desplazamiento axial abierta. Fuente: (Meza, 2008)

Para escoger la compuerta para un trabajo específico se debe tener en cuenta como parte integral la regulación del agua a lo largo de los colectores, evitar la obstrucción y taponamiento de la red de alcantarillado por acumulación de sedimentos, evitar inundaciones en terrenos ubicados por debajo de los niveles máximos de las crecientes y controlar y derivar los caudales de aguas lluvias que ingresan al sistema combinado o pluvial (Meza 2008).

2.3.2. Aplicación de las compuertas en los alcantarillados

Una de las aplicaciones que más se ha estudiado en los últimos 20 años son las Hydrass Gates, las cuales se han utilizado para crear lavados de sedimentos y reducir problemas como la reducción de capacidad hidráulica y desbordamientos aguas arriba en los alcantarillados. Consisten en almacenamiento hacia aguas arriba, para luego hacer rotar la compuerta, donde se tiene un cambio de momento que descarga rápidamente el volumen almacenado, lavado que tiene un tiempo que está entre 2 y 5 minutos. Los principales objetivos de estudio para este tipo de

compuertas son: la relación entre caudal y el movimiento de la compuerta en función del comportamiento aguas arriba, evaluar la propagación del lavado y asociar el movimiento de la compuerta con los sedimentos aguas abajo (Bertrand-Krajewski et al. 2003) (figura 2-10).

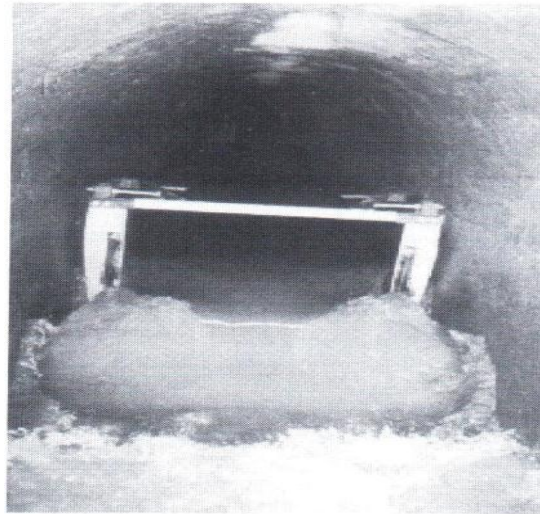


Figura 2-9. Hydrass Gate, lavado (izquierda). Fuente (Ashley et al. 2005)

La operación de este tipo de compuerta, es de la siguiente manera: paso 1 se tiene un almacenamiento de agua, el paso 2 fase inicial del funcionamiento de la compuerta para generar un lavado, paso 3, es la compuerta totalmente abierta donde se generan dos lavados, por debajo y por encima de la compuerta y son analizados por Bertrand-Krajewski (2003) y en el último paso es el movimiento de la compuerta su punto inicial.

Por otro lado se encuentran las Hydroselft, cuyos sistemas no requieren de suministro externos de agua, porque resulta despreciable el agua almacenada, ya que pueden ser fácilmente adaptables en la instalación existente y puede ser operada sin una fuente de energía externa (Ashley et al., 2005).

Estos lavados ayudan a reservar un área de almacenamiento para una operación hidráulica con el flap gate (Figura 2-11). Por otro lado, ésta compuerta puede ser instalada directamente en el sistema de alcantarillado y los volúmenes requeridos para el lavado que se crean paralelo a las paredes de los alcantarillados (Raghaven, 2004).

Tabla 2-2. Requisitos para la implementación de compuertas en la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá. Fuente (Meza, 2008).

ID	REQUISITOS PARA SU IMPLEMENTACIÓN
1	Suficiente espacio en la red y en la superficie del suelo para la ubicación de la compuerta y demás accesorios para su maniobra.
2	Disponer de mediciones de niveles y precipitación en los colectores aledaños
3	Conocer las características hidrológicas de la zona de estudio
4	Determinar las condiciones y tipo de suelo en la zona de estudio
5	Análisis preliminar del hidrograma de salida bajo varios eventos de lluvia y determinar su influencia sobre la red aguas abajo
6	Implementación de un sistema telemétrico de control y operación
7	Cuerpo receptor o colector con capacidad suficiente para recibir el caudal derivado de forma que no ocasione inundaciones
8	Análisis previo de las características hidráulicas, de calidad de agua y de autodepuración del curso o cuerpo de agua receptor.
9	Medidores de nivel del agua, aguas arriba y aguas abajo del sector a operar con compuertas
10	Suministro permanente de energía eléctrica u otra fuente de energía para el movimiento de las compuertas
11	Aguas residuales con baja a media acumulación de sedimentos en el sector a operar. Sólidos en el agua menores a 30 mm
12	Tuberías a operar mayores a 10 pulgadas de diámetro
13	Buen estado estructural de los colectores a operar, sin índices de fallas o colapsos
14	Un Modelo del funcionamiento de la compuerta flexible, sencillo, óptimo y de gran adaptabilidad, que se pueda calibrar continuamente.



Figura 2-10. Flap Gate, compuerta usada para los sistemas Hydrosel. Fuente (Meza, 2008)

Este sistema ha sido usado en Europa, con sistemas de alcantarillados que tienen dimensiones entre 250 mm a 4300 mm de diámetro y cuyas las longitudes de lavado son mayores a 340 m. (Ashley et al. 2005).

Como se menciona en el capítulo de antecedentes, las compuertas se han utilizado y estudiado con frecuencia en los últimos 20 años, siendo el uso más común el lavado de sedimentos en la red (Campisano et al., 2007), creando estrategias de pequeñas aperturas que generen lavados que limpien el conducto. Por otra parte en Barcelona-España se implementó unas reglas de operación a partir de los eventos medidos en tres cuencas diferentes.

Las estrategias aplicadas para el movimiento de una serie de compuertas se basan en: los eventos de lluvia registrados, cumpliendo con un buen estado de las comunicaciones, no exista ninguna alarma de fallo, la verificación y adquisición de los datos de los distintos sensores lleguen al centro, procesamiento de los datos haciendo el ajuste y simulando distintas estrategias escogiendo la mejor, ejecutando la mejor estrategia (Ballester et al., 1998).

Aunque en los últimos años las investigaciones se han dirigido en la implementación de estrategias de operación por medio de modelos matemáticos (Creaco & Bertrand-Krajewski, 2009) para operar compuertas, se han enfocado en el lavado que puede generar el almacenamiento del agua antes de la compuerta en tiempos específicos, encontrando investigaciones de compuertas con rotación axial (Bertrand-Krajewski, 2003) y de desplazamiento vertical (Campisano et al., 2007).

Por ser el lavado de sedimentos una base de investigación de la última década para las compuertas, es un tema que hay que tener en cuenta para la implementación de las reglas de operación; con el fin de verificar las implicaciones que tiene los sedimentos y como la operación puede beneficiar al sistema de drenaje urbano (Zhou & Li, 2010).

2.4. Sedimentos en los alcantarillados

Como se puede observar en la Figura 2-11 los sedimentos deben ser considerados en un sistema de alcantarillado, debido al depósito de éstos, que crea problemas como reducción de la capacidad hidráulica y un incremento en la rugosidad del conducto (Ashley et al., 2005); por otro lado la contaminación creada por esta acumulación crea consecuencias ambientales en los cuerpos de agua que reciben estas aguas (Williams, Tait, & Ashley, 2009). Este problema lo podemos detectar con mayor frecuencia en los sistemas combinados y los drenajes de aguas lluvia, de igual forma no indica que los sistemas separados no se vean afectados.

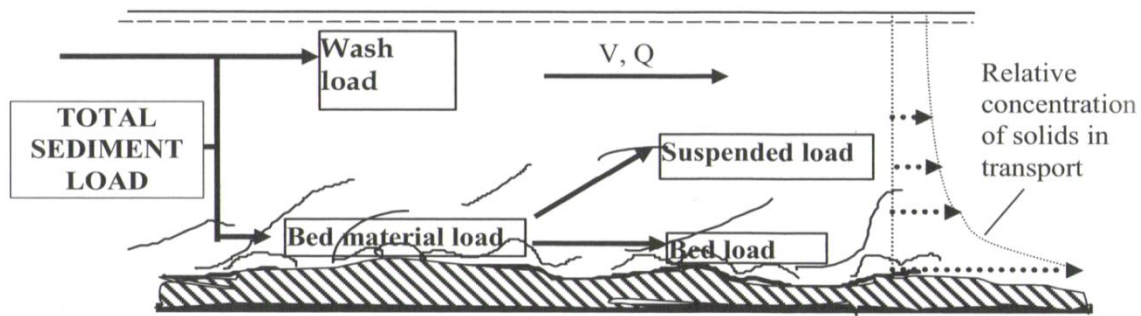


Figura 2-11. Carga total de sedimentos en alcantarillados. Fuente (Ashley et al. 2005).

Antes de mencionar los trabajos que se han realizado para beneficiar la capacidad hidráulica en una tubería de alcantarillado con los lavados de sedimentos, es necesario mencionar el criterio de la tensión tractiva el cual se aplica para el control de erosión, la sedimentación y la producción de sulfuros, también se define como la fuerza tangencial por unidad de área mojada ejercida por el flujo de aguas residuales (UNATSABAR, 2005).

Al no cumplir con los valores mínimos de tensión tractiva, cuyo valor es de un (1) Pa., el cual se puede presentar con caudales promedios bajo o con construcciones que no sigan las especificaciones de diseño, por esto habría que adicionar dispositivos hidráulicos como las compuertas que ayuden a disminuir la acumulación de sedimentos (UNATSABAR, 2005).

Por esta razón en los últimos 20 años diferentes trabajos en donde se generan lavados experimentales en conjunto con un lecho con una granulometría (d_{50}) específica que esta entre 250 y 400 μm (Creaco et al., 2009) cuyo material es arena volcánica. Con este material realizaron una serie de pruebas donde hicieron varios lavados, almacenando agua y abriendo la compuerta, en donde encontraron que la mejor forma de operar para tener un buen arrastre es con varios lavados y una apertura de compuerta grande. (Campisano et al., 2007).

Pero no es suficiente comprender la cantidad de lavado que se tiene a partir de una serie de aperturas de compuerta con un nivel de almacenamiento aguas arriba, debido a que no todo el sedimento viaja a través de toda la longitud de la tubería, por este motivo, se debe verificar las 3 cargas de sedimento: carga del lecho, carga en suspensión, y la carga de lavado (Chi-Yuan Fan et al., 2003), por lo cual se debe tener muy en cuenta los periodos secos y húmedos debido las bajas velocidades ya que el objetivo principal de las metodologías para el transporte es verificar si existe

flujo suficiente para arrastras estos hacia una planta de aguas residuales. (Diaz-Granados et al. 2009).

Para el transporte o lavado de sedimentos es importante tener en cuenta la cantidad de sedimento que se arrastra al tener un lavado, para esto se han utilizado desde los últimos 30 años una gran cantidad de metodologías (Diaz-Granados et al., 2009), como Moquito, Hypocra, Cosmoss entre otras, pero para este trabajo se utilizará la metodología de enunciada por el STSim y la cual consta de una tasa de erosión α_{ero} que tiene unidades de $1/m^2$, valor que se encuentra entre 0.01 y 0.12, dependiendo de las fuerzas iniciales que actúan para la iniciación del movimiento (Schlütter, 1999).

$$\frac{dm}{dt} = -\alpha_{ero} m_p(t) Q(t) \quad [7]$$

Donde m es la masa por metro que hay en la tubería, α_{ero} la tasa de erosión y Q (t) es el caudal de entrada a la tubería en un instante de tiempo.

Lo anterior es una de las metodologías que existe para el transporte de sedimentos, basada en un balance de masas y donde el lavado depende de la concentración de sedimento en la tubería.

3. METODOLOGIA

Para realizar un análisis de los fenómenos físicos que ocurren en la red, se realizan análisis a nivel local y global. Cada uno de estos se estudiará por aparte para luego unir ambas metodologías. A nivel local se estudiará el comportamiento de la compuerta y los fenómenos físicos que se tendrían con la operación de una compuerta deslizante, con cada movimiento de la compuerta, mientras, que en el análisis global se tomara una zona de estudio de la ciudad de Bogotá, donde se ingresará las lluvias de los eventos máximos, así obtener los caudales de la red.

Dentro del análisis local también se estudiará los fenómenos formados a partir de un análisis dimensional, el cual, será útil para la escogencia de las aperturas.

La Figura 3-1 es el esquema de la metodología utilizada para para el análisis a nivel local, cuyo primer paso es tener en claro las características de tubería como diámetro, pendiente, n de manning y el caudal o el nivel aguas arriba (y_1), segundo se realizan los cálculos de los niveles con la metodología de energía y momentum, y por ultimo se establece las características hidráulicas de los niveles (y_1 , y_2 y y_3) (Figura 3-1). Cada uno de estos niveles encontrados son necesarios para realizar el perfil hidráulico y también para ingresar a las gráficas dimensionales que direccionan una apertura de compuerta. Lo mencionado se explica detalladamente a continuación.

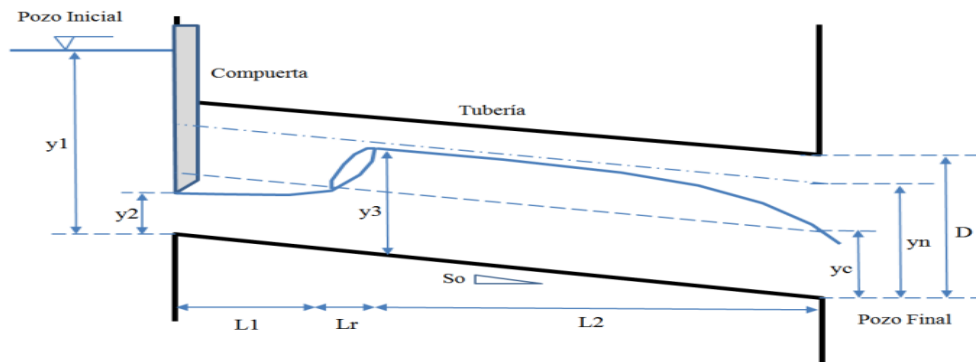


Figura 3-1. Esquema del resalto hidráulico, después de la operación de la compuerta hidráulica. Donde D = diámetro (m), y_n = profundidad normal (m), y_c = profundidad crítica (m), y_1 = profundidad pozo inicial (m), y_2 = apertura de la compuerta (m), y_3 = profundidad del resalto hidráulico (m), L_1 = longitud antes del resalto (m), L_r = longitud del resalto (m), L_2 = longitud (m) después del resalto hasta la entrega del siguiente pozo.

3.1. ANÁLISIS LOCAL

El cálculo al operar la compuerta es analizado en flujo permanente y con una relación de energías y de momentos, encontrando un nivel aguas arriba (y_1) y aguas abajo (y_3), los cuales están en función de la apertura de la compuerta (y_2), razón para modelar los diferentes fenómenos que pueden ocurrir por el movimiento de la compuerta.

La figura 3-2, muestra los pasos a seguir para realizar el análisis local, siendo el caudal y la apertura de la compuerta variables que se conocen y con las que se puede empezar los análisis y encontrar los niveles que actúan alrededor de la compuerta y su comportamiento hacia la salida o a otro manhole.

Por esto se analiza el resalto hidráulico como fenómeno que ayudaría a la operación, debido a que el comportamiento de los niveles (y_1 , y_2 y y_3) generan cambios de acuerdo al caudal de entrada variando las condiciones hidráulicas, todo en función de la apertura de la compuerta.

3.1.1. Resalto hidráulico.

La Figura 3-2 muestra el esquema hidráulico que se debe presentar al ser operada la compuerta, mostrando la altura inicial, apertura de compuerta y al finalizar el resalto (Y_1 , Y_2 y Y_3 respectivamente). También las alturas, crítica y normal verifican el nivel de la apertura de la compuerta y la altura normal para calcular el nivel del resalto, cada uno de estos niveles son una característica especial para la operación de la compuerta.

El análisis local tiene como efecto principal la verificación del perfil hidráulico y posible formación del resalto hidráulico hacia aguas abajo de la compuerta, que ayudan estimar la variación de estos niveles hacia aguas abajo de la compuerta según el tipo de combinaciones de los niveles aguas arriba.

Para el análisis local los comportamientos que se produce antes, durante y después de abrir y cerrar una compuerta, se necesitan varios conceptos básicos de la hidráulica como: la conservación de energía y momentum, para este caso en particular la energía específica se compara antes y después de la compuerta (ecuación 8), valor que debe ser igual a ambos lados pues se asume que no hay pérdida de energía entre un punto y otro:

$$E_1 = E_2 \quad [8]$$

$$y_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} = y_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad [9]$$

Dónde E = Energía (m), y_1 = nivel del agua en la zona 1 (m), y_2 = Nivel del agua en zona 2 (m), Q = Caudal (m^3/s), g = gravedad (m/s^2), A = área (m^2).

La ecuación 8 y 9 son la base para el análisis con el que se obtiene el caudal del sistema o la altura de almacenamiento antes de la compuerta, dependiendo de los datos iniciales que se tengan.

A continuación se calcula la altura del resalto (y_3), para este paso se utilizan las siguientes ecuaciones (ecuación 10 a 12) las cuales se pueden deducir de la conservación del momentum para una sección circular:

$$z = y_1 - r \quad [10]$$

$$\hat{z} = -\frac{2(r^2 - z^2)^{3/2}}{3A} \quad [11]$$

$$\bar{z} = y_1 - (r - \hat{z}) \quad [12]$$

Donde: z = eje al centroide (m), y_1 = nivel de agua en zona 1 (m), r = radio (m), A = Área (m^2).

Para calcular la altura del resalto (y_3), el momento en 2 (M_2 – momento en la apertura de la compuerta) y el momento en 3 (M_3 – momento en el nivel del resalto hidráulico) se asumen iguales. Para esto se usa un método numérico, el cual encuentra el M_3 variando el nivel de Y_3 utilizando las ecuación 10, ecuación 11 y ecuación 12 hasta llegar a igualar con momentos el momento 2.

Ya obteniendo la altura hacia aguas arriba (y_1) de la compuerta, la altura del resalto (y_3); en función de la apertura de la compuerta (y_2), verifica el tipo de flujo que se obtiene en cada uno de los tramos de la tubería. En la mayoría de los casos el nivel Y_2 es supercrítico y Y_1 y Y_3 es subcrítico.

3.1.2. Análisis con flujo gradualmente variado

El análisis anterior se realizó bajo el concepto de flujo permanente, para identificar el comportamiento del flujo después de la profundidad del resalto (y_3), se realizó el análisis con la metodología del flujo gradualmente variado (FGV), porque en este evento si existen variaciones de niveles en el espacio y en el tiempo.

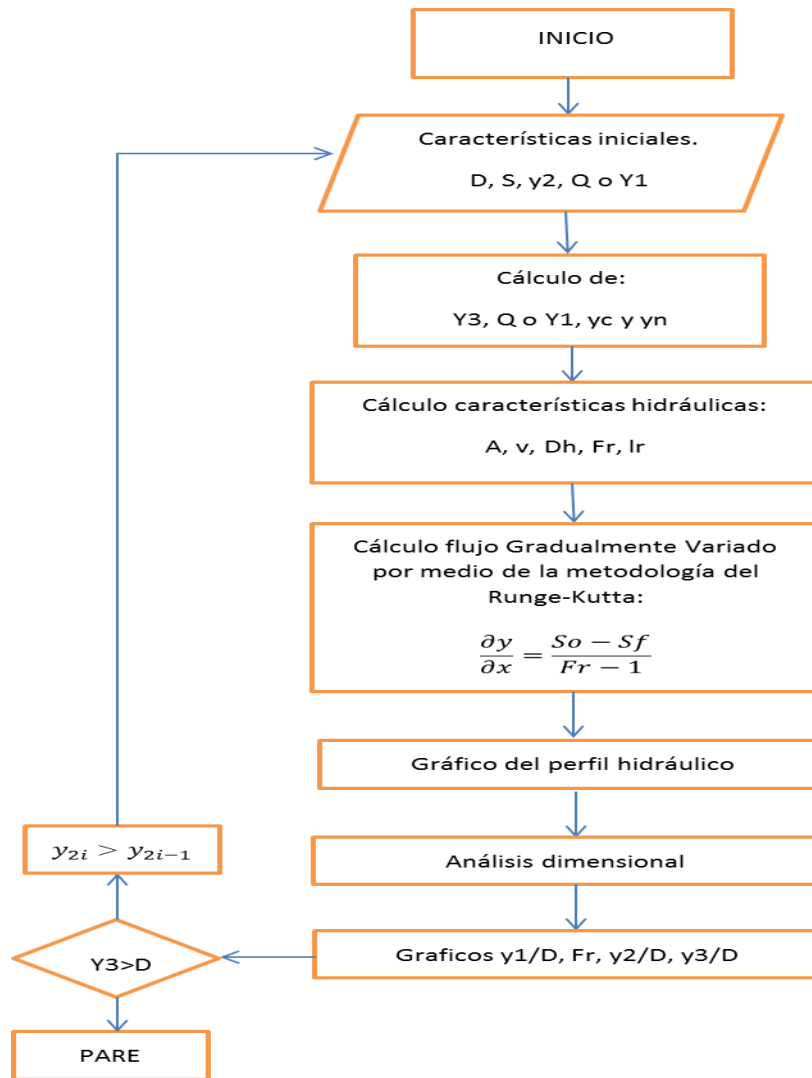


Figura 3-2. Diagrama de flujo del análisis local.

Para analizar el flujo hacia aguas abajo con un tipo de flujo supercrítico se debe empezar el análisis desde la apertura de la compuerta, y para un tipo de flujo subcrítico el análisis se empieza desde el nivel crítico. Cuando se está analizando el flujo después del resalto (Y3) se tienen dos opciones porque el cálculo se realiza de atrás hacia adelante siendo la primera opción tomar desde el nivel crítico hasta el nivel de la tubería, si hay llenado de la tubería o si el perfil es un “M-1”, por otro lado, se analiza desde el nivel crítico hasta llegar a la altura del resalto completando el perfil de la

superficie de agua; mientras que para el análisis en flujo supercrítico se hace hasta que el número de Froude sea mayor a 1.1 (figura 3-2).

Con todo lo mencionado anteriormente ya se conocen los niveles (y_1 , y_2 y y_3) y los perfiles hacia aguas abajo, lo que corresponde al fenómeno completo operando una compuerta para generar un resalto hidráulico, de esta forma conocer la implicación hidráulica del fenómeno hacia aguas abajo y saber cuál es la mejor opción de operar dicha compuerta.

Todo el análisis local se implementó en un aplicativo realizado en VISUAL BASIC® (figura 3-3), cada uno de estos cálculos fueron dispuestos cuidadosamente y de tal orden que la persona que esté utilizando el sistema sea guiado de forma práctica y sencilla, desde el nivel hacia aguas arriba hasta el perfil que se forma después de operar la compuerta hasta el cálculo del perfil hacia aguas abajo. Para al final entregar las gráficas del perfil hidráulico de operación.

3.1.3. Aplicativo computacional

Las tablas que se realizan después de una serie de cálculos repetitivos son demasiado extensas (anexo A), en muchos casos no hay claridad sobre los valores encontrados para cada nivel (y_1) ó caudal (Q) de entrada que se tenga. Por esto se diseñó un aplicativo en VISUAL BASIC®, que funciona desde Excel®, y el cual contiene todos los análisis mencionados.

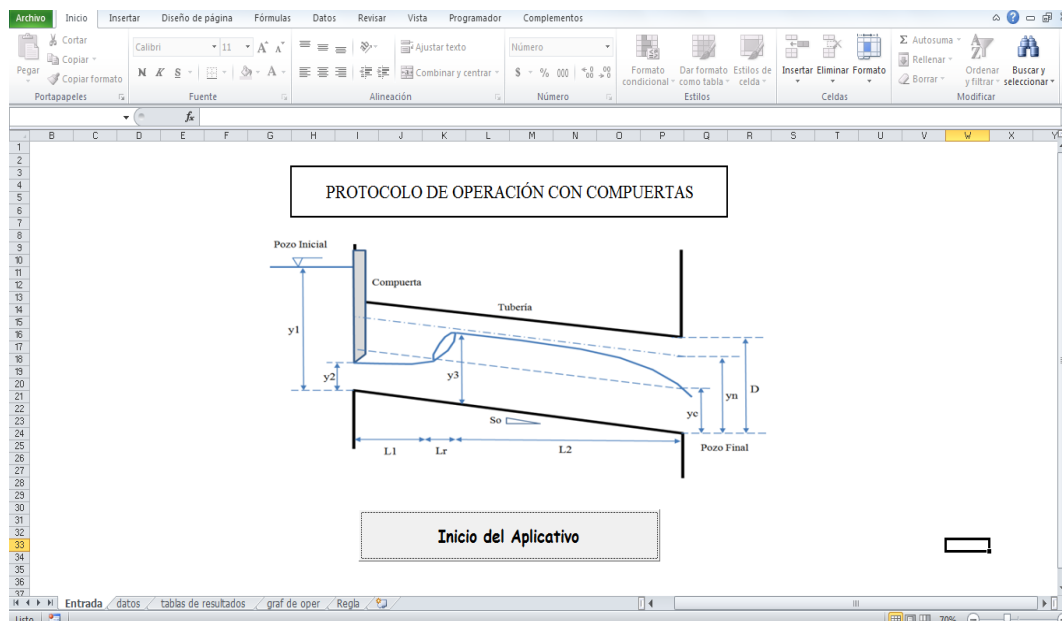


Figura 3-3. Pantalla inicial del aplicativo operacional de compuertas en alcantarillado.

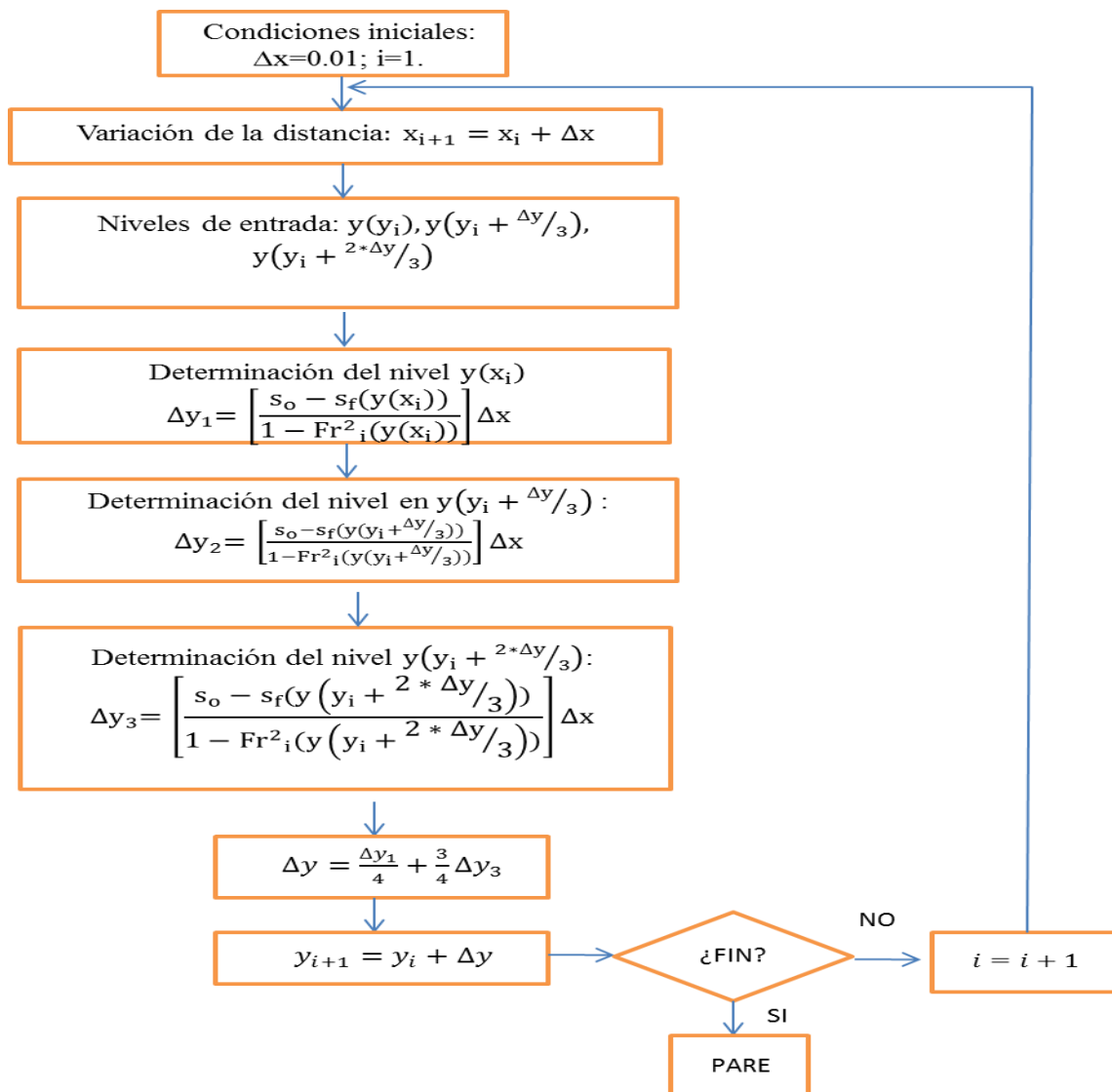


Figura 3-4. Esquema de cálculo para el análisis de Runge-Kutta. Adaptado de (Chow, 1994)

Este aplicativo comienza con una vista previa del esquema operacional (figura 3-3), en esta pestaña de Excel® existe un botón en la parte de abajo con el cual se ingresa al aplicativo, luego se ingresan los datos de entrada (figura 3-4), los cuales son: diámetro (m), n de manning, pendiente de la tubería (m/m), esto con respecto a las características físicas de la tubería. En la parte hidráulica se ingresa los datos de: apertura de compuerta (m) (y2) y el nivel aguas arriba (m) (y1) o

el caudal de sistema (m^3/s) (Q). Con estos datos se realiza el cálculo del caudal o del nivel aguas arriba.

Figura 3-5. Muestra inicial del aplicativo operacional de compuertas en alcantarillado, página de ingreso de datos.

La página mostrada en la figura 3-5 muestra el nivel del resalto (y_3), los perfiles de flujo formados después de la compuerta y después del nivel del resalto, también el nivel crítico y normal, calculado a partir de los datos ingresados en la página anterior.

Figura 3-6. Pantalla calculo niveles después de la compuerta y nomenclatura de los perfiles hidráulicos.

Después del calculo de todos los niveles (y_1 , y_2 y y_3) y los perfiles hidráulicos, esta misma página contiene dos (2) botones (figura 3-6): el de la derecha calcula los perfiles hidráulicos por medio del concepto de FGV con la metodología de Runge-Kutta con base a los niveles encontrados y el botón

de la izquierda calcula las características hidráulicas de cada uno de los niveles y muestra unas reglas de operación según el caudal que se tenga en el sistema.

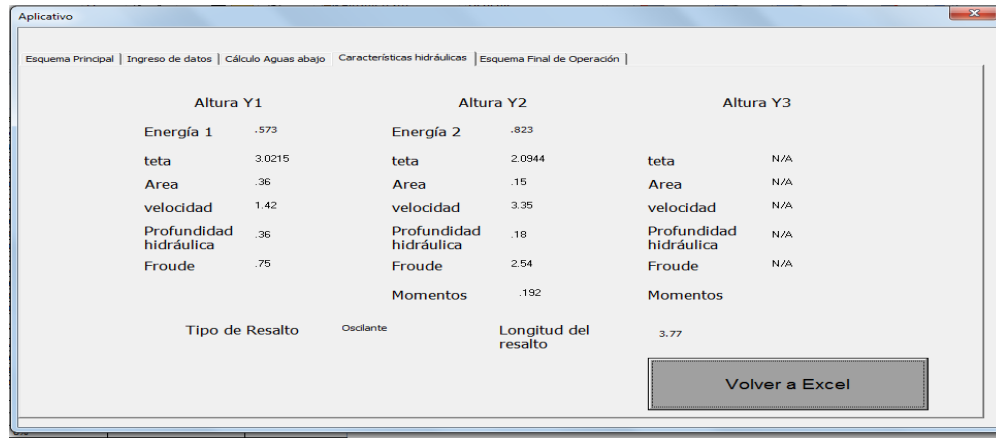


Figura 3-7. Resultados de las características hidráulicas de cada una de los niveles encontrados.

La siguiente página (Figura 3-7) muestra los siguientes valores: energía en la zona 1 y 2; los ángulos, las áreas, velocidades, profundidad hidráulica, número de Froude en los tres niveles que se generan (Y1, Y2 y Y3), los momentos en la zona 2 y 3, por último la longitud del resalto y el tipo de resalto. Esta hoja contiene un botón que devuelve Excel®.

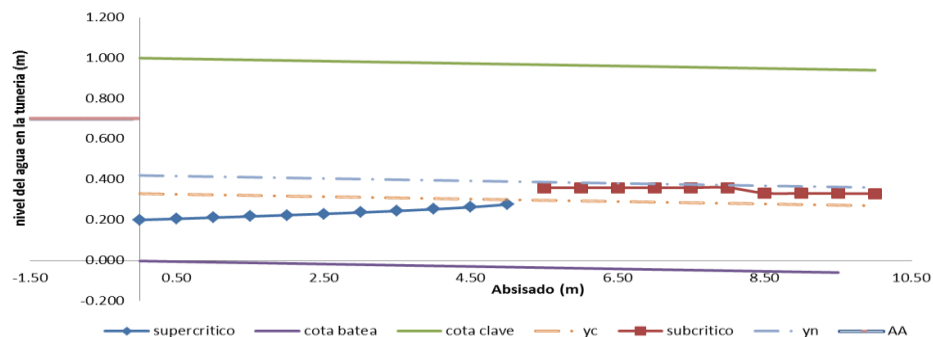


Figura 3-8. Perfil resultado del aplicativo computacional.

Los resultados que imprime el aplicativo computacional son: los perfiles hidráulicos calculados por la metodología de Runge-Kutta (figura 3-8), el esquema conceptual con los valores en cada punto

analizado (figura 3-10) y un esquema de operación que muestra los niveles de apertura de compuerta con respecto al resalto y a los tipos de flujo (figura 3-9).

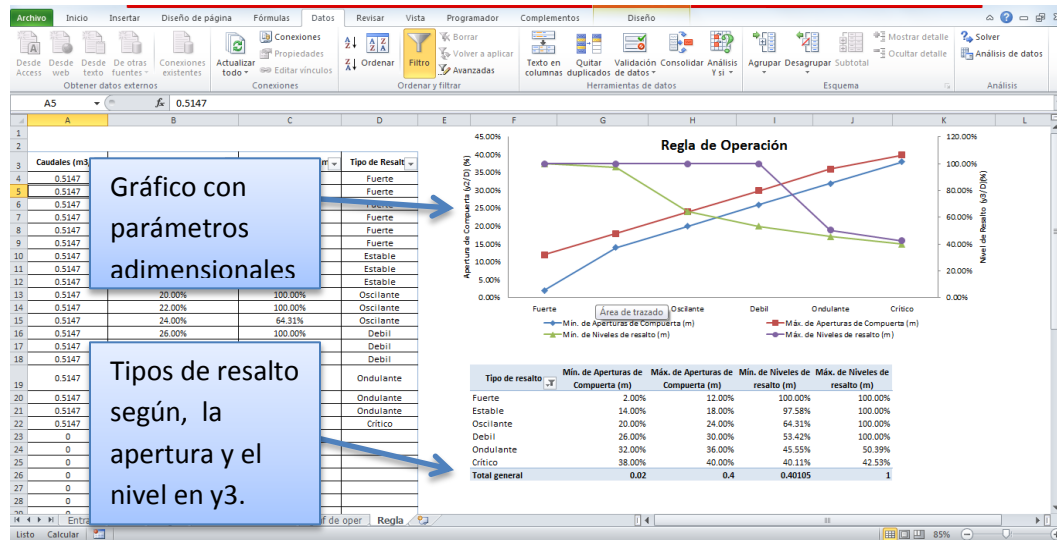


Figura 3-9. Resultados del aplicativo computacional. Esquema de operación de la compuerta a partir del caudal del sistema.

La figura 3-9, representa el análisis dimensional, donde se relaciona las profundidades aguas arriba con las aperturas de compuerta (y_2) y los niveles calculados aguas abajo (y_3), esta gráfica es usada para establecer el rango de apertura de compuerta y realizar comparaciones para el cumplimiento de los objetivos para la operación de la compuerta. Por ultimo se tiene el esquema conceptual con los valores correspondientes a la zona calculada (figura 3-10).

En resumen el aplicativo computacional se realizó para presentar de una forma fácil y organizada los resultados y las gráficas, dependiendo de los datos que se le ingresen, sin necesidad de entrar en tablas que son extensas. Por otra parte al final del aplicativo se presenta un gráfico en donde se establece un esquema de operación en función del caudal del sistema y muestran como es el perfil aguas abajo con respecto a la apertura de la compuerta.

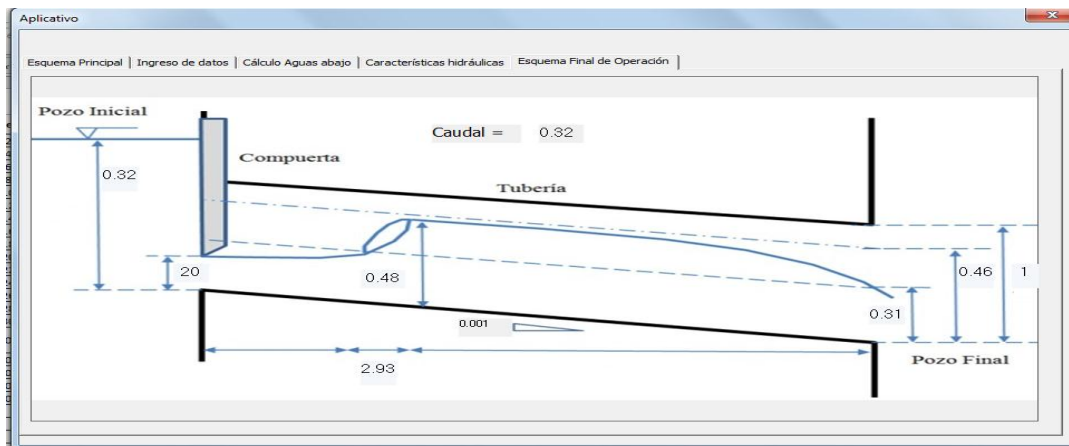


Figura 3-10. Esquema conceptual con los valores esquemáticos del análisis.

3.1.4. Modelo físico.

Para verificar los análisis y los perfiles de flujo encontrados en los cálculos se realizarán pruebas físicas con un modelo a escala en donde se pueda simular una operación de una compuerta. Se hicieron ensayos de verificación de datos y de comportamiento del flujo a través de la compuerta, como parte de las reglas de operación.

El modelo presentado en la figura 3-11 se construyó en acrílico en calibre N° 3 y está conformado por una caja de 0.30m x 0.30m x 0.60m y está unida a una tubería hecha en el mismo material con un diámetro de 0.20m con una longitud de 2m de largo (figura 3-11).

El ensayo con el modelo se realiza con unos caudales fijos que vienen de un sistema de tuberías (Figura 3-12) que conduce agua desde un tanque superior que se encuentra ubicado en la parte superior del laboratorio de hidráulica de la Pontificia Universidad Javeriana, este sistema de tubos se unen con una manguera de dos (2) pulgadas (figura 3-13) para llevar el agua con los caudales requeridos a la caja del modelo.

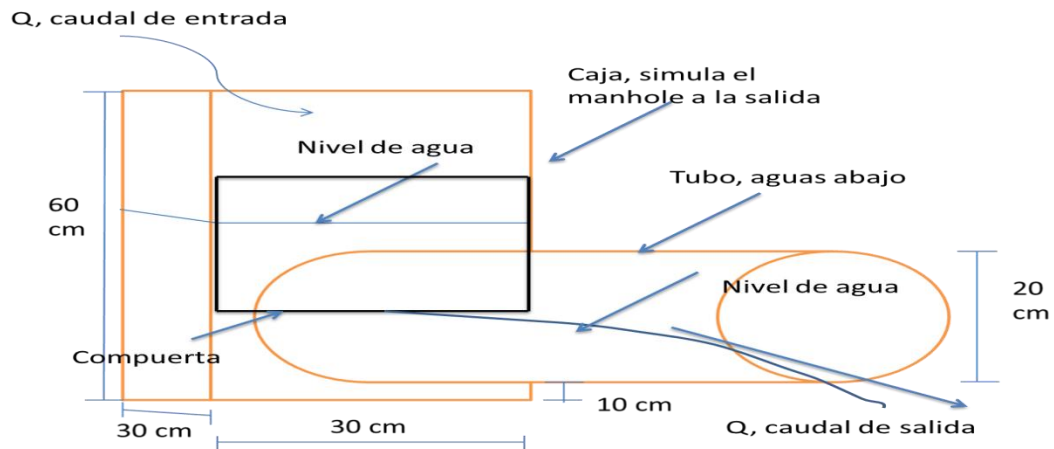


Figura 3-11. Esquema del modelo físico.



Figura 3-12. Fotografía del montaje del circuito de tuberías de donde se extrae el agua para el ensayo.

El modelo se montó sobre un canal en el laboratorio de hidráulica de la Pontificia Universidad Javeriana, los caudales fijos fueron medidos por un caudalímetro de ultrasonido el cual se instala en la tubería y lo más cercano posible donde la tubería se une con la manguera que lleva el agua hacia el modelo (figura 3-12).



Figura 3-13. Fotografía de modelo físico

El montaje de utilizo de la siguiente manera:

1. Se midieron 3 diferentes caudales de entrada al modelos (1.5, 2 y 2.5 l/s) desde la red modelo que se encuentra en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Javeriana.
2. El caudal ingresa por una manguera de 2" (50.80 mm) al modelo y se espera que el flujo se estabilice para empezar a operar la compuerta.
3. Se calcula el nivel crítico para cada uno de los caudales y la compuerta se opera por debajo de este nivel.
4. Se hace una revisión visual si se genera resalto.
5. Se toma la profundidad que se genera aguas arriba y el tiempo en que tarde en estabilizar el nivel (y_1).

Los datos de los niveles que se medidos (tabla 3-1 y anexos D), en algunos casos difieren en más del 50% con los cálculos de los niveles aguas arriba de la compuerta, adicional al operar la compuerta en muchos casos no se logró observar los cambios de nivel (figura 3-14), tampoco el perfil que se crea aguas abajo, como sí se puede observar con un canal rectangular (figura 3-16). Adicional la forma del modelo físico fue cambiando al hacer los laboratorios, expandiéndose la

tubería en la zona en que se une con la caja, haciendo variar las condiciones y disminuyendo la posibilidad de poder generar un resalto.

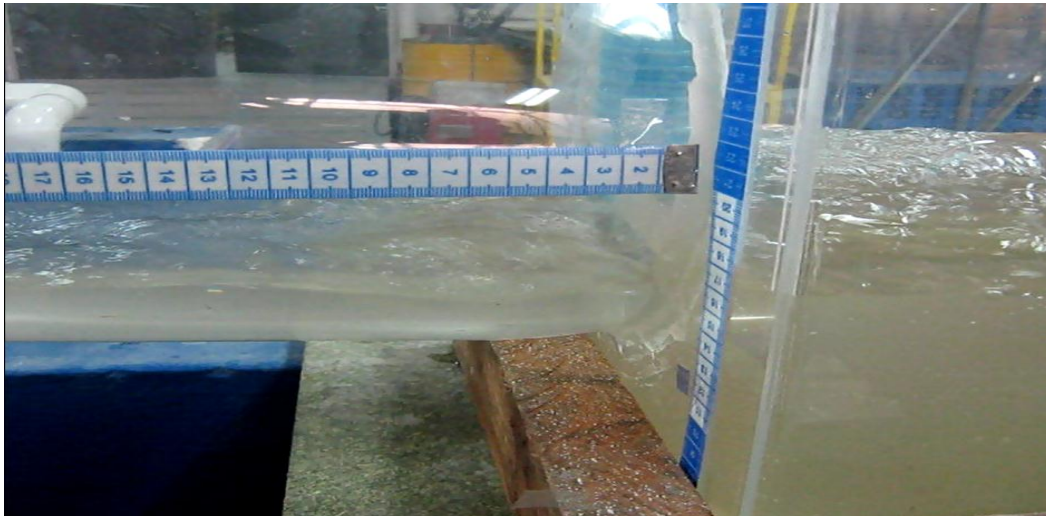


Figura 3-14. Fotografía de la prueba realizada con el modelo físico.



Figura 3-15. Fotografía de la prueba realizada con el modelo físico.



Figura 3-16. Fotografía de la prueba realizada con el modelo físico.

Por otro lado, cuando la apertura de la compuerta es muy baja, es decir esta entre un 1 y 15% del diámetro, no se genera un resalto sino un flujo orificio el cual hace que se presente un nivel aguas arriba mayor a 2 veces el diámetro. Este nivel antes de la compuerta se estabiliza en un determinado tiempo, por esta razón se estableció la ecuación 13, la cual se utiliza en dos fases: con una apertura de compuerta fija y con una apertura de la compuerta en que se va abriendo en determinado tiempo.

Tabla 3-1. Tabla resumen de los datos medidos aguas arriba y aguas abajo con el modelo físico.

caudal (m ³ /s)	Valores medidos con el modelo físico				Valores calculados	
	y1 (m)	y2 (m)	y3 (m)	longitud del resalto (m)	y1 (m)	y3 (m)
0.0015	0.040	0.077	0.045	0.000	0.077	0.033
	0.045	0.072	0.040	0.000	0.071	0.033
	0.110	0.115	0.090	0.065	0.114	0.084
	0.060	0.035	0.043	0.040	0.032	0.033
	0.065	0.030	0.040	0.040	0.032	0.033
	0.081	0.050	0.045	0.050	0.049	0.038
0.0020	0.090	0.040	0.040	0.080	0.037	0.038
	0.098	0.036	0.090	0.000	0.037	0.038
	0.078	0.035	0.043	0.000	0.037	0.038
	0.070	0.030	0.040	0.000	0.045	0.038
	0.067	0.050	0.056	0.050	0.048	0.042
	0.078	0.045	0.060	0.065	0.045	0.042
0.0025	0.086	0.035	0.055	0.085	0.048	0.042
	0.075	0.040	0.064	0.080	0.041	0.042
	0.085	0.035	0.059	0.000	0.048	0.042

Para implementar estas fases primero se toma el tiempo y el nivel aguas arriba cuando este se estabiliza (figura 3-15) en el modelo físico, con estos valores se calibra un coeficiente (C_d), para así con la ecuación [13] calibrar los cálculos con los datos obtenidos con el modelo físico.

El análisis de las dos (2) fases se realizó de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta y}{\Delta t} = [Q_{ent} - C_d A_2 \sqrt{sgy_1}] 1/A_{manhole} \quad [13]$$

Las variables que encontramos en la expresión 13 son: $\Delta y/\Delta t$ = la variación del nivel aguas arriba con respecto al tiempo (m/s), Q_{ent} = caudal de entrada al sistema (m^3/s), A_2 = área con respecto a la apertura de la compuerta, C_d = coeficiente de variación, y_1 = nivel aguas arriba de la compuerta (m), g = gravedad (m/s^2) y $A_{manhole}$ = área de la caja (m).

Fase I: este análisis se realiza con una apertura de compuerta fija para calibrar el coeficiente variación (C_d), y de igual forma conocer la variación de los caudales en la entrada a la tubería con respecto al tiempo, debido a que se genera un flujo muy distinto al del resalto hidráulico.

Fase II: a partir del nivel encontrado en la fase I se analiza ahora el movimiento de la compuerta en el tiempo, empezando desde la altura en que se estabiliza el flujo aguas arriba (y_1) en la fase I, subiendo la compuerta en un determinado tiempo y así encontrar los caudales, que se generan hasta una apertura de compuerta en que el flujo pasa sin interactuar con la compuerta.

3.2. ANALISIS GLOBAL

Para el análisis global, primero se escoge una zona para su estudio, se recolecta la información como la topología, la red de alcantarillado (manholes y tubería), la malla vial y las estaciones pluviométricas cercanas a la zona de estudio. Cada estación pluviométrica contiene una serie histórica de donde se encuentran los hietogramas de entrada; donde se realiza el montaje de la red de alcantarillado en el programa EPA SWMM 5.0, ingresando los hietogramas de entrada sacados de la serie histórica.

Antes de continuar se debe realizar un análisis local con los caudales modelados en el programa, encontrando los perfiles hidráulicos que representarían el perfil del agua. Para los niveles encontrados se verifican hacia aguas arriba la altura del agua en cada manhole y a partir de cada nivel aguas abajo se verifican si existe un lleno de la tubería (figura 3-16).

A continuación se explica en detalle cada uno de los pasos mencionados:

3.2.1. Zona de implementación del análisis

Para el análisis global se escogió una zona de la ciudad de Bogotá D.C. capital y a la vez la ciudad más importante de Colombia siendo el principal centro cultural, económico y turístico, tiene una población aproximada de 7 millones de personas, la cual, la hace ser la ciudad más pobladas del país.

Ubicada a 2630 msnm siendo esta la cosmopolita más alta del mundo, con un área de 1776 m² y un área urbana de 307 m². También está bañada por los Ríos Bogotá, Tunjuelo, San Francisco, Fucha, Juan Amarillo o Salitre. El río Bogotá es el más grande en extensión donde desembocan todos los otros.

Para el análisis global se escogieron tres (3) UGAs las número 99, 60 y 61 (Figura 3-17) las cuales están ubicadas en la localidad de Chapinero entre las calles 92 y 100 y las carreras 7 y 20. Este sector del nor-orient de la ciudad es de más movimiento comercial que residencial y durante los últimos 10 años han tenido problemas de rebores del alcantarillado en temporada de lluvia.



Figura 3-17. Zona de análisis ciudad de Bogotá D.C.- Colombia. Google earth. Recuperado en marzo 16 de 2012

La red de acueducto y alcantarillado de la ciudad está a cargo de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), pero no solo está a cargo de la red total de la ciudad, sino también debe mantener la calidad del agua proveniente de las fuentes hídricas que abastecen a la ciudad. La EAAB tiene una organización de la ciudad con respecto a la distribución de la red de alcantarillado, división llamadas Unidades de Gestión Administrativas (UGA).

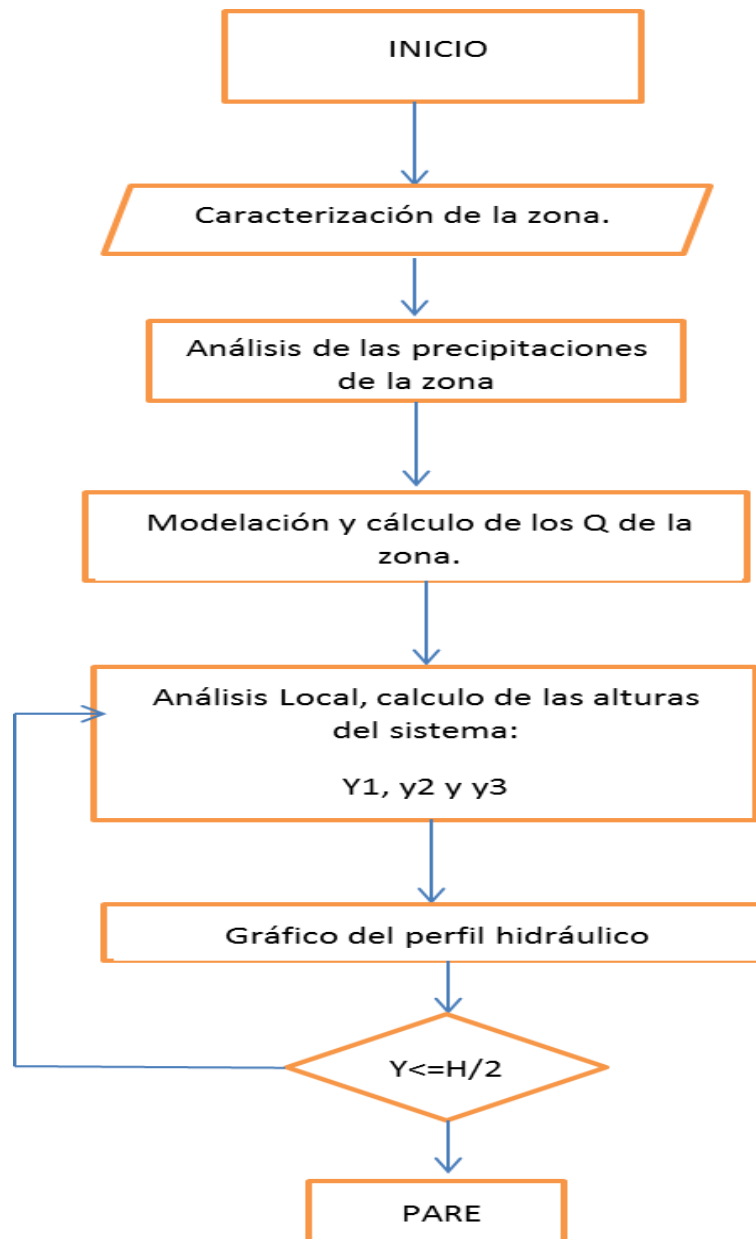


Figura 3-18. Diagrama de flujo del análisis global.

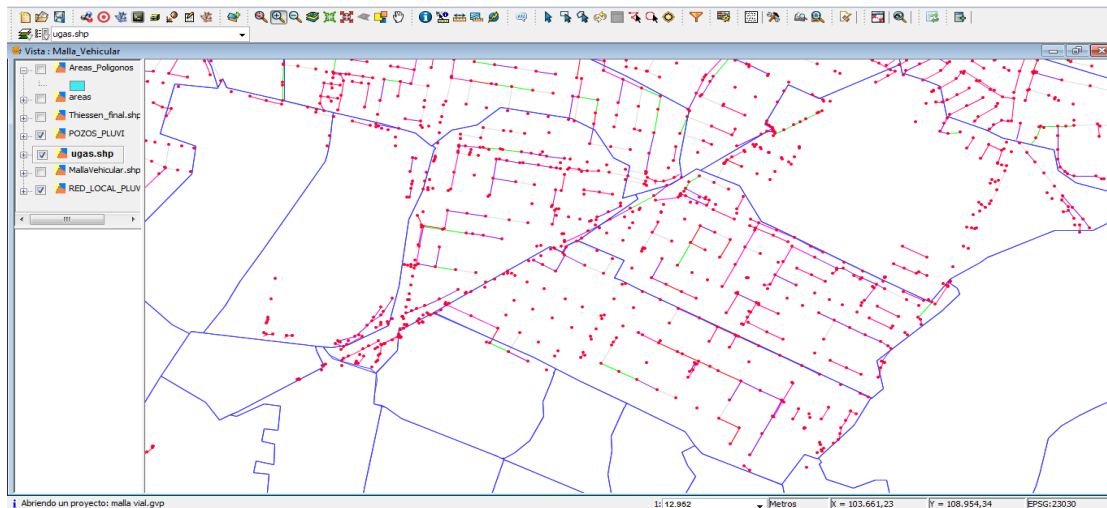


Figura 3-19. Red pluvial y pozos de la red de alcantarillado de las UGAs 99, 60 y 61. Información de la EAAB. Archivo GvSig.

La zona tiene una red de drenaje esquematizada en la Figura 3-19, también se puede encontrar la ubicación de los pozos (puntos rojos) y las UGAs (división en azul, Figura 3-18) que contienen a las redes a analizar. En esta zona la red de drenaje está constituida por diámetros que están entre 0.3m y 1.5m. Cada UGA tienen un nivel de referencia como entrada del agua lluvia al sistema, las alturas especificadas son: la UGA 61 tiene una altura máxima de 2568 msnm y una mínima de 2553, la UGA 60 tiene una altura máxima de 2590 msnm siendo este el nivel más alto y entrega a la UGA 99 con un nivel entre 2553 y 2550 msnm y la UGA 99 donde se recibe las aguas de las UGAs 60 y 61 su cuota más alta es la mínima indicada para las 2 UGAs anteriores y entrega al canal del Virrey a 2548 msnm.

Para el análisis de cada una de las UGAs se necesitaron cuatro 4 estaciones pluviograficas con las cuales se realizaron los hietográfamas de entrada, teniendo registros diarios cada 15 minutos, registros históricos suministrado por la EAAB. Las estaciones escogidas por su cercanía y serie de registros fueron: Estación laboratorio la Hormona, Usaquén Santa Ana, Salitre Casa de Bombas, San Luis (figura 3-20).



Figura 3-20. Ubicación de las estaciones pluviométricas. Google earth. Recuperado en marzo 16 de 2012.

Cada una de estas estaciones ubicadas en la figura 3-20 como un punto azul son las mencionadas; a partir de estas estaciones se toman los registros de las precipitaciones de aguas lluvias que caen en la zona resaltada con líneas azules en la misma figura y las cuales que corresponden a las UGAs 99, 60 y 61. Cada una de las estaciones se encuentra en las siguientes coordenadas:

Tabla 3-2. Coordenadas de las estaciones.

Estación	Coordenadas	
	Norte	Este
San Luis	105.349,65	104.105,31
Usaquén Santa Ana	110.407,40	158.028,52
Laboratorio la Hormona	109.881,06	101.623,82
Salitre Casa de Bombas	109.100,78	100.103,09

Con cada una de las estaciones se recogió la serie histórica diaria y se tomaron los eventos más grandes de cada una de las estaciones. A partir de estos eventos se obtuvieron los hietogramas de entrada del evento máximo registrado históricamente en cada estación, los cuales servirán para el análisis de la zona que corresponde a las UGAs ya mencionadas.

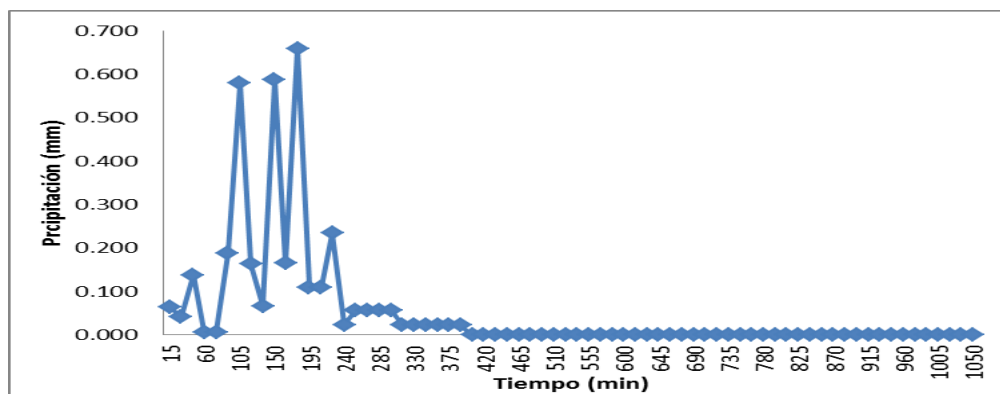


Figura 3-21. Hietograma de entrada Estación Usaqué Santa Ana.

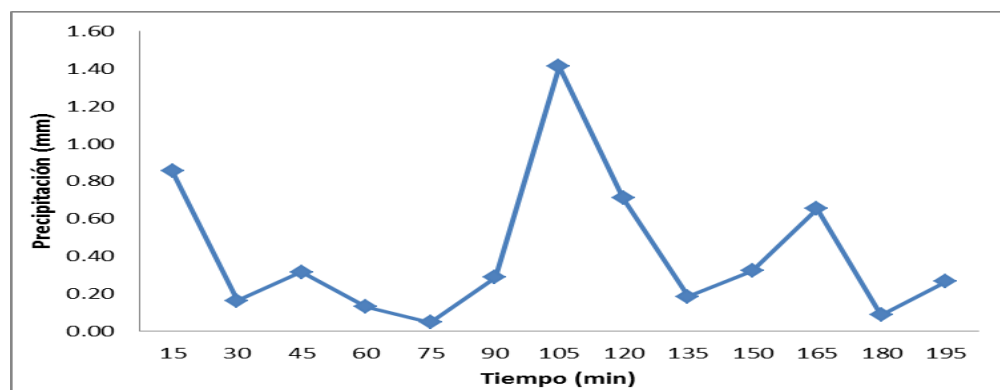


Figura 3-22. Hietograma de entrada Estación Laboratorio la Hormona.

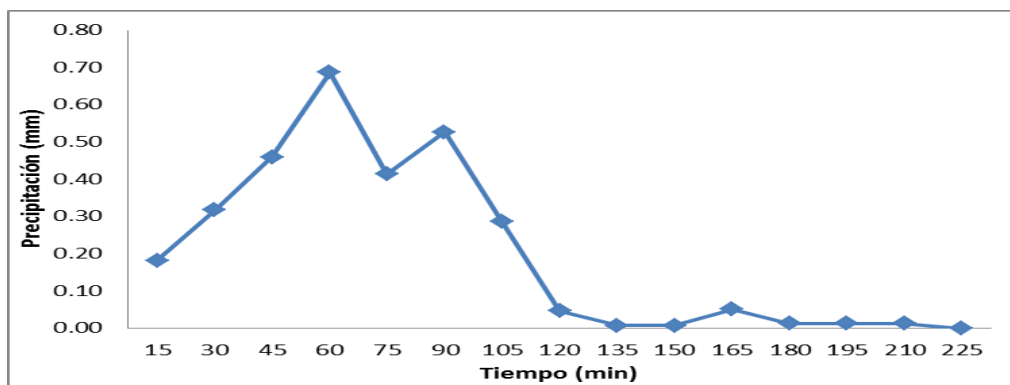


Figura 3-23. Hietograma de entrada Estación Salitre Casa de Bombas.

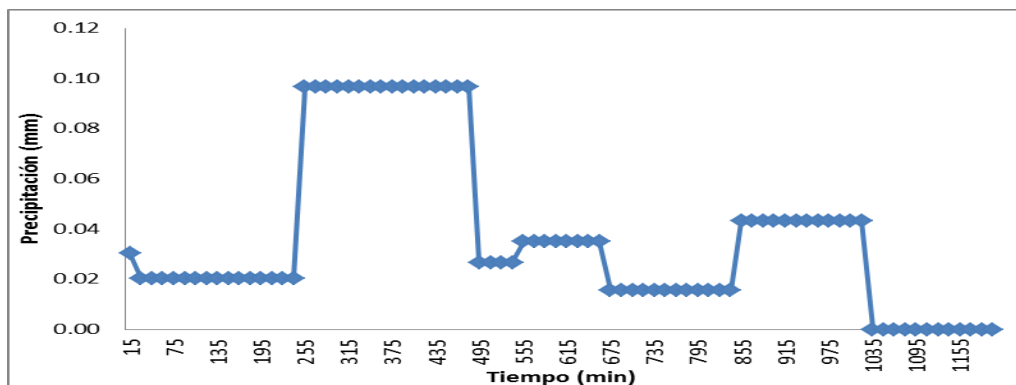


Figura 3-24. Hietograma de entrada Estación San Luis.

Los hietogramas de entrada (figuras 3-21 a 3-24) muestran el pico o el nivel más alto de lluvia durante toda la serie registrada por las estaciones. Estas gráficas se usaran en el análisis global que se realizara en la fase final del trabajo, donde a cada una le corresponde un área de afectación y cuyos modelos que se realicen deberán tener éstos como datos de entrada.

Otro importante dato el cual suministró la empresa de acueducto y Alcantarillado de Bogotá fue la malla vía de la ciudad de Bogotá D.C. (figura 3-25), cuya referencia es importante para la sectorización de las áreas de afectación de cada manhole o pozo el cual es de referencia para las áreas aferentes a cada pozo o manhole a estudiar.

Las cuatro (4) estaciones pluviográficas, ubicadas alrededor de las UGAs de estudio se usaron para realizar un análisis de interpolación por medio de los polígonos de Thiessen, metodología que se basa en trazar líneas entre los puntos para crear un polígono, luego crear bisectrices entre las líneas del polígono hasta que éstas se intercepten, así formar las áreas de afectación que corresponda a cada una de las estaciones que se escogieron (figura 3-25).

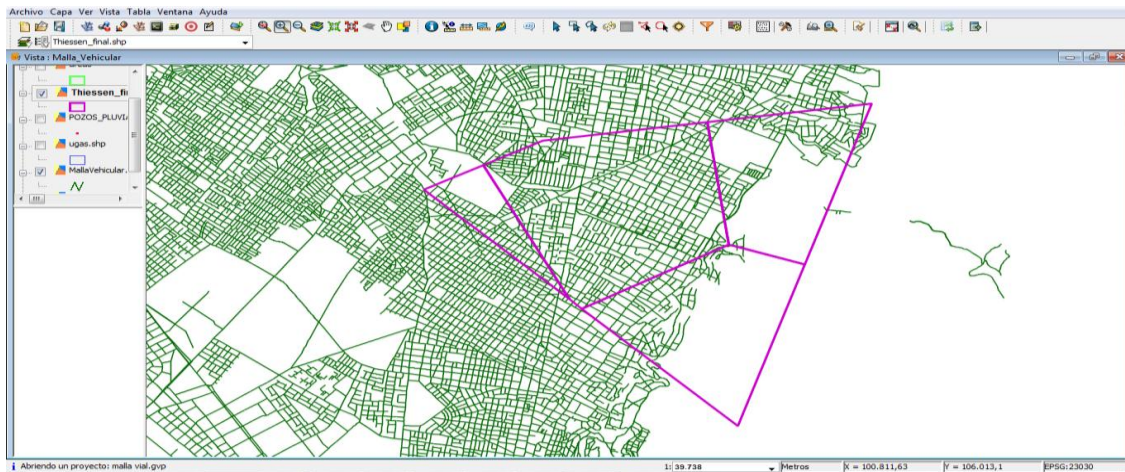


Figura 3-25. Malla vial de la zona de afectación en la ciudad de Bogotá.

Cada uno de los vértices del polígono formado por las líneas moradas en la Figura 3-25 son las estaciones pluviográficas. Como era de esperarse por estar tan alejadas las estaciones de San Luis y Salitre Casa de Bombas de la zona de afectación sus datos no tienen afectación sobre esta área, entonces, solamente las estaciones de Laboratorio la Hormona con un 83% de afectación y la estación de Usaquén Santa Ana con un 17% de afectación tienen influencia de lluvias sobre la zona de estudio.

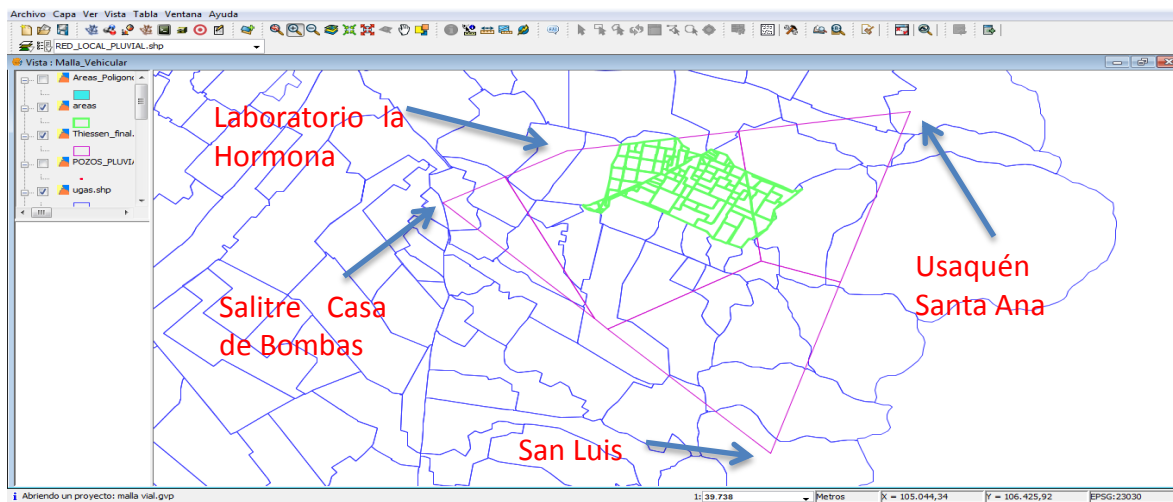


Figura 3-26. Zona de implementación. En morado las áreas de afectación de cada estación sobre la zona de análisis. Vista en GvSig.

3.2.2. EPA SWMM 5.0

Con los análisis de las estaciones y con las áreas de afectación sobre la zona de cada una de las estaciones se dispone a realizar un modelo hidráulico en donde se tiene en cuenta la ubicación de los pozos más importantes junto con sus niveles, las longitudes de la tubería y sus respectivos diámetros y la ubicación de las salidas o descargas de la red. Con el modelo se toman los eventos escogidos y se implementan en el modelo para conocer la operación de la red, con respecto a los eventos más grandes y con respecto a su afectación sobre la zona.

El analizar cada pozo es una parte sensible porque estos puntos son los manholes que reciben el agua lluvia, puntos que pueden ubicar las deficiencias en la red (Figura 3-26), a continuación, se toma el área aferente de cada uno de los pozos localizados en el modelo, delimitados con respecto a la malla vial de la zona (Figura 3-24), con el fin limitar las áreas de afectación de cada punto o manhole y la capacidad de almacenamiento.

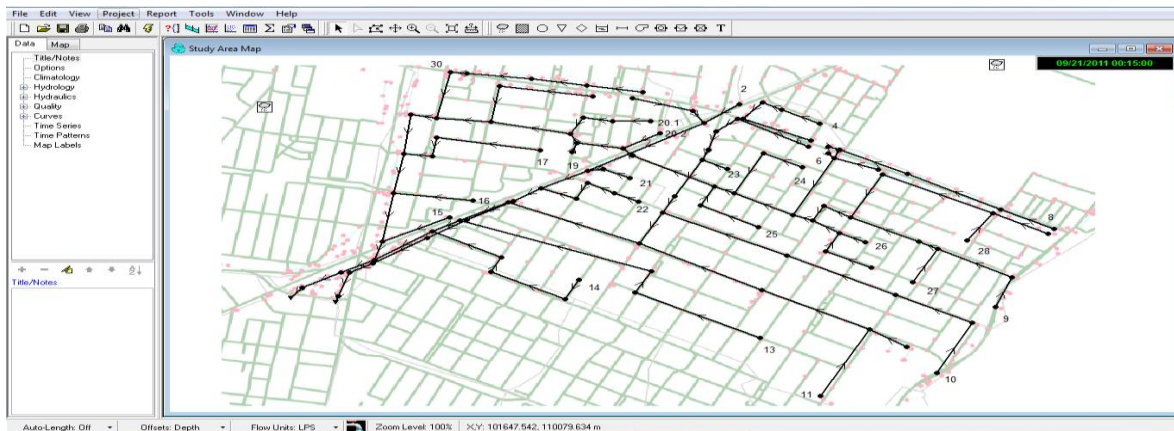


Figura 3-27. Zona de implementación. Red de alcantarillado que tiene la zona de afectación con los pozos principales que reciben el agua lluvia. Modelo en EPASWMM 5.0.

Luego pone el funcionamiento la red a través del modelo hidráulico hecho en el programa EPASWMM 5.0, programa que permite simular precipitaciones basado en un modelo dinámico el cual se utiliza para realizar modelaciones en periodos de tiempo extendidos. Este programa se caracteriza por utilizar un modelo hidrológico en donde las precipitaciones, los volúmenes, la infiltración, la entrada a acuíferos, etc., son tenidos en cuenta por medio de una variabilidad en el área, creando flujo superficial.

Siguiendo los parámetros anteriores la red dibujada en este programa se colocó con respecto a la información suministrada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en los archivos (ArcGis o GvSIG) que contiene toda la red de Bogotá.

En la construcción del modelo de la zona se tuvo en cuenta las coordenadas, las cotas clave y rasante de cada uno de los pozos escogidos, las tuberías tienen como características a tener en cuenta para el modelo, las longitudes, los diámetros y las secciones transversales (circulares o rectangulares para los box).

La red de alcantarillado dibujada en el programa tiene que ser afectada por las áreas aferentes encontradas (figura 3-27) en el archivo GvSig (Figura 3-25), se modelan con respecto a los eventos de lluvias máximas registradas de las estaciones Usaqué Santa Ana y Laboratorio la Hormona por ser estas las únicas estaciones pluviográficas que tienen afectación sobre la zona.

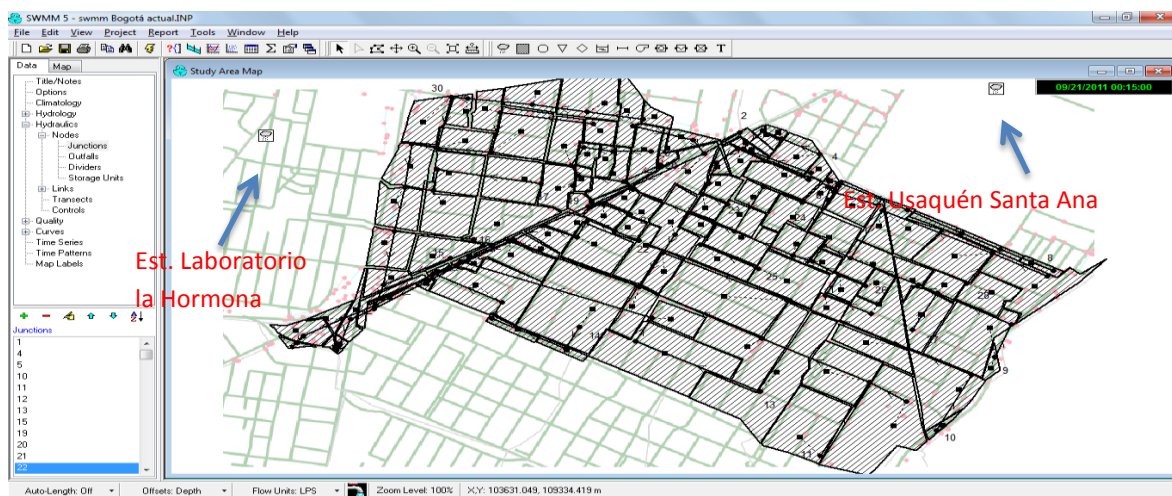


Figura 3-28. Zona de implementación. Áreas aferentes. Modelo en EPASWMM 5.0.

3.2.3. Condiciones admisibles de operación.

Se tomarán como referencia a nivel local y global una serie de parámetros que ayudaran para el análisis en la mejora de la operación en el sistema, estas características del flujo dentro de la red son:

3.2.3.1. Análisis local:

- Los niveles aguas arriba (y_1) no pueden superar el diámetro de la tubería.

- El nivel del resalto no puede ser mayor al diámetro de la tubería, porque se generaría flujo a tubería llena.
- Se debe generar un resalto para que cumpla con los 2 objetivos ya mencionados.

3.2.3.2. Análisis global – local

- Los niveles del agua dentro de la red no pueden ser mayores a la mitad de la altura del manhole.

4. RESULTADOS

A continuación se presentará los resultados obtenidos en cada uno de los análisis empezando por describir los encontrado en el análisis local con el aplicativo computacional y con el análisis dimensional, mencionando los niveles de (y_1 , y_2 y y_3) encontrados, y la implicación de estos resultaos al introducirlo en el análisis global.

4.1 Análisis local

El movimiento de una compuerta deslizante generar muchas combinaciones de niveles hacia aguas arriba y aguas abajo formando en muchas ocasiones un resto hidráulico, por este motivo, a continuación se mostrará un primer análisis de estudio, verificando los casos que se presentarían al mover la compuerta, con un nivel o con un caudal y una apertura de compuerta como datos de entrada.

4.1.1. Esquemas de operación

Al realizar toda la fase de análisis, se encuentran los tres (3) niveles generados por la operación de la compuerta y el caudal total del sistema; para encontrar estos niveles se debe tener en cuenta que se puede tener como dato inicial el nivel aguas arriba o el caudal, siendo cada uno de estos parámetros calculado de forma diferente.

Para cada uno de estos análisis se realizó una tabla en donde se resume los datos obtenidos (tablas anexo A). Cada tabla muestra el tipo de resalto, el porcentaje de apertura de las compuertas, los niveles críticos y normales que crean el perfil hidráulico y la nomenclatura del perfil que se forma con la operación de la compuerta. Las tablas 4-1 y 4-2 son un resumen de los resultados obtenidos con los datos de entrada al sistema (nivel aguas arriba (y_1) o el caudal (Q)), valor que se observa en la cuarta columna.

Tabla 4-1. Resumen de operación y características hidráulicas ($D=1$) ($Q=0.45\text{m}^3/\text{s}$)

Conoce el Q y Y_2 , se halla el Y_1 - Para Y_1 más altos del diámetro de entrada ($y_1 > d$)											
	(m^3/s)	%	%	%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	Tipos de resalto	
CAUDAL (Q)	TIPO DE	Mín. de y_1	Máx. de y_1	Mín. de	Máx. de	Y_3	Y_3	Y_c	Y_n	y_2	y_3
(m^3/s)	RESALTO			Apertura	Apertura						
0.45	fuerte	3.74	3.74	12.0%	12.0%	0.96	0.96	0.37	0.4507	M-3	M-1
0.45	estable	3.00	1.48	13.0%	17.0%	0.90	0.74	0.37	0.4507	M-3	M-1
0.45	oscilante	1.29	0.77	18.0%	23.0%	0.71	0.59	0.37	0.4507	M-3	M-2
0.45	debil	0.71	0.57	24.0%	28.0%	0.57	0.50	0.37	0.4507	M-3	M-2
0.45	ondulante	0.54	0.48	29.0%	34.0%	0.48	0.41	0.37	0.4507	M-3	M-2
0.45	critico	0.48	0.48	0.3500	0.3500	0.41	0.41	0.37	0.45	M-3	M-2

Tabla 4-2. Resumen de operación y características hidráulicas (D=1) (Y1= 0.65m)

Conoce el el nivel aguas arriba (Y1) y apertura de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)													
		(m ³ /s)	(m ³ /s)	%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
Altura y1	tipo de resalto	Mín. de Q	Máx. de Q	Mín. de y2/d	Máx. de y2/d	Mín. de yn	Máx. de yn	Mín. de yc	Mín. de yc2	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Y2	Y3
0.65	fuerte	0.0047	0.0132	1%	2%	0.02	0.04	0.03	0.03	0.11	0.15	S-3	S-1
0.65	estable	0.0239	0.0986	3%	8%	0.06	0.12	0.08	0.08	0.19	0.33	S-3	S-1
0.65	oscilante	0.1163	0.3613	9%	21%	0.13	0.23	0.18	0.18	0.35	0.51	S-3	S-1
0.65	debil	0.3830	0.6668	22%	35%	0.24	0.32	0.34	0.34	0.53	0.61	S-2	S-1
0.65	ondulante	0.6883	1.0409	36%	53%	0.32	0.41	0.47	0.47	0.61	0.65	S-2	S-1
0.65	critico	1.0608	1.2550	54%	64%	0.41	0.45	0.59	0.59	0.65	0.67	S-2	S-1

En las tablas 4-1 y 4-2 se observan dos (2) columnas llamadas “Min. De y2/d” y “Max. De y2/d” en donde muestran el porcentaje de apertura de la compuerta con respecto al diámetro de la tubería, mostrando un intervalo de apertura de compuerta, dando así un orden de magnitud para cada uno de los niveles hacia aguas arriba (y1) o caudal (Q) (columna 2 y 3), aguas abajo (y3) (columna 11 y 12), también para el nivel crítico (tabla 4-1, columna 9 y tabla 4-2, columnas 11 y 12) y normal (tabla 4-1, columna 10 y para la tabla 4-2 las columnas 9 y 10) según el caudal que entra al sistema. Cada uno de estos intervalos de niveles se caracterizo por un tipo de resalto (columna 1).

Después de calcular los tres (3) niveles (Y1, Y2 y Y3) que caracterizan al resalto hidráulico al operar la compuerta, se tiene los niveles críticos y normales que se generan dependiendo de los caudales del sistema. En la tabla 4-1 se ven solamente un valor crítico y normal debido que estos niveles están en función únicamente del caudal, caso contrario se ve en la tabla 4-2 donde las columnas que enfatizan los niveles críticos y normales contienen un valor máximo y mínimo, debido a que los caudales varían porque se mantiene un nivel fijo aguas arriba (Y1), también la operación de la compuerta hacen variar el caudal tal y como se ve en las columnas 2 y 3.

El nivel crítico se tiene en cuenta porque las estrategias de operación se han de realizar con el objetivo de cumplir las condiciones hidráulicas admisibles. Las aperturas deberán estar por debajo de este nivel crítico como se muestra en las tablas y los niveles del resalto (Y3) deben estar por debajo del nivel de la tubería, esto nos lleva a tener valores que hacen parte de una operación hidráulica que cumpla con las condiciones admisibles.

No solo los niveles juegan un papel importante también las pendientes porque dependiendo del tipo (subcrítica o supercrítica) hacen modificar los perfiles aun así se tengan los mismos niveles aguas arriba haciendo que haya más facilidad de llenado en la tubería con pendientes más empinadas o sea perfiles S. Mientras que para pendientes suaves u horizontales es más fácil lograr perfiles M2 y H2.

En la Figura 4-1 encontramos la simulación del perfil en detalle, donde se muestra una línea naranja la cual simula el nivel crítico durante la operación, debajo de esta línea está el perfil con flujo supercrítico, donde el inicio es la ubicación de la compuerta, luego la línea morada simula el perfil aguas abajo con un tipo de flujo subcrítico, este último siempre debe estar por debajo del nivel de la tubería.

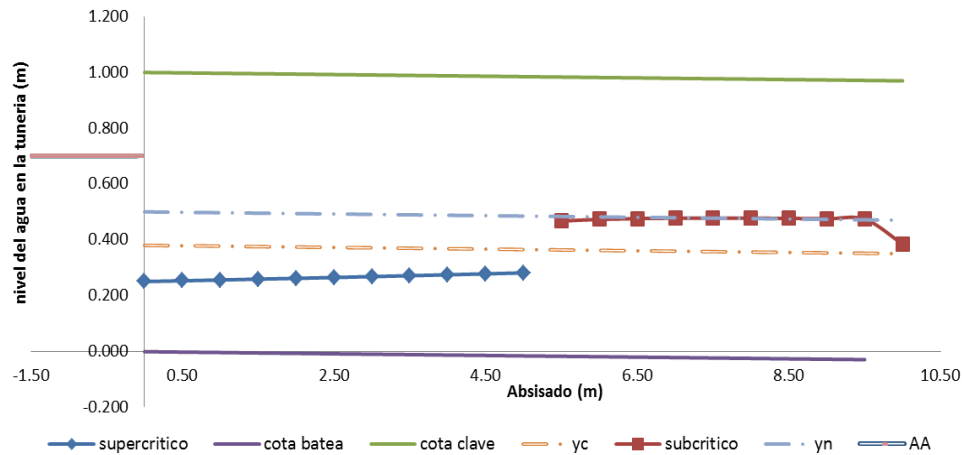


Figura 4-1. Perfil del agua después de la compuerta (azul) y del resalto hidráulico (rojo) para una profundidad con una pendiente suave. Las líneas mostradas son, perfil supercrítico, la cota inferior de la tubería, la cota superior de la tubería, nivel crítico, el perfil subcrítico, la profundidad normal y el nivel aguas arriba.

4.1.2. Esquemas de operación cualitativos

1. Donde la altura inicial es menor a la mitad del diámetro.
2. Donde la altura inicial está entre la mitad y 1.2 veces del diámetro.
3. El nivel aguas arriba Y1 es 1.2 veces mayor al diámetro.

Tabla 4-3. Numeración de los esquemas conceptuales de operación según la zona en que se encuentre la compuerta

PENDIENTE	ZONA (y_2)	$y_1 < 0.5D$	$0.5D < y_1 < 1.2D$	$y_1 > 1.2D$
S	1	10	10	10
	2	11	11	12
	3	13	14	15
M	1	5	5	5
	2	6	6	6
	3	7	8	9
H	$y_2 > y_c$	4	4	4
	$y_2 < y_c$	1	2	3

Los esquemas que están referenciados en la tabla 4-3 dependen de la ubicación de la compuerta y se distribuyó de la siguiente manera, cada pendiente tiene tres zonas las cuales son: 3, del lecho hasta el nivel crítico o normal, 2, entre los niveles crítico y normal y 1, después del nivel crítico o normal. Siendo cada nivel importante para resaltar el comportamiento del flujo después del resalto.

A partir de los análisis numéricos y con respecto a los resultados encontrados en la tablas 4-1 y 4-2 se establecieron los esquemas de operación conceptual, referenciando la altura aguas arriba (y_1), la apertura de la compuerta (y_2), el nivel del resalto (y_3), los niveles crítico y normal (y_c y y_n respectivamente), pendiente y el perfil hidráulico formado, también se establece una comparación con los perfiles calculados, los cuales se explicaran a continuación:

4.1.2.1 Comparación entre los esquemas conceptuales y analíticos, pendiente horizontal.

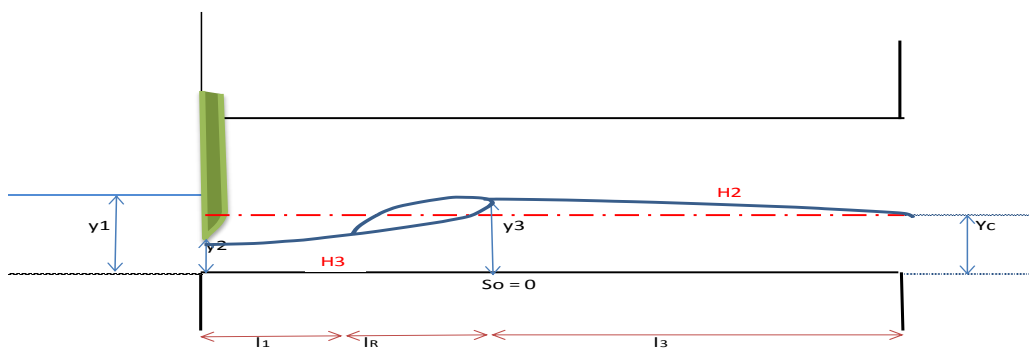


Figura 4-2. Esquema de operación 1, apertura antes del nivel crítico, pendiente horizontal y nivel aguas arriba $0.5d < Y_1$.

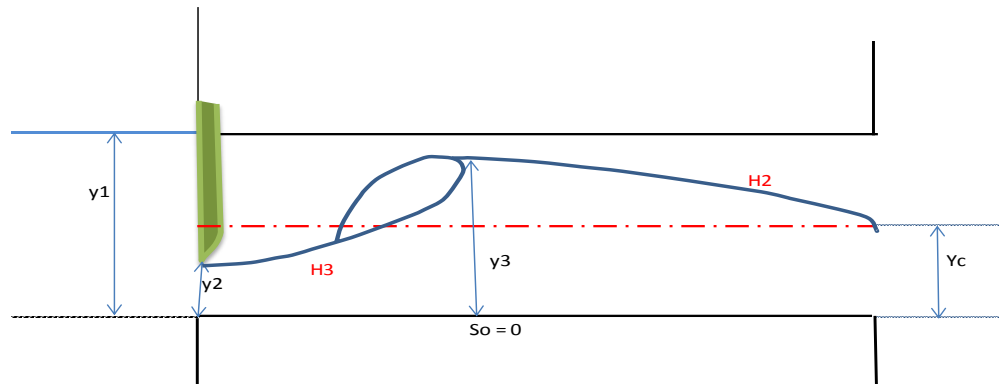


Figura 4-3. Esquema de operación 2, apertura antes del nivel crítico, pendiente horizontal y nivel aguas arriba entre la mitad y 1,2 veces el diámetro. $0.5d < Y_1 < 1.2d$.

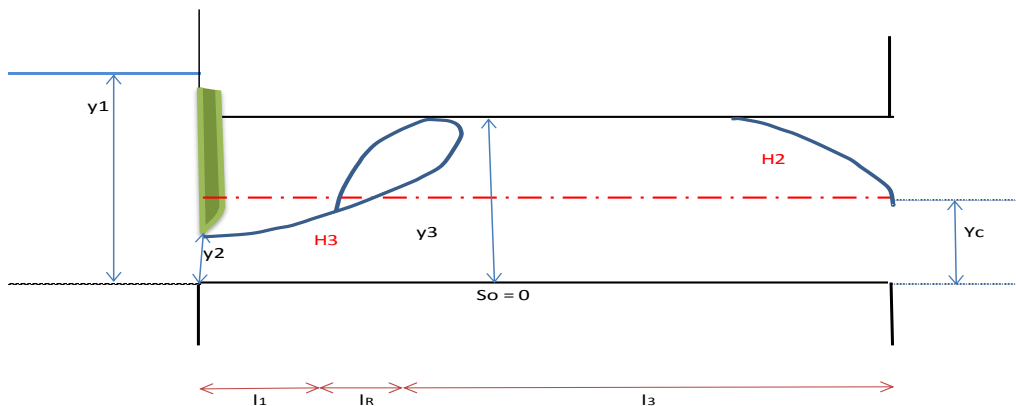


Figura 4-4. Esquema de operación 3, apertura antes del nivel crítico, pendiente horizontal y nivel agua arriba mayor a 1.2 veces el diámetro. $Y_1 > 1.2d$.

En los esquemas 1, 2 y 3 (Figura 4-2 a 4-4), muestran una operación con una pendiente horizontal. Los esquemas muestran que solamente se puede generar un resalto hidráulico al estar la compuerta por debajo del nivel crítico. Cada uno de los esquemas muestra que el nivel de entrega al siguiente pozo es sobre el nivel crítico.

4.1.2.2 Comparación entre los esquemas conceptuales y analíticos, pendiente suave.

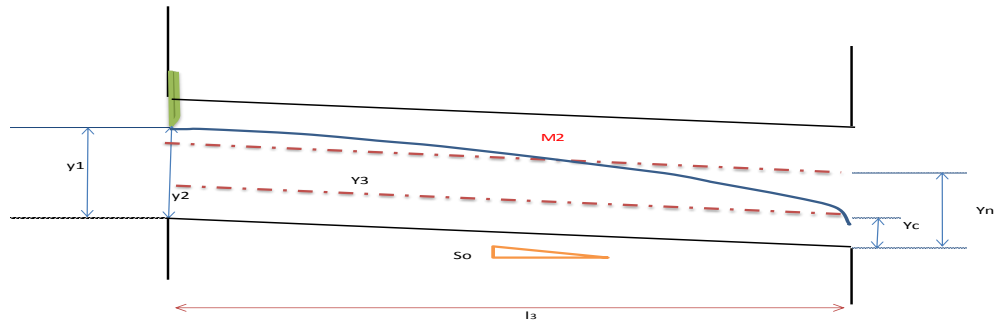


Figura 4-5. Esquema de operación 5, apertura en zona 1, pendiente suave, para cualquier altura aguas arriba (y_1).

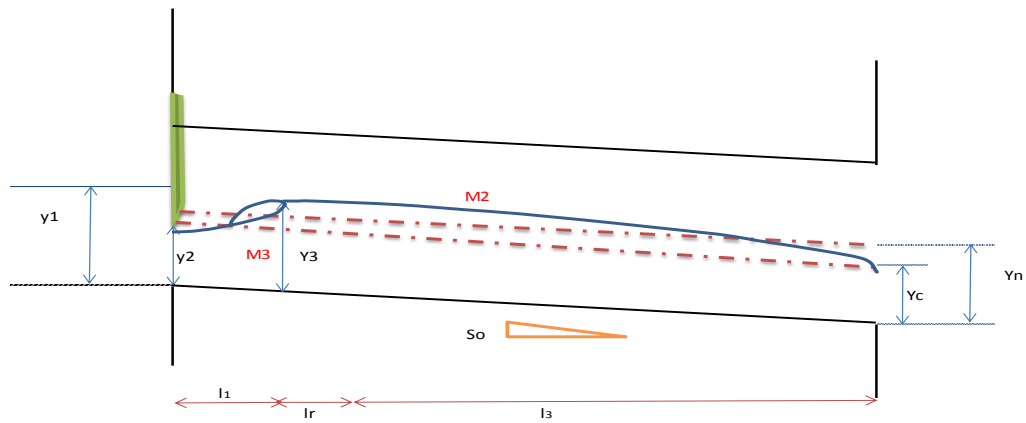
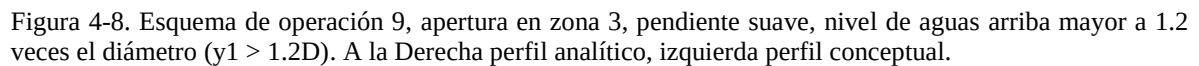
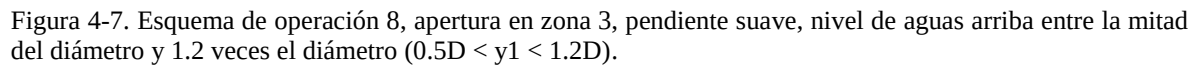


Figura 4-6. Esquema de operación 7, apertura en zona 3, pendiente suave, nivel de aguas arriba menor de la mitad del diámetro ($y_1 < D$).



En los esquemas (Figuras 4-5 a 4-8) se muestran los tres niveles principales, aguas arriba (Y1), apertura de compuerta (Y2), nivel de resalto (Y3), con una pendiente suave, donde una vez más se comprueba que para generar un resalto la compuerta debe estar por debajo del nivel crítico y el nivel aguas arriba no puede ser mayor a 1.2 veces el diámetro porque se produce un llenado en la tubería.

4.1.2.3 Comparación entre los esquemas conceptuales y calculados, pendiente fuerte:

Para este tipo de pendiente se mostrará la relación de los esquemas conceptuales con los calculados.

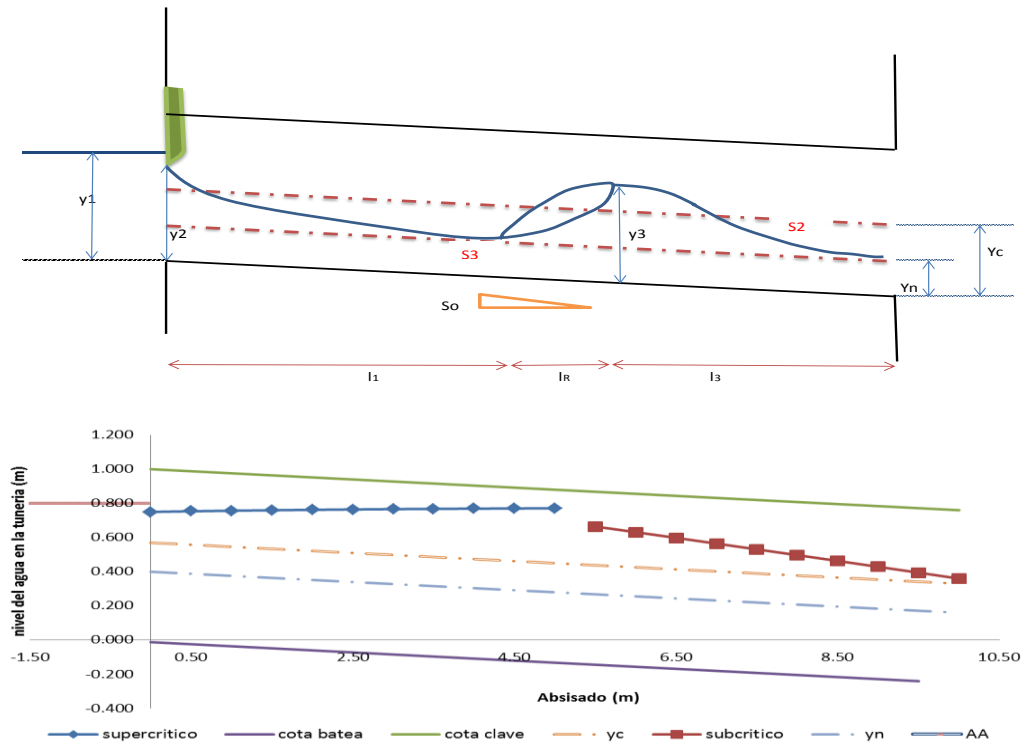
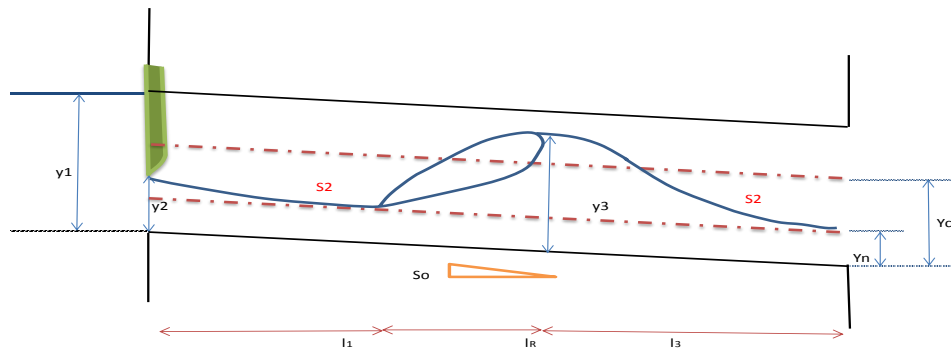


Figura 4-9. Esquema de operación 10, apertura en zona 1, pendiente empinada, para cualquier nivel aguas arriba. Abajo el perfil analítico, arriba el perfil conceptual.



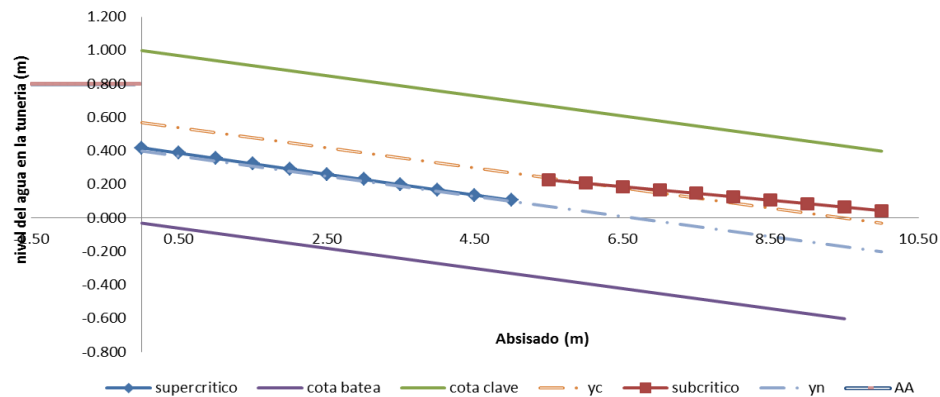


Figura 4-10. Esquema de operación 11, apertura en zona 2, pendiente empinada, nivel de aguas arriba entre 0 a 1.2 veces el diámetro ($0 < Y1 < 1.2d$). Abajo el perfil analítico, arriba el perfil conceptual.

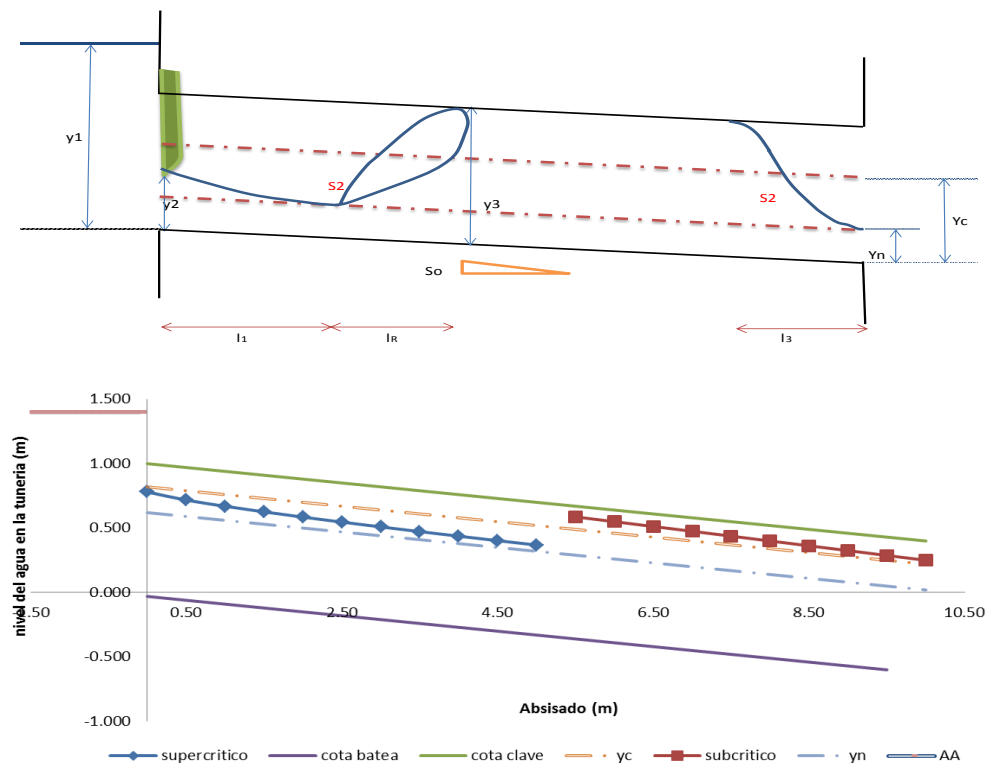


Figura 4-11. Esquema de operación 12, apertura en zona 2, pendiente empinada, nivel de aguas arriba mayor a 1.2 veces el diámetro ($Y1 > 1.2d$). Abajo el perfil calculado, arriba el perfil conceptual.

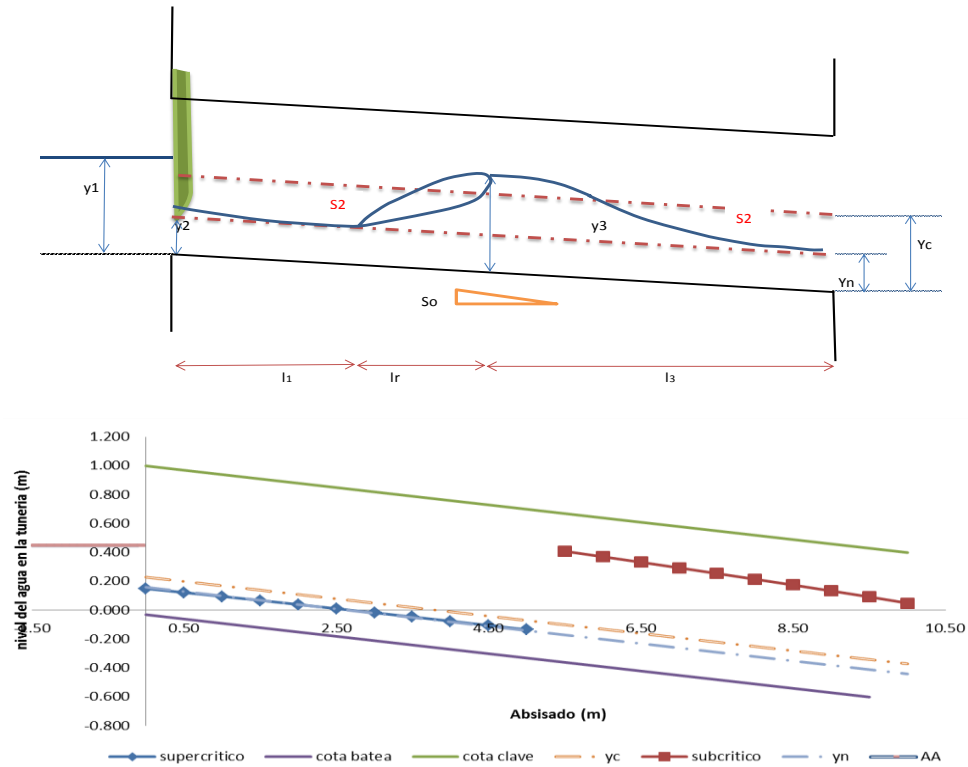
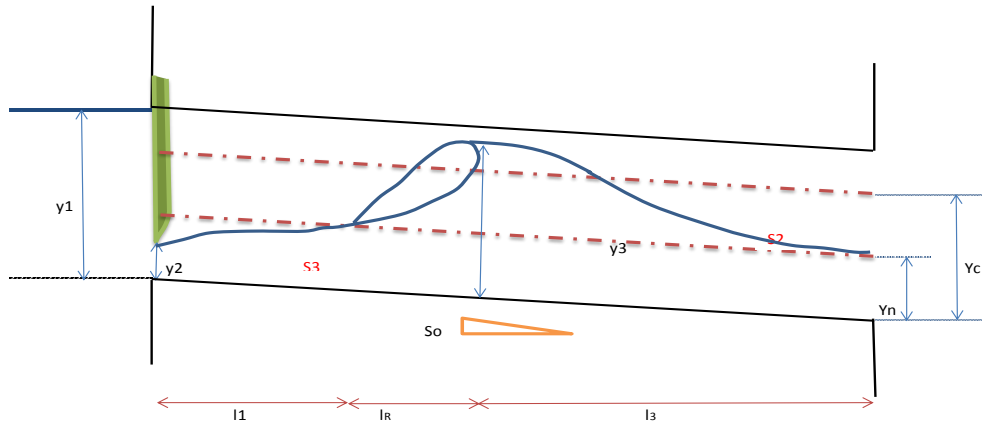


Figura 4-12. Esquema de operación 13, apertura en zona 3, pendiente empinada, nivel de aguas arriba menor a la mitad del diámetro ($y_1 < 0.5d$). A la Derecha perfil analítico, izquierda perfil conceptual.



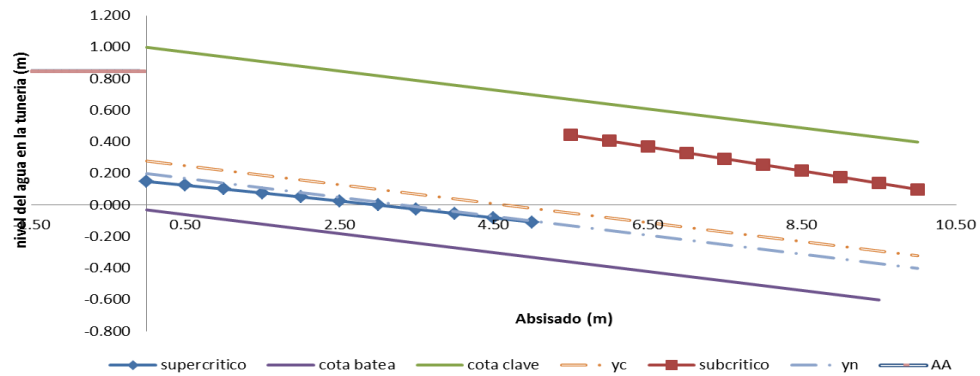


Figura 4-13. Esquema de operación 14, apertura en zona 3, pendiente empinada, nivel de aguas arriba entre la mitad y 1,2 veces el diámetro ($0.5d < Y1 < 1.2d$). A la Derecha perfil calculado, izquierda perfil conceptual.

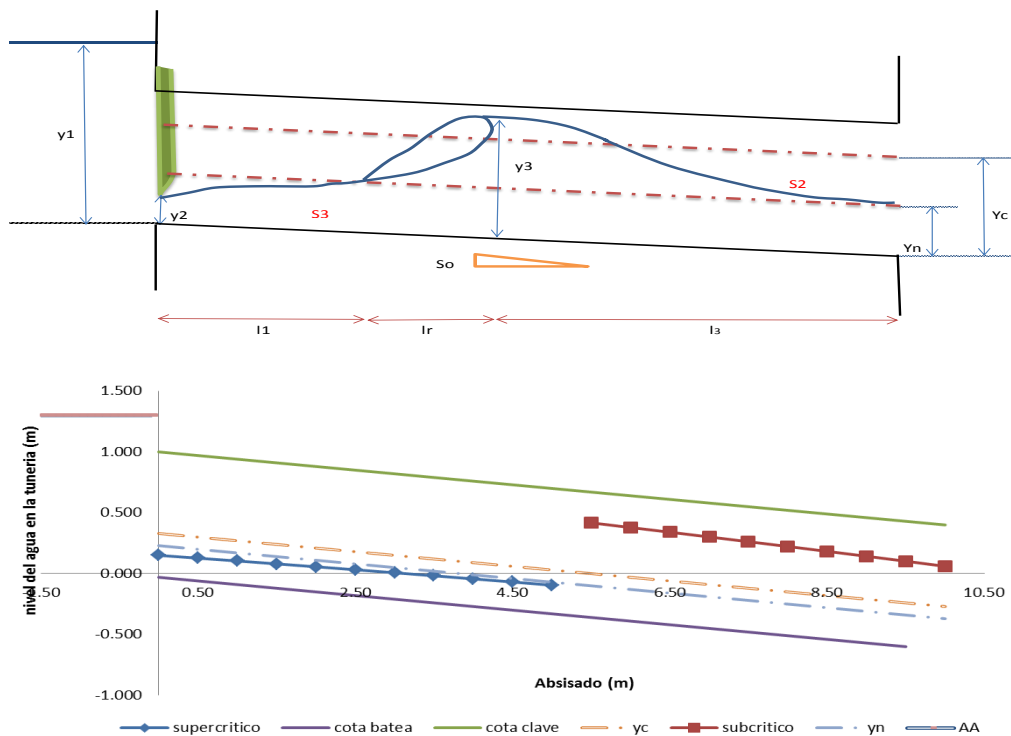


Figura 4-14. Esquema de operación 15, apertura en zona 3, pendiente empinada, nivel de aguas arriba mayor a 1,2 veces el diámetro ($Y1 > 1.2d$). A la Derecha perfil analítico, izquierda perfil conceptual.

Por último tenemos las figuras 4-9 a 4-14 que muestran los esquemas con pendientes empinadas (S), al igual que con las pendientes suaves, la compuerta se ubica en las tres (3) zonas, se encuentra que la operación debe ser por debajo del nivel crítico que en este caso está en las zonas 2 y 3, encontrando una mejor operación en la zona 2, en la zona 3 se tendría llenado en la tubería y niveles aguas arriba 1.2 veces más grandes que el diámetro.

Cada uno de los esquemas son exclusivamente conceptuales y contienen los niveles que se verían realmente en una tubería, aunque se tiene un contraste con los cálculos que en muchos casos los análisis imprimen remansos, pero en la realidad se sabe que esto no puede ser porque no se tiene un nivel aguas abajo que ayude a generarlo. Razones por las que se toma el nivel del resalto (y_3) como la altura máxima que se genera al operar la compuerta.

4.1.3. Arrastre de sedimentos

Dentro del análisis local se realizaron una serie de modelaciones físicas con un modelo a escala (Figura 3-13), para realizar la simulación de los perfiles conceptuales, pero al no encontrar relación con los perfiles, se analizó pequeñas aperturas de compuerta para luego verificar la variación del caudal que salía del tanque en un tiempo determinado y analizar el caudal de salida por la compuerta y que lavado genera.

El procedimiento de cálculo realizado para la verificación de la fase II encontrado con el modelo físico, es similar al procedimiento para el cálculo para los perfiles hidráulicos; el objetivo de este procedimiento es encontrar la variación de los caudales en el tiempo. Para el cálculo de la variación de los caudales, la fase I encuentra un valor aguas arriba (y_1), con este valor seguimos a la fase II para calcular los caudales a medida que se va abriendo la compuerta hasta estar esta totalmente abierta. (Figura 4-15) con lo anterior el paso siguiente a calibrar el valor del coeficiente C_d se continuó a calcular la variación de los caudales en el tiempo.

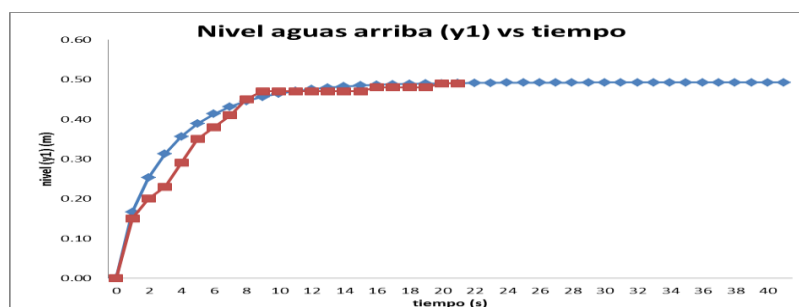


Figura 4-15. Gráfica de fase I del nivel aguas arriba versus el tiempo. Con una apertura de compuerta constante (línea roja, son los datos medidos y línea azul, datos calculados).

Primero se verifico que para aperturas pequeñas (entre 1cm y 5 cm) un tiempo de llenado en el tanque a 85 segundos, cuyo valor fue de 0.49 m. Luego de la calibración de C_d se observó que el comportamiento del nivel aguas arriba con respecto al tiempo se comporta de manera exponencial, hasta llegar a un nivel estable.

En la fase II, se encontró que con una relación lineal de apertura de compuerta, se logra obtener un pico de caudal con un porcentaje de apertura del 50%, cuyo pico se produce antes de llegar al nivel crítico generado por el caudal de entrada (figura 4-16), comportamiento que en la mayoría de casos es muy cercano a la mitad del nivel crítico. El caudal calculado en el tiempo con respecto a la apertura de la compuerta es el dato buscado para verificar la cantidad de sedimento que posiblemente se puede lavar.

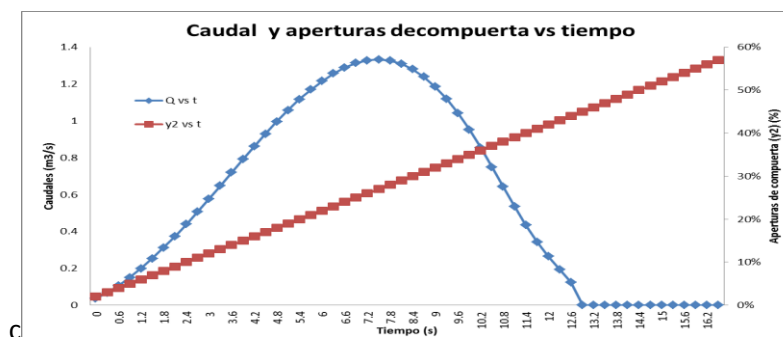


Figura 4-16. Gráfica de fase II caudales y porcentaje de apertura contra el tiempo. Con una apertura de compuerta que se va moviendo en el tiempo.

Con los caudales encontrados y la metodología de arrastre de sedimentos STSim (Schlütter, 1999), se encontraron los porcentajes de arrastre de sedimentos operando la compuerta con respecto a los caudales encontrados del modelo implementado en SWMM 5.0.

Tabla 4-4. Porcentaje de arrastre de sedimento según apertura de compuerta según la metodología de STSim (Schlütter, 1999) y la Fase I y Fase II de operación.

Porcentaje de arrastre de sedimentos (STSim)				
Apertura de compuerta y_2	Caudales máximos (%)			
	(0-25)% Q_{max}	(26-50)% Q_{max}	(50-75)% Q_{max}	(75-100)% Q_{max}
0 - 40%	(0 - 40) %	(0 - 40) %	(20 - 100) %	(40 - 100)
40 - 60%	(0 - 10)%	(0 - 25) %	(0 - 50)%	(10 - 90)%
60 - 100%	(0 - 1)%	(0 - 5)%	(0 - 20)%	(0 - 40)%

La tabla 4-4 se puede distinguir los diferentes porcentajes de arrastre de sedimentos que se pueden generar al realizar una operación con compuertas deslizantes. Cada uno de estos porcentajes muestran que a medida que se va abriendo la compuerta el lavado es menos efectivo, por esta razón hay que relacionar las aperturas bajas con los análisis que se realizaran a continuación para encontrar una apertura que también contribuya con el lavado en la tubería.

4.2. Análisis Global - Local

La modelación de la red se hizo a partir de los datos suministrados por la EAAB. La modelación se realizó en el software EPASWMM y cuyos resultados se mostrara a continuación:

4.2.1. Modelo en EPASWMM

Al momento de representar la red en el software, se ingresan los datos de los hietogramas de las estaciones de Laboratorio la Hormona y Usaqué Santa Ana. Los eventos máximos, son modelados para encontrar los caudales que se producen en la red de alcantarillado (figura 4-18).

Con el caudal máximo se analizan las salidas y los niveles de agua en el tiempo, con los eventos máximos de lluvia. Los caudales máximos encontrados en los nodos 112 y 113 son: 1892 l/s y de 432 l/s respectivamente.

De esta manera se realiza el análisis local en la salida de la red y se incluye el nivel aguas arriba (y1) simulando la operación de la compuerta en este punto. Luego se verifican los niveles de los manholes que han sido generados por la operación de la compuerta.

Esta simulación de la compuerta se hace para diferentes porcentajes de apertura de compuerta. Las aperturas se clasifican como bajas, menores al 40%; medias entre el 40 y 60% y por ultimo la apertura alta son las mayores del 60%, donde cada apertura es con respecto al diámetro.

A continuación, una simulación con el programa EPASWMM 5.0 en donde se tienen en cuenta los caudales máximos según los registros históricos de las estaciones.

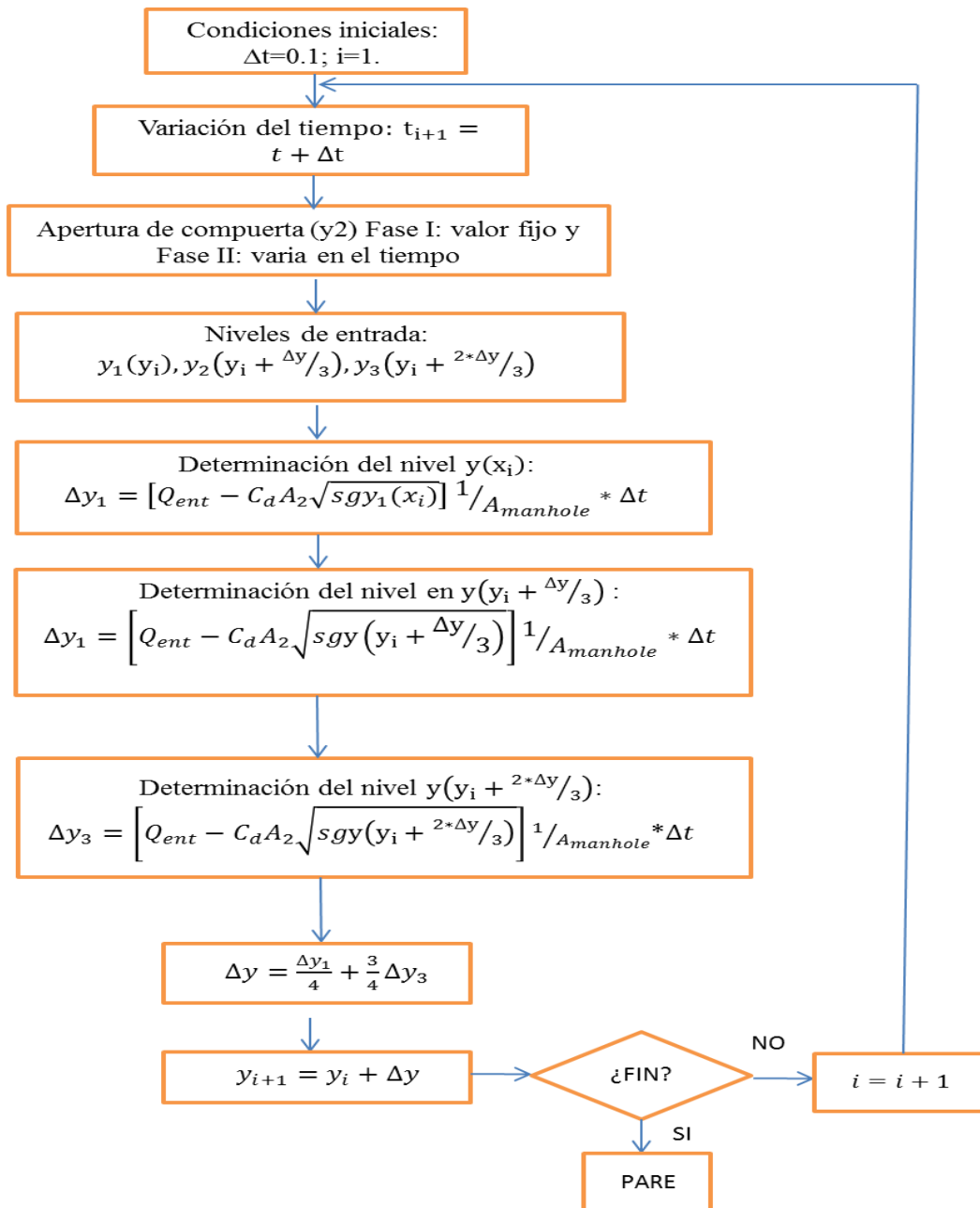


Figura 4-17. Esquema de cálculo para la fase I y la fase II con la metodología de Runge-Kutta. Adaptado de (Chow et al., 1994)

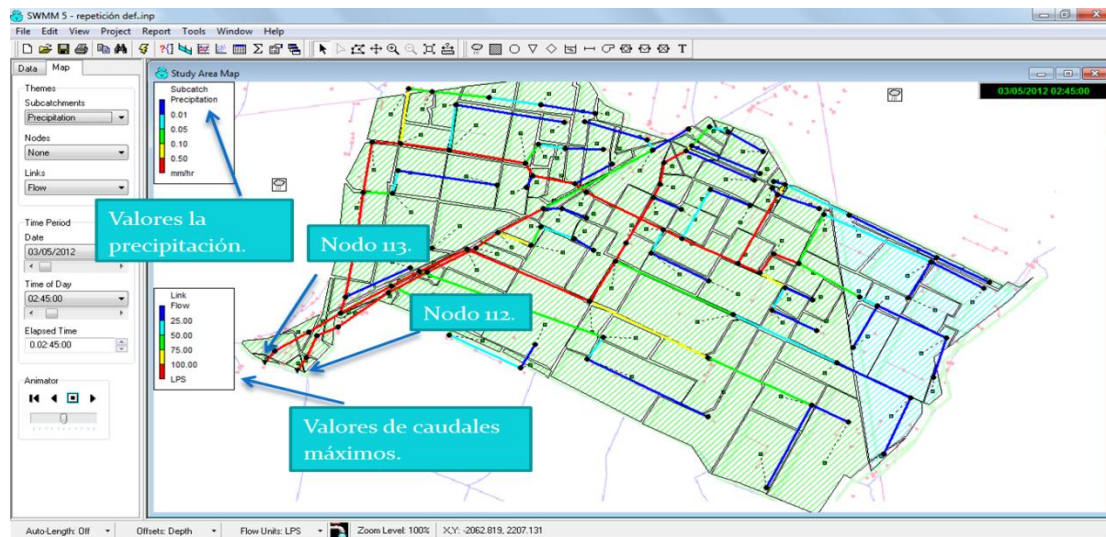


Figura 4-18. Modelación de la red de alcantarillado, caudales que recorren la red con los eventos máximos ingresados.

Los puntos en donde se realizó este análisis; fueron los nodos o manholes 112 y 113, siendo el nodo 113 el más crítico porque contiene una gran parte del agua que cae en las UGAs 99, 60 y 61. El nodo 112 que con un ramal menos extenso que la red principal del nodo 113, recibe el agua de las tres UGAs; el nodo 113 que tiene una pendiente empinada, a comparación del nodo 112 que tiene una pendiente suave lo cual genera diferentes comportamientos al operar la compuerta hacia aguas arriba.

Cada uno de estos nodos fueron analizados localmente y por separados, debido a las diferentes características hidráulicas. El análisis en el nodo generó diferentes resultados los cuales se muestran a continuación:

La primera simulación muestra una operación de la compuerta, apertura baja, formando un nivel aguas arriba (y_1) mayor al diámetro en el nodo 113. Las Figuras 4-19 a 4-22 muestran, cómo por tener un evento máximo, el caudal generado produce sobrecargas aguas arriba. Con base en lo anterior se subió la apertura de la compuerta a un nivel por encima del 60%, contrario lo que menciona (Campisano et al., 2007) en su trabajo.

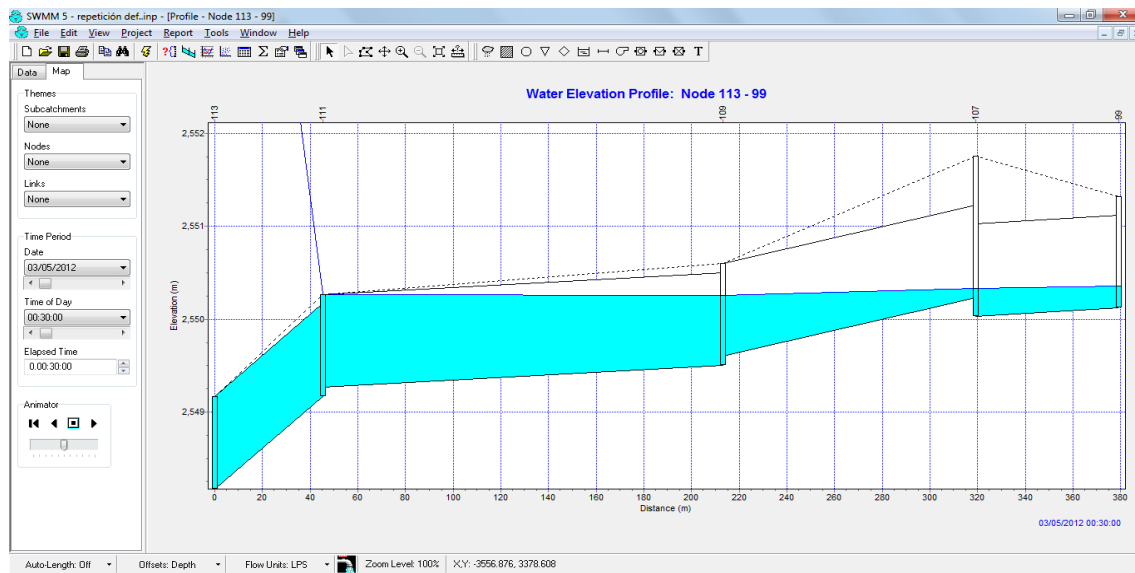


Figura 4-19. Simulación de una compuerta con una apertura baja (20%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 30s.

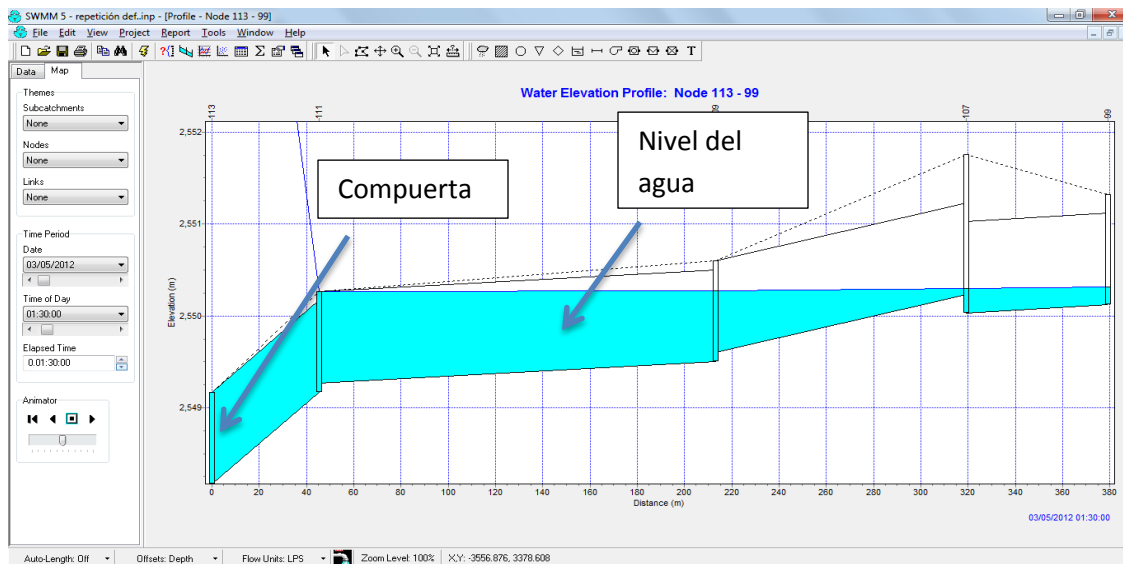


Figura 4-20. Simulación de una compuerta con una apertura baja (20%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 1:30min

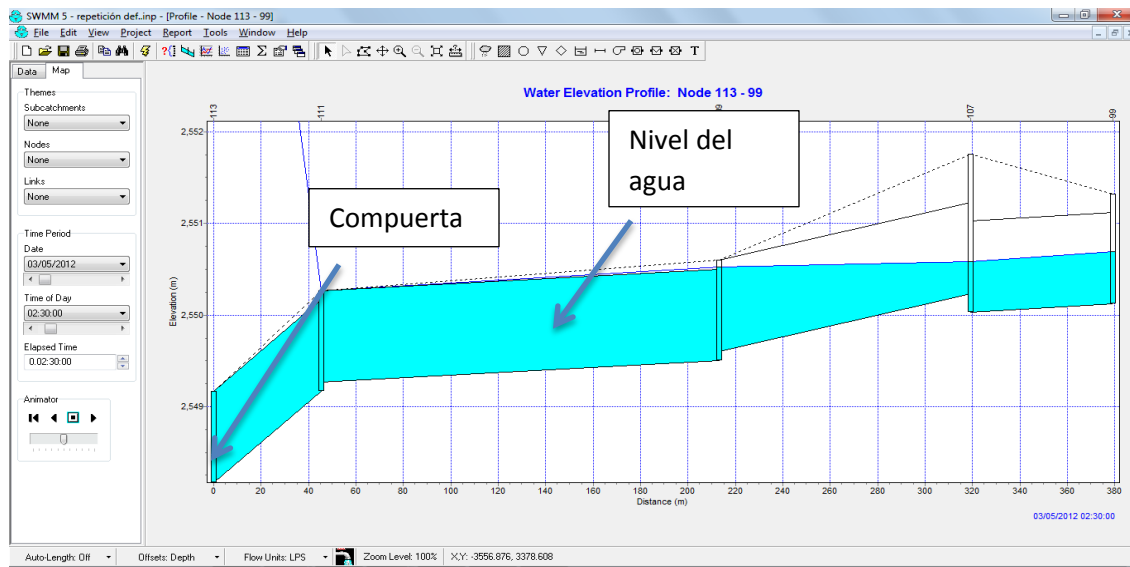


Figura 4-21. Simulación de una compuerta con una apertura baja (20%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 2:30 min.

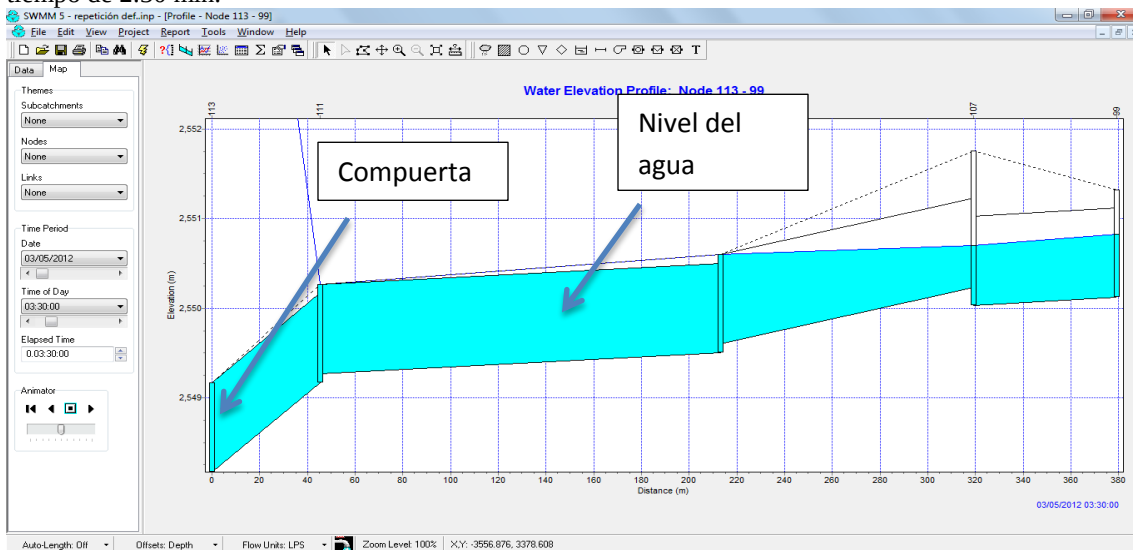


Figura 4-22. Simulación de una compuerta con una apertura baja (20%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 3:30 min.

Los resultados (Figura 4-23, Figura 4-24, Figura 4-25 y Figura 4-26) con una apertura alta fueron mejores con respecto al control de inundaciones aguas arriba de la compuerta. Aun así hay rebose en los manholes cercanos a la salida sobre la red troncal analizada, lo cual demuestra que la

operación no es suficiente para controlar estos niveles máximos y basta con dejar la compuerta totalmente abierta para que desagüe la totalidad del agua.

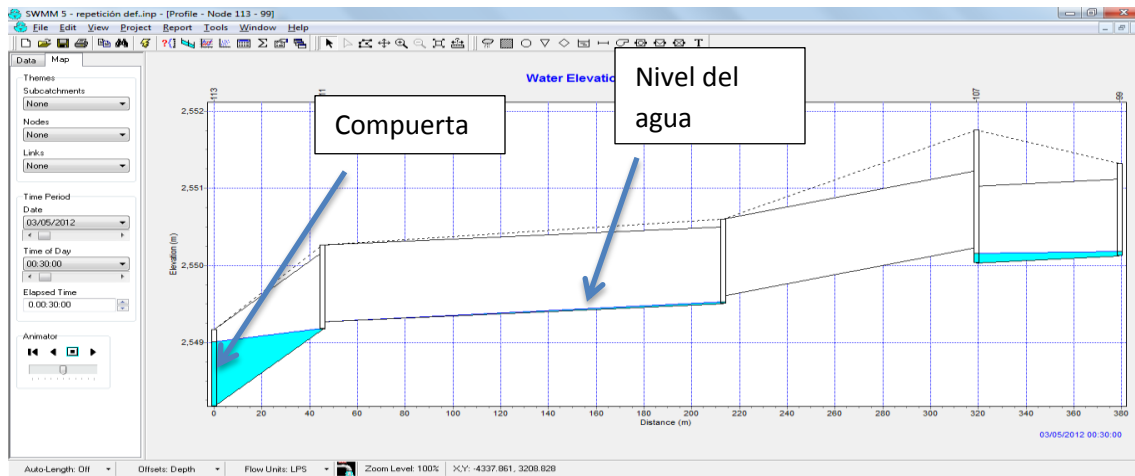


Figura 4-23. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 30s.

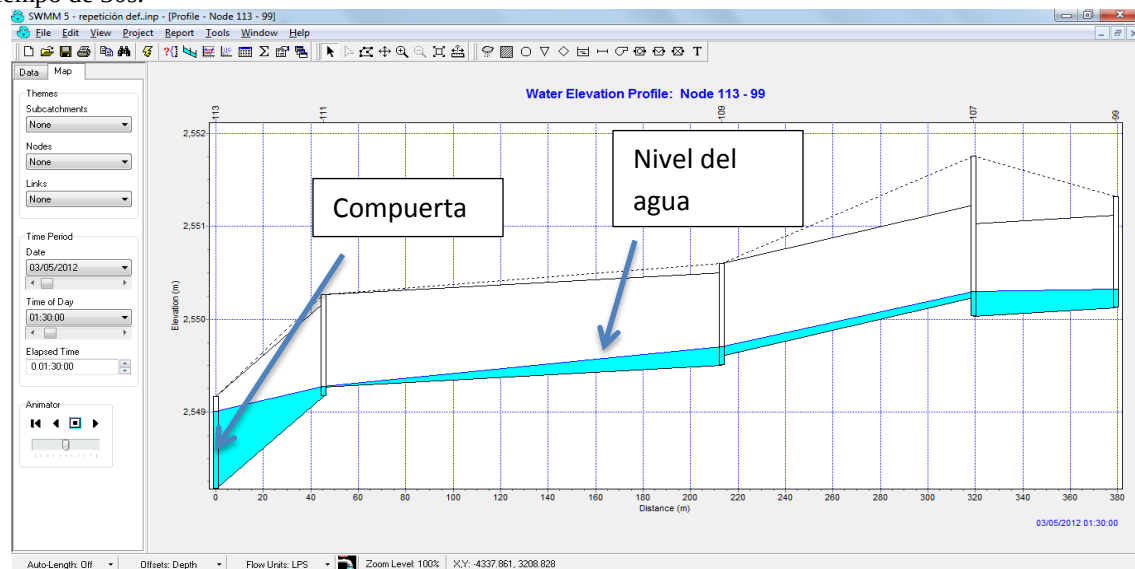


Figura 4-24. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 1:30 min.

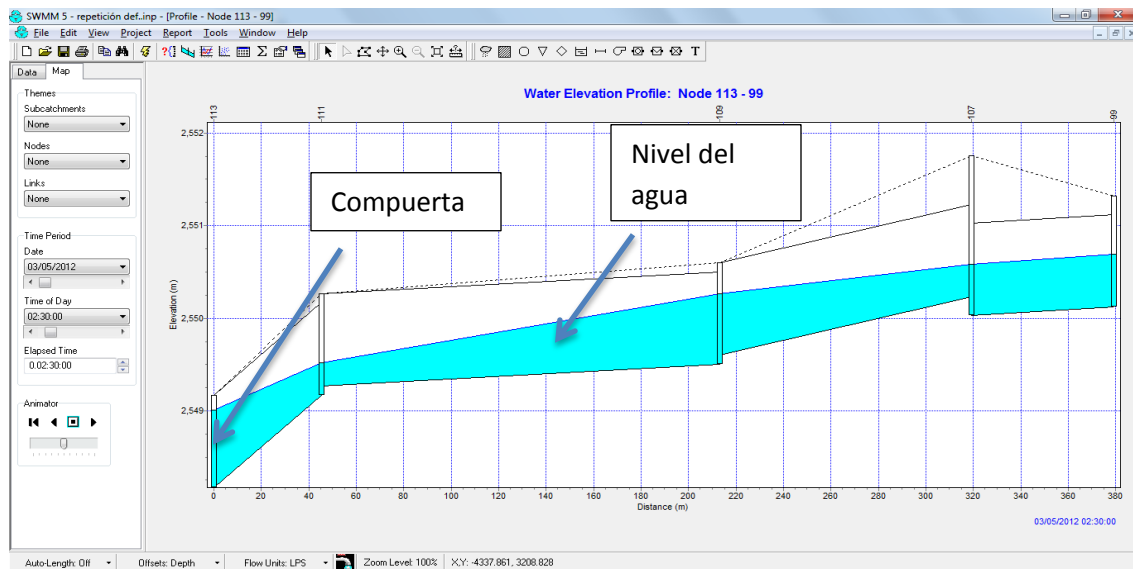


Figura 4-25. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 2:30 min.

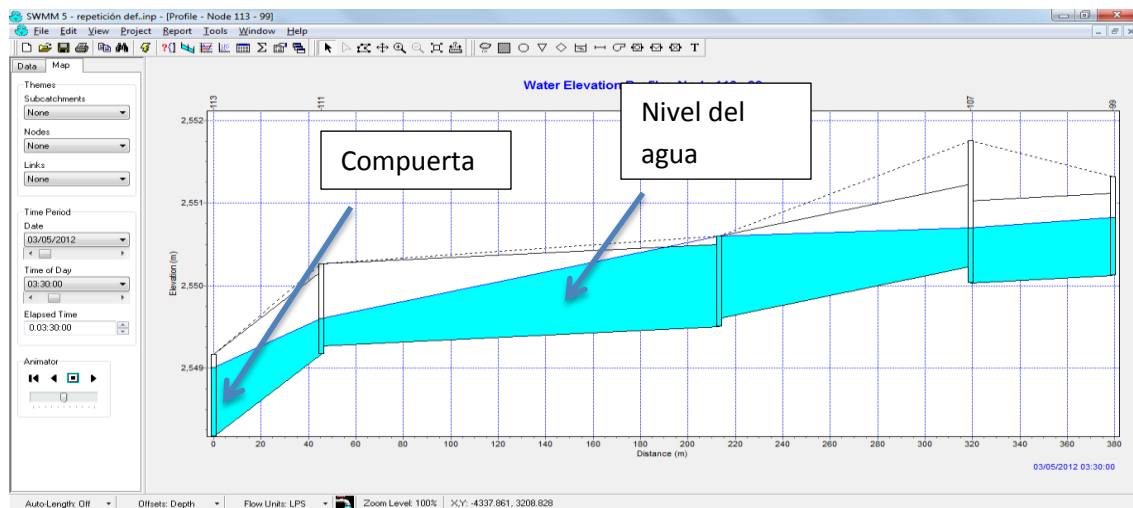


Figura 4-26. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente fuerte, para un tiempo de 3:30 min.

Por otro lado al revisar la salida correspondiente al nodo 112 con un caudal 4 veces menor al caudal máximo del nodo 113 y con una pendiente más suave, se encontró una mejor operación.

No obstante la compuerta tuvo que ser subida a una apertura alta para que no se generara problemas hidráulicos en la red, tal y como se muestra en las figuras 4-27 a 4-30.

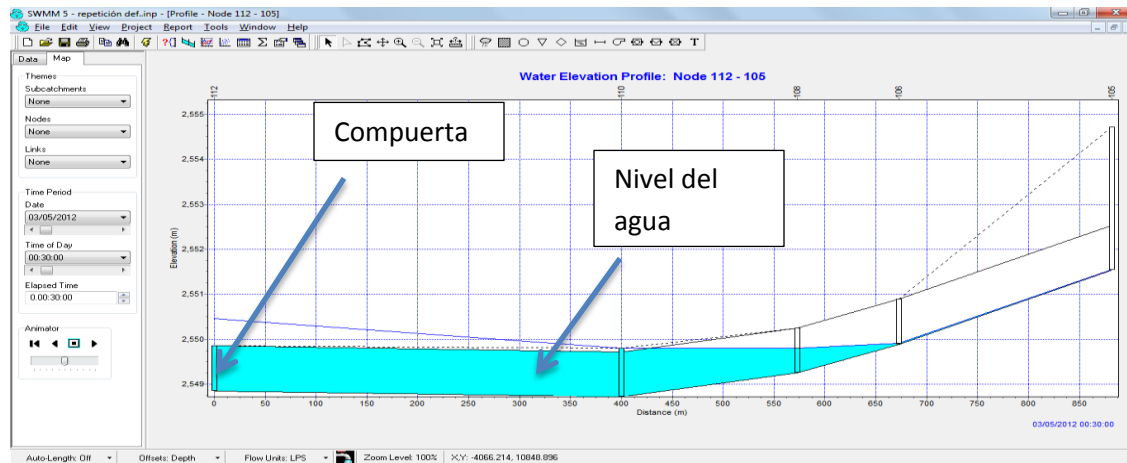


Figura 4-27. Simulación de una compuerta con una apertura alta (45%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 30 s.

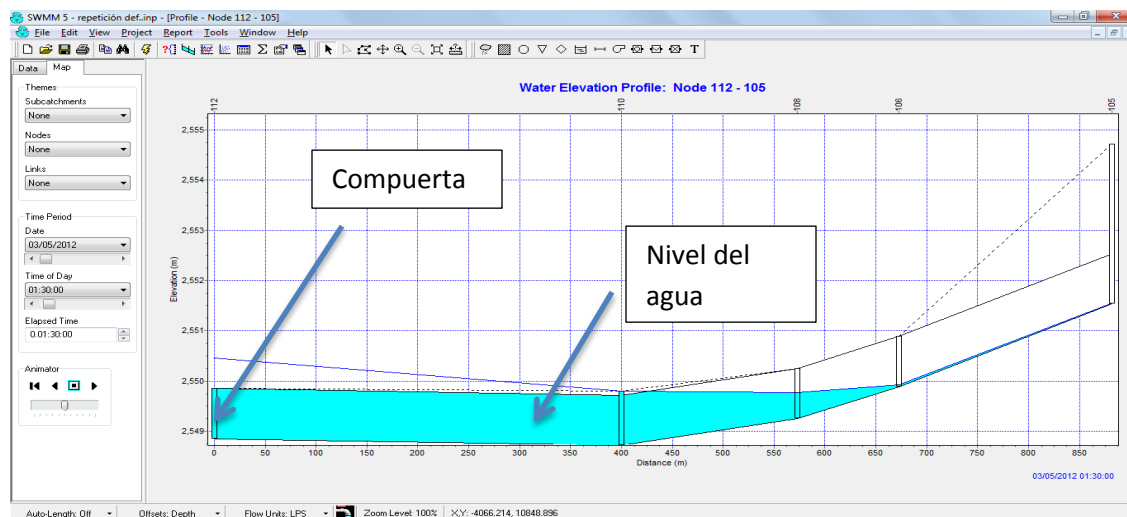


Figura 4-28. Simulación de una compuerta con una apertura alta (45%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 1:30 min.

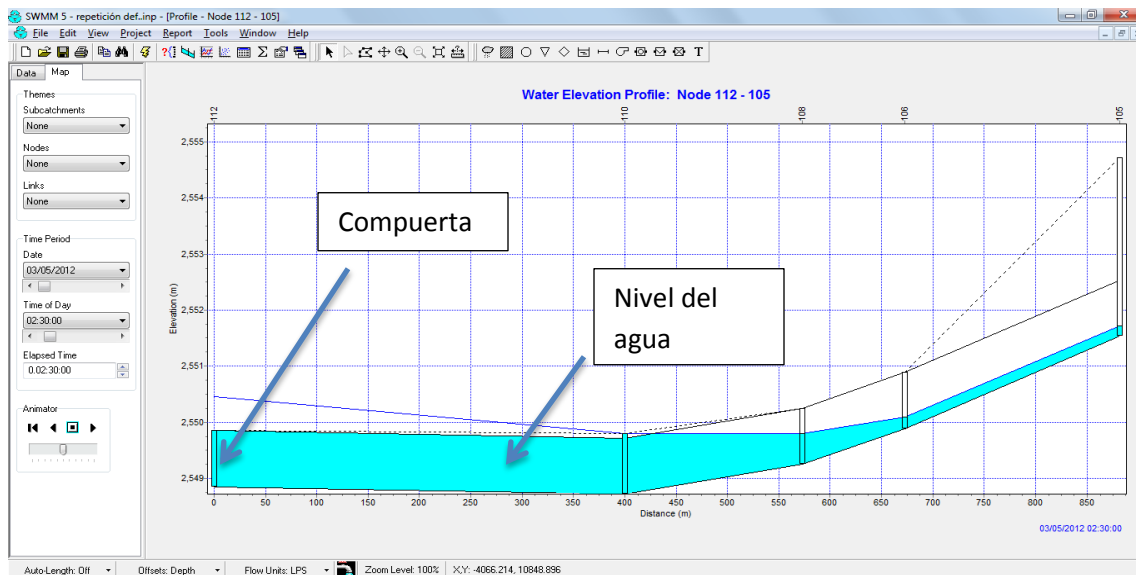


Figura 4-29. Simulación de una compuerta con una apertura alta (45%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 2:30 min.

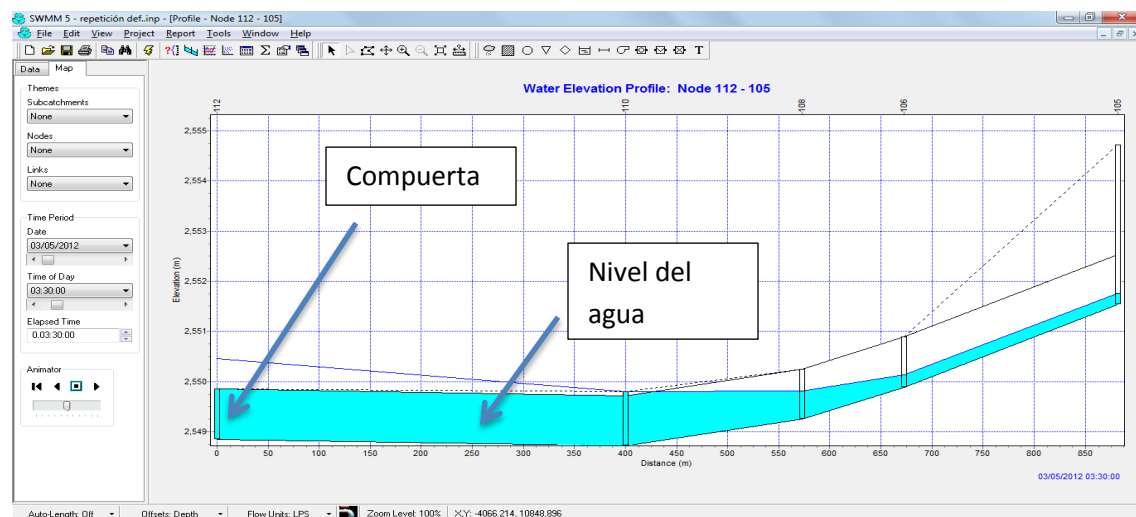


Figura 4-30. Simulación de una compuerta con una apertura alta (45%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 3:30 min.

Para una apertura alta, se puede evidenciar que el nivel del agua en cada uno de los pozos o manholes no alcanza el nivel máximo de la tubería, sin embargo, si está por encima de la mitad

(figura 4-31). De esta forma las condiciones hidráulicas admisibles presentadas en la metodología no cumpliría por ser este un comportamiento que podría generar rebores sea por sedimento o daños en la tubería.

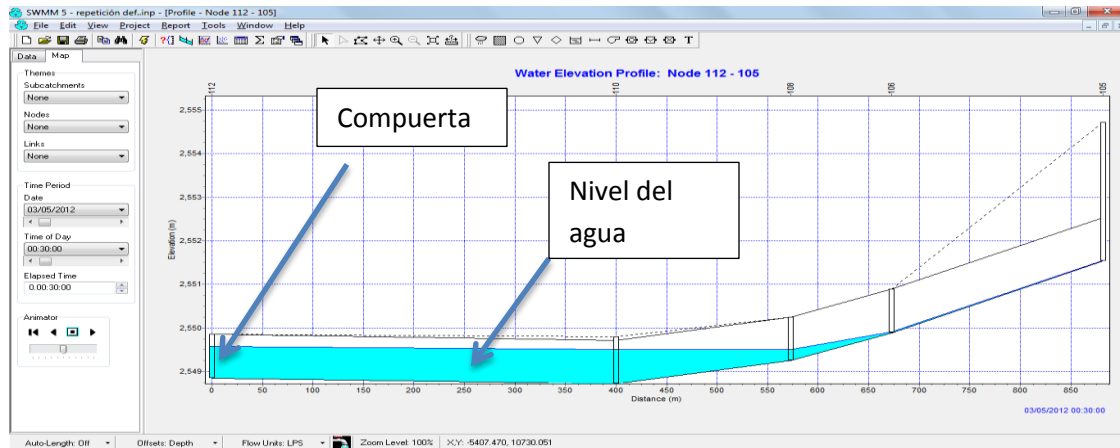


Figura 4-31. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 30 s.

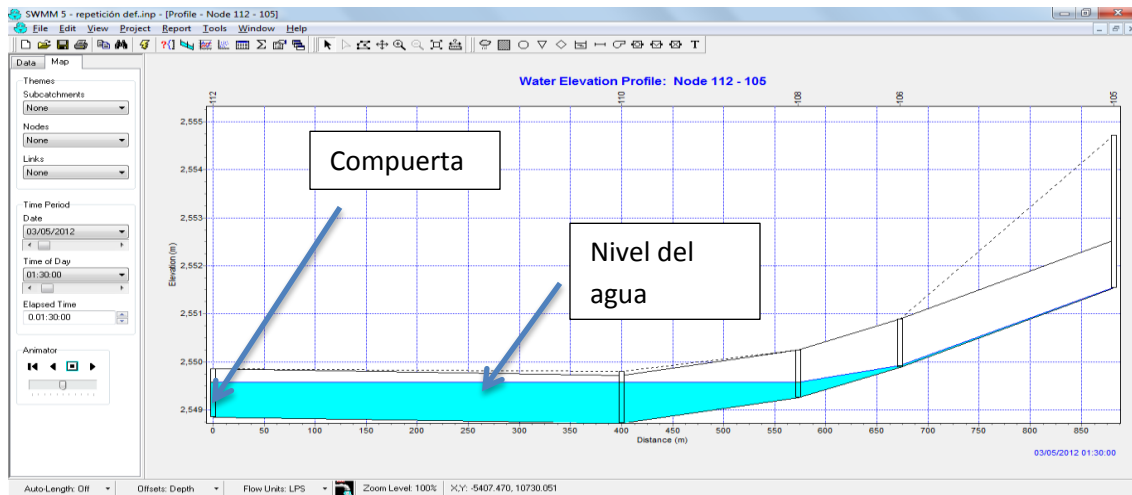


Figura 4-32. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 1:30 min.

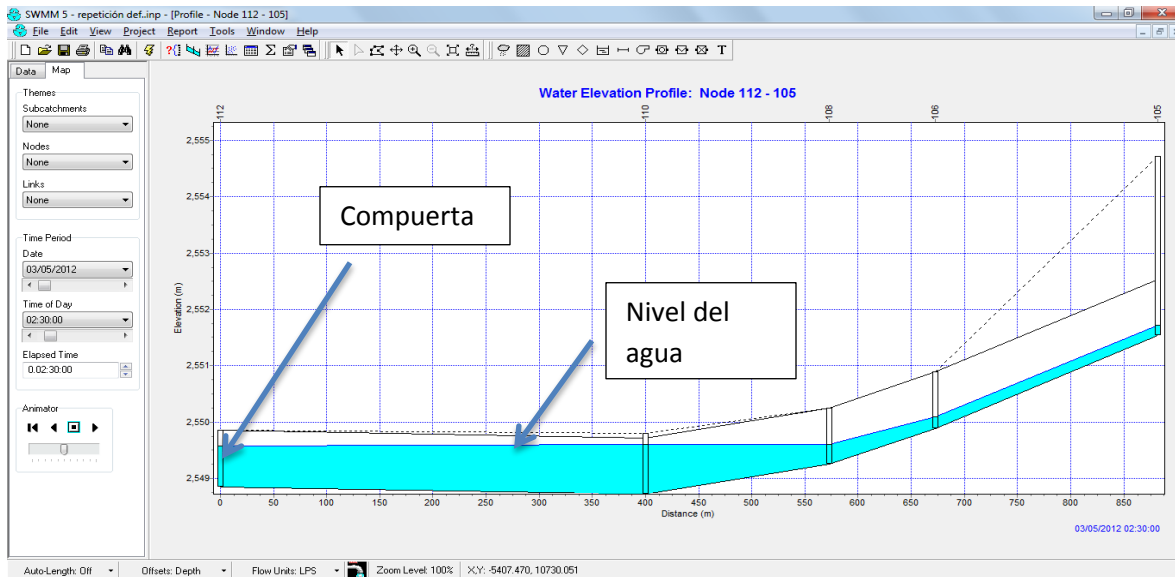


Figura 4-33. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 2:30 min.

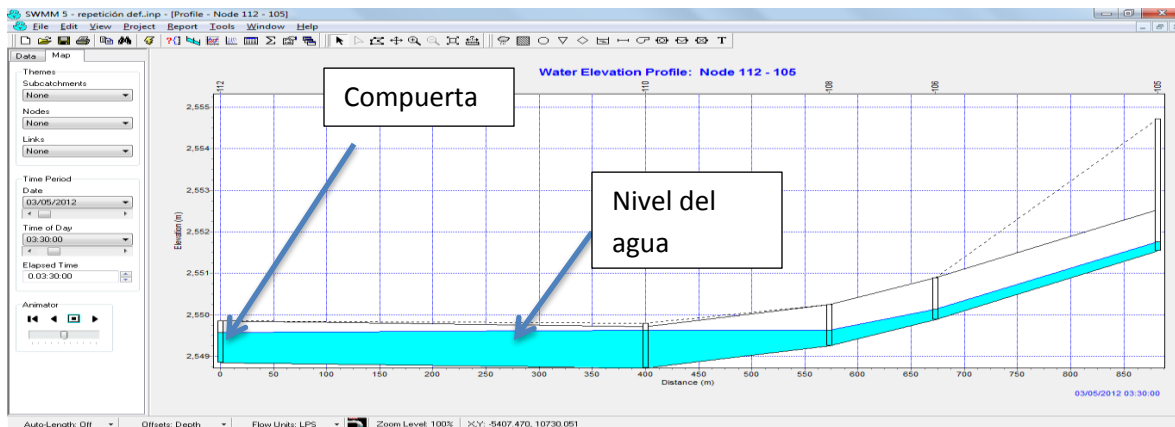


Figura 4-34. Simulación de una compuerta con una apertura alta (65%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 3:30 min.

Lo anterior demuestra, que la operación de la compuerta tiene dificultades hacia aguas arriba para eventos críticos o máximos, pero este primer análisis nos lleva a no solamente revisar los eventos máximos históricos, sino los eventos máximos hidráulicos llevando la profundidad normal hasta el nivel máximo de la tubería.

En este punto, se quiso verificar la forma de operar la compuerta, para esto se utilizó el nodo 112, en que se encontró que el caudal máximo hidráulico es de 742 l/s. Tal y como se esperaba la red se satura (figura 4-35), por esta razón, el caudal calculado se verificó para un mismo nivel de apertura de compuerta, donde los diferentes niveles que se forma aguas arriba (y1) generan lleno total de la tubería.

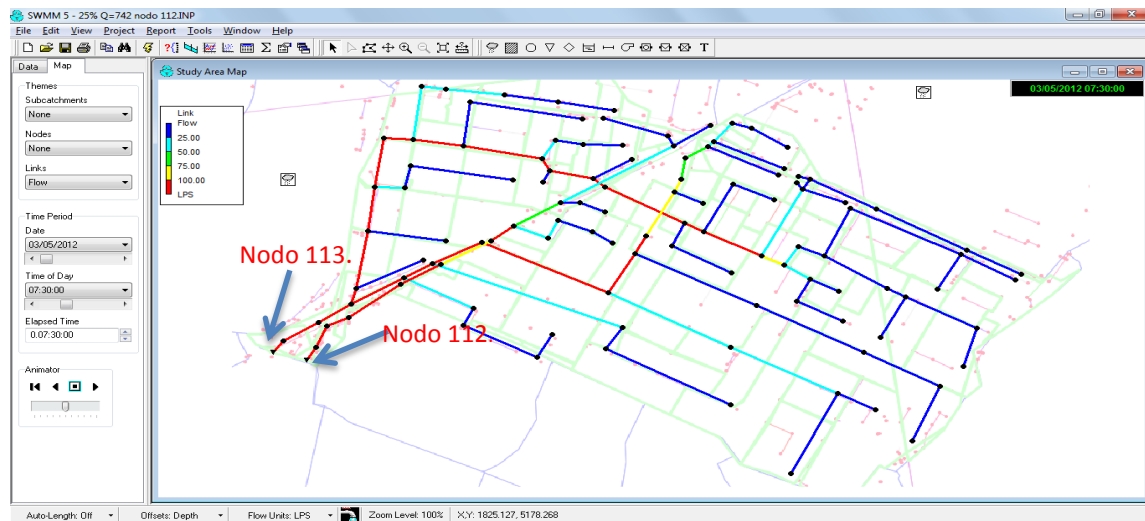


Figura 4-35. Simulación de la zona de implementación con un caudal máximo hidráulico de 742 l/s.

Los caudales que mejor respondieron para una buena operación fueron los menores al 50% del caudal máximo hidráulico, esto se dio, al operar la compuerta con una apertura baja, los niveles del agua sobre la red principal no superaban la mitad del nivel máximo de los manholes, además de hacer un el lavado de sedimentos que genera entre un 30 a 60% de arrastre. (Figura 4-36, Figura 4-37, Figura 4-38, Figura 4-39 y Figura 4-40).

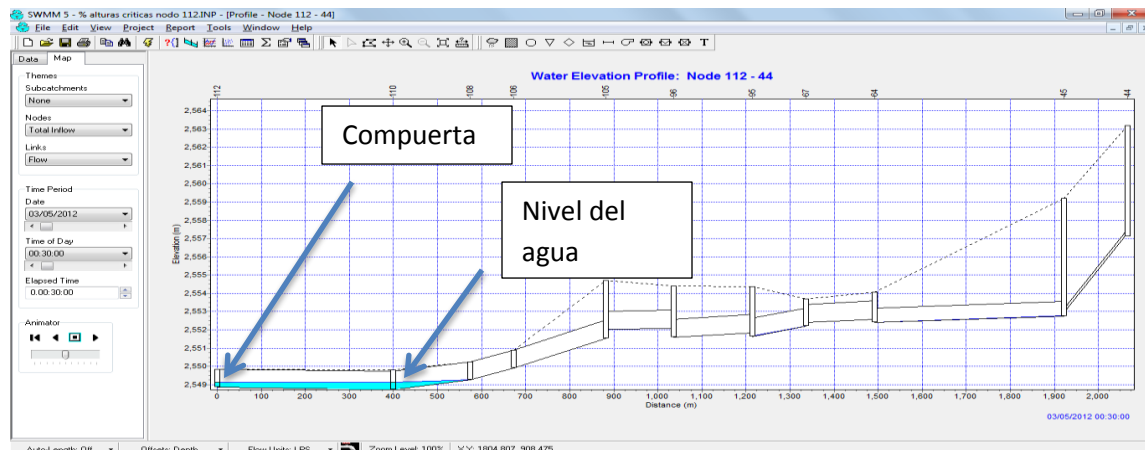


Figura 4-36. Simulación de una compuerta con una apertura baja (25%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 30 s, para un caudal menor al 50% del caudal máximo.

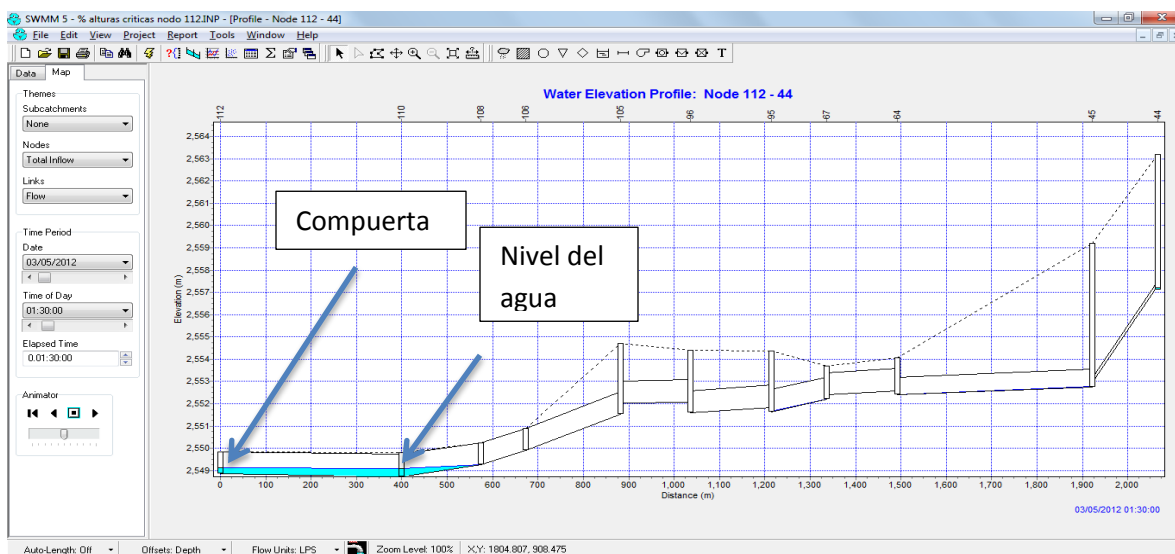


Figura 4-37. Simulación de una compuerta con una apertura baja (25%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 1:30 min, para un caudal menor al 50% del caudal máximo.

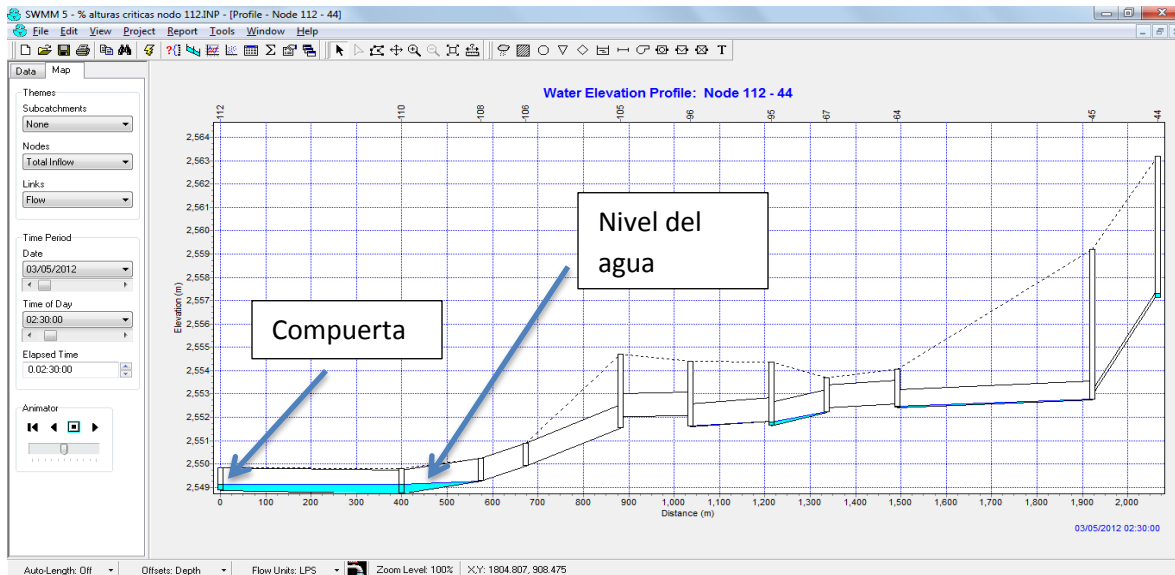


Figura 4-38. Simulación de una compuerta con una apertura baja (25%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 2:30 min, para un caudal menor al 50% del caudal máximo.

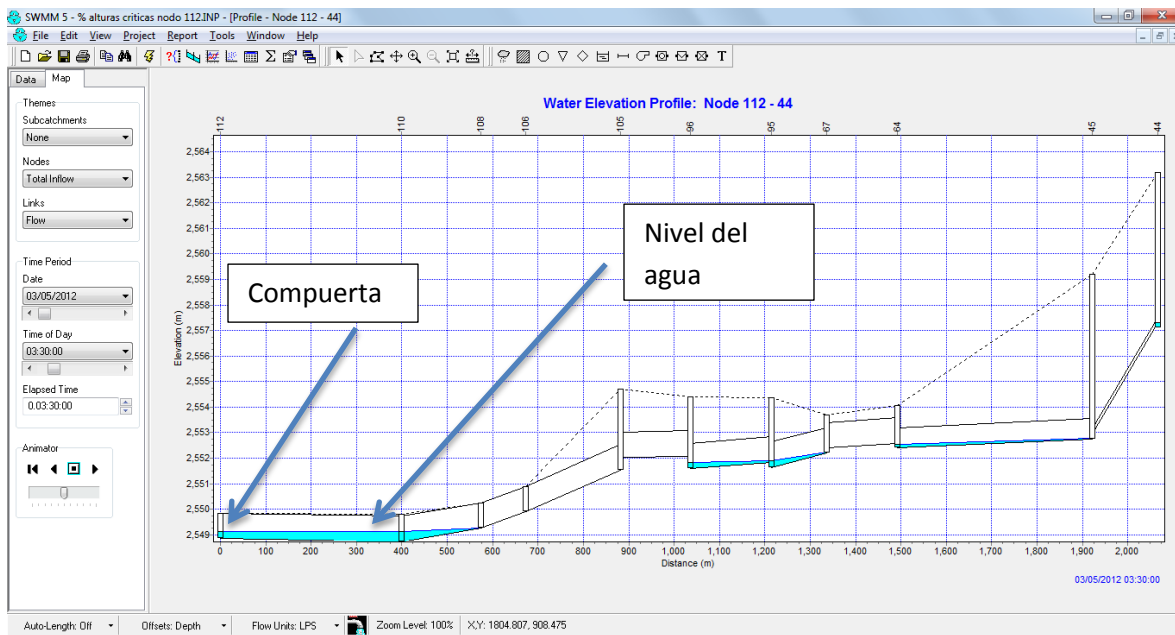


Figura 4-39. Simulación de una compuerta con una apertura baja (25%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 3:30 min, para un caudal menor al 50% del caudal máximo.

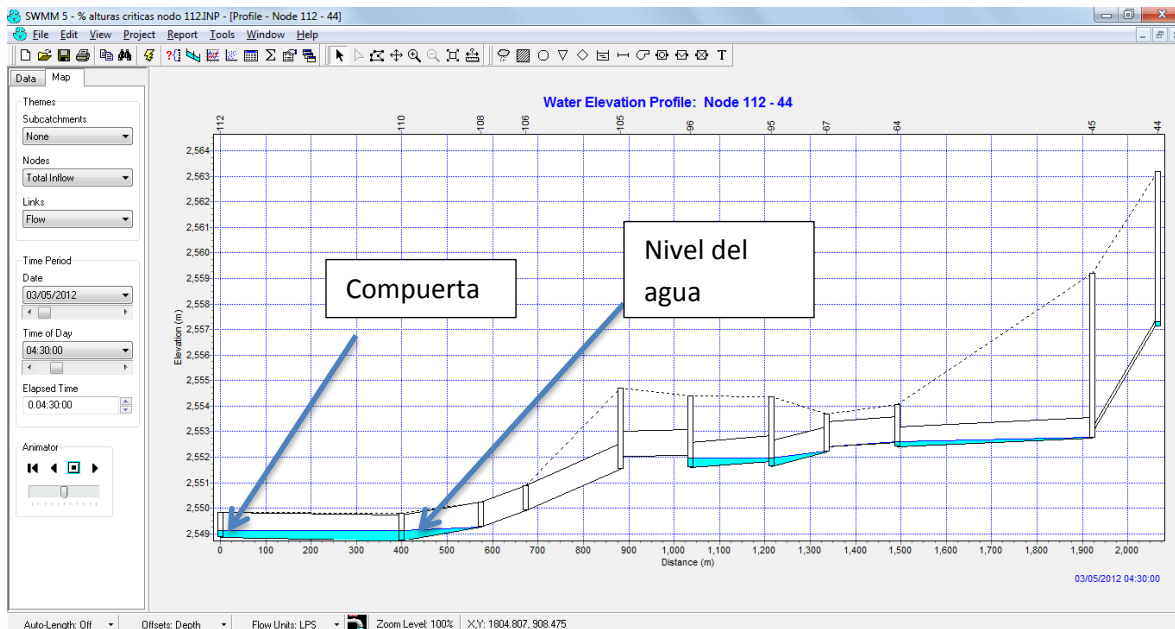


Figura 4-40. Simulación de una compuerta con una apertura baja (25%) y con una pendiente suave, para un tiempo de 3:30 min, para un caudal menor al 50% del caudal máximo.

A partir del seguimiento realizado, se puede indicar que los caudales que viajan por la red, llegan a ser un indicador para la operación de la compuerta, evitando que ocurra sobrecarga en la red según la apertura de la compuerta y conocer que beneficios se pueden extraer para diferentes movimientos de la compuerta.

4.2.2. Análisis Dimensional

Con los cálculos anteriores se han encontrado los niveles aguas arriba y aguas abajo, pero los valores dependen del diámetro de la tubería y de los caudales que entran al sistema, motivado por esta variedad de datos sueltos, se realizó un análisis dimensional que concluya con expresiones dimensionales que muestre los niveles que posiblemente se puedan dar al operar la compuerta.

Al realizar el análisis local se encontraron tres puntos críticos los cuales fueron antes de la compuerta, al operar la compuerta y la altura del resalto. Para realizar un análisis adimensional se tomaron las siguientes variables de estudio: nivel aguas arriba (y_1) y nivel donde se forma el resalto, en función de la zona de la compuerta. Cada una de las variables hidráulicas dentro de los

cálculos, hacen parte del análisis. Siendo la gravedad un valor fijo, se incluye por ser un valor explicativo de los fenómenos que se presentan.

El primer análisis se realiza con respecto a la variación hacia aguas arriba (y_1) en función de la apertura de la compuerta:

El nivel aguas arriba esta en función del caudal (Q), la apertura de la compuerta (y_2), diámetro de la tubería (D) y la gravedad (g).

$$n - m = 5 - 2 = 3 \text{ parametros adimensionales} \quad [14]$$

$$y_1 = f(y_2, Q, D, g) \quad [15]$$

$$y_1 = L \quad y_2 = L \quad Q = \frac{L^3}{T} \quad D = L \quad g = \frac{L}{T^2} \quad [16]$$

Del análisis se obtiene el siguiente resultado:

$$\frac{y_1}{D} = f\left(\frac{Q^{2/5}}{g^{1/5}D}, \frac{y_2}{D}\right) \quad \text{ó} \quad \frac{y_1}{D} = f\left(\frac{Q^2}{g^5D}, \frac{y_2}{D}\right) \quad [17]$$

Del anterior análisis representa la implicación que tiene la apertura de la compuerta (y_2) sobre el nivel aguas arriba (y_1), adicional, se encontró un parámetro muy similar al número de Froude, el cual resalta el tipo de flujo que se analiza y generaliza las variables como el caudal y el diámetro.

El comportamiento con respecto al nivel aguas arriba y al nivel de apertura de la compuerta, se compara el número de Froude equivalente, para de esta forma encontrar una relación entre estas relaciones (Figura 4-41). También se observa que los niveles hacia aguas arriba son más altos mientras la compuerta tiene un porcentaje de apertura bajo, y que esta relación va creciendo a medida que los número de Froude son más altos guardando relación con el caudal que se esté trabajando.

Los valores del número de Froude equivalente son afectados por el caudal y por el diámetro en el sistema debido a la variación de caudales máximos, los cuales se van a necesitar de mayores aperturas. Además, el diámetro también produce cambios en el análisis, debido a que el número de Froude equivalente aumenta según la apertura de la compuerta se valla abriendo, concluyendo que este número equivalente va a ir en aumento con respecto a la apertura de la compuerta hasta llegar a uno (1), mientras que el intervalo se profundizaes aguas arriba y abajo se hace más pequeño.

(Campisano et al., 2007) en su trabajo mencionó que a menores diámetros se realizarían menores lavados, operación que mejoraría el lavado del sedimento, pero incluso en éste caso habría que verificar el almacenamiento hacia aguas arriba porque puede existir llenado en el manhole por la altura antes de la compuerta que se puede verificar en la grafica 4-41. Este fenómeno se quiere disminuir, por este motivo, y respaldado en las gráficas, para una optimización en la operación y una buena descarga para un lavado, se revisaría las relaciones que contengan valores de Froude mayores a 0.4 los cuales tiene una apertura muy pequeña y los niveles aguas arriba no sería una amenaza para el sistema (Figura 4-41).

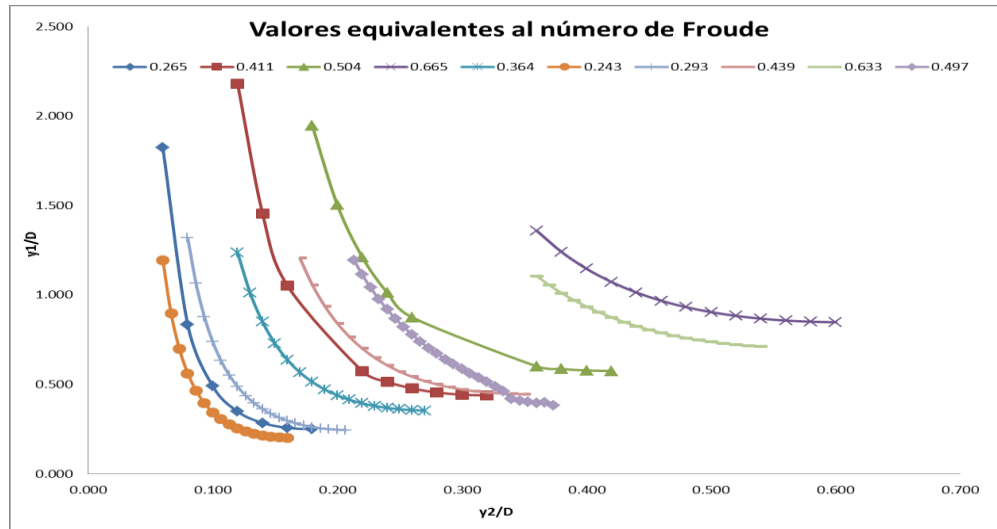


Figura 4-41. Relación dimensional entre y_1/D (relación aguas arriba) vs. y_2/D (relación de apertura de compuerta con respecto al diámetro, siendo las curvas los números de Froude equivalente

. En el segundo análisis se verificó la altura del resalto (y_3) en función de las variables en la compuerta, que son: la apertura de la compuerta (y_2), el caudal (Q), el diámetro de la tubería (D) y la gravedad (g).

$$y_3 = f(y_2, Q, D, g) \quad [18]$$

$$y_2 = L \quad Q = \frac{L^3}{T} \quad D = L \quad g = \frac{L}{T^2} \quad [19]$$

El resultado del análisis dimensional es:

$$\frac{y_3}{D} = f\left(\frac{Q^{2/5}}{g^{1/5}D}, \frac{y_2}{D}\right) \quad \text{ó} \quad \frac{y_3}{D} = f\left(\frac{Q^2}{g^5 D}, \frac{y_2}{D}\right) \quad [20]$$

De igual forma que en el análisis anterior el número de Froude esta presente en las relaciones dimensionales encontradas que caracteriza las propiedades del flujo en esta zona. Los resultados con respecto a la altura en y_3 (figura 4-42) muestran un comportamiento similar al encontrado en la zona de y_1 , pero esta vez, el que aumenta es el nivel hacia aguas abajo o y_3 , en relación a menores aperturas de compuerta, igualmente, el Froude va aumentando a medida que la compuerta se va abriendo siempre, estando por debajo del nivel crítico, siendo la mejor forma de operar la compuerta y crear un resalto que ayude a la evacuación de agua sin posibilidad de llenado creando flujo subcrítico.

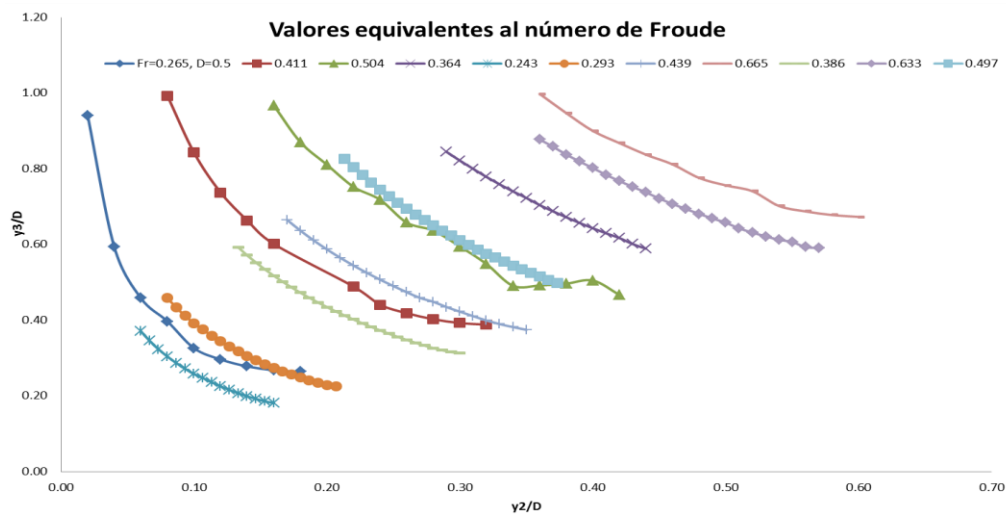


Figura 4-42. Relación dimensional entre y_3/D (nivel del resalto respecto al diámetro) vs. y_2/D (apertura de la compuerta, respecto al diámetro.). Siendo las curvas los números de Froude equivalente

Con respecto a lo anterior el caudal y el diámetro son las variables que especifican el número de Froude equivalente, con el cual se puede encontrar intervalos de operación de la compuerta que varían por las fluctuaciones del sistema en una tubería. Por esto se incluyó otra variable como el tipo de resalto que se genera en la operación (Figura 4-43), el cual es un comportamiento que está en función del número de Froude en la zona de la compuerta, donde cada uno representan un intervalo de niveles aguas arriba (y_1) y aguas abajo (y_3).

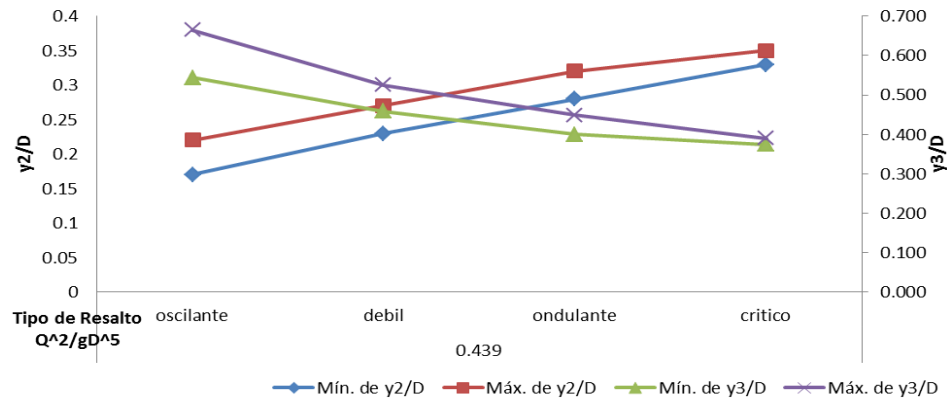


Figura 4-43. Relación dimensional entre tipo de resalto vs. y_2/D y tipo de resalto vs. y_3/D , para un valor equivalente al Froude de 0.439.

Cada punto en las Figura indica los niveles menores y mayores de apertura de compuerta (y_2/D) y del nivel de resalto (y_3/D) que se forma aguas abajo. Entre más alto sea el valor del caudal se tiene un mayor rango de operación con respecto al tipo de resalto, pero estos valores están en función del número de Froude equivalente. Valor que tiene el diámetro de tubería y el caudal del sistema, logrando operaciones que se adapten a las condiciones establecidas.

La operación corresponde a una caracterización de los caudales que posiblemente lleguen al sistema:

$$\begin{aligned}
 &0 < Q < 0.5 \text{ caudales bajos} \\
 &0.51 < Q < 1 \text{ caudales medios} \\
 &Q > 1 \text{ caudales altos}
 \end{aligned}$$

Cada uno de estos intervalos de caudales hacen corresponder a unas alturas específicas para un perfil hidráulico, por otro lado, los niveles hacia aguas abajo también pueden ser tenido en cuenta como un valor de verificación para las dimensiones de la tubería, cuya operación cumpla con las condiciones hidráulicas deseadas, en otras palabras, el encontrar un caudal determinando para una apertura de compuerta (y_2/D) que genere hacia aguas abajo (y_3/D) un nivel que sea menor al 100% de la capacidad de la tubería.

5. PROTOCOLO DE OPERACIÓN HIDRÁULICA

Los protocolos son directrices, que siguen una serie de pasos que reglamentan condiciones desfavorables, en pro del cumplimiento de los objetivos primordiales para buscar mejoras y beneficios a la salida de la red.

Cada una de las reglas está en función de las aperturas de compuerta (y_2) y de los caudales registrados. Variaciones que tienen impactos favorables o desfavorables con respecto a cada uno de los objetivos que se requiere cumplir, determinando restricciones para una mejor operación del sistema.

5.1. Condiciones de operación.

A partir de un análisis global se puede obtener, los caudales máximos históricos o hidráulicos, los cuales son analizados en la salida de una red. Estos caudales son la condición inicial para la operación de la compuerta, debido a que los máximos eventos, generan restricciones para la operación y el cumplimiento de los objetivos.

Al ser los niveles máximos pueden generar una baja capacidad hidráulica debido al volumen que transporte la red, Los niveles pueden subir drásticamente generando pérdida en la capacidad hidráulica hacia aguas arriba de una red de alcantarillado.

Los niveles de los perfiles simulados se buscan cumplir con los siguientes objetivos:

5.2. Objetivos de operación

Hay dos (2) clases de objetivos locales y globales, siendo los objetivos locales el lavado y la verificación de los niveles aguas arriba (y_1) y el global es con respecto al nivel aguas arriba de la compuerta (y_1) y la altura del nivel del agua con respecto a lo manholes.

Para el primer objetivo a nivel local, se referencian el lavado de sedimentos (Raghaven, 2004) que se obtendría a partir de un porcentaje de apertura de la compuerta, generando alguno de estos tres tipos de resalto: fuerte, estable y oscilante. Estas características del resalto se generan con aperturas bajas de compuerta con un flujo supercrítico, por este motivo se tiene un mejor porcentaje de arrastre de sedimentos, tal y como se muestra en la prueba con el modelo físico. Por otro lado un segundo objetivo son los niveles aguas arriba (y_1) los cuales no pueden ser mayores a 1.2 veces el diámetro ya que esto produce posibles sobrecargas en el sistema.

A nivel global los niveles aguas arriba (y_1) generados en el análisis local, son verificados con respecto al nivel del manhole en estudio. Luego el análisis es que a partir de este punto aguas

arriba los niveles del agua encontrados no pueden sobrepasar la mitad del nivel máximo de los manhole.

La operación está supeditada a criterios hidráulicos, como la verificación de los niveles en cada manhole. Dichos criterios se analizan para determinar si durante un evento máximo se puede operar la compuerta.

A partir de este análisis se pueden encontrar: los caudales y las pendientes, como resultado de lo anterior se darán las condiciones para el cumplimiento de los objetivos del esquema de operación con compuertas.

5.3. Reglas de operación.

La figura 5-1, muestra el esquema usado para representar el análisis con compuertas a la salida de la red. El esquema empieza con las condiciones de operación, las cuales dependen de los caudales máximos que entrarían al sistema y la implementación de los dos análisis, local y global.

Cada uno de los caudales indican si es posible una operación, primero se analiza a nivel local: se analizan los tipos de resalto, la cantidad de lavado de sedimento y la profundidad aguas arriba (y_1), que se genera con una apertura de compuerta. Segundo se analizan los niveles del agua en cada uno de los manholes de la red troncal, cuyos niveles no pueden superar la mitad de la altura máxima aguas arriba.

A partir de la descripción realizada se especifican las siguientes condiciones que salen de las tablas de operación (tablas 5-1 y tabla 5-2):

Especificando los objetivos locales se puede establecer una apertura dependiendo del objetivo que se requiera cumplir tomando los caudales máximos, no son recomendables aperturas bajas, las cuales generan sobrecargas en la red, porque los niveles llegarían a estar por encima de la mitad del nivel máximo del manhole. Por otro lado al subir la apertura se encontraría con lo contrario, que habría un bajo lavado pero unos niveles aceptables aguas arriba de la compuerta.

A partir de este análisis se puede ver, que dependiendo de los caudales, se tendrán diferentes condiciones en la red donde la operación será benéfica, para algunos objetivos que cumplan las condiciones admisibles y los objetivos planteados, dependiendo de la apertura de la compuerta.

La operación con pendiente supercrítica es más restringida y solamente con caudales que contengan el 25% del caudal máximo se puede tener un sistema que operando la compuerta

cumpla todos los objetivos, aunque probablemente en este caso el problema de sedimentación no se presente.

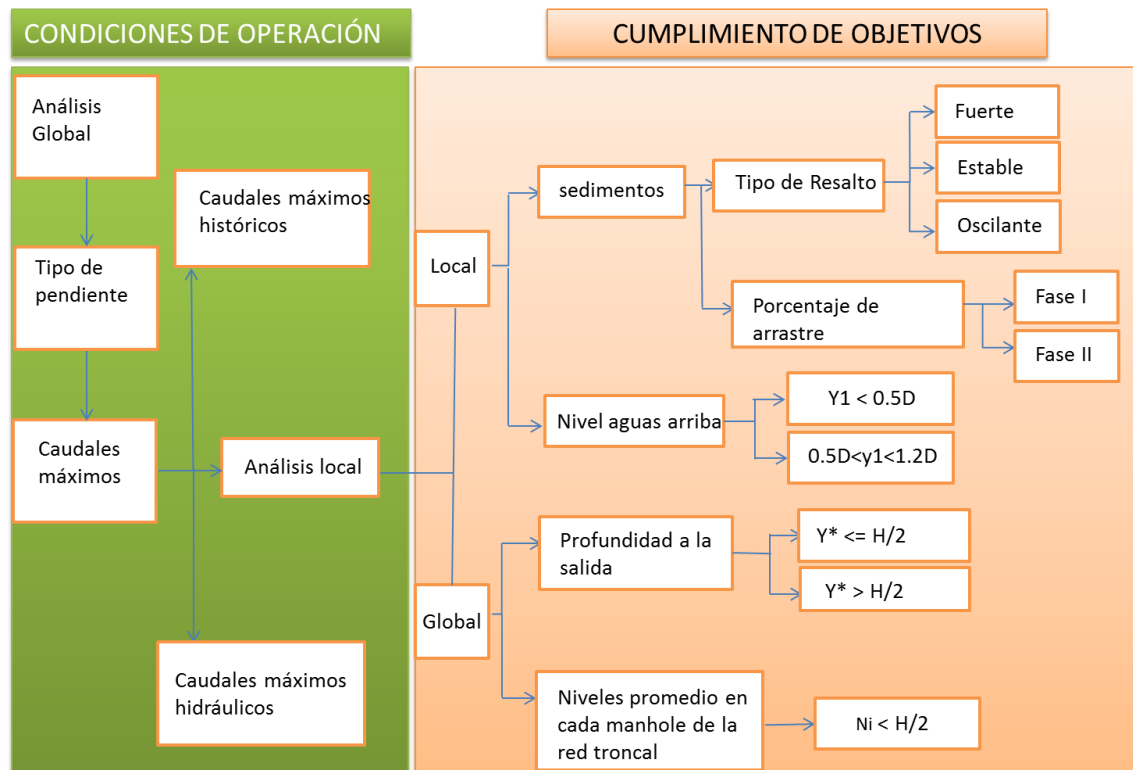


Figura 5-1. Esquema de operación con compuertas para una red troncal.

Por el contrario, los caudales máximos pueden generar lavado pero con aperturas medias o altas. De otra forma sería riesgoso mantener de esta forma la compuerta con tiempos extendidos en la red aguas arriba. Las aperturas al ser bajas, producen niveles aguas arriba ($y1$) mayores al diámetro y habría reboses en el ramal principal.

Para una operación de la compuerta que cumpla con las condiciones admisibles de operación y tener un lavado de sedimentos son necesarias aperturas altas para eventos con tiempos muy largos, logrando hasta el 40% de arrastre de sedimentos, pero esto no indica que las aperturas bajas no sean benéficas, ya que como lo indica campisano (2007) tener dichas aperturas entre 2 y 5 minutos puede hacer una buena limpieza, para luego continuar con la apertura sin dejar que haya sobreflujo.

Cuando existe pendientes subcríticas la compuerta puede ser operada para regular los niveles aguas arriba de la red troncal con caudales menores al 75% de los caudales máximos, de esta forma cumple con las condiciones admisibles; logrando un lavado de sedimentos que llegaría hasta el 50% del arrastre de sedimentos generando niveles de agua por debajo de la mitad de los manholes de la red troncal, cumpliendo los objetivos de operación especificados. Con caudales menores al 25% del caudal máximo se lograrían porcentajes bajos de lavado de sedimentos con niveles de aperturas altas.

Las reglas se establecen a partir de las tablas anexas, las cuales muestran los caudales de entrada con respecto al caudal máximo y el comportamiento que posiblemente se podría tener al operar la compuerta desde niveles bajos hasta niveles altos. Las tablas están divididas por el tipo de pendiente que encuentre en la red.

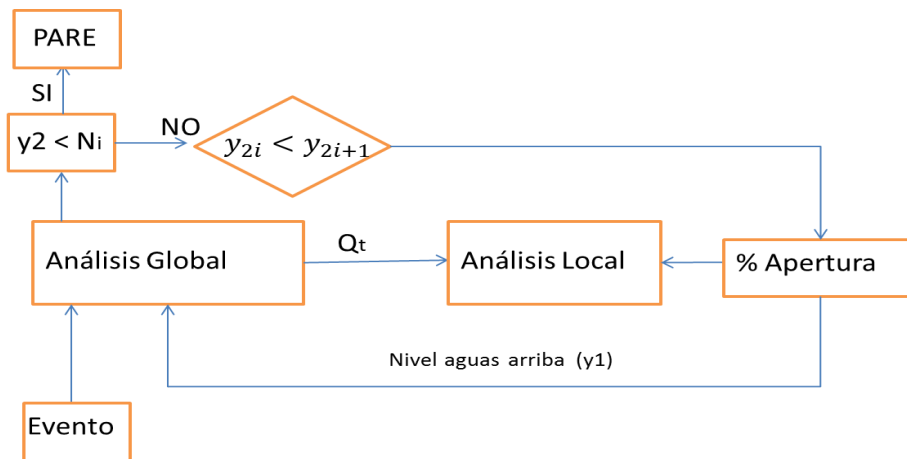


Figura 5-2. Esquema final protocolo de operación con compuertas para una red principal.

Para finalizar, el procedimiento que se recomienda seguir para una operación con compuertas se debe empezar con un análisis global, para encontrar los caudales máximos producidos por un evento de lluvia, seguido, se realiza un análisis en la compuerta (análisis local) para verificar los tipos de nivel aguas arriba (y_1) y aguas abajo (y_3), con un apertura de compuerta específica, que serviría para encontrar una apertura de compuerta adecuada. Al generar niveles aguas arriba que no sobrepasen la mitad de los niveles máximos del manholes estudiado y de los manhole anteriores (figura 5-2). Sin dejar de lado el arrastre de sedimentos, según la apertura de compuerta se podrá tener un porcentaje del arrastre de sedimentos a partir de la tabla 4-4.

Tabla 5-1. Tabla de protocolos de operación hidráulica, con Pendiente subcrítica.

REGLAS DE OPERACIÓN PARA CAUDALES MÁXIMOS - PENDIENTE SUPERCRÍTICA							
Porcentaje de apertura de compuerta		Análisis Local			Análisis Global		
		BAJO	MEDIO	ALTO	$y^* < H/2$ ó $y^* > H/2$		
condiciones					BAJO	MEDIO	ALTO
Qtms	Qmax	1	Fuerte -Debil	Ondulante - Crítico	Crítico		
		2	(100 - 98.70) %	(98.69 - 45.30)%	(45.32 - 0)%	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$
		3	$y_1 > 1.2D$	$y_1 > 1.2D$	$0.5D > y_1 > 1.2D$		$y^* < H/2$
	(0-25)% Qmax	1	Fuerte a Ondulante	Crítico	Crítico		
		2	(100 - 79.70)%	(79.70 - 16.70)%	(16.70 - 0)%	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$
		3	$0.5D > y_1 > 1.2D$	$y_1 < D$	$y_1 < D$		$y^* < H/2$
	(26 -50)% Qmax	1	Fuerte a Oscilante	Crítico	Crítico		
		2	(100 - 98.70)%	(98.70 - 30.40)%	(30.40 - 0)%	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$
		3	$y_1 > 1.2D$	$0.5D > y_1 > 1.2D$	$y_1 < D$		$y^* < H/2$
	(50 -75)% Qmax	1	Fuerte a Oscilante	Debil - Ondulante	Crítico		
		2	100.00%	95.88%	38.59%	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$
		3	$y_1 > 1.2D$	$0.5D > y_1 > 1.2D$	$y_1 < D$		$y^* < H/2$
	Qmax	1	EL CAUDAL SATURA TOTALMENTE LA RED. NO VALE LA PENA HACER UNA OPERACIÓN CON COMPUERTA, PORQUE ESTÁ ESTARÁ TOTALMENTE ABIERTA HASTA QUE EVACUE LA GRAN MAYORÍA DEL VOLUMEN QUE ESTA EN LA RED.				
		2					
		3					
	% Qmax	1	ESTE CAUDAL TENDRÍA QUE SER IGUAL AL CAUDAL ANALISADO CON LA CONDICIÓN DE UNA SERIE HISTORICA.				
		2					
		3					

Niveles de Apertura	BAJO	$Y_2 < 40\%$
	MEDIO	$40\% < Y_2 < 60\%$
	ALTO	$Y_2 > 60\%$

1	Lavado = Tiene 6 tipos de comportamiento: Fuerte, Estable, Oscilante, Debil, Ondulante, Crítico.
2	Porcentaje de arrastre de sedimentos = Porcentaje de arrastre con una determinada apertura (%)
3	Nivel aguas arriba de la compuerta = Nivel del agua arriba (m) ($y_1 < D$, $D < y_1 < 1.2D$, $y_1 > 1.2D$)
y^*	de entrada al sistema

Tabla 5-2. Tabla de protocolos de operación hidráulica, con Pendiente subcrítica.

REGLAS DE OPERACIÓN PARA CAUDALES MÁXIMOS - PENDIENTE SUBCRÍTICA									
Porcentaje de apertura de compuerta		Análisis Local			Análisis Global				
		BAJO	MEDIO	ALTO	$y^* < H/2$	δ	$y^* > H/2$		
Condiciones							BAJO	MEDIO	ALTO
Qtrans hist	Qmax	1	Fuerte - Estable - Oscilante	Oscilante - Debil	Ondulante - Crítico				
		2	(75.6 - 1.0)%	(0 - 1.0)%	(0 - 1.0)%	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$	
		3	$y1 > 1.2D$	$0.5D > y1 > 1.2D$	$y1 < D$				
	(0-25)% Qmax	1	Fuerte a Onulante	Crítico	Crítico				
		2	(38.80 - 0.11)%	(0.8 - 0.10)%	(0 - 0.07)%	$y^* < H/2$	$y^* < H/2$	$y^* < H/2$	
		3	$y1 > 0.5D$	$y1 < D$	$y1 < D$				
	(26 -50)% Qmax	1	Fuerte a Onulante	Crítico	Crítico				
		2	(40 - 4.80)%	(4.5 - 2.8)%	(0 - 2.7)%	$y^* > H/2$	$y^* < H/2$	$y^* < H/2$	
		3	$y1 > 0.5D$	$y1 < D$	$y1 < D$				
	(50 -75)% Qmax	1	Fuerte a Onulante	Crítico	Crítico				
		2	(50 - 0.15)%	(14 - 5.3)%	(0 - 4.5)%	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$	$y^* < H/2$	
		3	$y1 > 0.5D$	$0.5D > y1 > 1.2D$	$y1 < D$				
	Qhid	Qmax	1	Fuerte a Onulante	Crítico	Crítico			
			2	(100 - 11)%	(11.09 - 10)%	(10 - 0)%	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$
			3	$y1 > 1.2D$	$0.5D > y1 > 1.2D$	$y1 < D$			
(0-25)% Qmax		1	Fuerte a Onulante	Crítico	Crítico				
		2	(40.50 - 1.1)%	(1.05 - 1.02)%	(1 - 0)%	$y^* > H/2$	$y^* < H/2$	$y^* < H/2$	
		3	$y1 > 1.2D$	$y1 < D$	$y1 < D$				
(26 -50)% Qmax		1	Fuerte a Onulante	Crítico	Crítico				
		2	(60.30- 11.30)%	(11.33 - 5.2)%	(5.1 - 0)%	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$	
		3	$y1 > 1.2D$	$y1 < D$	$y1 < D$				
(50 -75)% Qmax	1	Fuerte a Onulante	Crítico	Crítico					
	2	(76.10 - 11)%	(11.09 - 10)%	(10 - 0)%	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$	$y^* > H/2$		
	3	$y1 > 1.2D$	$0.5D > y1 > 1.2D$	$y1 < D$					
Nieves de Apertura		BAJO	Y2<40%						
		MEDIO	40%<Y2<60%						
		ALTO	Y2>60%						
		1	Lavado = Tiene 6 tipos de comportamiento: Fuerte, Estable, Oscilante, Debil, Ondulante, Crítico.						
		2	Porcentaje de arrastre de sedimentos =	Porcentaje de arrastre con una determinada apertura (%)					
		3	Nivel aguas ariba de la compuerra =	Nivel en los manhole hacia agua arriba de la red troncal (m) ($y1 < D$, $D < y1 < 1.2D$, $y1 > 1.2D$)					
y^*			Nivel del agua en cada pozo según el caudal de entrada al sistema						

6. CONCLUSIONES

Estructurar una serie de reglas que mejoren la operación de un sistema de alcantarillado para compuertas conlleva un análisis local y otro general, para de esta forma verificar las bondades y los perjuicios que se tengan al operar y controlar un sistema, con los cuales se realizaron dos análisis con respecto a las compuertas deslizantes verticales, siendo el primero la verificación de los niveles solamente en la compuerta (análisis local) y el segundo calcular los caudales con respecto a un evento en una red de alcantarillado para una zona específica (análisis global). Estas compuertas se colocaron a la salida de la red, cuya operación se basa en los caudales máximos analizados en la red y verificando los niveles hacia aguas arriba, logrando lavados importantes para la red.

A nivel local se determinan una serie de perfiles hidráulicos basados en los cálculos en flujo permanente y flujo gradualmente variado, pero estos no coincidieron con un modelo físico aun estando la compuerta por debajo del nivel crítico, sin embargo este mostró la creación de un flujo orificio, el cual se produce al tener aperturas muy bajas (1 el 15% del diámetro) de compuerta y el cual fue referente para realizar un análisis del arrastre de sedimentos basado en dos fases de cálculo (fase I y fase II), por otro lado, el análisis global muestra los niveles del agua que se forman para aperturas bajas y altas de compuerta. Encontrando que las aperturas altas son las mejores para tener un nivel del agua en una red principal por debajo de la mitad de los niveles máximos de los manholes

Las aperturas de la compuerta se pueden establecer teniendo en cuenta los niveles que se requieran a nivel local, pero para realizar el control en una red principal muchas veces no se logra el objetivo global, por esto es recomendable establecer los caudales máximos en la red y verificar las aperturas, según los niveles picos que se presenten en la modelación realizada.

Finalmente se consolida un esquema general de operación con compuertas con respecto al cumplimiento de los objetivos nivel local (lavado y nivel aguas arriba) y global (niveles de agua en manholes), en función de los caudales (condición de operación). Para niveles de apertura baja, la operación generaría un almacenamiento creando condiciones aguas arriba no deseadas en la tubería pero en un corto tiempo (2 a 5 min) se lograría un buen lavado de sedimentos, por otro lado, al subir la compuerta los niveles sobre una red principal se van reduciendo y posiblemente no sean más altos que la mitad de la altura de los manholes.

Complementando lo expuesto, las tablas finales corresponden a las reglas de operación que se puede establecer en una compuerta, las cuales están en función del caudal y de la apertura de la compuerta, en base al cumplimiento de los objetivos locales y globales. El cumplimiento de los objetivos según la apertura de la compuerta, no se puede establecer como procedimientos contrarios, porque la operación se puede establecer en tiempos tal y como lo muestra el modelo en el análisis global.

7. RECOMENDACIONES

Se plantean las siguientes recomendaciones:

Al trabajar solamente con compuertas deslizantes verticales, se recomienda analizar con esta metodología otro tipo de compuertas.

Los caudales usados para el análisis de arrastre de sedimentos, fueron calculados con respecto a la variación en el tiempo y a las aperturas de la compuerta. Se recomienda realizar este análisis en la tubería y verificar otros porcentajes de arrastre, extendiendo los análisis en fase I y fase II, relacionados en el trabajo.

Se recomienda aplicar el mismo procedimiento con varias compuertas en la red.

8. REFERENCIAS

- Ashley, R. M., Bertrand-Krajewski, J. L., Hvitved-Jacobsen, T., & Verbanck, M. (2005). Solids in sewers.
- Ballester, J. L., Martí, J., & Salamero, M. (1998). Control de compuertas de derivación en la red de alcantarillado de Barcelona. *Ingeniería del Agua*, 5(4), 37–46.
- Bertrand-Krajewski, J. L., Bardin, J. P., Gibello, C., & Laplace, D. (2003). Hydraulics of a sewer flushing gate. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 47(4), 129.
- Bertrand-Krajewski, J. L. (2003). Sewer sediment management: some historical aspects of egg-shaped sewers and flushing tanks. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 47(4), 109.
- Butler, D., & Parkinson, J. (1997). Towards sustainable urban drainage. *Water science and technology*, 35(9), 53–63.
- Campisano, A., Creaco, E., & Modica, C. (2004). Experimental and numerical analysis of the scouring effects of flushing waves on sediment deposits. *Journal of Hydrology*, 299(3-4), 324–334.
- Campisano, A., Creaco, E., & Modica, C. (2006). Experimental analysis of the hydrass flushing gate and laboratory validation of flush propagation modelling. *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*, 54(6-7), 101.
- Campisano, A., Creaco, E., & Modica, C. (2007). Dimensionless approach for the design of flushing gates in sewer channels. *Journal of hydraulic engineering*, 133, 964.

-
- Chow, V. T. (1959). Open-channel hydraulics, London, McGraw Hill.
- Creaco, E., & Bertrand-Krajewski, J. L. (2009). Numerical simulation of flushing effect on sewer sediments and comparison of four sediment transport formulas. *Journal of Hydraulic Research*, 47(2), 195–202.
- Delleur, J. W. (2003). The evolution of urban hydrology: past, present, and future. *Journal of hydraulic engineering*, 129, 563.
- Díaz-Granados, M., Rodríguez, J. P., Rodríguez, M. S., Penagos, J. C., Camacho, L. A., Achleitner, S., Maksinovic, C., et al. (2009). Towards a Paradigm Shift in Urban Drainage Management and Modelling in Developing Countries. *Revista de Ingeniería*, (30), 133–150.
- ERBISTI, P. (2003). Design of hydraulic gates. *Recherche*, 67, 02.
- García García, D. (2009). Caracterización paramétrica de resaltos hidráulicos libres y sumergidos a partir de mediciones de velocidades instantáneas con equipo Doppler aguas abajo de un azud. Análisis temporal y frecuencial.
- Marsalek, J., Barnwell, T. O., Geiger, W., Grottker, M., Huber, W. C., Saul, A. J., Schilling, W., et al. (1993). Urban drainage systems: design and operation. *Water Science & Technology*, 27(12), 31–70.
- Meza, L. (2008, noviembre 22). *Evaluación sistemas de alcantarillados*. Universidad de los Andes, Bogotá D.C.
- Quejada, E. (2011). Control en tiempo real de sistemas de drenaje urbano. evaluación del potencial de aplicación en la cuenca del Río Fucha (Bogotá). *XIX Seminario nacional de hidráulica e hidrología y el i foro nacional sobre la seguridad de embalses Bogotá D.C. Colombia*, 24 y 25 de marzo 2011, 18.

-
- Raghaven, R. (2004). Gate and vacuum flushing of sewer sediment: Laboratory testing. *Journal of hydraulic engineering*, 130, 463.
- Schutze, M., Campisano, A., Colas, H., Schilling, W., & Vanrolleghem, P. A. (2004). Real time control of urban wastewater systems--where do we stand today? *Journal of hydrology*, 299(3-4), 335–348.
- Sturm, T. W., & Tuzson, J. (2001). Open channel hydraulics. *Applied Mechanics Reviews*, 54, B107.
- Unidad de Apoyo Técnico para el Saneamiento Básico del Área Rural. (2005). Guías para el diseño de tecnologías de alcantarillado, Lima, 73 pág.
- Williams, K. J., Tait, S. J., & Ashley, R. M. (2009). In-sewer sedimentation associated with active flow control. *Water Science & Technology*, 60(1), 55–63.
- Zhou, Y., & Li, T. (2010). Optimized operation plan for sewer sediment control. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 11(5), 335–341.

9. ANEXOS

A. ANALISIS LOCAL

Tablas resumen del análisis local con diferentes diámetros y pendientes.

Tabla A-1. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q), la apertura de la compuerta (y2), diámetro de la tubería de 0.5 m pendiente suave.

Conoce el Q y Y2, se halla Y1											
(m3/s)		%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
Caudal Q	Etiquetas de fila	Mín. de Apertura	Máx. de Apertura	Mín. de y1	Máx. de y1	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Yn	yc	y2	y3
0.015	estable	6.0%	6.0%	0.53	0.53	0.18	0.18	0.08	0.08	M-3	M-1
0.015	oscilante	8.0%	10.0%	0.16	0.25	0.14	0.15	0.08	0.08	M-2	M-1
0.015	debil	12.0%	12.0%	0.12	0.12	0.13	0.13	0.08	0.08	M-2	M-2
0.015	ondulante	14.0%	14.0%	0.11	0.11	0.12	0.12	0.08	0.08	M-1	M-2
0.015	critico	16.0%	30.0%	0.11	0.15	0.11	0.16	0.08	0.08	M-1	M-2
0.02	fuerte	6.0%	6.0%	0.91	0.91	0.23	0.23	0.09	0.09	M-3	M-1
0.02	estable	8.0%	8.0%	0.42	0.42	0.18	0.18	0.09	0.09	M-3	M-1
0.02	oscilante	10.0%	10.0%	0.24	0.24	0.15	0.15	0.09	0.09	M-2	M-1
0.02	debil	12.0%	14.0%	0.14	0.17	0.12	0.13	0.09	0.09	M-2	M-2
0.02	ondulante	16.0%	16.0%	0.13	0.13	0.11	0.11	0.09	0.09	M-1	M-2
0.02	critico	18.0%	26.0%	0.12	0.14	0.11	0.14	0.09	0.09	M-1	M-2
0.025	estable	8.0%	8.0%	0.63	0.63	0.22	0.22	0.1	0.1	M-3	M-1
0.025	oscilante	10.0%	12.0%	0.24	0.35	0.17	0.19	0.1	0.1	M-2	M-1
0.025	debil	14.0%	14.0%	0.18	0.18	0.14	0.14	0.1	0.1	M-2	M-2
0.025	ondulante	16.0%	18.0%	0.14	0.16	0.11	0.13	0.1	0.1	M-1	M-2
0.025	critico	20.0%	24.0%	0.14	0.14	0.11	0.13	0.10	0.10	M-1	M-2
0.03	estable	8.0%	10.0%	0.49	0.89	0.23	0.26	0.11	0.11	M-3	M-1
0.03	oscilante	12.0%	14.0%	0.23	0.32	0.18	0.20	0.11	0.11	M-2	M-1
0.03	debil	16.0%	16.0%	0.19	0.19	0.15	0.15	0.11	0.11	M-2	M-2
0.03	ondulante	18.0%	20.0%	0.16	0.17	0.11	0.13	0.11	0.11	M-1	M-2
0.03	critico	22.0%	30.0%	0.15	0.17	0.13	0.16	0.11	0.11	M-1	M-2
0.035	estable	10.0%	10.0%	0.65	0.65	0.26	0.26	0.12	0.12	M-3	M-1
0.035	oscilante	12.0%	14.0%	0.29	0.41	0.20	0.23	0.12	0.12	M-2	M-1
0.035	debil	16.0%	18.0%	0.20	0.23	0.16	0.18	0.12	0.12	M-2	M-2
0.035	ondulante	20.0%	22.0%	0.17	0.18	0.11	0.14	0.12	0.12	M-1	M-2
0.035	critico	24.0%	30.0%	0.17	0.17	0.13	0.16	0.12	0.12	M-1	M-2
0.05	estable	12.0%	12.0%	0.78	0.78	0.32	0.32	0.15	0.14	M-3	M-1
0.05	oscilante	14.0%	18.0%	0.31	0.53	0.23	0.28	0.15	0.14	M-2	M-1
0.05	debil	20.0%	22.0%	0.23	0.26	0.19	0.21	0.15	0.14	M-2	M-2
0.05	ondulante	24.0%	26.0%	0.20	0.21	0.18	0.19	0.15	0.14	M-1	M-2
0.05	critico	28.0%	32.0%	0.20	0.20	0.16	0.17	0.15	0.14	M-1	M-2
0.075	estable	16.0%	16.0%	0.78	0.78	0.37	0.37	0.19	0.18	M-3	M-1
0.075	oscilante	18.0%	22.0%	0.39	0.59	0.29	0.34	0.19	0.18	M-2	M-1
0.075	debil	24.0%	26.0%	0.30	0.34	0.25	0.27	0.19	0.18	M-2	M-2
0.075	ondulante	28.0%	32.0%	0.25	0.28	0.22	0.24	0.19	0.18	M-1	M-2
0.075	critico	34.0%	38.0%	0.25	0.25	0.19	0.21	0.19	0.18	M-1	M-2
0.085	estable	16.0%	18.0%	0.73	0.98	0.38	0.41	0.2	0.19	M-3	M-1
0.085	oscilante	20.0%	24.0%	0.40	0.57	0.30	0.34	0.2	0.19	M-2	M-1
0.085	debil	26.0%	28.0%	0.32	0.35	0.27	0.28	0.2	0.19	M-2	M-2
0.085	ondulante	30.0%	34.0%	0.27	0.30	0.22	0.25	0.2	0.19	M-1	M-2
0.085	critico	36.0%	36.0%	0.27	0.27	0.20	0.20	0.20	0.19	M-1	M-2
0.1	oscilante	20.0%	26.0%	0.44	0.75	0.33	0.40	0.22	0.21	M-2	M-1
0.1	debil	28.0%	32.0%	0.33	0.39	0.28	0.31	0.22	0.21	M-2	M-2
0.1	ondulante	34.0%	38.0%	0.29	0.31	0.22	0.27	0.22	0.21	M-1	M-2
0.1	critico	40.0%	42.0%	0.29	0.29	0.21	0.22	0.22	0.21	M-1	M-2
0.125	oscilante	22.0%	28.0%	0.53	0.89	0.39	0.47	0.25	0.23	M-2	M-1
0.125	debil	30.0%	36.0%	0.37	0.47	0.31	0.37	0.25	0.23	M-2	M-2
0.125	ondulante	38.0%	42.0%	0.33	0.35	0.26	0.29	0.25	0.23	M-1	M-2
0.125	critico	44.0%	46.0%	0.32	0.33	0.25	0.25	0.25	0.23	M-1	M-2

Tabla A-2. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 0.5m y pendiente suave.

Conoce el nivel aguas arriba (Y1) y la apertura de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)													
(m)	%	%	(m3/s)	(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Profundidad y1	Etiquetas de fila	Mín. de apertura	Máx. de apertura	Mín. de Q	Máx. de Q	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Mín. de yn	Máx. de yn	Mín. de yc	Máx. de yc	y2	y3
0.1	estable	2.0%	2.0%	0.0012	0.0012	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	M-3	M-1
0.1	oscilante	4.0%	6.0%	0.0033	0.0057	0.05	0.05	0.05	0.06	0.03	0.04	M-3	M-2
0.1	debil	8.0%	10.0%	0.0083	0.0109	0.06	0.06	0.08	0.09	0.05	0.06	M-3	M-2
0.1	ondulante	12.0%	16.0%	0.0135	0.0185	0.07	0.08	0.10	0.11	0.07	0.08	M-3	M-3
0.1	critico	18.0%	18.0%	0.0208	0.0208	0.09	0.09	0.12	0.12	0.09	0.09	M-3	M-3
0.15	estable	2.0%	2.0%	0.0016	0.0016	0.07	0.07	0.03	0.03	0.02	0.02	M-3	M-1
0.15	oscilante	4.0%	8.0%	0.0042	0.0109	0.08	0.11	0.05	0.09	0.04	0.06	M-3	M-1
0.15	debil	10.0%	16.0%	0.0146	0.0260	0.13	0.14	0.10	0.14	0.07	0.10	M-3	M-1
0.15	ondulante	18.0%	24.0%	0.0298	0.0408	0.15	0.15	0.15	0.18	0.11	0.13	M-3	M-2
0.15	critico	26.0%	28.0%	0.0443	0.0477	0.15	0.15	0.18	0.19	0.13	0.14	M-3	M-2
0.2	estable	2.0%	4.0%	0.0018	0.0050	0.07	0.08	0.03	0.06	0.02	0.04	M-3	M-1
0.2	oscilante	6.0%	12.0%	0.0088	0.0225	0.11	0.16	0.08	0.13	0.06	0.09	M-3	M-1
0.2	debil	14.0%	20.0%	0.0274	0.0424	0.16	0.18	0.14	0.18	0.10	0.13	M-3	M-1
0.2	ondulante	22.0%	32.0%	0.0473	0.0712	0.19	0.21	0.19	0.24	0.14	0.17	M-3	M-2
0.2	critico	34.0%	38.0%	0.0757	0.0846	0.21	0.22	0.25	0.27	0.18	0.19	M-3	M-2
0.25	estable	2.0%	6.0%	0.0020	0.0100	0.08	0.13	0.04	0.08	0.02	0.06	M-3	M-1
0.25	oscilante	8.0%	16.0%	0.0150	0.0379	0.15	0.20	0.10	0.17	0.08	0.12	M-3	M-1
0.25	debil	18.0%	26.0%	0.0439	0.0684	0.21	0.23	0.18	0.24	0.13	0.17	M-3	M-2
0.25	ondulante	28.0%	40.0%	0.0744	0.1093	0.23	0.25	0.25	0.32	0.18	0.22	M-3	M-2
0.25	critico	42.0%	48.0%	0.1148	0.1310	0.25	0.27	0.33	0.36	0.22	0.24	M-2	M-2
0.3	fuerte	2.0%	58.0%	0.0022	0.1869	0.09	0.31	0.04	0.49	0.03	0.29	M-3	M-1
0.3	estable	4.0%	2.0%	0.0022	0.0022	0.09	0.09	0.04	0.04	0.03	0.03	M-3	M-1
0.3	oscilante	8.0%	6.0%	0.0062	0.0111	0.11	0.13	0.07	0.09	0.05	0.06	M-3	M-1
0.3	debil	20.0%	18.0%	0.0167	0.0497	0.16	0.23	0.11	0.20	0.08	0.14	M-3	M-1
0.3	ondulante	34.0%	32.0%	0.0569	0.1000	0.24	0.28	0.21	0.30	0.15	0.21	M-3	M-2
0.3	critico	50.0%	48.0%	0.1071	0.1549	0.28	0.30	0.31	0.44	0.22	0.26	M-3	M-2
0.35	fuerte	2.0%	68.0%	0.0024	0.2529	0.09	0.36	0.04	0.49	0.03	0.34	M-3	M-1
0.35	estable	4.0%	2.0%	0.0024	0.0024	0.09	0.09	0.04	0.04	0.03	0.03	M-3	M-1
0.35	oscilante	10.0%	8.0%	0.0067	0.0182	0.12	0.17	0.07	0.11	0.05	0.08	M-3	M-1
0.35	debil	24.0%	22.0%	0.0249	0.0712	0.19	0.28	0.13	0.24	0.10	0.17	M-3	M-1
0.35	ondulante	40.0%	38.0%	0.0794	0.1371	0.29	0.33	0.26	0.38	0.18	0.25	M-3	M-2
0.35	critico	58.0%	56.0%	0.1452	0.2081	0.33	0.35	0.40	0.49	0.25	0.31	M-3	M-2
0.4	fuerte	2.0%	78.0%	0.0026	0.3330	0.09	0.42	0.04	0.49	0.03	0.39	M-3	M-1
0.4	estable	4.0%	2.0%	0.0026	0.0026	0.09	0.09	0.04	0.04	0.03	0.03	M-3	M-1
0.4	oscilante	12.0%	10.0%	0.0072	0.0268	0.13	0.20	0.07	0.14	0.05	0.10	M-3	M-1
0.4	debil	26.0%	24.0%	0.0346	0.0870	0.23	0.31	0.16	0.27	0.12	0.19	M-3	M-2
0.4	ondulante	44.0%	42.0%	0.0962	0.1707	0.32	0.37	0.29	0.49	0.20	0.28	M-3	M-2
0.4	critico	68.0%	66.0%	0.1799	0.2790	0.37	0.40	0.49	0.49	0.28	0.36	M-3	M-2
0.45	fuerte	2.0%	78.0%	0.0028	0.3796	0.09	0.45	0.04	0.49	0.03	0.41	M-3	M-1
0.45	estable	4.0%	2.0%	0.0028	0.0028	0.09	0.09	0.04	0.04	0.03	0.03	M-3	M-1
0.45	oscilante	12.0%	10.0%	0.0077	0.0287	0.13	0.22	0.07	0.15	0.05	0.11	M-3	M-1
0.45	debil	30.0%	28.0%	0.0370	0.1144	0.24	0.35	0.17	0.33	0.12	0.22	M-3	M-2
0.45	ondulante	50.0%	48.0%	0.1247	0.2185	0.36	0.42	0.35	0.49	0.23	0.31	M-3	M-2
0.45	critico	76.0%	74.0%	0.2289	0.3566	0.42	0.45	0.49	0.49	0.32	0.40	M-3	M-2
0.5	fuerte	2.0%	98.0%	0.0029	0.8870	0.09	0.50	0.04	0.49	0.03	0.49	M-3	M-1
0.5	estable	4.0%	2.0%	0.0029	0.0029	0.09	0.09	0.04	0.04	0.03	0.03	M-3	M-2
0.5	oscilante	14.0%	12.0%	0.0081	0.0393	0.14	0.25	0.07	0.17	0.05	0.13	M-3	M-2
0.5	debil	34.0%	32.0%	0.0487	0.1455	0.27	0.40	0.19	0.40	0.14	0.25	M-3	M-2
0.5	ondulante	56.0%	54.0%	0.1570	0.2753	0.41	0.47	0.49	0.49	0.26	0.36	M-2	C-1
1.1	fuerte	2.0%	6.0%	0.0043	0.0220	0.13	0.25	0.03	0.07	0.04	0.09	M-3	M-1
1.1	estable	8.0%	20.0%	0.0336	0.1239	0.29	0.50	0.09	0.17	0.12	0.23	M-3	M-1
1.125	fuerte	2.0%	6.0%	0.0044	0.0223	0.13	0.25	0.03	0.07	0.04	0.09	M-3	M-1
1.125	estable	8.0%	20.0%	0.0340	0.1254	0.29	0.50	0.09	0.17	0.12	0.23	M-3	M-1
1.15	fuerte	2.0%	8.0%	0.0044	0.0343	0.13	0.30	0.03	0.09	0.04	0.12	M-3	M-1
1.15	estable	10.0%	20.0%	0.0475	0.1269	0.34	0.50	0.10	0.17	0.14	0.24	M-3	M-1
1.175	fuerte	2.0%	8.0%	0.0045	0.0347	0.13	0.30	0.03	0.09	0.04	0.12	M-3	M-1
1.175	estable	10.0%	18.0%	0.0480	0.1109	0.34	0.49	0.10	0.16	0.14	0.22	M-3	M-1
1.2	fuerte	2.0%	8.0%	0.0045	0.0351	0.13	0.30	0.03	0.09	0.04	0.12	M-3	M-1
1.2	estable	10.0%	18.0%	0.0485	0.1122	0.35	0.49	0.10	0.16	0.14	0.22	M-3	M-1
1.25	fuerte	2.0%	8.0%	0.0046	0.0359	0.14	0.31	0.03	0.09	0.04	0.12	M-3	M-1
1.25	estable	10.0%	18.0%	0.0496	0.1147	0.35	0.50	0.11	0.16	0.14	0.22	M-3	M-1
1.3	fuerte	2.0%	8.0%	0.0047	0.0366	0.14	0.31	0.03	0.09	0.04	0.12	M-3	M-1
1.3	estable	10.0%	18.0%	0.0506	0.1171	0.36	0.50	0.11	0.17	0.14	0.23	M-3	M-1
1.5	fuerte	2.0%	10.0%	0.0051	0.0545	0.14	0.38	0.03	0.11	0.04	0.15	M-3	M-1
1.5	estable	12.0%	14.0%	0.0709	0.0885	0.43	0.47	0.13	0.14	0.17	0.19	M-3	M-1
1.75	fuerte	2.0%	12.0%	0.0055	0.0769	0.15	0.47	0.03	0.13	0.04	0.18	M-3	M-1
2	fuerte	2.0%	12.0%	0.0059	0.0823	0.16	0.50	0.03	0.14	0.04	0.19	M-3	M-1

Tabla A-3. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 0.5m y pendiente empinada.

Conoce el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)													
(m3/s)	%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
Caudal	Tipo de resalto	Mín. de Apertura	Máx. de Apertura	Mín. de y11	Máx. de y11	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Mín. de yc	Máx. de yc	Mín. de Yn	Máx. de Yn	y2	y3
0.015	fuerte	2.00%	4.00%	1.672	13.068	0.236	0.360	0.08	0.08	0.06	0.06	S-3	S-1
0.015	estable	6.00%	6.00%	0.526	0.526	0.179	0.179	0.08	0.08	0.06	0.06	S-2	S-1
0.015	oscilante	8.00%	10.00%	0.159	0.252	0.118	0.127	0.08	0.08	0.06	0.06	S-1	S-1
0.015	debil	12.00%	12.00%	0.124	0.124	0.113	0.113	0.08	0.08	0.06	0.06	S-1	S-1
0.015	ondulante	14.00%	14.00%	0.110	0.110	0.112	0.112	0.08	0.08	0.06	0.06	S-1	S-1
0.015	critico	16.00%	18.00%	0.107	0.109	0.131	0.132	0.08	0.08	0.06	0.06	S-1	S-1
0.02	fuerte	6.00%	6.00%	0.911	0.911	0.229	0.229	0.09	0.09	0.07	0.07	S-3	S-1
0.02	estable	8.00%	8.00%	0.416	0.416	0.178	0.178	0.09	0.09	0.07	0.07	S-2	S-1
0.02	oscilante	10.00%	10.00%	0.245	0.245	0.149	0.149	0.09	0.09	0.07	0.07	S-1	S-1
0.02	debil	12.00%	14.00%	0.142	0.174	0.118	0.127	0.09	0.09	0.07	0.07	S-1	S-1
0.02	ondulante	16.00%	16.00%	0.128	0.128	0.113	0.113	0.09	0.09	0.07	0.07	S-1	S-1
0.02	critico	18.00%	20.00%	0.124	0.125	0.112	0.132	0.09	0.09	0.07	0.07	S-1	S-1
0.025	estable	8.00%	8.00%	0.628	0.628	0.222	0.222	0.1	0.1	0.07	0.07	S-2	S-1
0.025	oscilante	10.00%	12.00%	0.238	0.355	0.165	0.188	0.1	0.1	0.07	0.07	S-1	S-1
0.025	debil	14.00%	14.00%	0.183	0.183	0.142	0.142	0.1	0.1	0.07	0.07	S-1	S-1
0.025	ondulante	16.00%	18.00%	0.144	0.156	0.113	0.125	0.1	0.1	0.07	0.07	S-1	S-1
0.025	critico	20.00%	22.00%	0.139	0.139	0.112	0.132	0.1	0.1	0.07	0.07	S-1	S-1
0.03	estable	8.00%	10.00%	0.489	0.887	0.228	0.265	0.11	0.11	0.08	0.08	S-2	S-1
0.03	oscilante	12.00%	14.00%	0.233	0.317	0.178	0.198	0.11	0.11	0.08	0.08	S-1	S-1
0.03	debil	16.00%	16.00%	0.190	0.190	0.149	0.149	0.11	0.11	0.08	0.08	S-1	S-1
0.03	ondulante	18.00%	20.00%	0.157	0.168	0.112	0.132	0.11	0.11	0.08	0.08	S-1	S-1
0.03	critico	22.00%	24.00%	0.153	0.153	0.131	0.132	0.11	0.11	0.08	0.08	S-1	S-1
0.035	estable	10.00%	10.00%	0.648	0.648	0.258	0.258	0.12	0.12	0.09	0.09	S-2	S-1
0.035	oscilante	12.00%	14.00%	0.293	0.410	0.198	0.228	0.12	0.12	0.09	0.09	S-1	S-1
0.035	debil	16.00%	18.00%	0.196	0.231	0.161	0.178	0.12	0.12	0.09	0.09	S-1	S-1
0.035	ondulante	20.00%	22.00%	0.169	0.178	0.112	0.142	0.12	0.12	0.09	0.09	S-1	S-1
0.035	critico	24.00%	26.00%	0.165	0.166	0.131	0.132	0.12	0.12	0.09	0.09	S-1	S-1
0.05	estable	12.00%	12.00%	0.775	0.775	0.316	0.316	0.14	0.14	0.11	0.11	S-2	S-1
0.05	oscilante	14.00%	18.00%	0.309	0.526	0.233	0.279	0.14	0.14	0.11	0.11	S-1	S-1
0.05	debil	20.00%	22.00%	0.232	0.261	0.192	0.211	0.14	0.14	0.11	0.11	S-1	S-1
0.05	ondulante	24.00%	26.00%	0.204	0.214	0.179	0.188	0.14	0.14	0.11	0.11	S-1	S-1
0.05	critico	28.00%	30.00%	0.199	0.200	0.167	0.170	0.14	0.14	0.11	0.11	S-1	S-1
0.075	estable	16.00%	16.00%	0.777	0.777	0.368	0.368	0.18	0.18	0.13	0.13	S-2	S-1
0.075	oscilante	18.00%	22.00%	0.388	0.586	0.289	0.336	0.18	0.18	0.13	0.13	S-1	S-1
0.075	debil	24.00%	26.00%	0.301	0.336	0.252	0.270	0.18	0.18	0.13	0.13	S-1	S-1
0.075	ondulante	28.00%	32.00%	0.253	0.278	0.215	0.239	0.18	0.18	0.13	0.13	S-1	S-1
0.075	critico	34.00%	36.00%	0.246	0.248	0.200	0.210	0.18	0.18	0.13	0.13	S-1	S-1
0.085	estable	16.00%	18.00%	0.727	0.975	0.378	0.412	0.19	0.19	0.14	0.14	S-2	S-1
0.085	oscilante	20.00%	24.00%	0.398	0.570	0.300	0.344	0.19	0.19	0.14	0.14	S-1	S-1
0.085	debil	26.00%	28.00%	0.318	0.351	0.265	0.279	0.19	0.19	0.14	0.14	S-1	S-1
0.085	ondulante	30.00%	34.00%	0.271	0.296	0.223	0.251	0.19	0.19	0.14	0.14	S-1	S-1
0.085	critico	36.00%	36.00%	0.266	0.266	0.200	0.200	0.19	0.19	0.14	0.14	S-1	S-1
0.1	oscilante	20.00%	26.00%	0.437	0.751	0.332	0.404	0.21	0.21	0.15	0.15	S-1	S-1
0.1	debil	28.00%	32.00%	0.329	0.388	0.281	0.312	0.21	0.21	0.15	0.15	S-1	S-1
0.1	ondulante	34.00%	38.00%	0.293	0.312	0.223	0.265	0.21	0.21	0.15	0.15	S-1	S-1
0.1	critico	40.00%	42.00%	0.287	0.289	0.210	0.217	0.21	0.21	0.15	0.15	S-1	S-1
0.125	oscilante	22.00%	28.00%	0.530	0.885	0.388	0.470	0.23	0.23	0.17	0.17	S-1	S-1
0.125	debil	30.00%	36.00%	0.371	0.471	0.310	0.368	0.23	0.23	0.17	0.17	S-1	S-1
0.125	ondulante	38.00%	42.00%	0.333	0.354	0.264	0.293	0.23	0.23	0.17	0.17	S-1	S-1
0.125	critico	44.00%	46.00%	0.325	0.328	0.247	0.253	0.23	0.23	0.17	0.17	S-1	S-1

Tabla A-4. Tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 0.5m y pendiente empinada.

Conoce el nivel aguas arriba (Y1) y la apertura de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)													
(m)	%	%	(m³/s)	(m³/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	y2	y3
Alturas Y1	Tipo de Resaltos	Mín. de y2/d	Máx. de y2/d	Mín. de Q	Máx. de Q	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Mín. de yn	Máx. de yn	Mín. de yc	Máx. de yc		
0.1	estable	2.0%	2.0%	0.0012	0.0012	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	C-3	C-1
0.1	oscilante	4.0%	6.0%	0.0033	0.0057	0.05	0.05	0.03	0.04	0.03	0.04	C-3	C-1
0.1	debil	8.0%	10.0%	0.0083	0.0109	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05	0.06	S-2	S-1
0.1	ondulante	12.0%	16.0%	0.0135	0.0185	0.07	0.08	0.06	0.07	0.07	0.08	S-2	S-2
0.1	critico	18.0%	18.0%	0.0208	0.0208	0.09	0.09	0.07	0.07	0.09	0.09	S-2	S-2
0.15	estable	2.0%	2.0%	0.0016	0.0016	0.07	0.07	0.02	0.02	0.02	0.02	C-3	C-1
0.15	oscilante	4.0%	8.0%	0.0042	0.0109	0.08	0.11	0.03	0.05	0.04	0.06	S-3	S-1
0.15	debil	10.0%	16.0%	0.0146	0.0260	0.13	0.14	0.06	0.08	0.07	0.10	S-2	S-1
0.15	ondulante	18.0%	24.0%	0.0298	0.0408	0.15	0.15	0.09	0.10	0.11	0.13	S-2	S-2
0.15	critico	26.0%	28.0%	0.0443	0.0477	0.15	0.15	0.11	0.11	0.13	0.14	S-2	S-2
0.2	estable	2.0%	4.0%	0.0018	0.0050	0.07	0.08	0.02	0.03	0.02	0.04	C-3	C-1
0.2	oscilante	6.0%	12.0%	0.0088	0.0225	0.11	0.16	0.05	0.08	0.06	0.09	S-3	S-1
0.2	debil	14.0%	20.0%	0.0274	0.0424	0.16	0.18	0.08	0.10	0.10	0.13	S-3	S-1
0.2	ondulante	22.0%	32.0%	0.0473	0.0712	0.19	0.21	0.11	0.14	0.14	0.17	S-2	S-2
0.2	critico	34.0%	38.0%	0.0757	0.0846	0.21	0.22	0.14	0.15	0.18	0.19	S-2	S-2
0.25	estable	2.0%	6.0%	0.0020	0.0100	0.08	0.13	0.02	0.05	0.02	0.06	C-3	C-1
0.25	oscilante	8.0%	16.0%	0.0150	0.0379	0.15	0.20	0.06	0.10	0.08	0.12	S-3	S-1
0.25	debil	18.0%	26.0%	0.0439	0.0684	0.21	0.23	0.11	0.13	0.13	0.17	S-3	S-1
0.25	ondulante	28.0%	40.0%	0.0744	0.1093	0.23	0.25	0.14	0.17	0.18	0.22	S-2	S-2
0.25	critico	42.0%	48.0%	0.1148	0.1310	0.25	0.27	0.18	0.19	0.22	0.24	S-2	S-2
0.3	fuerte	2.0%	2.0%	0.0022	0.0022	0.09	0.09	0.02	0.02	0.03	0.03	S-3	S-1
0.3	estable	4.0%	6.0%	0.0062	0.0111	0.11	0.13	0.04	0.05	0.05	0.06	S-3	S-1
0.3	oscilante	8.0%	18.0%	0.0167	0.0497	0.16	0.23	0.06	0.11	0.08	0.14	S-3	S-1
0.3	debil	20.0%	32.0%	0.0569	0.1000	0.24	0.28	0.12	0.17	0.15	0.21	S-3	S-1
0.3	ondulante	34.0%	48.0%	0.1071	0.1549	0.28	0.30	0.17	0.21	0.22	0.26	S-2	S-2
0.3	critico	50.0%	58.0%	0.1614	0.1869	0.30	0.31	0.22	0.23	0.27	0.29	S-2	S-2
0.35	fuerte	2.0%	2.0%	0.0024	0.0024	0.09	0.09	0.02	0.02	0.03	0.03	S-3	S-1
0.35	estable	4.0%	8.0%	0.0067	0.0182	0.12	0.17	0.04	0.07	0.05	0.08	S-3	S-1
0.35	oscilante	10.0%	22.0%	0.0249	0.0712	0.19	0.28	0.08	0.14	0.10	0.17	S-3	S-1
0.35	debil	24.0%	38.0%	0.0794	0.1371	0.29	0.33	0.15	0.20	0.18	0.25	S-3	S-1
0.35	ondulante	40.0%	56.0%	0.1452	0.2081	0.33	0.35	0.20	0.25	0.25	0.31	S-2	S-1
0.35	critico	58.0%	68.0%	0.2157	0.2529	0.35	0.36	0.26	0.28	0.31	0.34	S-2	S-1
0.4	fuerte	2.0%	2.0%	0.0026	0.0026	0.09	0.09	0.02	0.02	0.03	0.03	S-3	S-1
0.4	estable	4.0%	10.0%	0.0072	0.0268	0.13	0.20	0.04	0.08	0.05	0.10	S-3	S-1
0.4	oscilante	12.0%	24.0%	0.0346	0.0870	0.23	0.31	0.09	0.15	0.12	0.19	S-3	S-1
0.4	debil	26.0%	42.0%	0.0962	0.1707	0.32	0.37	0.16	0.22	0.20	0.28	S-3	S-1
0.4	ondulante	44.0%	66.0%	0.1799	0.2790	0.37	0.40	0.23	0.30	0.28	0.36	S-2	S-1
0.4	critico	68.0%	78.0%	0.2879	0.3330	0.40	0.42	0.31	0.34	0.36	0.39	S-2	S-1
0.45	fuerte	2.0%	2.0%	0.0028	0.0028	0.09	0.09	0.02	0.02	0.03	0.03	S-3	S-1
0.45	estable	4.0%	10.0%	0.0077	0.0287	0.13	0.22	0.04	0.09	0.05	0.11	S-3	S-1
0.45	oscilante	12.0%	28.0%	0.0370	0.1144	0.24	0.35	0.10	0.18	0.12	0.22	S-3	S-1
0.45	debil	30.0%	48.0%	0.1247	0.2185	0.36	0.42	0.19	0.26	0.23	0.31	S-3	S-1
0.45	ondulante	50.0%	74.0%	0.2289	0.3566	0.42	0.45	0.27	0.36	0.32	0.40	S-2	S-1
0.45	critico	76.0%	78.0%	0.3680	0.3796	0.45	0.45	0.37	0.38	0.41	0.41	S-2	S-1
0.5	fuerte	2.0%	2.0%	0.0029	0.0029	0.09	0.09	0.03	0.03	0.03	0.03	S-3	S-1
0.5	estable	4.0%	12.0%	0.0081	0.0393	0.14	0.25	0.04	0.10	0.05	0.13	S-3	S-1
0.5	oscilante	14.0%	32.0%	0.0487	0.1455	0.27	0.40	0.11	0.20	0.14	0.25	S-3	S-1
0.5	debil	34.0%	54.0%	0.1570	0.2753	0.41	0.47	0.21	0.30	0.26	0.36	S-3	S-1
0.5	ondulante	56.0%	98.0%	0.2876	0.8870	0.47	0.50	0.31	0.49	0.36	0.49	S-3	S-1
0.55	fuerte	2.0%	2.0%	0.0031	0.0031	0.11	0.11	0.03	0.03	0.02	0.02	S-3	S-1
0.55	estable	4.0%	12.0%	0.0085	0.0414	0.27	0.16	0.06	0.13	0.04	0.10	S-3	S-1
0.55	oscilante	14.0%	32.0%	0.0513	0.1506	0.41	0.29	0.15	0.26	0.11	0.19	S-3	S-1
0.55	debil	34.0%	52.0%	0.1617	0.2506	0.45	0.42	0.27	0.34	0.20	0.26	S-3	S-1
0.55	ondulante	54.0%	56.0%	0.2586	0.2661	0.45	0.45	0.34	0.35	0.26	0.27	S-2	S-1
0.6	fuerte	2.0%	4.0%	0.0032	0.0089	0.15	0.11	0.03	0.06	0.02	0.04	S-3	S-1
0.6	estable	6.0%	14.0%	0.0161	0.0539	0.30	0.19	0.08	0.15	0.06	0.11	S-3	S-1
0.6	oscilante	16.0%	36.0%	0.0648	0.1837	0.45	0.33	0.16	0.29	0.12	0.21	S-3	S-1
0.6	debil	38.0%	46.0%	0.1955	0.2402	0.48	0.47	0.3	0.33	0.22	0.25	S-3	S-1
0.65	fuerte	2.0%	4.0%	0.0033	0.0093	0.16	0.12	0.03	0.06	0.03	0.04	S-3	S-1
0.65	estable	6.0%	16.0%	0.0168	0.0678	0.34	0.20	0.08	0.17	0.06	0.12	S-3	S-1
0.65	oscilante	18.0%	38.0%	0.0797	0.2068	0.49	0.36	0.18	0.31	0.14	0.23	S-3	S-1
0.65	debil	40.0%	40.0%	0.2193	0.2193	0.50	0.50	0.32	0.32	0.24	0.24	S-3	S-1
0.7	fuerte	2.0%	4.0%	0.0034	0.0096	0.16	0.13	0.03	0.06	0.03	0.04	S-3	S-1
0.7	estable	6.0%	16.0%	0.0174	0.0708	0.35	0.20	0.08	0.17	0.06	0.13	S-3	S-1
0.7	oscilante	18.0%	36.0%	0.0832	0.2041	0.50	0.38	0.19	0.30	0.14	0.23	S-3	S-1
0.75	fuerte	2.0%	4.0%	0.0036	0.0100	0.17	0.13	0.03	0.06	0.03	0.05	S-3	S-1
0.75	estable	6.0%	18.0%	0.0181	0.0865	0.38	0.21	0.08	0.19	0.06	0.14	S-3	S-1
0.75	oscilante	20.0%	30.0%	0.0999	0.1704	0.49	0.41	0.21	0.28	0.15	0.21	S-3	S-1
0.8	fuerte	2.0%	4.0%	0.0037	0.0103	0.17	0.13	0.03	0.06	0.03	0.05	S-3	S-1
0.8	estable	6.0%	18.0%	0.0187	0.0897	0.39	0.22	0.08	0.20	0.06	0.14	S-3	S-1
0.8	oscilante	20.0%	28.0%	0.1037	0.1622	0.50	0.42	0.21	0.27	0.16	0.20	S-3	S-1
0.85	fuerte	2.0%	4.0%	0.0038	0.0106	0.17	0.14	0.04	0.06	0.03	0.05	S-3	S-1
0.85	estable	6.0%	20.0%	0.0193	0.1073	0.43	0.22	0.09	0.22	0.06	0.16	S-3	S-1
0.85	oscilante	22.0%	26.0%	0.1221	0.1526	0.50	0.45	0.23	0.26	0.17	0.19	S-3	S-1
0.9	fuerte	2.0%	6.0%	0.0039	0.0199	0.23	0.14	0.04	0.09	0.03	0.07	S-3	S-1
0.9	estable	8.0%	22.0%	0.0302	0.1262	0.47	0.27	0.11	0.24	0.08	0.17	S-3	S-1
0.9	oscilante	24.0%	24.0%	0.1419	0.1419	0.50	0.50	0.25	0.25	0.19	0.19	S-3	S-1
0.95	fuerte	2.0%	6.0%	0.0040	0.0204	0.23	0.14	0.04	0.09	0.03	0.07	S-3	S-1
0.95	estable	8.0%	22.0%	0.0311	0.1301	0.48	0.28	0.11	0.24	0.08	0.18	S-3	S-1
0.95	oscilante	24.0%	24.0%	0.1463	0.1463	0.50	0.50	0.25	0.25	0.19	0.19	S-3	S-1
1	fuerte	2.00%	6.00%	0.0041	0.0210	0.24	0.13	0.04	0.09	0.03	0.07	S-3	S-1
1	estable	8.00%	22.00%	0.0319	0.1339	0.50	0.28	0.11	0.24	0.08	0.18	S-3	S-1

Tabla A-5. Tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente empinada.

Conoce el nivel aguas arriba (Y1) y la apertura de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)													
(m)		%	%	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
Altura Y1	Tipo de resalto	Mín. de apertura	Máx. de apertura	Mín. de Q	Máx. de Q	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Mín. de yc	Máx. de yc	Mín. de yn	Máx. de yn	y2	y3
0.2	estable	0.7%	1.3%	0.0031	0.0086	0.08	0.11	0.02	0.04	0.02	0.03	S-3	S-1
0.2	oscilante	2.0%	4.0%	0.0154	0.0399	0.12	0.16	0.06	0.09	0.04	0.07	S-3	S-1
0.2	debil	4.7%	7.3%	0.0487	0.0851	0.17	0.19	0.10	0.14	0.08	0.10	S-2	S-1
0.2	ondulante	8.0%	10.7%	0.0942	0.1294	0.20	0.21	0.15	0.17	0.11	0.12	S-2	S-1
0.2	critico	11.3%	12.7%	0.1379	0.1545	0.21	0.22	0.18	0.19	0.13	0.13	S-2	S-1
0.25	estable	0.7%	2.0%	0.0035	0.0175	0.08	0.13	0.02	0.06	0.02	0.05	S-3	S-1
0.25	oscilante	2.7%	5.3%	0.0264	0.0676	0.15	0.20	0.07	0.12	0.06	0.09	S-3	S-1
0.25	debil	6.0%	8.7%	0.0787	0.1239	0.21	0.23	0.13	0.17	0.10	0.12	S-2	S-1
0.25	ondulante	9.3%	13.3%	0.1352	0.2010	0.24	0.26	0.18	0.22	0.13	0.15	S-2	S-1
0.25	critico	14.0%	16.0%	0.2115	0.2423	0.26	0.27	0.22	0.24	0.16	0.17	S-2	S-1
0.3	fuerte	0.7%	0.7%	0.0039	0.0039	0.09	0.09	0.03	0.03	0.02	0.02	S-3	S-1
0.3	estable	1.3%	2.0%	0.0108	0.0194	0.11	0.13	0.05	0.06	0.03	0.05	S-3	S-1
0.3	oscilante	2.7%	6.0%	0.0293	0.0892	0.16	0.23	0.08	0.14	0.06	0.10	S-2	S-1
0.3	debil	6.7%	10.7%	0.1023	0.1830	0.24	0.28	0.15	0.21	0.11	0.15	S-2	S-1
0.3	ondulante	11.3%	16.0%	0.1964	0.2877	0.28	0.30	0.22	0.26	0.15	0.18	S-2	S-1
0.3	critico	16.7%	19.3%	0.3002	0.3490	0.30	0.32	0.27	0.29	0.19	0.20	S-2	S-1
0.35	fuerte	0.7%	0.7%	0.0042	0.0042	0.10	0.10	0.03	0.03	0.02	0.02	S-3	S-1
0.35	estable	1.3%	2.7%	0.0117	0.0320	0.12	0.17	0.05	0.08	0.04	0.06	S-3	S-1
0.35	oscilante	3.3%	7.3%	0.0439	0.1286	0.19	0.27	0.10	0.17	0.07	0.12	S-2	S-1
0.35	debil	8.0%	12.7%	0.1439	0.2531	0.28	0.33	0.18	0.25	0.13	0.17	S-2	S-1
0.35	ondulante	13.3%	18.7%	0.2686	0.3892	0.33	0.35	0.25	0.31	0.18	0.21	S-2	S-1
0.35	critico	19.3%	22.7%	0.4037	0.4741	0.35	0.36	0.31	0.34	0.22	0.23	S-2	S-1
0.4	fuerte	0.7%	0.7%	0.0045	0.0045	0.10	0.10	0.03	0.03	0.02	0.02	S-3	S-1
0.4	estable	1.3%	3.3%	0.0126	0.0474	0.13	0.20	0.05	0.10	0.04	0.07	S-3	S-1
0.4	oscilante	4.0%	8.7%	0.0614	0.1749	0.23	0.32	0.12	0.20	0.09	0.14	S-2	S-1
0.4	debil	9.3%	14.7%	0.1924	0.3341	0.32	0.37	0.21	0.28	0.15	0.20	S-2	S-1
0.4	ondulante	15.3%	21.3%	0.3516	0.5052	0.38	0.40	0.29	0.35	0.20	0.24	S-2	S-1
0.4	critico	22.0%	26.0%	0.5216	0.6173	0.40	0.42	0.36	0.39	0.24	0.27	S-2	S-1
0.45	fuerte	0.7%	0.7%	0.0048	0.0048	0.11	0.11	0.03	0.03	0.02	0.02	S-3	S-1
0.45	estable	1.3%	3.3%	0.0134	0.0507	0.13	0.22	0.05	0.11	0.04	0.08	S-3	S-1
0.45	oscilante	4.0%	9.3%	0.0657	0.2086	0.24	0.35	0.12	0.22	0.09	0.16	S-2	S-1
0.45	debil	10.0%	16.0%	0.2280	0.4060	0.36	0.42	0.23	0.31	0.16	0.22	S-2	S-1
0.45	ondulante	16.7%	24.7%	0.4257	0.6538	0.42	0.45	0.32	0.40	0.22	0.27	S-2	S-1
0.45	critico	25.3%	26.0%	0.6720	0.6900	0.45	0.45	0.41	0.41	0.28	0.28	S-2	S-1
0.5	fuerte	0.7%	0.7%	0.0051	0.0051	0.11	0.11	0.03	0.03	0.02	0.02	S-3	S-1
0.5	estable	1.3%	4.0%	0.0141	0.0697	0.14	0.25	0.05	0.13	0.04	0.09	S-3	S-1
0.5	oscilante	4.7%	10.7%	0.0867	0.2663	0.27	0.39	0.14	0.25	0.10	0.18	S-2	S-1
0.5	debil	11.3%	18.0%	0.2878	0.5062	0.40	0.46	0.26	0.35	0.18	0.24	S-2	S-1
0.5	ondulante	18.7%	27.3%	0.5279	0.8000	0.47	0.50	0.36	0.45	0.25	0.30	S-2	S-1
0.5	critico	28.0%	28.0%	0.8200	0.8200	0.50	0.50	0.45	0.45	0.31	0.31	S-2	S-1
0.55	fuerte	0.7%	0.7%	0.0053	0.0053	0.10	0.10	0.03	0.03	0.02	0.02	S-3	S-1
0.55	estable	1.3%	4.7%	0.0148	0.0916	0.15	0.28	0.05	0.14	0.04	0.10	S-3	S-1
0.55	oscilante	5.3%	12.0%	0.1106	0.3306	0.30	0.44	0.16	0.28	0.11	0.20	S-2	S-1
0.55	debil	12.7%	20.0%	0.3542	0.6167	0.44	0.51	0.29	0.39	0.20	0.27	S-2	S-1
0.55	ondulante	20.7%	30.0%	0.6404	0.9599	0.51	0.55	0.40	0.49	0.27	0.33	S-2	S-1
0.55	critico	30.7%	36.0%	0.9817	1.1514	0.55	0.56	0.50	0.54	0.34	0.36	S-2	S-1
0.6	fuerte	0.7%	1.3%	0.0055	0.0155	0.11	0.15	0.03	0.06	0.02	0.04	S-3	S-1
0.6	estable	2.0%	4.7%	0.0282	0.0962	0.19	0.29	0.08	0.15	0.06	0.11	S-3	S-1
0.6	oscilante	5.3%	12.7%	0.1163	0.3760	0.31	0.47	0.16	0.30	0.12	0.21	S-2	S-1
0.6	debil	13.3%	21.3%	0.4015	0.7118	0.48	0.55	0.31	0.42	0.21	0.29	S-2	S-1
0.6	ondulante	22.0%	32.7%	0.7375	1.1333	0.56	0.60	0.43	0.54	0.29	0.36	S-2	S-1
0.6	critico	33.3%	39.3%	1.1569	1.3633	0.60	0.61	0.54	0.59	0.37	0.40	S-2	S-1
0.65	fuerte	0.7%	1.3%	0.0058	0.0162	0.11	0.15	0.03	0.06	0.02	0.04	S-3	S-1
0.65	estable	2.0%	5.3%	0.0294	0.1217	0.19	0.33	0.08	0.17	0.06	0.12	S-3	S-1
0.65	oscilante	6.0%	14.0%	0.1437	0.4514	0.35	0.51	0.18	0.33	0.13	0.23	S-2	S-1
0.65	debil	14.7%	23.3%	0.4790	0.8408	0.52	0.60	0.34	0.46	0.23	0.31	S-2	S-1
0.65	ondulante	24.0%	35.3%	0.8683	1.3199	0.60	0.65	0.47	0.58	0.32	0.39	S-2	S-1
0.65	critico	36.0%	42.7%	1.3453	1.5916	0.65	0.66	0.59	0.64	0.39	0.43	S-2	S-1
0.7	fuerte	0.7%	1.3%	0.0060	0.0168	0.12	0.16	0.03	0.06	0.03	0.04	S-3	S-1
0.7	estable	2.0%	5.3%	0.0306	0.1269	0.20	0.34	0.08	0.17	0.06	0.12	S-3	S-1
0.7	oscilante	6.0%	14.7%	0.1500	0.5038	0.36	0.54	0.19	0.35	0.13	0.24	S-2	S-1
0.7	debil	15.3%	25.3%	0.5332	0.9796	0.55	0.65	0.36	0.5	0.25	0.34	S-2	S-1
0.7	ondulante	26.0%	38.0%	1.0091	1.5197	0.65	0.69	0.50	0.62	0.34	0.42	S-2	S-1
0.7	critico	38.7%	46.0%	1.5468	1.8361	0.69	0.70	0.63	0.69	0.42	0.46	S-2	S-1
0.75	fuerte	0.7%	1.3%	0.0062	0.0174	0.11	0.16	0.03	0.06	0.03	0.04	S-3	S-1
0.75	estable	2.0%	6.0%	0.0317	0.1560	0.20	0.37	0.08	0.19	0.06	0.13	S-3	S-1
0.75	oscilante	6.7%	16.0%	0.1810	0.5900	0.39	0.59	0.21	0.38	0.15	0.26	S-2	S-1
0.75	debil	16.7%	26.7%	0.6214	1.0970	0.60	0.69	0.39	0.53	0.27	0.36	S-2	S-1
0.75	ondulante	27.3%	40.7%	1.1284	1.7324	0.70	0.74	0.53	0.67	0.36	0.45	S-2	S-1
0.75	critico	41.3%	49.3%	1.7613	2.0969	0.71	0.75	0.68	0.74	0.45	0.50	S-2	S-1
0.8	fuerte	0.7%	1.3%	0.0064	0.0180	0.12	0.16	0.03	0.06	0.03	0.05	S-3	S-1
0.8	estable	2.0%	6.7%	0.0328	0.1878	0.21	0.40	0.08	0.21	0.06	0.15	S-3	S-1
0.8	oscilante	7.3%	17.3%	0.2147	0.6826	0.43	0.63	0.23	0.41	0.16	0.28	S-2	S-1
0.8	debil	18.0%	28.7%	0.7160	1.2536	0.64	0.74	0.42	0.56	0.29	0.38	S-2	S-1
0.8	ondulante	29.3%	43.3%	1.2868	1.9581	0.74	0.79	0.57	0.71	0.39	0.48	S-2	S-1
0.8	critico	44.0%	47.3%	1.9886	2.1394	0.80	0.80	0.72	0.75	0.48	0.50	S-2	S-1

Tabla A-6. Continuación de la tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente empinada.

Conoce el nivel aguas arriba (Y1) y la apertura de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)													
(m)	%	%	(m3/s)	(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	y2	y3
Altura Y1	Tipo de resalto	Mín. de apertura	Máx. de apertura	Mín. de Q	Máx. de Q	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Mín. de yc	Máx. de yc	Mín. de yn	Máx. de yn		
0.85	fuerte	0.7%	2.0%	0.0066	0.0338	0.13	0.22	0.03	0.09	0.03	0.06	S-3	S-1
0.85	estable	2.7%	6.7%	0.0517	0.1943	0.25	0.42	0.11	0.21	0.08	0.15	S-3	S-1
0.85	oscilante	7.3%	18.0%	0.2223	0.7462	0.44	0.66	0.23	0.43	0.16	0.29	S-2	S-1
0.85	debil	18.7%	30.7%	0.7814	1.4198	0.67	0.79	0.44	0.60	0.30	0.41	S-2	S-1
0.85	ondulante	31.33%	46.00%	1.455	2.197	0.79	0.84	0.61	0.76	0.41	0.51	S-2	S-1
0.85	critico	46.7%	56.0%	2.2288	2.6671	0.77	0.84	0.76	0.84	0.51	0.57	S-2	S-1
0.9	fuerte	0.67%	2.00%	0.007	0.035	0.12	0.21	0.04	0.09	0.03	0.06	S-3	S-1
0.9	estable	2.67%	7.33%	0.053	0.230	0.25	0.45	0.11	0.23	0.08	0.16	S-3	S-1
0.9	oscilante	8.00%	19.33%	0.260	0.849	0.47	0.71	0.25	0.46	0.17	0.31	S-2	S-1
0.9	debil	20.00%	32.67%	0.886	1.596	0.72	0.84	0.47	0.64	0.32	0.43	S-2	S-1
0.9	ondulante	33.33%	48.67%	1.632	2.448	0.73	0.89	0.65	0.8	0.44	0.54	S-2	S-1
0.9	critico	49.3%	59.3%	2.4820	2.9773	0.74	0.88	0.81	0.89	0.54	0.60	S-2	S-1
0.95	fuerte	0.67%	2.00%	0.007	0.036	0.12	0.22	0.04	0.09	0.03	0.06	S-3	S-1
0.95	estable	2.67%	8.00%	0.055	0.268	0.26	0.48	0.11	0.25	0.08	0.18	S-3	S-1
0.95	oscilante	8.67%	20.00%	0.299	0.920	0.50	0.74	0.27	0.48	0.19	0.33	S-2	S-1
0.95	debil	20.67%	34.00%	0.959	1.742	0.75	0.88	0.49	0.67	0.33	0.45	S-2	S-1
0.95	ondulante	34.67%	52.00%	1.781	2.748	0.88	0.94	0.68	0.85	0.46	0.58	S-2	S-1
0.95	critico	52.7%	62.7%	2.7840	3.3050	0.94	0.96	0.86	0.94	0.58	0.64	S-2	S-1
1	fuerte	0.67%	2.00%	0.007	0.037	0.12	0.23	0.04	0.09	0.03	0.07	S-3	S-1
1	estable	2.67%	8.00%	0.056	0.276	0.27	0.50	0.11	0.26	0.08	0.18	S-3	S-1
1	oscilante	8.67%	21.33%	0.308	1.033	0.52	0.79	0.27	0.51	0.19	0.34	S-2	S-1
1	debil	22.00%	36.00%	1.074	1.935	0.80	0.93	0.52	0.71	0.35	0.48	S-2	S-1
1	ondulante	36.67%	54.67%	1.976	3.028	0.93	0.99	0.72	0.9	0.48	0.61	S-2	S-1
1	critico	55.3%	59.3%	3.0657	3.2882	0.99	1.00	0.90	0.94	0.61	0.64	S-2	S-1
1.1	fuerte	0.67%	2.00%	0.008	0.039	0.13	0.24	0.04	0.09	0.03	0.07	S-3	S-1
1.1	estable	2.67%	8.67%	0.059	0.326	0.28	0.54	0.11	0.28	0.08	0.19	S-3	S-1
1.1	oscilante	9.33%	23.33%	0.361	1.234	0.57	0.87	0.3	0.56	0.2	0.38	S-2	S-1
1.1	debil	24.00%	39.33%	1.278	2.306	0.87	1.02	0.57	0.78	0.38	0.52	S-2	S-1
1.1	ondulante	40.00%	60.00%	2.350	3.632	1.03	1.09	0.79	0.99	0.53	0.67	S-2	S-1
1.1	critico	60.7%	66.0%	3.6732	4.0022	1.09	1.10	0.99	1.04	0.68	0.71	S-2	S-1
1.2	fuerte	0.67%	2.67%	0.008	0.062	0.14	0.29	0.04	0.12	0.03	0.09	S-3	S-1
1.2	estable	3.33%	10.00%	0.086	0.418	0.33	0.61	0.14	0.32	0.1	0.22	S-3	S-1
1.2	oscilante	10.67%	25.33%	0.458	1.452	0.63	0.95	0.33	0.61	0.23	0.41	S-2	S-1
1.2	debil	26.00%	43.33%	1.500	2.756	0.96	1.12	0.62	0.85	0.42	0.58	S-2	S-1
1.2	ondulante	44.00%	66.00%	2.804	4.349	1.12	1.19	0.86	1.08	0.58	0.75	S-2	S-1
1.2	critico	66.7%	68.0%	4.3957	4.4883	1.19	1.19	1.09	1.10	0.75	0.76	S-2	S-1
1.3	fuerte	0.67%	2.67%	0.008	0.064	0.14	0.30	0.04	0.12	0.03	0.09	S-3	S-1
1.3	estable	3.33%	10.67%	0.090	0.479	0.34	0.66	0.14	0.34	0.1	0.23	S-3	S-1
1.3	oscilante	11.33%	27.33%	0.521	1.686	0.68	1.03	0.36	0.66	0.24	0.44	S-2	S-1
1.3	debil	28.00%	46.67%	1.738	3.197	1.04	1.21	0.67	0.92	0.45	0.63	S-2	S-1
1.3	ondulante	47.33%	72.00%	3.249	5.174	1.22	1.30	0.93	1.18	0.63	0.83	S-2	S-1
1.3	critico	72.7%	74.7%	5.2272	5.3891	1.30	1.30	1.18	1.20	0.84	0.85	S-2	S-1
1.4	fuerte	0.67%	2.67%	0.009	0.067	0.14	0.31	0.04	0.12	0.03	0.09	S-3	S-1
1.4	estable	3.33%	11.33%	0.093	0.544	0.35	0.71	0.15	0.37	0.1	0.25	S-3	S-1
1.4	oscilante	12.00%	30.00%	0.589	1.993	0.73	1.12	0.38	0.72	0.26	0.48	S-2	S-1
1.4	debil	30.67%	50.67%	2.049	3.737	1.13	1.31	0.73	1	0.49	0.68	S-2	S-1
1.4	ondulante	51.33%	79.33%	3.794	6.324	1.32	1.40	1.01	1.29	0.69	0.95	S-2	S-1
1.4	critico	80.0%	84.7%	6.3935	6.9093	1.40	1.40	1.29	1.33	0.95	1.01	S-2	S-1
1.1	fuerte	0.67%	2.00%	0.008	0.039	0.133	0.241	0.04	0.09	0.03	0.07	S-3	S-1
1.1	estable	2.67%	9.33%	0.059	0.362	0.282	0.565	0.11	0.3	0.08	0.2	S-3	S-1
1.1	oscilante	10.00%	24.00%	0.398	1.301	0.586	0.890	0.31	0.58	0.21	0.39	S-3	S-1
1.1	debil	24.7%	52.7%	1.3486	4.5269	0.90	1.50	0.59	0.99	0.40	0.77	S-2	S-1
1.125	fuerte	0.67%	2.00%	0.008	0.039	0.134	0.243	0.04	0.09	0.03	0.07	S-3	S-1
1.125	estable	2.67%	9.33%	0.060	0.366	0.285	0.571	0.12	0.3	0.08	0.21	S-3	S-1
1.125	oscilante	10.00%	24.67%	0.404	1.368	0.594	0.913	0.31	0.59	0.22	0.4	S-3	S-1
1.125	debil	25.3%	53.3%	1.4169	4.6234	0.92	1.50	0.60	0.99	0.41	0.77	S-2	S-1
1.15	fuerte	0.67%	2.67%	0.008	0.060	0.134	0.287	0.04	0.12	0.03	0.08	S-3	S-1
1.15	estable	3.33%	9.33%	0.084	0.371	0.326	0.578	0.14	0.3	0.1	0.21	S-3	S-1
1.15	oscilante	10.00%	25.33%	0.409	1.437	0.600	0.936	0.31	0.61	0.22	0.41	S-3	S-1
1.15	debil	26.0%	51.3%	1.4867	4.1069	0.95	1.42	0.62	0.99	0.42	0.72	S-2	S-1
1.175	fuerte	0.67%	2.67%	0.008	0.061	0.135	0.290	0.04	0.12	0.03	0.08	S-3	S-1
1.175	estable	3.33%	9.33%	0.085	0.375	0.329	0.584	0.14	0.3	0.1	0.21	S-3	S-1
1.175	oscilante	10.00%	26.00%	0.414	1.507	0.607	0.959	0.32	0.62	0.22	0.42	S-3	S-1
1.175	debil	26.7%	54.0%	1.5581	4.6519	0.97	1.50	0.63	0.99	0.43	0.78	S-2	S-1
1.2	fuerte	0.67%	2.67%	0.008	0.062	0.136	0.293	0.04	0.12	0.03	0.09	S-3	S-1
1.2	estable	3.33%	10.00%	0.086	0.419	0.332	0.613	0.14	0.32	0.1	0.22	S-3	S-1
1.2	oscilante	10.67%	26.00%	0.458	1.528	0.634	0.972	0.33	0.63	0.23	0.42	S-3	S-1
1.2	debil	26.7%	54.0%	1.5793	4.6053	0.98	1.50	0.64	0.99	0.43	0.77	S-2	S-1
1.25	fuerte	0.67%	2.67%	0.008	0.063	0.138	0.298	0.04	0.12	0.03	0.09	S-3	S-1
1.25	estable	3.33%	10.00%	0.088	0.428	0.338	0.625	0.14	0.32	0.1	0.22	S-3	S-1
1.25	oscilante	10.67%	27.33%	0.469	1.674	0.647	1.019	0.34	0.66	0.23	0.44	S-3	S-1
1.25	debil	28.0%	54.0%	1.7277	4.5596	1.03	1.49	0.67	0.99	0.45	0.77	S-2	S-1
1.3	fuerte	0.67%	2.67%	0.008	0.064	0.140	0.303	0.04	0.12	0.03	0.09	S-3	S-1
1.3	estable	3.33%	10.67%	0.090	0.480	0.344	0.659	0.14	0.34	0.1	0.23	S-3	S-1
1.3	oscilante	11.33%	28.67%	0.522	1.827	0.681	1.065	0.36	0.69	0.24	0.46	S-3	S-1
1.3	debil	29.3%	54.0%	1.8823	4.5542	1.08	1.49	0.70	0.99	0.47	0.77	S-2	S-1
1.5	fuerte	0.67%	3.33%	0.009	0.096	0.146	0.366	0.04	0.15	0.03	0.11	S-3	S-1
1.5	estable	4.00%	12.67%	0.126	0.661	0.408	0.777	0.17	0.4	0.12	0.28	S-3	S-1
1.5	oscilante	13.33%	32.67%	0.711	2.369	0.798	1.232	0.42	0.79	0.29	0.53	S-3	S-1
1.5	debil	33.3%	50.7%	2.4322	4.2760	1.24	1.49	0.80	0.99	0.54	0.74	S-2	S-1
1.75	fuerte	0.67%	4.00%	0.010	0.137	0.154	0.436	0.04	0.18	0.03	0.13	S-3	S-1
1.75	estable	4.67%	14.67%	0.171	0.885	0.477	0.908	0.2	0.47	0.14	0.32	S-3	S-1
1.75	oscilante	15.33%	38.00%	0.942	3.168	0.930	1.440	0.49	0.92	0.33	0.62	S-3	S-1
1.75	debil	38.7%	42.0%	3.2399	3.6068	1.45	1.50	0.93	0.98	0.63	0.67	S-3	S-1
2	fuerte	0.67%	4.67%	0.010	0.183	0.162	0.505	0.04	0.21	0.03	0.15	S-3	S-1
2	estable	5.33%	16.67%	0.223	1.140	0.546	1.042	0.23	0.54	0.16	0.36	S-3	S-1
2	oscilante	17.3%	34.7%	1.2033	3.0466	1.07	1.50	0.55	0.90	0.37	0.61	S-3	S-1

Tabla A-7. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente empinada.

Conoce el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (Y2), se halla el nivel aguas arriba (y1)													
(m3/s)		%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
Caudal	Caudal - Tipo de Resalto	Min. de Apertura	Máx. de Apertura	Min. de y11	Máx. de y11	Min. de Y3	Máx. de Y3	Min. de yc	Máx. de yc	Min. de Yn	Máx. de Yn	y2	y3
0.1	fuerte	3.33%	3.33%	1.61	1.61	0.38	0.38	0.15	0.15	0.12	0.12	S-3	S-1
0.1	estable	4.00%	4.67%	0.64	0.97	0.30	0.33	0.15	0.15	0.12	0.12	S-3	S-1
0.1	oscilante	5.33%	6.00%	0.36	0.46	0.25	0.27	0.15	0.15	0.12	0.12	S-3	S-1
0.1	debil	6.67%	7.33%	0.25	0.29	0.22	0.23	0.15	0.15	0.12	0.12	S-3	S-1
0.1	ondulante	8.00%	9.33%	0.20	0.23	0.18	0.21	0.15	0.15	0.12	0.12	S-3	S-1
0.1	critico	10.00%	10.00%	0.20	0.20	0.18	0.18	0.15	0.15	0.12	0.12	S-3	S-1
0.15	estable	4.67%	5.33%	0.95	1.36	0.39	0.43	0.19	0.19	0.14	0.14	S-3	S-1
0.15	oscilante	6.00%	6.00%	0.37	0.70	0.29	0.36	0.19	0.19	0.14	0.14	S-3	S-1
0.15	debil	8.67%	9.33%	0.29	0.33	0.26	0.27	0.19	0.19	0.14	0.14	S-3	S-1
0.15	ondulante	10.00%	11.33%	0.24	0.27	0.23	0.24	0.19	0.19	0.14	0.14	S-3	S-1
0.15	critico	12.00%	12.67%	0.24	0.24	0.22	0.22	0.19	0.19	0.14	0.14	S-3	S-1
0.2	estable	5.33%	6.67%	0.89	1.62	0.43	0.50	0.22	0.22	0.16	0.16	S-3	S-1
0.2	oscilante	7.33%	8.67%	0.49	0.71	0.35	0.40	0.22	0.22	0.16	0.16	S-3	S-1
0.2	debil	9.33%	10.67%	0.34	0.42	0.30	0.33	0.22	0.22	0.16	0.16	S-3	S-1
0.2	ondulante	11.33%	13.33%	0.28	0.32	0.25	0.29	0.22	0.22	0.16	0.16	S-3	S-1
0.2	critico	14.00%	14.67%	0.27	0.27	0.24	0.25	0.22	0.22	0.16	0.16	S-3	S-1
0.25	estable	6.00%	7.33%	1.05	1.79	0.48	0.56	0.24	0.24	0.18	0.18	S-3	S-1
0.25	oscilante	8.00%	10.00%	0.51	0.84	0.39	0.46	0.24	0.24	0.18	0.18	S-3	S-1
0.25	debil	10.67%	12.67%	0.35	0.46	0.32	0.37	0.24	0.24	0.18	0.18	S-3	S-1
0.25	ondulante	13.33%	14.67%	0.31	0.33	0.29	0.31	0.24	0.24	0.18	0.18	S-3	S-1
0.25	critico	15.33%	16.00%	0.30	0.30	0.27	0.28	0.24	0.24	0.18	0.18	S-3	S-1
0.3	estable	6.67%	8.00%	1.16	1.89	0.53	0.61	0.27	0.27	0.2	0.2	S-3	S-1
0.3	oscilante	8.67%	11.33%	0.53	0.95	0.41	0.51	0.27	0.27	0.2	0.2	S-3	S-1
0.3	debil	12.00%	13.33%	0.41	0.48	0.37	0.40	0.27	0.27	0.2	0.2	S-3	S-1
0.3	ondulante	14.00%	16.00%	0.34	0.38	0.32	0.35	0.27	0.27	0.2	0.2	S-3	S-1
0.3	critico	16.67%	18.00%	0.32	0.33	0.29	0.31	0.27	0.27	0.20	0.20	S-3	S-1
0.35	estable	7.33%	8.67%	1.25	1.95	0.58	0.65	0.29	0.29	0.22	0.22	S-3	S-1
0.35	oscilante	9.33%	12.00%	0.60	1.04	0.46	0.55	0.29	0.29	0.22	0.22	S-3	S-1
0.35	debil	12.67%	14.67%	0.43	0.54	0.39	0.44	0.29	0.29	0.22	0.22	S-3	S-1
0.35	ondulante	15.33%	17.33%	0.36	0.40	0.34	0.37	0.29	0.29	0.22	0.22	S-3	S-1
0.35	critico	18.00%	19.33%	0.35	0.35	0.32	0.33	0.29	0.29	0.22	0.22	S-3	S-1
0.4	estable	8.00%	9.33%	1.32	1.98	0.62	0.69	0.31	0.31	0.23	0.23	S-3	S-1
0.4	oscilante	10.00%	12.67%	0.65	1.11	0.49	0.59	0.31	0.31	0.23	0.23	S-3	S-1
0.4	debil	13.33%	16.00%	0.44	0.59	0.41	0.48	0.31	0.31	0.23	0.23	S-3	S-1
0.4	ondulante	16.67%	18.67%	0.38	0.42	0.36	0.40	0.31	0.31	0.23	0.23	S-3	S-1
0.4	critico	19.33%	20.67%	0.37	0.37	0.34	0.35	0.31	0.31	0.23	0.23	S-3	S-1
0.45	estable	8.00%	10.00%	1.36	2.47	0.65	0.76	0.33	0.33	0.24	0.24	S-3	S-1
0.45	oscilante	10.67%	14.00%	0.64	1.16	0.51	0.62	0.33	0.33	0.24	0.24	S-3	S-1
0.45	debil	14.67%	16.67%	0.48	0.59	0.44	0.49	0.33	0.33	0.24	0.24	S-3	S-1
0.45	ondulante	17.33%	20.00%	0.40	0.46	0.38	0.43	0.33	0.33	0.24	0.24	S-3	S-1
0.45	critico	20.67%	22.00%	0.38	0.39	0.35	0.37	0.33	0.33	0.24	0.24	S-3	S-1
0.5	estable	9.33%	10.67%	1.40	1.98	0.68	0.75	0.35	0.35	0.26	0.26	S-3	S-1
0.5	oscilante	11.33%	14.67%	0.69	1.21	0.54	0.65	0.35	0.35	0.26	0.26	S-3	S-1
0.5	debil	15.33%	18.00%	0.49	0.63	0.46	0.52	0.35	0.35	0.26	0.26	S-3	S-1
0.5	ondulante	18.67%	21.33%	0.41	0.47	0.39	0.44	0.35	0.35	0.26	0.26	S-3	S-1
0.5	critico	22.00%	23.33%	0.40	0.41	0.38	0.38	0.35	0.35	0.26	0.26	S-3	S-1
0.55	estable	10.00%	11.33%	1.43	1.97	0.71	0.78	0.37	0.37	0.27	0.27	S-3	S-1
0.55	oscilante	12.00%	15.33%	0.72	1.24	0.57	0.68	0.37	0.37	0.27	0.27	S-3	S-1
0.55	debil	16.00%	18.67%	0.52	0.67	0.49	0.55	0.37	0.37	0.27	0.27	S-3	S-1
0.55	ondulante	19.33%	22.00%	0.43	0.50	0.42	0.47	0.37	0.37	0.27	0.27	S-3	S-1
0.55	critico	22.67%	24.67%	0.41	0.43	0.39	0.41	0.37	0.37	0.27	0.27	S-3	S-1
0.6	estable	11.33%	12.00%	1.44	1.67	0.74	0.77	0.38	0.38	0.28	0.28	S-3	S-1
0.6	oscilante	12.67%	16.00%	0.76	1.26	0.60	0.71	0.38	0.38	0.28	0.28	S-3	S-1
0.6	debil	16.67%	19.33%	0.55	0.70	0.51	0.58	0.38	0.38	0.28	0.28	S-3	S-1
0.6	ondulante	20.00%	23.33%	0.44	0.52	0.44	0.50	0.38	0.38	0.28	0.28	S-3	S-1
0.6	critico	24.00%	25.33%	0.43	0.44	0.41	0.43	0.38	0.38	0.28	0.28	S-3	S-1
0.65	estable	12.00%	12.00%	1.66	1.66	0.79	0.79	0.4	0.4	0.29	0.29	S-3	S-1
0.65	oscilante	12.67%	16.67%	0.79	1.45	0.62	0.76	0.4	0.4	0.29	0.29	S-3	S-1
0.65	debil	17.33%	20.00%	0.58	0.73	0.54	0.60	0.4	0.4	0.29	0.29	S-3	S-1
0.65	ondulante	20.67%	24.00%	0.46	0.55	0.46	0.52	0.4	0.4	0.29	0.29	S-3	S-1
0.65	critico	24.67%	26.67%	0.44	0.45	0.42	0.45	0.40	0.40	0.29	0.29	S-3	S-1
0.7	estable	12.00%	12.67%	1.66	1.90	0.82	0.85	0.42	0.42	0.3	0.3	S-3	S-1
0.7	oscilante	13.33%	17.33%	0.82	1.46	0.65	0.79	0.42	0.42	0.3	0.3	S-3	S-1
0.7	debil	18.00%	21.33%	0.57	0.76	0.54	0.63	0.42	0.42	0.30	0.30	S-3	S-1
0.75	estable	12.67%	13.33%	1.65	1.88	0.84	0.87	0.43	0.43	0.32	0.32	S-3	S-1
0.75	oscilante	14.00%	18.00%	0.84	1.46	0.67	0.81	0.43	0.43	0.32	0.32	S-3	S-1
0.75	debil	18.67%	22.00%	0.59	0.79	0.57	0.65	0.43	0.43	0.32	0.32	S-3	S-1
0.75	ondulante	22.67%	26.00%	0.48	0.57	0.49	0.55	0.43	0.43	0.32	0.32	S-3	S-1
0.75	critico	26.67%	28.67%	0.46	0.47	0.46	0.48	0.43	0.43	0.32	0.32	S-3	S-1
0.80	estable	13.33%	13.33%	1.85	1.85	0.89	0.89	0.45	0.45	0.33	0.33	S-3	S-1
0.80	oscilante	14.00%	18.67%	0.86	1.64	0.69	0.86	0.45	0.45	0.33	0.33	S-3	S-1
0.80	debil	19.33%	22.67%	0.61	0.81	0.59	0.67	0.45	0.45	0.33	0.33	S-3	S-1
0.80	ondulante	23.33%	27.33%	0.48	0.58	0.48	0.50	0.45	0.45	0.33	0.33	S-3	S-1
0.8	critico	28.00%	30.00%	0.46	0.47	0.47	0.49	0.45	0.45	0.33	0.33	S-3	S-1
0.85	estable	14.00%	14.00%	1.83	1.83	0.91	0.91	0.46	0.46	0.34	0.34	S-3	S-1
0.85	oscilante	14.67%	19.33%	0.88	1.63	0.71	0.87	0.46	0.46	0.34	0.34	S-3	S-1
0.85	debil	20.00%	23.33%	0.63	0.83	0.61	0.69	0.46	0.46	0.34	0.34	S-3	S-1
0.85	ondulante	24.00%	28.00%	0.49	0.61	0.52	0.59	0.46	0.46	0.34	0.34	S-3	S-1
0.85	critico	28.67%	30.00%	0.46	0.48	0.49	0.51	0.46	0.46	0.34	0.34	S-3	S-1
0.90	estable	14.67%	14.67%	1.80	1.80	0.92	0.92	0.47	0.47	0.35	0.35	S-3	S-1
0.90	oscilante	15.33%	19.33%	0.96	1.62	0.75	0.89	0.47	0.47	0.35	0.35	S-3	S-1
0.90	debil	20.00%	24.00%	0.65	0.90	0.63	0.73	0.47	0.47	0.35	0.35	S-3	S-1
0.90	ondulante	24.67%	28.67%	0.50	0.62	0.54	0.61	0.47	0.47	0.35	0.35	S-3	S-1
0.9	critico	29.33%	31.33%	0.45	0.49	0.50	0.53	0.47	0.47	0.35</			

Tabla A-8. Tabla resumen del análisis local conociendo el nivel afuas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente suave.

Conoce el nivel aguas arriba (Y1) y el nivel de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)													
(m)	%	%	(m3/s)	(m3/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	y2	y3
Alturas Y1	Tipo de resalto	Mín. de apertura	Máx. de apertura	Mín. de Q	Máx. de Q	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Mín. de yn	Máx. de yn	Mín. de yc	Máx. de yc		
0.20	estable	0.7%	1.3%	0.0031	0.0086	0.08	0.11	0.02	0.03	0.02	0.04	M-3	M-1
0.20	oscilante	2.0%	4.0%	0.0154	0.0399	0.12	0.16	0.04	0.07	0.06	0.09	M-3	M-1
0.20	debil	4.7%	7.3%	0.0487	0.0851	0.17	0.19	0.08	0.10	0.10	0.14	M-3	M-1
0.20	ondulante	8.0%	10.7%	0.0942	0.1294	0.20	0.21	0.11	0.12	0.15	0.17	M-3	M-2
0.20	critico	11.3%	12.7%	0.1379	0.1545	0.21	0.22	0.13	0.13	0.18	0.19	M-2	M-2
0.25	estable	0.7%	2.0%	0.0035	0.0175	0.08	0.13	0.02	0.05	0.02	0.06	M-3	M-1
0.25	oscilante	2.7%	5.3%	0.0264	0.0676	0.15	0.20	0.06	0.09	0.07	0.12	M-3	M-1
0.25	debil	6.0%	8.7%	0.0787	0.1239	0.21	0.23	0.10	0.12	0.13	0.17	M-3	M-1
0.25	ondulante	9.3%	13.3%	0.1352	0.2010	0.24	0.26	0.13	0.15	0.18	0.22	M-3	M-2
0.25	critico	14.0%	16.0%	0.2115	0.2423	0.26	0.27	0.16	0.17	0.22	0.24	M-2	M-2
0.30	fuerte	0.7%	0.7%	0.0039	0.0039	0.09	0.09	0.02	0.02	0.03	0.03	M-3	M-1
0.30	estable	1.3%	2.0%	0.0108	0.0194	0.11	0.13	0.03	0.05	0.05	0.06	M-3	M-1
0.30	oscilante	2.7%	6.0%	0.0293	0.0892	0.16	0.23	0.06	0.10	0.08	0.14	M-3	M-1
0.30	debil	6.7%	10.7%	0.1023	0.1830	0.24	0.28	0.11	0.15	0.15	0.21	M-3	M-1
0.30	ondulante	11.3%	16.0%	0.1964	0.2877	0.28	0.30	0.15	0.18	0.22	0.26	M-3	M-2
0.30	critico	16.7%	19.3%	0.3002	0.3490	0.30	0.32	0.19	0.20	0.27	0.29	M-2	M-2
0.35	fuerte	0.7%	0.7%	0.0042	0.0042	0.10	0.10	0.02	0.02	0.03	0.03	M-3	M-1
0.35	estable	1.3%	2.7%	0.0117	0.0320	0.12	0.17	0.04	0.06	0.05	0.08	M-3	M-1
0.35	oscilante	3.3%	7.3%	0.0439	0.1286	0.19	0.27	0.07	0.12	0.10	0.17	M-3	M-1
0.35	debil	8.0%	12.7%	0.1439	0.2531	0.28	0.33	0.13	0.17	0.18	0.25	M-3	M-1
0.35	ondulante	13.3%	18.7%	0.2686	0.3892	0.33	0.35	0.18	0.21	0.25	0.31	M-3	M-2
0.35	critico	19.3%	22.7%	0.4037	0.4741	0.35	0.36	0.22	0.23	0.31	0.34	M-2	M-2
0.40	fuerte	0.7%	0.7%	0.0045	0.0045	0.10	0.10	0.02	0.02	0.03	0.03	M-3	M-1
0.40	estable	1.3%	3.3%	0.0126	0.0474	0.13	0.20	0.04	0.07	0.05	0.10	M-3	M-1
0.40	oscilante	4.0%	8.7%	0.0614	0.1749	0.23	0.32	0.09	0.14	0.12	0.20	M-3	M-1
0.40	debil	9.3%	14.7%	0.1924	0.3341	0.32	0.37	0.15	0.20	0.21	0.28	M-3	M-1
0.40	ondulante	15.3%	21.3%	0.3516	0.5052	0.38	0.40	0.20	0.24	0.29	0.35	M-3	M-2
0.40	critico	22.0%	26.0%	0.5216	0.6173	0.40	0.42	0.24	0.27	0.36	0.39	M-2	M-2
0.45	fuerte	0.7%	0.7%	0.0048	0.0048	0.11	0.11	0.02	0.02	0.03	0.03	M-3	M-1
0.45	estable	1.3%	3.3%	0.0134	0.0507	0.13	0.22	0.04	0.08	0.05	0.11	M-3	M-1
0.45	oscilante	4.0%	9.3%	0.0657	0.2086	0.24	0.35	0.09	0.16	0.12	0.22	M-3	M-1
0.45	debil	10.0%	16.0%	0.2280	0.4060	0.36	0.42	0.16	0.22	0.23	0.31	M-3	M-1
0.45	ondulante	16.7%	24.7%	0.4257	0.6538	0.42	0.45	0.22	0.27	0.32	0.40	M-3	M-2
0.45	critico	25.3%	26.0%	0.6720	0.6900	0.45	0.45	0.28	0.28	0.41	0.41	M-2	M-2
0.50	fuerte	0.7%	0.7%	0.0051	0.0051	0.11	0.11	0.02	0.02	0.03	0.03	M-3	M-1
0.50	estable	1.3%	4.0%	0.0141	0.0697	0.14	0.25	0.04	0.09	0.05	0.13	M-3	M-1
0.50	oscilante	4.7%	10.7%	0.0867	0.2663	0.27	0.39	0.10	0.18	0.14	0.25	M-3	M-1
0.50	debil	11.3%	18.0%	0.2878	0.5062	0.40	0.46	0.18	0.24	0.26	0.35	M-3	M-1
0.50	ondulante	18.7%	27.3%	0.5279	0.8000	0.47	0.50	0.25	0.30	0.36	0.45	M-3	M-2
0.50	critico	28.0%	28.0%	0.8200	0.8200	0.50	0.50	0.31	0.31	0.45	0.45	M-2	M-2
0.55	fuerte	0.7%	0.7%	0.0053	0.0053	0.10	0.10	0.02	0.02	0.03	0.03	M-3	M-1
0.55	estable	1.3%	4.7%	0.0148	0.0916	0.15	0.28	0.04	0.10	0.05	0.14	M-3	M-1
0.55	oscilante	5.3%	12.0%	0.1106	0.3306	0.30	0.44	0.11	0.20	0.16	0.28	M-3	M-1
0.55	debil	12.7%	20.0%	0.3542	0.6167	0.44	0.51	0.20	0.27	0.29	0.39	M-3	M-1
0.55	ondulante	20.7%	30.0%	0.6404	0.9599	0.51	0.55	0.27	0.33	0.40	0.49	M-3	M-2
0.55	critico	30.7%	36.0%	0.9817	1.1514	0.55	0.56	0.34	0.36	0.50	0.54	M-2	M-2
0.60	fuerte	0.7%	1.3%	0.0055	0.0155	0.11	0.15	0.02	0.04	0.03	0.06	M-3	M-1
0.60	estable	2.0%	4.7%	0.0282	0.0962	0.19	0.29	0.06	0.11	0.08	0.15	M-3	M-1
0.60	oscilante	5.3%	12.7%	0.1163	0.3760	0.31	0.47	0.12	0.21	0.16	0.30	M-3	M-1
0.60	debil	13.3%	21.3%	0.4015	0.7118	0.48	0.55	0.21	0.29	0.31	0.42	M-3	M-1
0.60	ondulante	22.0%	32.7%	0.7375	1.1333	0.56	0.60	0.29	0.36	0.43	0.54	M-3	M-2
0.60	critico	33.3%	39.3%	1.1569	1.3633	0.60	0.61	0.37	0.40	0.54	0.59	M-2	M-2
0.65	fuerte	0.7%	1.3%	0.0058	0.0162	0.11	0.15	0.02	0.04	0.03	0.06	M-3	M-1
0.65	estable	2.0%	5.3%	0.0294	0.1217	0.19	0.33	0.06	0.12	0.08	0.17	M-3	M-1
0.65	oscilante	6.0%	14.0%	0.1437	0.4514	0.35	0.51	0.13	0.23	0.18	0.33	M-3	M-1
0.65	debil	14.7%	23.3%	0.4790	0.8408	0.52	0.60	0.23	0.31	0.34	0.46	M-3	M-1
0.65	ondulante	24.0%	35.3%	0.8683	1.3199	0.60	0.65	0.32	0.39	0.47	0.58	M-3	M-2
0.65	critico	36.0%	42.7%	1.3453	1.5916	0.65	0.66	0.39	0.43	0.59	0.64	M-2	M-2
0.70	fuerte	0.7%	1.3%	0.0060	0.0168	0.12	0.16	0.03	0.04	0.03	0.06	M-3	M-1
0.70	estable	2.0%	5.3%	0.0306	0.1269	0.20	0.34	0.06	0.12	0.08	0.17	M-3	M-1
0.70	oscilante	6.0%	14.7%	0.1500	0.5038	0.36	0.54	0.13	0.24	0.19	0.35	M-3	M-1
0.70	debil	15.3%	25.3%	0.5332	0.9796	0.55	0.65	0.25	0.34	0.36	0.50	M-3	M-1
0.70	ondulante	26.0%	38.0%	1.0091	1.5197	0.65	0.69	0.34	0.42	0.50	0.62	M-3	M-2
0.70	critico	38.7%	46.0%	1.5468	1.8361	0.69	0.70	0.42	0.46	0.63	0.69	M-2	M-2
0.75	fuerte	0.7%	1.3%	0.0062	0.0174	0.11	0.16	0.03	0.04	0.03	0.06	M-3	M-1
0.75	estable	2.0%	6.0%	0.0317	0.1560	0.20	0.37	0.06	0.13	0.08	0.19	M-3	M-1
0.75	oscilante	6.7%	16.0%	0.1810	0.5900	0.39	0.59	0.15	0.26	0.21	0.38	M-3	M-1
0.75	debil	16.7%	26.7%	0.6214	1.0970	0.60	0.69	0.27	0.36	0.39	0.53	M-3	M-1
0.75	ondulante	27.3%	40.7%	1.1284	1.7324	0.70	0.74	0.36	0.45	0.53	0.67	M-3	M-2
0.75	critico	41.3%	49.3%	1.7613	2.0969	0.71	0.75	0.45	0.50	0.68	0.74	M-2	M-2
0.80	fuerte	0.7%	1.3%	0.0064	0.0180	0.12	0.16	0.03	0.05	0.03	0.06	M-3	M-1
0.80	estable	2.0%	6.7%	0.0328	0.1878	0.21	0.40	0.06	0.15	0.08	0.21	M-3	M-1
0.80	oscilante	7.3%	17.3%	0.2147	0.6826	0.43	0.63	0.16	0.28	0.23	0.41	M-3	M-1
0.80	debil	18.0%	28.7%	0.7160	1.2536	0.64	0.74	0.29	0.38	0.42	0.56	M-3	M-1
0.80	ondulante	29.3%	43.3%	1.2868	1.9581	0.74	0.79	0.39	0.48	0.57	0.71	M-3	M-2
0.80	critico	44.0%	47.3%	1.9886	2.1394	0.80	0.80	0.48	0.50	0.72	0.75	M-2	M-2

Tabla A-9. Continuación de la tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente suave.

Conoce el nivel aguas arriba (Y1) y el nivel de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)													
(m)	%	%	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	y2	y3
Alturas Y1	Tipo de resalto	Mín. de apertura	Máx. de apertura	Mín. de Q	Máx. de Q	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Mín. de yn	Máx. de yn	Mín. de yc	Máx. de yc		
0.85	fuerte	0.7%	2.0%	0.0066	0.0338	0.13	0.22	0.03	0.06	0.03	0.09	M-3	M-1
0.85	estable	2.7%	6.7%	0.0517	0.1943	0.25	0.42	0.08	0.15	0.11	0.21	M-3	M-1
0.85	oscilante	7.3%	18.0%	0.2223	0.7462	0.44	0.66	0.16	0.29	0.23	0.43	M-3	M-1
0.85	debil	18.7%	30.7%	0.7814	1.4198	0.67	0.79	0.30	0.41	0.44	0.60	M-3	M-1
0.85	ondulante	31.3%	46.0%	1.4548	2.1966	0.79	0.84	0.41	0.51	0.61	0.76	M-3	M-2
0.85	critico	46.7%	56.0%	2.2288	2.6671	0.77	0.84	0.51	0.57	0.76	0.84	M-2	M-2
0.90	fuerte	0.7%	2.0%	0.0068	0.0348	0.12	0.21	0.03	0.06	0.04	0.09	M-3	M-1
0.90	estable	2.7%	7.3%	0.0532	0.2296	0.25	0.45	0.08	0.16	0.11	0.23	M-3	M-1
0.90	oscilante	8.0%	19.3%	0.2596	0.8493	0.47	0.71	0.17	0.31	0.25	0.46	M-3	M-1
0.90	debil	20.0%	32.7%	0.8865	1.5956	0.72	0.84	0.32	0.43	0.47	0.64	M-3	M-1
0.90	ondulante	33.3%	48.7%	1.6324	2.4480	0.73	0.89	0.44	0.54	0.65	0.80	M-3	M-2
0.90	critico	49.3%	59.3%	2.4820	2.9773	0.74	0.88	0.54	0.60	0.81	0.89	M-3	M-3
0.95	fuerte	0.7%	2.0%	0.0070	0.0358	0.12	0.22	0.03	0.06	0.04	0.09	M-3	M-1
0.95	estable	2.7%	8.0%	0.0548	0.2677	0.26	0.48	0.08	0.18	0.11	0.25	M-3	M-1
0.95	oscilante	8.7%	20.0%	0.2995	0.9197	0.50	0.74	0.19	0.33	0.27	0.48	M-3	M-1
0.95	debil	20.7%	34.0%	0.9586	1.7422	0.75	0.88	0.33	0.45	0.49	0.67	M-3	M-1
0.95	ondulante	34.7%	52.0%	1.7809	2.7483	0.88	0.94	0.46	0.58	0.68	0.85	M-3	M-2
0.95	critico	52.7%	62.7%	2.7840	3.3050	0.94	0.96	0.58	0.64	0.86	0.94	M-3	M-2
1.00	fuerte	0.7%	2.0%	0.0072	0.0368	0.12	0.23	0.03	0.07	0.04	0.09	M-3	M-1
1.00	estable	2.7%	8.0%	0.0562	0.2756	0.27	0.50	0.08	0.18	0.11	0.26	M-3	M-1
1.00	oscilante	8.7%	21.3%	0.3084	1.0332	0.52	0.79	0.19	0.34	0.27	0.51	M-3	M-1
1.00	debil	22.0%	36.0%	1.0740	1.9352	0.80	0.93	0.35	0.48	0.52	0.71	M-3	M-1
1.00	ondulante	36.7%	54.7%	1.9756	3.0283	0.93	0.99	0.48	0.61	0.72	0.90	M-3	M-2
1.00	critico	55.3%	59.3%	3.0657	3.2882	0.99	1.00	0.61	0.64	0.90	0.94	M-3	M-2
1.10	fuerte	0.7%	2.0%	0.0075	0.0386	0.13	0.24	0.03	0.07	0.04	0.09	M-3	M-1
1.10	estable	2.7%	8.7%	0.0591	0.3256	0.28	0.54	0.08	0.19	0.11	0.28	M-3	M-1
1.10	oscilante	9.3%	23.3%	0.3613	1.2339	0.57	0.87	0.20	0.38	0.30	0.56	M-3	M-1
1.10	debil	24.0%	39.3%	1.2784	2.3057	0.87	1.02	0.38	0.52	0.57	0.78	M-3	M-1
1.10	ondulante	40.0%	60.0%	2.3498	3.6318	1.03	1.09	0.53	0.67	0.79	0.99	M-3	M-2
1.10	critico	60.7%	66.0%	3.6732	4.0022	1.09	1.10	0.68	0.71	0.99	1.04	M-3	M-2
1.20	fuerte	0.7%	2.7%	0.0079	0.0618	0.14	0.29	0.03	0.09	0.04	0.12	M-3	M-1
1.20	estable	3.3%	10.0%	0.0859	0.4182	0.33	0.61	0.10	0.22	0.14	0.32	M-3	M-1
1.20	oscilante	10.7%	25.3%	0.4577	1.4515	0.63	0.95	0.23	0.41	0.33	0.61	M-3	M-1
1.20	debil	26.0%	43.3%	1.4996	2.7560	0.96	1.12	0.42	0.58	0.62	0.85	M-3	M-1
1.20	ondulante	44.0%	66.0%	2.8039	4.3494	1.12	1.19	0.58	0.75	0.86	1.08	M-3	M-2
1.20	critico	66.7%	68.0%	4.3957	4.4883	1.19	1.19	0.75	0.76	1.09	1.10	M-3	M-2
1.30	fuerte	0.7%	2.7%	0.0082	0.0644	0.14	0.30	0.03	0.09	0.04	0.12	M-3	M-1
1.30	estable	3.3%	10.7%	0.0895	0.4791	0.34	0.66	0.10	0.23	0.14	0.34	M-3	M-1
1.30	oscilante	11.3%	27.3%	0.5214	1.6861	0.68	1.03	0.24	0.44	0.36	0.66	M-3	M-1
1.30	debil	28.0%	46.7%	1.7377	3.1972	1.04	1.21	0.45	0.63	0.67	0.92	M-3	M-1
1.30	ondulante	47.3%	72.0%	3.2492	5.1737	1.22	1.30	0.63	0.83	0.93	1.18	M-3	M-2
1.30	critico	72.7%	74.7%	5.2272	5.3891	1.30	1.30	0.84	0.85	1.18	1.20	M-3	M-2
1.40	fuerte	0.7%	2.7%	0.0085	0.0669	0.14	0.31	0.03	0.09	0.04	0.12	M-3	M-1
1.40	estable	3.3%	11.3%	0.0930	0.5439	0.35	0.71	0.10	0.25	0.15	0.37	M-3	M-1
1.40	oscilante	12.0%	30.0%	0.5891	1.9934	0.73	1.12	0.26	0.48	0.38	0.72	M-3	M-1
1.40	debil	30.7%	50.7%	2.0489	3.7371	1.13	1.31	0.49	0.68	0.73	1.00	M-3	M-2
1.40	ondulante	51.3%	79.3%	3.7938	6.3242	1.32	1.40	0.69	0.95	1.01	1.29	M-3	M-2
1.40	critico	80.0%	84.7%	6.3935	6.9093	1.40	1.40	0.95	1.01	1.29	1.33	M-3	M-2
1.10	fuerte	0.7%	2.0%	0.008	0.039	0.13	0.24	0.05	0.12	0.04	0.09	M-3	M-1
1.10	estable	2.7%	9.3%	0.059	0.362	0.28	0.56	0.15	0.36	0.11	0.30	M-3	M-1
1.10	oscilante	10.0%	24.0%	0.398	1.301	0.59	0.89	0.38	0.72	0.31	0.58	M-3	M-1
1.10	debil	24.7%	45.2%	1.349	4.527	0.90	1.50	0.74	0.99	0.59	0.99	M-3	M-1
1.125	fuerte	0.7%	2.0%	0.008	0.039	0.13	0.24	0.05	0.12	0.04	0.09	M-3	M-1
1.125	estable	2.7%	9.3%	0.060	0.366	0.28	0.57	0.15	0.37	0.12	0.30	M-3	M-1
1.125	oscilante	10.0%	24.7%	0.404	1.368	0.59	0.91	0.38	0.74	0.31	0.59	M-3	M-1
1.125	debil	25.3%	53.3%	1.417	4.623	0.92	1.50	0.76	0.99	0.60	0.99	M-3	M-1
1.150	fuerte	0.7%	2.7%	0.008	0.060	0.13	0.29	0.05	0.15	0.04	0.12	M-3	M-1
1.150	estable	3.3%	9.3%	0.084	0.371	0.33	0.58	0.18	0.37	0.14	0.30	M-3	M-1
1.150	oscilante	10.0%	25.3%	0.409	1.437	0.60	0.94	0.39	0.77	0.31	0.61	M-3	M-1
1.150	debil	26.0%	51.3%	1.487	4.107	0.95	1.42	0.78	0.99	0.62	0.99	M-3	M-1
1.175	fuerte	0.7%	2.7%	0.008	0.061	0.14	0.29	0.05	0.15	0.04	0.12	M-3	M-1
1.175	estable	3.3%	9.3%	0.085	0.375	0.33	0.58	0.18	0.37	0.14	0.30	M-3	M-1
1.175	oscilante	10.0%	26.0%	0.414	1.507	0.61	0.96	0.39	0.79	0.32	0.62	M-3	M-1
1.175	debil	26.7%	54.0%	1.558	4.652	0.97	1.50	0.81	0.99	0.63	0.99	M-3	M-1
1.20	fuerte	0.7%	2.7%	0.008	0.062	0.14	0.29	0.05	0.15	0.04	0.12	M-3	M-1
1.20	estable	3.3%	10.0%	0.086	0.419	0.33	0.61	0.18	0.39	0.14	0.32	M-3	M-1
1.20	oscilante	10.7%	26.0%	0.458	1.528	0.63	0.97	0.41	0.80	0.33	0.63	M-3	M-1
1.20	debil	26.7%	54.0%	1.579	4.605	0.98	1.50	0.81	0.99	0.64	0.99	M-3	M-1
1.25	fuerte	0.7%	2.7%	0.008	0.063	0.14	0.30	0.05	0.15	0.04	0.12	M-3	M-1
1.25	estable	3.3%	10.0%	0.088	0.428	0.34	0.63	0.18	0.40	0.14	0.32	M-3	M-1
1.25	oscilante	10.7%	27.3%	0.469	1.674	0.65	1.02	0.42	0.84	0.34	0.66	M-3	M-1
1.25	debil	28.0%	54.0%	1.728	4.560	1.03	1.49	0.86	0.99	0.67	0.99	M-3	M-1
1.30	fuerte	0.7%	2.7%	0.008	0.064	0.14	0.30	0.06	0.15	0.04	0.12	M-3	M-1
1.30	estable	3.3%	10.7%	0.090	0.480	0.34	0.66	0.18	0.42	0.14	0.34	M-3	M-1
1.30	oscilante	11.3%	28.7%	0.522	1.827	0.68	1.07	0.44	0.89	0.36	0.69	M-3	M-1
1.30	debil	29.3%	54.0%	1.882	4.554	1.08	1.49	0.91	0.99	0.70	0.99	M-3	M-1
1.50	fuerte	0.7%	3.3%	0.009	0.096	0.15	0.37	0.06	0.19	0.04	0.15	M-3	M-1
1.50	estable	4.0%	12.7%	0.126	0.661	0.41	0.78	0.21	0.50	0.17	0.40	M-3	M-1
1.50	oscilante	13.3%	32.7%	0.711	2.369	0.80	1.23	0.52	0.99	0.42	0.79	M-3	M-1
1.50	debil	33.3%	50.7%	2.432	4.276	1.24	1.49	0.99	0.99	0.80	0.99	M-3	M-1
1.75	fuerte	0.7%	4.0%	0.010	0.137	0.15	0.44	0.06	0.22	0.04	0.18	M-3	M-1
1.75	estable	4.7%	14.7%	0.171	0.885	0.48	0.91	0.25	0.58	0.20	0.47	M-3	M-1
1.75	oscilante	15.3%	38.0%	0.942	3.168	0.93	1.44	0.60	0.99	0.49	0.92	M-3	M-1
1.75	debil	38.7%	42.0%	3.240	3.607	1.45	1.50	0.99	0.99	0.93	0.98	M-3	M-1
2.00	fuerte	0.7%	4.7%	0.010	0.183	0.16	0.51	0.06	0.26	0.04	0.21	M-3	M-1
2.00	estable	5.3%	16.7%	0.223	1.140	0.55	1.04	0.28	0.67	0.23	0.54	M-3	M-1
2.00	oscilante	17.3%	34.7%	1.203	3.047	1.07	1.50	0.69	0.99	0.55	0.90	M-3	M-1

Tabla A-10. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.5m y pendiente suave.

Conoce el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (Y2), se halla la altura aguas arriba(y1)											
(m3/s)		%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
Caudal	Tipo de resalto	Mín. de apertura	Máx. de apertura	Mín. de y1	Máx. de y1	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Yn	Yc	y2	y3
0.10	estable	4.0%	4.7%	0.64	0.97	0.30	0.33	0.19	0.15	M-3	M-1
0.10	oscilante	5.3%	6.0%	0.36	0.46	0.25	0.28	0.19	0.15	M-3	M-1
0.10	debil	6.7%	7.3%	0.25	0.29	0.22	0.24	0.19	0.15	M-3	M-1
0.10	ondulante	8.0%	10.0%	0.16	0.22	0.18	0.20	0.19	0.15	M-3	M-2
0.10	crítico	10.7%	10.7%	0.16	0.16	0.18	0.18	0.19	0.15	M-2	M-2
0.15	estable	4.7%	5.3%	0.95	1.36	0.39	0.43	0.23	0.19	M-3	M-1
0.15	oscilante	6.0%	8.0%	0.37	0.70	0.29	0.36	0.23	0.19	M-3	M-1
0.15	debil	8.7%	9.3%	0.29	0.32	0.26	0.27	0.23	0.19	M-3	M-1
0.15	ondulante	10.0%	12.7%	0.19	0.26	0.21	0.24	0.23	0.19	M-3	M-2
0.15	crítico	13.3%	13.3%	0.20	0.20	0.21	0.21	0.23	0.19	M-2	M-2
0.20	estable	6.0%	6.7%	0.89	1.18	0.43	0.46	0.27	0.22	M-3	M-1
0.20	oscilante	7.3%	8.7%	0.49	0.71	0.35	0.40	0.27	0.22	M-3	M-1
0.20	debil	9.3%	10.7%	0.34	0.42	0.30	0.33	0.27	0.22	M-3	M-1
0.20	ondulante	11.3%	14.7%	0.22	0.31	0.24	0.29	0.27	0.22	M-3	M-2
0.20	crítico	15.3%	15.3%	0.23	0.23	0.25	0.25	0.27	0.22	M-2	M-2
0.25	estable	6.7%	7.3%	1.05	1.34	0.48	0.52	0.30	0.24	M-3	M-1
0.25	oscilante	8.0%	10.0%	0.52	0.84	0.39	0.46	0.30	0.24	M-3	M-1
0.25	debil	10.7%	12.7%	0.34	0.46	0.32	0.37	0.30	0.24	M-3	M-1
0.25	ondulante	13.3%	16.0%	0.26	0.32	0.27	0.31	0.30	0.24	M-3	M-2
0.25	crítico	16.7%	17.3%	0.25	0.26	0.27	0.27	0.30	0.24	M-2	M-2
0.30	estable	7.3%	8.0%	1.16	1.46	0.54	0.57	0.33	0.27	M-3	M-1
0.30	oscilante	8.7%	11.3%	0.53	0.95	0.42	0.51	0.33	0.27	M-3	M-1
0.30	debil	12.0%	13.3%	0.40	0.48	0.36	0.40	0.33	0.27	M-3	M-1
0.30	ondulante	14.0%	18.0%	0.28	0.37	0.29	0.35	0.33	0.27	M-3	M-2
0.30	crítico	18.7%	18.7%	0.28	0.28	0.29	0.29	0.33	0.27	M-2	M-2
0.35	estable	8.7%	8.7%	1.25	1.25	0.58	0.58	0.36	0.29	M-3	M-1
0.35	oscilante	9.3%	12.0%	0.60	1.04	0.46	0.55	0.36	0.29	M-3	M-1
0.35	debil	12.7%	14.7%	0.42	0.54	0.39	0.44	0.36	0.29	M-3	M-1
0.35	ondulante	15.3%	19.3%	0.30	0.40	0.32	0.38	0.36	0.29	M-3	M-2
0.35	crítico	20.0%	20.0%	0.30	0.30	0.32	0.32	0.36	0.29	M-2	M-2
0.40	estable	9.3%	9.3%	1.32	1.32	0.62	0.62	0.38	0.31	M-3	M-1
0.40	oscilante	10.0%	12.7%	0.66	1.11	0.49	0.59	0.38	0.31	M-3	M-1
0.40	debil	13.3%	16.0%	0.44	0.60	0.41	0.47	0.38	0.31	M-3	M-1
0.40	ondulante	16.7%	20.7%	0.32	0.42	0.33	0.40	0.38	0.31	M-3	M-2
0.40	crítico	21.3%	21.3%	0.32	0.32	0.33	0.33	0.38	0.31	M-2	M-2
0.45	estable	10.0%	10.0%	1.37	1.37	0.65	0.65	0.41	0.33	M-3	M-1
0.45	oscilante	10.7%	14.0%	0.65	1.16	0.51	0.62	0.41	0.33	M-3	M-1
0.45	debil	14.7%	16.7%	0.48	0.59	0.44	0.49	0.41	0.33	M-3	M-1
0.45	ondulante	17.3%	22.0%	0.34	0.46	0.36	0.43	0.41	0.33	M-3	M-2
0.45	crítico	22.7%	22.7%	0.34	0.34	0.36	0.36	0.41	0.33	M-2	M-2
0.50	estable	10.7%	10.7%	1.40	1.40	0.69	0.69	0.43	0.35	M-3	M-1
0.50	oscilante	11.3%	14.7%	0.69	1.21	0.54	0.66	0.43	0.35	M-3	M-1
0.50	debil	15.3%	18.0%	0.49	0.64	0.46	0.52	0.43	0.35	M-3	M-1
0.50	ondulante	18.7%	23.3%	0.36	0.47	0.38	0.44	0.43	0.35	M-3	M-2
0.50	crítico	24.0%	24.0%	0.36	0.36	0.38	0.38	0.43	0.35	M-2	M-2
0.55	estable	11.3%	11.3%	1.43	1.43	0.71	0.71	0.45	0.37	M-3	M-1
0.55	oscilante	12.0%	15.3%	0.73	1.24	0.57	0.68	0.45	0.37	M-3	M-1
0.55	debil	16.0%	18.7%	0.53	0.68	0.48	0.55	0.45	0.37	M-3	M-1
0.55	ondulante	19.3%	24.7%	0.37	0.50	0.39	0.47	0.45	0.37	M-3	M-2
0.55	crítico	25.3%	25.3%	0.38	0.38	0.39	0.39	0.45	0.37	M-2	M-2
0.60	estable	12.0%	12.0%	1.45	1.45	0.74	0.74	0.47	0.38	M-3	M-1
0.60	oscilante	12.7%	16.0%	0.77	1.27	0.59	0.71	0.47	0.38	M-3	M-1
0.60	debil	16.7%	19.3%	0.56	0.71	0.51	0.58	0.47	0.38	M-3	M-1
0.60	ondulante	20.0%	25.3%	0.40	0.53	0.41	0.50	0.47	0.38	M-3	M-2
0.60	crítico	26.0%	26.0%	0.39	0.39	0.41	0.41	0.47	0.38	M-2	M-2
0.65	oscilante	12.7%	16.7%	0.80	1.46	0.62	0.76	0.49	0.40	M-3	M-1
0.65	debil	17.3%	20.0%	0.59	0.75	0.53	0.60	0.49	0.40	M-3	M-1
0.65	ondulante	20.7%	26.7%	0.41	0.56	0.42	0.52	0.49	0.40	M-3	M-2
0.65	crítico	27.3%	27.3%	0.41	0.41	0.42	0.42	0.49	0.40	M-2	M-2
0.70	oscilante	13.3%	17.3%	0.83	1.46	0.65	0.79	0.51	0.42	M-3	M-1
0.70	debil	18.0%	21.3%	0.59	0.77	0.54	0.62	0.51	0.42	M-3	M-1
0.70	ondulante	22.0%	28.0%	0.42	0.56	0.44	0.53	0.51	0.42	M-3	M-2
0.75	oscilante	14.0%	18.0%	0.86	1.47	0.67	0.81	0.53	0.43	M-3	M-1
0.75	debil	18.7%	22.0%	0.61	0.80	0.57	0.65	0.53	0.43	M-3	M-1
0.75	ondulante	22.7%	28.7%	0.44	0.59	0.45	0.55	0.53	0.43	M-3	M-2
0.75	crítico	29.3%	29.3%	0.44	0.44	0.45	0.45	0.53	0.43	M-2	M-2
0.80	oscilante	14.7%	18.7%	0.88	1.47	0.69	0.83	0.55	0.45	M-3	M-1
0.80	debil	19.3%	22.7%	0.64	0.82	0.59	0.67	0.55	0.45	M-3	M-1
0.80	ondulante	23.3%	30.0%	0.45	0.61	0.47	0.57	0.55	0.45	M-3	M-2
0.85	oscilante	15.3%	19.3%	0.90	1.47	0.71	0.85	0.57	0.46	M-3	M-1
0.85	debil	20.0%	23.3%	0.66	0.85	0.61	0.69	0.57	0.46	M-3	M-1
0.85	ondulante	24.0%	30.7%	0.47	0.63	0.48	0.59	0.57	0.46	M-3	M-2
0.85	crítico	31.3%	31.3%	0.47	0.47	0.48	0.48	0.57	0.46	M-2	M-2
0.90	oscilante	16.0%	19.3%	0.98	1.47	0.75	0.86	0.59	0.47	M-3	M-1
0.90	debil	20.0%	24.0%	0.68	0.92	0.62	0.73	0.59	0.47	M-3	M-1
0.90	ondulante	24.7%	31.3%	0.49	0.65	0.50	0.61	0.59	0.47	M-3	M-2
0.85	estable	14.0%	14.0%	1.83	1.83	0.91	0.91	0.83	0.46	M-3	M-1
0.85	oscilante	14.7%	19.3%	0.88	1.63	0.71	0.87	0.83	0.46	M-3	M-2
0.85	debil	20.0%	23.3%	0.63	0.83	0.61	0.69	0.83	0.46	M-3	M-2
0.85	ondulante	24.0%	28.0%	0.49	0.61	0.52	0.59	0.83	0.46	M-3	M-2
0.85	crítico	28.7%	30.0%	0.46	0.48	0.49	0.51	0.83	0.46	M-3	M-2
0.90	estable	14.7%	14.7%	1.80	1.80	0.92	0.92	0.86	0.47	M-3	M-1
0.90	oscilante	15.3%	19.3%	0.96	1.62	0.75	0.89	0.86	0.47	M-3	M-2
0.90	debil	20.0%	24.0%	0.65	0.90	0.63	0.73	0.86	0.47	M-3	M-2
0.90	ondulante	24.7%	28.7%	0.50	0.62	0.54	0.61	0.86	0.47	M-3	M-2
0.90	crítico	29.3%	31.3%	0.45	0.49	0.50	0.53	0.86	0.47	M-3	M-2
0.95	estable	14.7%	14.7%	1.99	1.99	0.97	0.97	0.89	0.49	M-3	M-1
0.95	oscilante	15.3%	20.0%	0.98	1.78	0.77	0.94	0.89	0.49	M-3	M-2
0.95	debil	20.7%	24.7%	0.67	0.92	0.64	0.75	0.89	0.49	M-3	M-2
0.95	ondulante	25.3%	29.3%	0.51	0.64	0.55	0.63	0.89	0.49	M-3	M-2
0.95	crítico	30.0%	31.3%	0.46	0.67	0.52	0.54	0.89	0.49	M-3	M-2
1.00	oscilante	17.3%	20.7%	1.01	1.46	0.78	0.90	0.62	0.50	M-3	M-1
1.00	debil	21.3%	25.3%	0.72	0.95	0.66	0.76	0.62	0.50	M-3	M-1
1.00	ondulante	26.0%	33.3%	0.51	0.69	0.52	0.64	0.62	0.50	M-3	M-2
1.00	crítico	34.0%	34.0%	0.51	0.51	0.52	0.52	0.62	0.50	M-2	M-2
1.00	oscilante	17.3%	20.7%	0.99	1.45	0.78	0.90	0.92	0.50	M-3	M-2
1.00	debil	21.3%	25.3%	0.68	0.93	0.66	0.76	0.92	0.50	M-3	M-2
1.00	ondulante	26.0%	30.7%	0.48	0.65	0.56	0.65	0.92	0.50	M-3	M-2
1.00	crítico	31.3%	32.7%	0.43	0.53	0.53	0.55	0.92	0.50	M-3	M-2

Tabla A-11. Tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente empinada.

Conoce el nivel aguas arriba (Y1) y apertura de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)													
(m)		(m ³ /s)	(m ³ /s)	%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
Altura y1	tipo de resalto	Mín. de Q	Máx. de Q	Mín. de Apertura	Máx. de Apertura	Mín. de yn	Máx. de yn	Mín. de yc	Mín. de yc2	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Y2	Y3
0.2	estable	0.0026	0.0070	1%	2%	0.02	0.03	0.02	0.02	0.10	0.11	M-3	M-1
0.2	oscilante	0.0126	0.0324	3%	6%	0.04	0.07	0.06	0.06	0.12	0.16	S-3	S-1
0.2	debil	0.0395	0.0688	7%	11%	0.08	0.10	0.10	0.10	0.17	0.20	S-2	S-1
0.2	ondulante	0.0761	0.1044	12%	16%	0.11	0.12	0.15	0.15	0.20	0.22	S-2	S-1
0.2	crítico	0.1112	0.1245	17%	19%	0.13	0.14	0.18	0.18	0.21	0.22	S-2	S-1
0.25	estable	0.0029	0.0143	1%	3%	0.02	0.05	0.02	0.02	0.08	0.13	M-3	M-1
0.25	oscilante	0.0214	0.0548	4%	8%	0.06	0.09	0.07	0.07	0.15	0.20	S-3	S-1
0.25	debil	0.0637	0.1000	9%	13%	0.10	0.12	0.13	0.13	0.21	0.23	S-2	S-1
0.25	ondulante	0.1091	0.1616	14%	20%	0.13	0.15	0.18	0.18	0.24	0.26	S-2	S-1
0.25	crítico	0.1700	0.1946	21%	24%	0.16	0.17	0.22	0.22	0.26	0.27	S-2	S-1
0.3	fuerte	0.0032	0.0032	1%	1%	0.02	0.02	0.03	0.03	0.09	0.09	S-3	S-1
0.3	estable	0.0088	0.0158	2%	3%	0.04	0.05	0.05	0.05	0.11	0.15	S-3	S-1
0.3	oscilante	0.0238	0.0722	4%	9%	0.06	0.10	0.08	0.08	0.16	0.23	S-3	S-1
0.3	debil	0.0827	0.1473	10%	16%	0.11	0.15	0.15	0.15	0.24	0.28	S-2	S-1
0.3	ondulante	0.1580	0.2306	17%	24%	0.15	0.18	0.22	0.22	0.28	0.30	S-2	S-1
0.3	crítico	0.2406	0.2792	25%	29%	0.19	0.20	0.27	0.27	0.30	0.32	S-2	S-1
0.35	fuerte	0.0034	0.0034	1%	1%	0.02	0.02	0.03	0.03	0.10	0.10	S-3	S-1
0.35	estable	0.0095	0.0260	2%	4%	0.04	0.06	0.05	0.05	0.12	0.17	S-3	S-1
0.35	oscilante	0.0357	0.1039	5%	11%	0.07	0.12	0.10	0.10	0.19	0.28	S-3	S-1
0.35	debil	0.1162	0.2033	12%	19%	0.13	0.17	0.18	0.18	0.29	0.33	S-2	S-1
0.35	ondulante	0.2156	0.3110	20%	28%	0.18	0.21	0.25	0.25	0.33	0.36	S-2	S-1
0.35	crítico	0.3225	0.3781	29%	34%	0.22	0.24	0.31	0.31	0.35	0.36	S-2	S-1
0.4	fuerte	0.0037	0.0037	1%	1%	0.02	0.02	0.03	0.03	0.11	0.11	S-3	S-1
0.4	estable	0.0102	0.0385	2%	5%	0.04	0.08	0.05	0.05	0.13	0.20	S-3	S-1
0.4	oscilante	0.0498	0.1411	6%	13%	0.09	0.14	0.12	0.12	0.23	0.32	S-3	S-1
0.4	debil	0.1550	0.2536	14%	21%	0.15	0.19	0.21	0.21	0.33	0.37	S-2	S-1
0.4	ondulante	0.2676	0.4026	22%	32%	0.20	0.25	0.28	0.28	0.37	0.40	S-2	S-1
0.4	crítico	0.4155	0.4907	33%	39%	0.25	0.27	0.36	0.36	0.40	0.42	S-2	S-1
0.45	fuerte	0.0039	0.0039	1%	1%	0.02	0.02	0.03	0.03	0.11	0.11	S-3	S-1
0.45	estable	0.0109	0.0412	2%	5%	0.04	0.08	0.05	0.05	0.13	0.22	S-3	S-1
0.45	oscilante	0.0533	0.1680	6%	14%	0.09	0.16	0.12	0.12	0.24	0.35	S-3	S-1
0.45	debil	0.1835	0.3247	15%	24%	0.16	0.22	0.23	0.23	0.36	0.42	S-2	S-1
0.45	ondulante	0.3402	0.5194	25%	37%	0.22	0.28	0.32	0.32	0.42	0.45	S-2	S-1
0.45	crítico	0.5336	0.5478	38%	39%	0.28	0.29	0.41	0.41	0.45	0.45	S-2	S-1
0.5	fuerte	0.0041	0.0041	1%	1%	0.02	0.02	0.03	0.03	0.11	0.11	S-3	S-1
0.5	estable	0.0115	0.0566	2%	6%	0.04	0.09	0.05	0.05	0.14	0.25	S-3	S-1
0.5	oscilante	0.0703	0.2141	7%	16%	0.10	0.18	0.14	0.14	0.27	0.39	S-3	S-1
0.5	debil	0.2312	0.4038	17%	27%	0.18	0.25	0.26	0.26	0.40	0.46	S-2	S-1
0.5	ondulante	0.4208	0.6339	28%	41%	0.25	0.31	0.36	0.36	0.47	0.50	S-2	S-1
0.5	crítico	0.6496	0.6496	42%	42%	0.31	0.31	0.45	0.45	0.50	0.50	S-2	S-1
0.55	fuerte	0.0043	0.0043	1%	1%	0.02	0.02	0.03	0.03	0.10	0.10	S-3	S-1
0.55	estable	0.0121	0.0743	2%	7%	0.04	0.10	0.05	0.05	0.15	0.28	S-3	S-1
0.55	oscilante	0.0896	0.2467	8%	17%	0.11	0.19	0.16	0.16	0.30	0.43	S-3	S-1
0.55	debil	0.2654	0.4908	18%	30%	0.20	0.27	0.28	0.28	0.44	0.51	S-2	S-1
0.55	ondulante	0.5094	0.7589	31%	45%	0.28	0.34	0.40	0.40	0.52	0.55	S-2	S-1
0.55	crítico	0.7760	0.9085	46%	54%	0.35	0.38	0.50	0.50	0.55	0.56	S-2	S-1
0.6	fuerte	0.0045	0.0126	1%	2%	0.02	0.04	0.03	0.03	0.11	0.16	S-3	S-1
0.6	estable	0.0230	0.0780	3%	7%	0.06	0.11	0.08	0.08	0.19	0.30	S-3	S-1
0.6	oscilante	0.0942	0.3015	8%	19%	0.12	0.21	0.16	0.16	0.32	0.47	S-3	S-1
0.6	debil	0.3217	0.5656	20%	32%	0.22	0.29	0.31	0.31	0.48	0.56	S-2	S-1
0.6	ondulante	0.5857	0.8945	33%	49%	0.30	0.37	0.43	0.43	0.56	0.60	S-2	S-1
0.6	crítico	0.9130	1.0746	50%	59%	0.38	0.41	0.54	0.54	0.60	0.61	S-2	S-1
0.65	fuerte	0.0047	0.0132	1%	2%	0.02	0.04	0.03	0.03	0.11	0.15	S-3	S-1
0.65	estable	0.0239	0.0986	3%	8%	0.06	0.12	0.08	0.08	0.19	0.33	S-3	S-1
0.65	oscilante	0.1163	0.3613	9%	21%	0.13	0.23	0.18	0.18	0.35	0.51	S-3	S-1
0.65	debil	0.3830	0.6668	22%	35%	0.24	0.32	0.34	0.34	0.53	0.61	S-2	S-1
0.65	ondulante	0.6883	1.0409	36%	53%	0.32	0.41	0.47	0.47	0.61	0.65	S-2	S-1
0.65	crítico	1.0608	1.2550	54%	64%	0.41	0.45	0.59	0.59	0.65	0.67	S-2	S-1
0.7	fuerte	0.0049	0.0137	1%	2%	0.03	0.04	0.03	0.03	0.12	0.16	M-3	M-1
0.7	estable	0.0249	0.1028	3%	8%	0.06	0.12	0.08	0.08	0.20	0.34	S-3	S-1
0.7	oscilante	0.1213	0.4029	9%	22%	0.13	0.25	0.19	0.19	0.36	0.55	S-3	S-1
0.7	debil	0.4261	0.7757	23%	38%	0.25	0.35	0.36	0.36	0.56	0.65	S-2	S-1
0.7	ondulante	0.7987	1.1985	39%	57%	0.35	0.44	0.50	0.50	0.66	0.70	S-2	S-1
0.7	crítico	1.2199	1.4515	58%	69%	0.44	0.49	0.63	0.63	0.70	0.70	S-2	S-2
0.75	fuerte	0.0051	0.0142	1%	2%	0.03	0.05	0.03	0.03	0.12	0.16	M-3	M-1
0.75	estable	0.0258	0.1262	3%	9%	0.06	0.14	0.08	0.08	0.21	0.37	S-3	S-1
0.75	oscilante	0.1463	0.4711	10%	24%	0.15	0.27	0.21	0.21	0.40	0.59	S-3	S-1
0.75	debil	0.4958	0.8680	25%	40%	0.27	0.37	0.39	0.39	0.60	0.70	S-2	S-1
0.75	ondulante	0.8925	1.3686	41%	61%	0.37	0.47	0.53	0.53	0.70	0.74	S-2	S-1
0.75	crítico	1.3917	1.6674	62%	74%	0.48	0.53	0.68	0.68	0.71	0.75	S-2	S-2

Tabla A-12. Continuación tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente empinada.

Conoce el el nivel aguas arriba (Y1) y apertura de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)													
(m)		(m ³ /s)	(m ³ /s)	%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
Altura y1	tipo de resalto	Mín. de Q	Máx. de Q	Mín. de Apertura	Máx. de Apertura	Mín. de yn	Máx. de yn	Mín. de yc	Mín. de yc2	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Y2	Y3
0.8	fuerte	0.0052	0.0147	1%	2%	0.03	0.05	0.03	0.03	0.12	0.17	S-3	S-1
0.8	estable	0.0267	0.1518	3%	10%	0.06	0.15	0.08	0.08	0.21	0.41	S-3	S-1
0.8	oscilante	0.1734	0.5180	11%	25%	0.16	0.28	0.23	0.23	0.43	0.63	S-3	S-1
0.8	debil	0.5442	0.9914	26%	43%	0.29	0.40	0.41	0.41	0.64	0.75	S-2	S-1
0.8	ondulante	1.0175	1.5784	44%	66%	0.40	0.52	0.57	0.57	0.75	0.80	S-2	S-1
0.8	critico	1.6035	1.9096	67%	79%	0.52	0.58	0.73	0.73	0.80	0.80	S-2	S-2
0.85	fuerte	0.0054	0.0275	1%	3%	0.03	0.06	0.03	0.03	0.13	0.22	S-3	S-1
0.85	estable	0.0420	0.1571	4%	10%	0.08	0.15	0.11	0.11	0.25	0.42	S-3	S-1
0.85	oscilante	0.1795	0.5946	11%	27%	0.16	0.30	0.23	0.23	0.44	0.67	S-3	S-1
0.85	debil	0.6223	1.1235	28%	46%	0.31	0.42	0.44	0.44	0.68	0.79	S-3	S-1
0.85	ondulante	1.1512	1.7840	47%	70%	0.43	0.56	0.61	0.61	0.80	0.84	S-3	S-1
0.85	critico	1.8119	2.1927	71%	84%	0.56	0.64	0.77	0.77	0.77	0.84	S-2	S-2
0.9	fuerte	0.0056	0.0284	1%	3%	0.03	0.06	0.04	0.04	0.13	0.22	S-3	S-1
0.9	estable	0.0433	0.1854	4%	11%	0.08	0.17	0.11	0.11	0.26	0.45	S-3	S-1
0.9	oscilante	0.2094	0.6762	12%	29%	0.18	0.32	0.25	0.25	0.48	0.72	S-2	S-1
0.9	debil	0.7054	1.2654	30%	49%	0.33	0.45	0.47	0.47	0.73	0.84	S-2	S-2
0.9	ondulante	1.2949	2.0493	50%	75%	0.46	0.61	0.65	0.65	0.73	0.89	S-2	S-2
0.9	critico	2.0816	2.5540	76%	89%	0.62	0.72	0.82	0.82	0.76	0.88	S-2	S-2
0.95	fuerte	0.0057	0.0292	1%	3%	0.03	0.07	0.04	0.04	0.13	0.23	S-3	S-1
0.95	estable	0.0445	0.2160	4%	12%	0.08	0.18	0.11	0.11	0.27	0.49	S-3	S-1
0.95	oscilante	0.2414	0.7323	13%	30%	0.19	0.34	0.27	0.27	0.51	0.75	S-2	S-1
0.95	debil	0.7630	1.4193	31%	52%	0.34	0.49	0.49	0.49	0.76	0.90	S-2	S-1
0.95	ondulante	1.4510	2.4602	53%	82%	0.49	0.70	0.69	0.69	0.90	0.95	S-2	S-1
0.95	critico	2.5032	3.1251	83%	94%	0.70	0.89	0.88	0.88	0.90	0.95	S-1	S-1
1.1	fuerte	0.0100	0.0300	13%	24%	0.03	0.01	0.07	0.03	0.09	0.04	S-3	S-1
1.1	estable	0.0400	0.1300	29%	55%	0.26	0.05	0.20	0.08	0.28	0.12	S-3	S-1
1.1	oscilante	0.1400	0.3400	57%	86%	0.93	0.29	0.38	0.21	0.55	0.30	S-3	S-1
1.1	debil	0.3500	0.5500	87%	95%	1.59	0.96	0.52	0.39	0.72	0.56	S-3	S-1
1.1	ondulante	0.5600	0.7500	89%	95%	2.02	1.62	0.60	0.52	0.81	0.73	S-2	S-1
1.125	fuerte	0.0100	0.0300	13%	25%	0.03	0.01	0.07	0.03	0.09	0.04	S-3	S-1
1.125	estable	0.0400	0.1400	28%	58%	0.29	0.05	0.21	0.08	0.30	0.12	S-3	S-1
1.125	oscilante	0.1500	0.3500	60%	88%	0.98	0.32	0.39	0.22	0.56	0.31	S-3	S-1
1.125	debil	0.3600	0.5600	89%	96%	1.65	1.01	0.53	0.40	0.74	0.57	S-3	S-1
1.125	ondulante	0.5700	0.7500	91%	96%	2.07	1.67	0.61	0.54	0.82	0.74	S-2	S-1
1.15	fuerte	0.0100	0.0400	14%	29%	0.05	0.01	0.09	0.03	0.12	0.04	S-3	S-1
1.15	estable	0.0500	0.1400	33%	59%	0.30	0.07	0.21	0.10	0.30	0.14	S-3	S-1
1.15	oscilante	0.1500	0.3600	61%	90%	1.03	0.33	0.40	0.22	0.58	0.32	S-3	S-1
1.15	debil	0.3700	0.5700	91%	98%	1.70	1.06	0.54	0.41	0.75	0.59	S-3	S-1
1.15	ondulante	0.5800	0.7500	92%	98%	2.12	1.73	0.62	0.55	0.83	0.75	S-2	S-1
1.175	fuerte	0.0100	0.0400	14%	29%	0.05	0.01	0.09	0.03	0.12	0.04	S-3	S-1
1.175	estable	0.0500	0.1400	33%	59%	0.30	0.07	0.21	0.10	0.30	0.14	S-3	S-1
1.175	oscilante	0.1500	0.3600	61%	91%	1.04	0.33	0.41	0.22	0.58	0.32	S-3	S-1
1.175	debil	0.3700	0.5800	92%	99%	1.76	1.08	0.55	0.41	0.76	0.59	S-3	S-1
1.175	ondulante	0.5900	0.7800	93%	99%	2.21	1.79	0.64	0.56	0.84	0.77	S-2	S-1
1.2	fuerte	0.0100	0.0400	14%	30%	0.05	0.01	0.09	0.03	0.12	0.04	S-3	S-1
1.2	estable	0.0500	0.1500	34%	62%	0.34	0.07	0.22	0.10	0.32	0.14	S-3	S-1
1.2	oscilante	0.1600	0.3700	64%	94%	1.09	0.37	0.42	0.23	0.60	0.33	S-3	S-1
1.2	debil	0.3800	0.5200	94%	100%	1.61	1.13	0.52	0.43	0.73	0.61	S-2	S-1
1.25	fuerte	0.0100	0.0400	14%	30%	0.05	0.01	0.09	0.03	0.12	0.04	S-3	S-1
1.25	estable	0.0500	0.1500	34%	63%	0.34	0.07	0.23	0.10	0.32	0.14	S-3	S-1
1.25	oscilante	0.1600	0.3800	66%	97%	1.16	0.38	0.43	0.24	0.61	0.34	S-3	S-1
1.25	debil	0.3900	0.4400	98%	100%	1.38	1.20	0.48	0.44	0.67	0.62	S-3	S-1
1.3	fuerte	0.0100	0.0400	15%	31%	0.05	0.01	0.09	0.03	0.12	0.04	S-3	S-1
1.3	estable	0.0500	0.1600	35%	67%	0.38	0.07	0.24	0.10	0.34	0.14	S-3	S-1
1.3	oscilante	0.1700	0.4000	69%	100%	1.27	0.42	0.45	0.25	0.64	0.36	S-3	S-1
1.3	debil	0.4100	0.4100	100%	100%	1.30	1.30	0.46	0.46	0.65	0.65	S-3	S-1
1.5	fuerte	0.0100	0.0500	15%	37%	0.08	0.01	0.11	0.03	0.15	0.04	S-3	S-1
1.5	estable	0.0600	0.1800	41%	77%	0.49	0.10	0.27	0.12	0.39	0.17	S-3	S-1
1.5	oscilante	0.1900	0.3000	79%	99%	0.97	0.53	0.39	0.28	0.56	0.41	S-3	S-1
1.75	fuerte	0.0100	0.0600	16%	44%	0.11	0.01	0.13	0.03	0.18	0.04	S-3	S-1
1.75	estable	0.0700	0.2100	48%	91%	0.66	0.14	0.32	0.14	0.46	0.20	S-3	S-1
1.75	oscilante	0.2200	0.2500	93%	100%	0.84	0.70	0.36	0.33	0.52	0.47	S-3	S-1
2	fuerte	0.0100	0.0700	16%	51%	0.15	0.01	0.15	0.03	0.21	0.04	S-3	S-1
2	estable	0.0800	0.2100	56%	98%	0.71	0.18	0.33	0.16	0.47	0.23	S-3	S-1

Tabla A-13. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente empinada.

Conoce el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (Y2), se halla el caudal (Q)												
(m ³ /s)	(m)	(m)	%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Caudal Q	tipo de resalto	Mín. de y11	Máx. de y11	Mín. de Apertura	Máx. de Apertura	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Yn	yc	y2	y3	
0.15	fuerte	2.0330	3.1580	6.0%	7.0%	0.52	0.57	0.21	0.21	C-3	C-1	
0.15	estable	1.0244	1.4030	8.0%	9.0%	0.44	0.47	0.21	0.21	C-3	C-1	
0.15	oscilante	0.4427	0.7845	10.0%	13.0%	0.33	0.40	0.21	0.21	C-3	C-1	
0.15	debil	0.3233	0.3892	14.0%	16.0%	0.28	0.31	0.21	0.21	C-3	C-1	
0.15	ondulante	0.2905	0.3039	17%	18%	0.26	0.27	0.21	0.21	C-3	C-1	
0.20	fuerte	2.4327	3.5601	7.0%	8.0%	0.61	0.66	0.24	0.24	C-3	C-1	
0.20	estable	1.0308	1.7525	9.0%	11.0%	0.49	0.56	0.24	0.24	C-3	C-1	
0.20	oscilante	0.5159	0.8324	12.0%	15.0%	0.39	0.46	0.24	0.24	C-3	C-1	
0.20	debil	0.3870	0.4603	16.0%	18.0%	0.34	0.37	0.24	0.24	C-3	C-1	
0.20	ondulante	0.3249	0.3634	19%	22%	0.27	0.32	0.24	0.24	C-3	C-1	
0.25	fuerte	2.6882	5.5235	7.0%	9.0%	0.68	0.81	0.27	0.27	C-3	C-1	
0.25	estable	1.2356	2.0058	10.0%	12.0%	0.56	0.63	0.27	0.27	C-3	C-1	
0.25	oscilante	0.5665	1.0118	13.0%	17.0%	0.43	0.53	0.27	0.27	C-3	C-1	
0.25	debil	0.4129	0.5126	18.0%	21.0%	0.36	0.41	0.27	0.27	C-3	C-1	
0.25	ondulante	0.3606	0.3935	22%	25%	0.31	0.35	0.27	0.27	C-3	C-1	
0.30	fuerte	3.8318	5.3742	8.0%	9.0%	0.81	0.88	0.3	0.3	C-3	C-1	
0.30	estable	1.1636	2.8449	10.0%	14.0%	0.59	0.75	0.3	0.3	C-3	C-1	
0.30	oscilante	0.6023	0.9858	15.0%	19.0%	0.47	0.56	0.3	0.3	C-3	C-1	
0.30	debil	0.4541	0.5518	20.0%	23.0%	0.40	0.45	0.3	0.3	C-3	C-1	
0.30	ondulante	0.3977	0.4340	24%	27%	0.35	0.39	0.30	0.30	C-3	C-1	
0.35	fuerte	3.8365	5.1832	9.0%	10.0%	0.86	0.93	0.32	0.33	S-3	S-1	
0.35	estable	1.2903	2.9350	11.0%	15.0%	0.64	0.81	0.32	0.33	S-3	S-1	
0.35	oscilante	0.6860	1.1039	16.0%	20.0%	0.52	0.61	0.32	0.33	S-3	S-1	
0.35	debil	0.4887	0.6285	21.0%	25.0%	0.43	0.50	0.32	0.33	S-3	S-1	
0.35	ondulante	0.4243	0.4687	26.0%	30.0%	0.37	0.42	0.32	0.33	S-3	S-1	
0.35	critico	0.4171	0.4197	31%	32%	0.35	0.36	0.32	0.33	S-3	S-1	
0.40	fuerte	3.8002	3.8002	11.0%	11.0%	0.91	0.91	0.34	0.35	S-3	S-1	
0.40	estable	1.3953	2.9805	12.0%	16.0%	0.70	0.86	0.34	0.35	S-3	S-1	
0.40	oscilante	0.7002	1.2047	17.0%	22.0%	0.55	0.66	0.34	0.35	S-3	S-1	
0.40	debil	0.5182	0.6485	23.0%	27.0%	0.46	0.53	0.34	0.35	S-3	S-1	
0.40	ondulante	0.4542	0.4989	28.0%	32.0%	0.40	0.44	0.34	0.35	S-3	S-1	
0.40	critico	0.4492	0.4492	33%	33%	0.39	0.39	0.34	0.35	S-3	S-1	
0.45	fuerte	3.7407	3.7407	12.0%	12.0%	0.96	0.96	0.37	0.37	C-3	C-1	
0.45	estable	1.4820	2.9959	13.0%	17.0%	0.74	0.90	0.37	0.37	C-3	C-1	
0.45	oscilante	0.7667	1.2906	18.0%	23.0%	0.59	0.71	0.37	0.37	C-3	C-1	
0.45	debil	0.5663	0.7108	24.0%	28.0%	0.50	0.57	0.37	0.37	C-3	C-1	
0.45	ondulante	0.4817	0.5439	29.0%	34.0%	0.41	0.48	0.37	0.37	C-3	C-1	
0.45	critico	0.4765	0.4765	35%	35%	0.41	0.41	0.37	0.37	C-3	C-1	
0.50	estable	1.5535	3.6686	13.0%	18.0%	0.78	1.00	0.39	0.39	C-3	C-1	
0.50	oscilante	0.8279	1.3635	19.0%	24.0%	0.63	0.75	0.39	0.39	C-3	C-1	
0.50	debil	0.5876	0.7689	25.0%	30.0%	0.52	0.61	0.39	0.39	C-3	C-1	
0.50	ondulante	0.5071	0.5666	31.0%	36.0%	0.43	0.51	0.39	0.39	C-3	C-1	
0.50	critico	0.5020	0.5020	37%	37%	0.43	0.43	0.39	0.39	C-3	C-1	
0.55	estable	1.6123	2.9734	15.0%	19.0%	0.82	0.99	0.41	0.41	C-3	C-1	
0.55	oscilante	0.8228	1.4254	20.0%	26.0%	0.64	0.79	0.41	0.41	C-3	C-1	
0.55	debil	0.6296	0.7708	27.0%	31.0%	0.56	0.62	0.41	0.41	C-3	C-1	
0.55	ondulante	0.5309	0.6065	32.0%	38.0%	0.46	0.54	0.41	0.41	C-3	C-1	
0.55	critico	0.5260	0.5260	39%	39%	0.45	0.45	0.41	0.41	C-3	C-1	
0.60	estable	1.6607	2.5079	17.0%	20.0%	0.86	0.98	0.43	0.43	C-3	C-1	
0.60	oscilante	0.8728	1.4780	21.0%	27.0%	0.68	0.83	0.43	0.43	C-3	C-1	
0.60	debil	0.6450	0.8188	28.0%	33.0%	0.57	0.66	0.43	0.43	C-3	C-1	
0.60	ondulante	0.5595	0.6238	34.0%	39.0%	0.49	0.56	0.43	0.43	C-3	C-1	
0.60	critico	0.5532	0.5532	40%	40%	0.48	0.48	0.43	0.43	C-3	C-1	
0.65	estable	1.7005	2.1803	19.0%	21.0%	0.89	0.97	0.45	0.45	C-3	C-1	
0.65	oscilante	0.9190	1.5227	22.0%	28.0%	0.71	0.86	0.45	0.45	C-3	C-1	
0.65	debil	0.6821	0.8637	29.0%	34.0%	0.60	0.69	0.45	0.45	C-3	C-1	
0.65	ondulante	0.5803	0.6593	35.0%	41.0%	0.50	0.59	0.45	0.45	C-3	C-1	
0.65	critico	0.5745	0.5745	42%	42%	0.50	0.50	0.45	0.45	C-3	C-1	
0.70	estable	1.9407	2.1920	20.0%	21.0%	0.96	1.00	0.47	0.47	C-3	C-1	
0.70	oscilante	0.9618	1.7333	22.0%	29.0%	0.74	0.93	0.47	0.47	C-3	C-1	
0.70	debil	0.6935	0.9055	30.0%	36.0%	0.62	0.72	0.47	0.47	C-3	C-1	
0.70	ondulante	0.6001	0.6727	37.0%	43.0%	0.53	0.60	0.47	0.47	C-3	C-1	
0.70	critico	0.5949	0.5949	44%	44%	0.51	0.51	0.47	0.47	C-3	C-1	
0.75	estable	1.9593	2.1984	21.0%	22.0%	0.99	1.00	0.49	0.49	M-3	M-1	
0.75	oscilante	1.0015	1.7603	23.0%	30.0%	0.77	0.96	0.49	0.49	M-3	M-1	
0.75	debil	0.7265	0.9445	31.0%	37.0%	0.65	0.75	0.49	0.49	M-3	M-1	
0.75	ondulante	0.6255	0.7045	38.0%	44.0%	0.56	0.63	0.49	0.49	M-3	M-1	
0.75	critico	0.6192	0.6192	45%	45%	0.54	0.54	0.49	0.49	M-3	M-1	
0.80	estable	1.9732	2.2007	22.0%	23.0%	1.00	1.00	0.51	0.5	M-3	M-1	
0.80	oscilante	1.0383	1.7824	24.0%	31.0%	0.80	0.98	0.51	0.5	M-3	M-1	
0.80	debil	0.7582	0.9810	32.0%	38.0%	0.67	0.78	0.51	0.5	M-3	M-1	
0.80	ondulante	0.6433	0.7353	39.0%	46.0%	0.57	0.66	0.51	0.5	M-3	M-1	
0.80	critico	0.6377	0.6377	47%	47%	0.56	0.56	0.51	0.50	M-3	M-1	
0.85	estable	1.9834	1.9834	24.0%	24.0%	1.00	1.00	0.53	0.52	M-3	M-1	
0.85	oscilante	1.0724	1.8006	25.0%	32.0%	0.83	1.00	0.53	0.52	M-3	M-1	
0.85	debil	0.7887	1.0150	33.0%	39.0%	0.70	0.81	0.53	0.52	M-3	M-1	
0.85	ondulante	0.6672	0.7649	40.0%	47.0%	0.59	0.68	0.53	0.52	M-3	M-1	
0.85	critico	0.6608	0.6608	48%	48%	0.58	0.58	0.53	0.52	M-3	M-1	
0.90	estable	2.1965	2.1965	24.0%	24.0%	1.00	1.00	0.55	0.54	M-3	M-1	
0.90	oscilante	1.1042	1.9907	25.0%	33.0%	0.85	1.00	0.55	0.54	M-3	M-1	
0.90	debil	0.7936	1.0469	34.0%	41.0%	0.71	0.83	0.55	0.54	M-3	M-1	
0.90	ondulante	0.6835	0.7720	42.0%	49.0%	0.60	0.69	0.55	0.54	M-3	M-1	
0.90	critico	0.6779	0.6779	50%	50%	0.59	0.59	0.55	0.54	M-3	M-1	
0.95	estable	2.1915	2.1915	25.0%	25.0%	1.00	1.00	0.57	0.55	M-3	M-1	
0.95	oscilante	1.1338	1.9955	26.0%	34.0%	0.88	1.00	0.57	0.55	M-3	M-1	
0.95	debil	0.8212	1.0768	35.0%	42.0%	0.73	0.85	0.57	0.55	M-3	M-1	
0.95	ondulante	0.7060	0.7991	43.0%	50.0%	0.62	0.71	0.57	0.55	M-3	M-1	
0.95	critico	0.6997	0.6997	51%	51%	0.61	0.61	0.57	0.55	M-3	M-1	
1.00	estable	2.1851	2.1851	26.0%	26.0%	1.00	1.00	0.59	0.57	M-3	M-1	
1.00	oscilante	1.1615	1.9985	27.0%	35.0%	0.90	1.00	0.59	0.57	M-3	M-1	
1.00	debil	0.8478	1.1048	36.0%	43.0%	0.75	0.88	0.59	0.57	M-3	M-1	
1.00	ondulante	0.7213	0.8252	44.0%	52.0%	0.63	0.74	0.59	0.57	M-3	M-1	
1.00	critico	0.7116	0.7158	53%	54%	0.61	0.63	0.59	0.57	M-3	M-1	

Tabla A-14. Tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente suave.

Conoce el Y1 y Y2, se halla el caudal Q													
(m)		(m ³ /s)	(m ³ /s)	%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
ATURA (Y1)	TIPO DE RESALTO	Min. Q	Máx. Q	Min. de Apertura	Máx. de Apertura	Min de Y3	Max de Y3	Min de Yn	Max de Yn	Min de Yc	Max de Yc	y2	y3
0.20	estable	0.0193	0.0193	5.00%	5.00%	0.082	0.082	0.039	0.039	0.034	0.034	M-3	M-1
0.20	oscilante	0.0378	0.0886	10.00%	25.00%	0.111	0.156	0.059	0.100	0.053	0.093	M-3	M-1
0.20	debil	0.1042	0.1481	30.00%	45.00%	0.164	0.182	0.111	0.139	0.103	0.131	M-3	M-1
0.20	ondulante	0.1617	0.2246	50.00%	75.00%	0.186	0.197	0.147	0.181	0.139	0.173	M-3	M-1
0.20	critico	0.2362	0.2695	80.00%	95.00%	0.198	0.200	0.187	0.204	0.179	0.195	M-3	M-2
0.25	estable	0.0217	0.0426	4.00%	8.00%	0.093	0.126	0.042	0.063	0.036	0.057	M-3	M-1
0.25	oscilante	0.0628	0.1193	12.00%	24.00%	0.149	0.192	0.081	0.121	0.074	0.113	M-3	M-1
0.25	debil	0.1370	0.2030	28.00%	44.00%	0.201	0.227	0.132	0.170	0.124	0.161	M-3	M-1
0.25	ondulante	0.2185	0.3172	48.00%	76.00%	0.231	0.247	0.178	0.227	0.169	0.217	M-3	M-1
0.25	critico	0.3302	0.3797	80.00%	96.00%	0.248	0.250	0.233	0.256	0.223	0.245	M-3	M-2
0.30	estable	0.0239	0.0470	3.33%	6.67%	0.093	0.126	0.042	0.063	0.036	0.057	M-3	M-1
0.30	oscilante	0.0694	0.1529	10.00%	23.33%	0.149	0.192	0.081	0.121	0.074	0.113	M-3	M-1
0.30	debil	0.1725	0.2805	26.67%	46.67%	0.201	0.227	0.132	0.170	0.124	0.161	M-3	M-1
0.30	ondulante	0.2971	0.4198	50.00%	76.67%	0.231	0.247	0.178	0.227	0.169	0.217	M-3	M-1
0.30	critico	0.4340	0.5017	80.00%	96.67%	0.248	0.250	0.233	0.256	0.223	0.245	M-3	M-2
0.35	estable	0.0258	0.0754	2.86%	8.57%	0.103	0.140	0.044	0.067	0.039	0.061	M-3	M-1
0.35	oscilante	0.0993	0.1891	11.43%	22.86%	0.167	0.228	0.086	0.141	0.079	0.134	M-3	M-1
0.35	debil	0.2103	0.3473	25.71%	45.71%	0.238	0.276	0.153	0.210	0.145	0.200	M-3	M-1
0.35	ondulante	0.3655	0.5316	48.57%	77.14%	0.279	0.297	0.218	0.274	0.208	0.262	M-3	M-1
0.35	critico	0.5469	0.6346	80.00%	97.14%	0.298	0.300	0.280	0.309	0.268	0.295	M-3	M-2
0.40	estable	0.0277	0.0811	2.50%	7.50%	0.120	0.197	0.049	0.095	0.043	0.087	M-3	M-1
0.40	oscilante	0.1068	0.2506	10.00%	25.00%	0.222	0.311	0.113	0.195	0.105	0.186	M-3	M-1
0.40	debil	0.2729	0.4188	27.50%	45.00%	0.321	0.365	0.206	0.273	0.197	0.261	M-3	M-1
0.40	ondulante	0.4383	0.6518	47.50%	77.50%	0.369	0.396	0.282	0.370	0.270	0.351	M-3	M-1
0.40	critico	0.6682	0.7774	80.00%	97.50%	0.397	0.400	0.376	0.418	0.357	0.395	M-3	M-2
0.45	fuerte	0.0294	0.0294	2.22%	2.22%	0.128	0.128	0.050	0.050	0.044	0.044	M-3	M-1
0.45	estable	0.0581	0.1139	5.81%	11.39%	0.176	0.238	0.077	0.117	0.070	0.110	M-3	M-1
0.45	oscilante	0.1409	0.2930	11.11%	24.44%	0.261	0.348	0.134	0.216	0.127	0.206	M-3	M-1
0.45	debil	0.3168	0.5152	26.67%	46.67%	0.357	0.413	0.227	0.315	0.217	0.300	M-3	M-1
0.45	ondulante	0.5357	0.7800	48.89%	77.78%	0.417	0.445	0.323	0.419	0.308	0.396	M-3	M-1
0.45	critico	0.7973	0.9297	80.00%	97.78%	0.446	0.450	0.425	0.474	0.402	0.445	M-3	M-2
0.50	fuerte	0.0310	0.0310	2.00%	2.00%	0.135	0.135	0.052	0.052	0.046	0.046	M-3	M-1
0.50	estable	0.0614	0.1206	4.00%	8.00%	0.186	0.253	0.080	0.122	0.073	0.114	M-3	M-1
0.50	oscilante	0.1493	0.3375	10.00%	24.00%	0.278	0.384	0.139	0.237	0.131	0.226	M-3	M-1
0.50	debil	0.3627	0.5962	26.00%	46.00%	0.394	0.458	0.248	0.348	0.238	0.331	M-3	M-1
0.50	ondulante	0.6179	0.9156	48.00%	78.00%	0.462	0.495	0.356	0.469	0.339	0.440	M-3	M-1
0.50	critico	0.9338	1.0907	80.00%	98.00%	0.496	0.500	0.476	0.531	0.446	0.495	M-3	M-2
0.55	fuerte	0.0326	0.0326	1.82%	1.82%	0.142	0.142	0.054	0.054	0.048	0.048	M-3	M-1
0.55	estable	0.0645	0.1269	3.64%	7.27%	0.196	0.267	0.082	0.126	0.075	0.118	M-3	M-1
0.55	oscilante	0.1573	0.4106	9.09%	25.45%	0.294	0.430	0.144	0.270	0.136	0.258	M-3	M-1
0.55	debil	0.4368	0.6809	27.27%	45.45%	0.440	0.502	0.281	0.381	0.269	0.362	M-3	M-1
0.55	ondulante	0.7038	1.0389	47.27%	76.36%	0.507	0.544	0.390	0.513	0.370	0.479	M-3	M-1
0.55	critico	1.0582	1.2601	78.18%	98.18%	0.545	0.550	0.520	0.590	0.485	0.545	M-3	M-2
0.60	fuerte	0.0340	0.0340	1.67%	1.67%	0.149	0.149	0.055	0.055	0.049	0.049	M-3	M-1
0.60	estable	0.0675	0.1648	3.33%	8.33%	0.206	0.309	0.084	0.148	0.077	0.140	M-3	M-1
0.60	oscilante	0.1963	0.4603	10.00%	25.00%	0.333	0.467	0.166	0.291	0.158	0.278	M-3	M-1
0.60	debil	0.4878	0.7933	26.67%	46.67%	0.476	0.551	0.303	0.424	0.289	0.400	M-3	M-1
0.60	ondulante	0.8170	1.1874	48.33%	76.67%	0.555	0.593	0.433	0.565	0.408	0.524	M-3	M-1
0.60	critico	1.2076	1.4374	78.33%	98.33%	0.594	0.600	0.572	0.650	0.530	0.595	M-3	M-2
0.65	fuerte	0.0354	0.0354	1.54%	1.54%	0.155	0.155	0.057	0.057	0.050	0.050	M-3	M-1
0.65	estable	0.0703	0.1721	3.08%	7.69%	0.215	0.323	0.087	0.153	0.080	0.145	M-3	M-1
0.65	oscilante	0.2050	0.5118	9.23%	24.62%	0.349	0.503	0.171	0.313	0.162	0.299	M-3	M-1
0.65	debil	0.5405	0.8862	26.15%	46.15%	0.513	0.596	0.325	0.458	0.310	0.431	M-3	M-1
0.65	ondulante	0.9109	1.3424	47.69%	76.92%	0.600	0.643	0.467	0.618	0.439	0.568	M-3	M-1
0.65	critico	1.3633	1.6224	78.46%	98.46%	0.644	0.650	0.625	0.711	0.574	0.645	M-3	M-2
0.70	fuerte	0.0368	0.0368	1.43%	1.43%	0.161	0.161	0.058	0.058	0.052	0.052	M-3	M-1
0.70	estable	0.0731	0.2134	2.86%	8.57%	0.224	0.365	0.089	0.175	0.082	0.167	M-3	M-1
0.70	oscilante	0.2473	0.5651	10.00%	24.29%	0.389	0.540	0.193	0.335	0.184	0.319	M-3	M-1
0.70	debil	0.5949	0.9824	25.71%	45.71%	0.550	0.640	0.347	0.493	0.330	0.462	M-3	M-1
0.70	ondulante	1.0082	1.5036	47.14%	77.14%	0.644	0.693	0.502	0.672	0.470	0.613	M-3	M-1
0.70	critico	1.5253	1.8146	78.57%	98.57%	0.694	0.700	0.679	0.773	0.619	0.695	M-3	M-2
0.75	fuerte	0.0381	0.0381	1.33%	1.33%	0.167	0.167	0.059	0.059	0.053	0.053	M-3	M-1
0.75	estable	0.0757	0.2215	2.67%	8.00%	0.232	0.379	0.091	0.180	0.084	0.171	M-3	M-1
0.75	oscilante	0.2568	0.6510	9.33%	25.33%	0.405	0.586	0.198	0.369	0.189	0.351	M-3	M-1
0.75	debil	0.6817	1.1086	26.67%	46.67%	0.595	0.689	0.381	0.538	0.362	0.500	M-3	M-1
0.75	ondulante	1.1351	1.6708	48.00%	77.33%	0.693	0.742	0.547	0.727	0.508	0.658	M-3	M-1
0.75	critico	1.6932	1.6932	78.67%	78.67%	0.743	0.750	0.734	0.836	0.664	0.745	M-3	M-2
0.80	fuerte	0.0394	0.0394	1.25%	1.25%	0.173	0.173	0.060	0.060	0.054	0.054	M-3	M-1
0.80	estable	0.0783	0.2659	3.75%	8.75%	0.240	0.420	0.093	0.202	0.085	0.193	M-3	M-1
0.80	oscilante	0.0783	0.7087	2.50%	25.00%	0.444	0.622	0.220	0.392	0.210	0.371	M-3	M-1
0.80	debil	0.7405	1.2121	26.25%	46.25%	0.632	0.734	0.404	0.574	0.382	0.531	M-3	M-1
0.80	ondulante	1.2669	1.8437	48.75%	77.50%	0.738	0.738	0.583	0.782	0.539	0.702	M-3	M-1
0.80	critico	1.8669	1.8669	78.75%	78.75%	0.793	0.793	0.790	0.790	0.708	0.708	M-3	M-2

Tabla A-15. Continuación tabla resumen del análisis local conociendo el nivel aguas arriba (y1) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente suave.

Conoce el Y1 y Y2, se halla el caudal Q													
(m)		(m ³ /s)	(m ³ /s)	%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)		
ATURA (Y1)	TIPO DE RESALTO	Min. Q	Máx. Q	Mín. de Apertura	Máx. de Apertura	Min de Y3	Max de Y3	Min de Yn	Max de Yn	Min de Yc	Max de Yc	y2	y3
0.85	fuerte	0.0406	0.0807	1.18%	2.35%	0.178	0.248	0.061	0.094	0.055	0.087	M-3	M-1
0.85	estable	0.1204	0.2748	3.53%	8.24%	0.299	0.435	0.121	0.207	0.114	0.197	M-3	M-1
0.85	oscilante	0.3123	0.7680	9.41%	24.71%	0.460	0.659	0.225	0.414	0.215	0.392	M-3	M-1
0.85	debil	0.8008	1.3470	25.88%	47.06%	0.669	0.782	0.427	0.620	0.403	0.570	M-3	M-1
0.85	ondulante	1.3752	2.0222	48.24%	77.65%	0.786	0.841	0.629	0.839	0.578	0.747	M-3	M-1
0.85	critico	2.0461	2.0461	78.82%	78.82%	0.842	0.842	0.847	0.847	0.753	0.753	M-3	M-2
0.90	fuerte	0.0418	0.0831	1.11%	2.22%	0.184	0.256	0.063	0.096	0.056	0.089	M-3	M-1
0.90	estable	0.1240	0.3222	3.33%	8.89%	0.309	0.476	0.124	0.230	0.116	0.220	M-3	M-1
0.90	oscilante	0.3606	0.8287	10.00%	24.44%	0.500	0.695	0.247	0.437	0.237	0.412	M-3	M-1
0.90	debil	0.8625	1.4573	25.56%	46.67%	0.705	0.827	0.450	0.656	0.423	0.600	M-3	M-1
0.90	ondulante	1.4864	2.2061	47.78%	77.78%	0.831	0.891	0.666	0.897	0.608	0.792	M-3	M-1
0.90	critico	2.2307	2.2307	78.89%	78.89%	0.892	0.892	0.904	0.904	0.798	0.798	M-3	M-2
0.95	fuerte	0.0429	0.0855	1.05%	2.11%	0.189	0.263	0.064	0.098	0.057	0.091	M-3	M-1
0.95	estable	0.1275	0.3317	3.16%	8.42%	0.318	0.491	0.126	0.234	0.118	0.224	M-3	M-1
0.95	oscilante	0.3714	0.9258	9.47%	25.26%	0.516	0.742	0.252	0.473	0.241	0.444	M-3	M-1
0.95	debil	0.9603	1.5704	26.32%	46.32%	0.751	0.871	0.485	0.694	0.455	0.631	M-3	M-1
0.95	ondulante	1.6004	2.3953	47.37%	77.89%	0.875	0.941	0.704	0.955	0.639	0.836	M-3	M-1
0.95	critico	2.4205	2.4205	78.95%	78.95%	0.942	0.942	0.963	0.963	0.842	0.842	M-3	M-2
1.00	fuerte	0.0441	0.0877	1.00%	2.00%	0.194	0.270	0.065	0.099	0.058	0.092	M-3	M-1
1.00	estable	0.1309	0.3818	3.00%	9.00%	0.327	0.531	0.128	0.257	0.120	0.246	M-3	M-1
1.00	oscilante	0.4223	0.9905	10.00%	25.00%	0.555	0.778	0.275	0.496	0.263	0.464	M-3	M-1
1.00	debil	1.0260	1.7171	26.00%	47.00%	0.788	0.920	0.509	0.742	0.475	0.670	M-3	M-1
1.00	ondulante	1.7477	2.5896	48.00%	78.00%	0.924	0.990	0.751	1.015	0.678	0.881	M-3	M-1
1.00	critico	2.6155	2.6155	79.00%	79.00%	0.991	0.991	1.023	1.023	0.887	0.887	M-3	M-2
1.10	fuerte	0.0921	0.0921	1.82%	1.82%	0.204	0.284	0.067	0.102	0.060	0.095	M-3	M-1
1.10	estable	0.1375	0.4020	2.73%	8.18%	0.344	0.562	0.132	0.266	0.124	0.254	M-3	M-1
1.10	oscilante	0.4448	1.1613	9.09%	25.45%	0.587	0.861	0.285	0.556	0.272	0.516	M-3	M-1
1.10	debil	1.1985	1.9584	26.36%	46.36%	0.870	1.009	0.569	0.819	0.527	0.731	M-3	M-1
1.10	ondulante	1.9906	2.9658	47.27%	77.27%	1.013	1.088	0.829	1.129	0.739	0.964	M-3	M-1
1.10	critico	2.9930	2.9930	78.18%	78.18%	1.089	1.089	1.137	1.137	0.970	0.970	M-3	M-2
1.15	fuerte	0.0942	0.0942	1.74%	1.74%	0.209	0.291	0.068	0.104	0.061	0.097	M-3	M-1
1.15	estable	0.1407	0.4556	2.61%	8.70%	0.352	0.602	0.134	0.289	0.126	0.277	M-3	M-1
1.15	oscilante	0.4992	1.2310	9.57%	25.22%	0.627	0.897	0.907	0.580	0.294	0.537	M-3	M-1
1.15	debil	1.2691	2.1159	26.09%	46.96%	0.907	1.058	0.593	0.868	0.548	0.770	M-3	M-1
1.15	ondulante	2.1487	3.1741	47.83%	77.39%	1.062	1.138	0.879	1.191	0.778	1.009	M-3	M-1
1.15	critico	3.2019	3.2019	78.26%	78.26%	1.139	1.139	1.200	1.200	1.015	1.015	M-3	M-2
1.25	fuerte	0.0983	0.1468	1.60%	2.40%	0.218	0.368	0.069	0.138	0.063	0.130	M-3	M-1
1.25	estable	0.1950	0.5223	3.20%	8.80%	0.421	0.658	0.165	0.318	0.157	0.303	M-3	M-1
1.25	oscilante	0.5676	1.3742	9.60%	24.80%	0.682	0.970	0.336	0.629	0.320	0.577	M-3	M-1
1.25	debil	0.9574	2.3739	19.13%	46.40%	0.980	1.147	0.642	0.949	0.589	0.831	M-3	M-1
1.25	ondulante	2.4083	3.6046	47.20%	77.60%	1.151	1.237	0.959	1.319	0.839	1.098	M-3	M-2
1.25	critico	3.6336	3.6624	78.40%	79.20%	1.238	1.239	1.328	1.336	1.104	1.110	M-3	M-2
1.50	fuerte	0.1078	0.1611	1.33%	2.00%	0.239	0.405	0.073	0.146	0.067	0.138	M-3	M-1
1.50	estable	0.2142	0.6765	2.67%	8.67%	0.464	0.785	0.176	0.379	0.167	0.360	M-3	M-1
1.50	oscilante	0.7264	1.8414	9.33%	25.33%	0.809	1.172	0.399	0.782	0.377	0.702	M-3	M-1
1.50	debil	1.8848	3.1356	26.00%	46.67%	1.182	1.378	0.795	1.180	0.713	1.001	M-3	M-1
1.50	ondulante	3.1732	4.7574	47.33%	78.00%	1.382	1.485	1.191	1.655	1.009	1.321	M-3	M-2
1.50	critico	4.7891	4.7891	78.67%	78.67%	1.486	1.486	1.664	1.664	1.327	1.327	M-3	M-2

Tabla A-16. Tabla resumen del análisis local conociendo el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (y2) con un diámetro de la tubería de 1.0m y pendiente suave.

Conoce el caudal (Q) y la apertura de la compuerta (Y2), se halla el nivel aguas arriba (y1)											
(m ³ /s)	%	%	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	Tipos de resalto	
Caudal	Tipo de resalto	Mín. de Apertura	Máx. de Apertura	Mín. de y11	Máx. de y11	Mín. de Y3	Máx. de Y3	Mín. de Yn	Mín. de yc	y2	y3
0.15	oscilante	10.0%	13.0%	0.784	0.438	0.336	0.404	0.27	0.21	M-3	M-1
0.15	debil	14.0%	16.0%	0.382	0.307	0.284	0.316	0.27	0.21	M-3	M-1
0.15	ondulante	17.0%	19.0%	0.281	0.244	0.246	0.272	0.27	0.21	M-3	M-2
0.15	critico	20.0%	22.0%	0.2305	0.2200	0.24	0.24	0.27	0.21	M-3	M-2
0.2	oscilante	12.0%	15.0%	0.831	0.511	0.389	0.457	0.31	0.24	M-3	M-1
0.2	debil	16.0%	18.0%	0.453	0.372	0.335	0.372	0.31	0.24	M-3	M-1
0.2	ondulante	19.0%	22.0%	0.343	0.283	0.283	0.322	0.31	0.24	M-3	M-2
0.2	critico	23.0%	26.0%	0.2690	0.2600	0.27	0.28	0.31	0.24	M-3	M-2
0.25	oscilante	14.0%	17.0%	0.847	0.561	0.431	0.500	0.35	0.27	M-3	M-1
0.25	debil	18.0%	21.0%	0.504	0.393	0.363	0.412	0.35	0.27	M-3	M-1
0.25	ondulante	22.0%	25.0%	0.368	0.313	0.319	0.349	0.35	0.27	M-3	M-2
0.25	critico	26.0%	28.0%	0.2990	0.2800	0.30	0.31	0.35	0.27	M-3	M-2
0.3	oscilante	16.0%	19.0%	0.848	0.596	0.467	0.533	0.39	0.3	M-3	M-1
0.3	debil	20.0%	23.0%	0.543	0.433	0.401	0.448	0.39	0.3	M-3	M-1
0.3	ondulante	24.0%	27.0%	0.408	0.351	0.349	0.389	0.39	0.3	M-3	M-2
0.3	critico	28.0%	34.0%	0.3360	0.3400	0.33	0.35	0.39	0.30	M-3	M-2
0.35	oscilante	17.0%	20.0%	0.956	0.680	0.518	0.587	0.42	0.33	M-3	M-1
0.35	debil	21.0%	25.0%	0.621	0.466	0.434	0.498	0.42	0.33	M-3	M-1
0.35	ondulante	26.0%	30.0%	0.441	0.369	0.373	0.421	0.42	0.33	M-3	M-2
0.35	critico	31.0%	33.0%	0.3554	0.3329	0.35	0.37	0.42	0.33	M-3	M-2
0.4	oscilante	19.0%	22.0%	0.931	0.693	0.545	0.610	0.45	0.35	M-3	M-1
0.4	debil	23.0%	27.0%	0.639	0.494	0.462	0.526	0.45	0.35	M-3	M-1
0.4	ondulante	28.0%	32.0%	0.469	0.397	0.401	0.445	0.45	0.35	M-3	M-2
0.4	critico	33.0%	39.0%	0.3836	0.3900	0.37	0.40	0.45	0.35	M-3	M-2
0.45	oscilante	21.0%	23.0%	0.910	0.759	0.587	0.630	0.49	0.37	M-3	M-1
0.45	debil	24.0%	28.0%	0.701	0.544	0.501	0.568	0.49	0.37	M-3	M-1
0.45	ondulante	29.0%	34.0%	0.517	0.422	0.423	0.486	0.49	0.37	M-3	M-2
0.45	critico	35.0%	42.0%	0.4089	0.4200	0.41	0.42	0.49	0.37	M-3	M-2
0.5	oscilante	23.0%	24.0%	0.891	0.820	0.627	0.648	0.52	0.39	M-3	M-1
0.5	debil	25.0%	30.0%	0.759	0.563	0.520	0.607	0.52	0.39	M-3	M-1
0.5	ondulante	31.0%	36.0%	0.537	0.445	0.445	0.506	0.52	0.39	M-3	M-2
0.5	critico	37.0%	40.0%	0.4315	0.4000	0.43	0.44	0.52	0.39	M-3	M-2
0.55	oscilante	24.0%	26.0%	0.948	0.813	0.643	0.686	0.55	0.41	M-3	M-1
0.55	debil	27.0%	31.0%	0.759	0.606	0.555	0.625	0.55	0.41	M-3	M-1
0.55	ondulante	32.0%	38.0%	0.579	0.465	0.466	0.540	0.55	0.41	M-3	M-2
0.55	critico	39.0%	42.0%	0.4520	0.4200	0.44	0.46	0.55	0.41	M-3	M-2
0.6	oscilante	26.0%	27.0%	0.925	0.861	0.679	0.701	0.58	0.43	M-3	M-1
0.6	debil	28.0%	33.0%	0.806	0.619	0.574	0.660	0.58	0.43	M-3	M-1
0.6	ondulante	34.0%	39.0%	0.593	0.498	0.496	0.558	0.58	0.43	M-3	M-2
0.6	critico	40.0%	44.0%	0.4836	0.4400	0.46	0.49	0.58	0.43	M-3	M-2
0.65	oscilante	28.0%	28.0%	0.906	0.906	0.712	0.712	0.61	0.45	M-3	M-1
0.65	debil	29.0%	34.0%	0.850	0.656	0.605	0.692	0.61	0.45	M-3	M-1
0.65	ondulante	35.0%	41.0%	0.629	0.514	0.514	0.590	0.61	0.45	M-3	M-2
0.65	critico	42.0%	47.0%	0.5004	0.4700	0.48	0.50	0.61	0.45	M-3	M-2
0.7	oscilante	29.0%	29.0%	0.947	0.947	0.742	0.742	0.64	0.47	M-3	M-1
0.7	debil	30.0%	36.0%	0.890	0.664	0.619	0.721	0.64	0.47	M-3	M-2
0.7	ondulante	37.0%	43.0%	0.639	0.529	0.530	0.604	0.64	0.47	M-3	M-2
0.7	critico	44.0%	48.0%	0.5157	0.4800	0.49	0.52	0.64	0.47	M-3	M-2
0.75	debil	32.0%	37.0%	0.877	0.697	0.646	0.732	0.68	0.49	M-3	M-2
0.75	ondulante	38.0%	44.0%	0.671	0.496	0.554	0.631	0.68	0.49	M-3	M-2
0.75	critico	45.0%	49.0%	0.5428	0.4958	0.52	0.54	0.68	0.49	M-3	M-2
0.8	debil	33.0%	38.0%	0.911	0.728	0.672	0.759	0.71	0.5	M-3	M-2
0.8	ondulante	39.0%	46.0%	0.701	0.569	0.567	0.657	0.71	0.5	M-3	M-2
0.8	critico	47.0%	50.0%	0.5554	0.5200	0.53	0.56	0.71	0.50	M-3	M-2
0.85	debil	35.0%	39.0%	0.897	0.757	0.698	0.805	0.75	0.52	M-3	M-2
0.85	ondulante	40.0%	47.0%	0.730	0.594	0.593	0.682	0.75	0.52	M-3	M-2
0.85	critico	48.0%	53.0%	0.5802	0.5802	0.55	0.58	0.75	0.52	M-3	M-2
0.9	debil	35.0%	41.0%	0.970	0.758	0.706	0.810	0.79	0.54	M-3	M-2
0.9	ondulante	42.0%	49.0%	0.733	0.604	0.603	0.693	0.79	0.54	M-3	M-2
0.9	critico	50.0%	54.0%	0.5906	0.5446	0.56	0.59	0.79	0.54	M-3	M-2
0.95	debil	36.0%	42.0%	0.995	0.784	0.729	0.833	0.84	0.55	M-3	M-2
0.95	ondulante	43.0%	50.0%	0.759	0.627	0.617	0.713	0.84	0.55	M-3	M-2
0.95	critico	51.0%	58.0%	0.6133	0.5800	0.56	0.61	0.84	0.55	M-3	M-2
1	debil	38.0%	43.0%	0.976	0.809	0.751	0.836	0.99	0.57	M-3	M-2
1	ondulante	44.0%	52.0%	0.783	0.635	0.635	0.736	0.99	0.57	M-3	M-2
1	critico	53.0%	58.0%	0.622	0.580	0.595	0.620	0.99	0.57	M-3	M-2

B. FUNCIONES DE VISUAL BASIC PARA EL APLICATIVO OPERACIONAL

1. Cálculo del nivel del resalto (y_3)

```

Function Calculo_Y3(yc, D, y, Q)           'Cálculo del y3 igualando los momentos en 2 y 3

M2 = Momentos(y, D, Q)
n = 100
For i = 1 To n                             'Iteraciones para determinar y3
  y3 = (D - yc) * i / n + yc
  If y3 < D Then
    M3 = Momentos(y3, D, Q)

    If Abs(M2 - M3) <= 0.0005 Then
      i = n
    End If
  Else
    y3 = "Full"
  End If
Next

Calculo_Y3 = y3

End Function
  
```

Figura B-1. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo del nivel aguas abajo.

2. Cálculo del caudal del sistema

```

Function caudal(y1, y, D)                 'Cálculo del caudal

If y1 < D Then
  teta1 = 2 * ArcCos(1 - 2 * (y1 / D))
  A1 = 1 / 8 * (teta1 - Sin(teta1)) * D ^ 2
  teta2 = 2 * ArcCos(1 - 2 * (y / D))
  A2 = 1 / 8 * (teta2 - Sin(teta2)) * D ^ 2
  Q = Sqr((y1 - y2) / ((1 / (2 * 9.81 * (A2 ^ 2))) - (1 / (2 * 9.81 * (A1 ^ 2))))) 'Cálculo de caudal si se conoce y1
Else
  A1 = y1 * 1
  teta2 = 2 * ArcCos(1 - 2 * (y / D))
  A2 = 1 / 8 * (teta2 - Sin(teta2)) * D ^ 2
  Q = Sqr((y1 - y) / ((1 / (2 * 9.81 * (A2 ^ 2))) - (1 / (2 * 9.81 * (A1 ^ 2))))) 'Cálculo de caudal si se conoce y1
End If
caudal = Q
End Function
  
```

Figura B-2. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo del caudal.

3. Cálculo del nivel aguas arriba (y1)

```

Function yaA(D, y, Q, yc)                                'Cálculo del nivel hacia aguas arriba

n = 1000

teta2 = 2 * ArcCos(1 - 2 * (y / D))
A2 = 1 / 8 * (teta2 - Sin(teta2)) * D ^ 2
v2 = Q / A2

E2 = y + (v2 ^ 2 / (2 * 9.81))
For i = 1 To n
  y1 = (4 * D - yc) * i / n + yc
  If y1 <= D Then
    teta = 2 * ArcCos(1 - 2 * (y1 / D))
    A = 1 / 8 * (teta - Sin(teta)) * D ^ 2
    v = Q / A
    E1 = y1 + (v ^ 2) / (2 * 9.81)
    If Abs(E1 - E2) < 0.001 Then
      i = n
    End If
  Else
    y1 = E2
    i = n
  End If
Next
yaA = y1
End Function
  
```

Figura B-3. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo del nivel aguas arriba.

4. Cálculo del nivel crítico.

```

Function y_critico(Q, D)                                'Cálculo del nivel crítico

n = 1000
For i = 1 To n
  If yc <> D Then
    yc = D * i / n
    teta = 2 * ArcCos(1 - 2 * (yc / D))
    A = 1 / 8 * (teta - Sin(teta)) * D ^ 2
    Dh = 1 / 8 * ((teta - Sin(teta)) / (Sin(1 / 2 * teta))) * D
    v = Q / A
    Fr = v / (Sqr(9.81 * Dh))
  Else
    i = n
  End If
  If Fr > 0.95 And Fr < 1.05 Then
    i = n
  End If
Next
y_critico = yc
End Function
  
```

Figura B-4. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo del nivel crítico.

5. Cálculo de la profundidad normal.

```
Function y_normal(D, Q, S, n)           'Cálculo del nivel normal
If S = 0 Then
    yn = "N/A"
Else
    p = 1000
    Z = Q * n / Sqr(S)
    For i = 1 To p
        yn = D * i / p
        If yn <> D Then
            teta = 2 * ArcCos(1 - 2 * (yn / D))
            A = 1 / 8 * (teta - Sin(teta)) * D ^ 2
            R = 1 / 4 * (1 - (Sin(teta) / teta)) * D
            Rh = (R) ^ (2 / 3)
            Z1 = A * Rh
        Else
            i = n
        End If
        If Abs(Z - Z1) < 0.001 Then
            i = p
        End If
    Next
End If
    y_normal = yn
End Function
```

Figura B-5. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo de la profundidad normal

6. Cálculo del tipo de resalto que se forma con la apertura de la compuerta.

```
Function Tipo_R(D, Q, y)               'Clasificación del resalto hidráulico

    teta = 2 * ArcCos(1 - 2 * (y / D))
    A = 1 / 8 * (teta - Sin(teta)) * D ^ 2
    Dh = 1 / 8 * ((teta - Sin(teta)) / (Sin(1 / 2 * teta))) * D   'Cálculo de profundidad hidráulica
    v = Q / A
    Fr = v / Sqr(9.81 * Dh)

    If Fr <= 1.2 Then
        Resalto = "Crítico"
    Else
        If Fr > 1.2 And Fr < 1.7 Then
            Resalto = "Ondulante"
        Else
            If Fr > 1.7 And Fr < 2.5 Then
                Resalto = "Débil"
            Else
                If Fr > 2.5 And Fr < 4.5 Then
                    Resalto = "Oscilante"
                Else
                    If Fr > 4.5 And Fr < 9 Then
                        Resalto = "Estable"
                    Else
                        If Fr > 9 Then
                            Resalto = "Fuerte"
                        End If
                    End If
                End If
            End If
        End If
    End If

    Tipo_R = Resalto

End Function

Function perfil_hid(D, Q, yn, yc, y)   'Clasificación del tipo de perfil del agua hacia aguas abajo
```

Figura B-6. Función en VISUAL BASIC, para el cálculo del tipo de resalto.

C. GRAFICOS TIPO DE RESALTO CONTRA APERTURA DE COMPUERTA Y RESALTO HIDRÁULICO

Se muestran alguno de los intervalos encontrados por medio de las gráficas que relacionan los tipos de resalto con respecto a las aperturas de compuerta (y_2/D) y los resaltos formados con respecto al diámetro (y_3/D). Adicional, cada una de estas gráficas están en función de valor equivalente al número de Froude. Las figuras mostradas hacen relación a algunos de los valores del Froude equivalente.

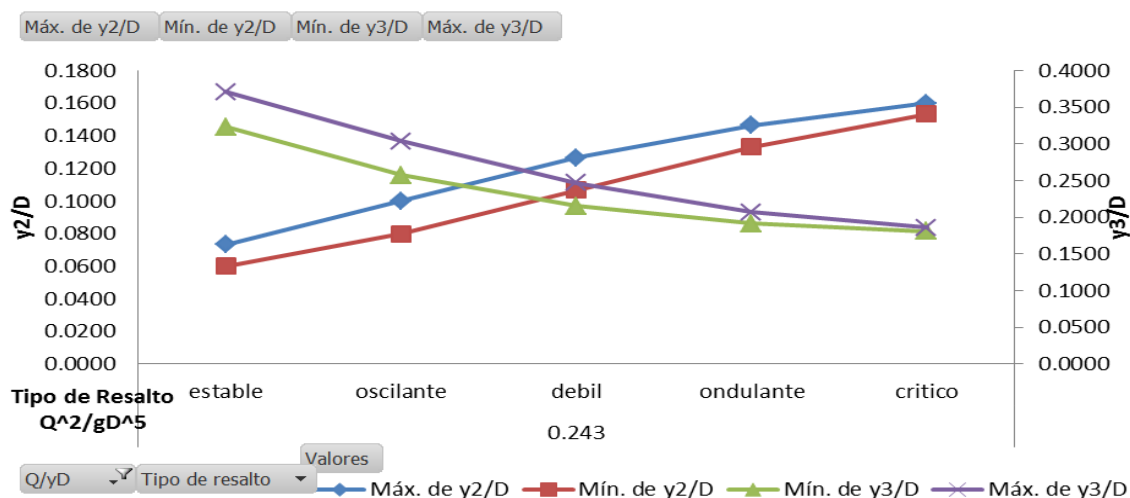


Figura C-1. Relación dimensional entre tipo de resalto vs. y_2/D y tipo de resalto vs. y_3/D , para un valor equivalente al Froude de 0.243

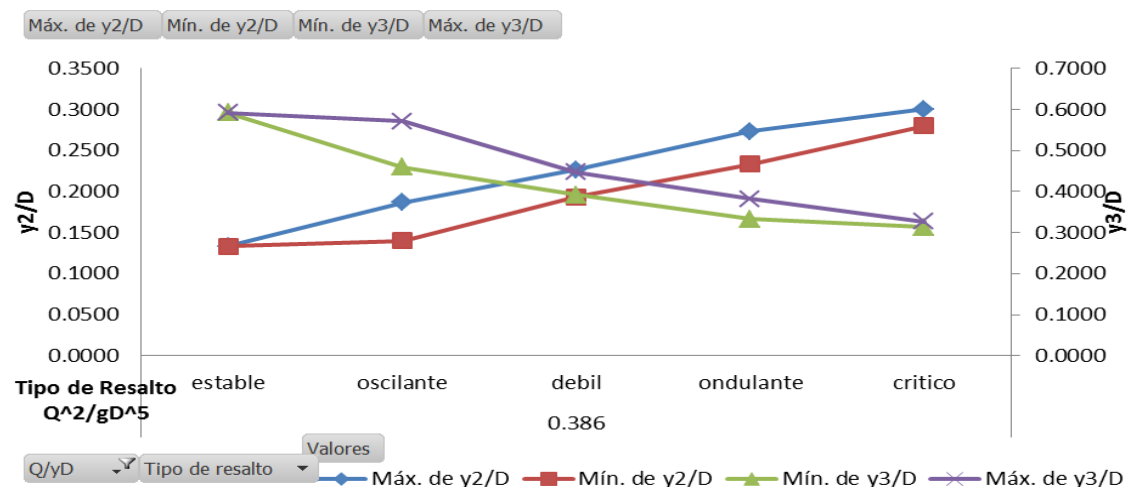


Figura C-2. Relación dimensional entre tipo de resalto vs. y_2/D y tipo de resalto vs. y_3/D , para un valor equivalente al Froude de 0.386.

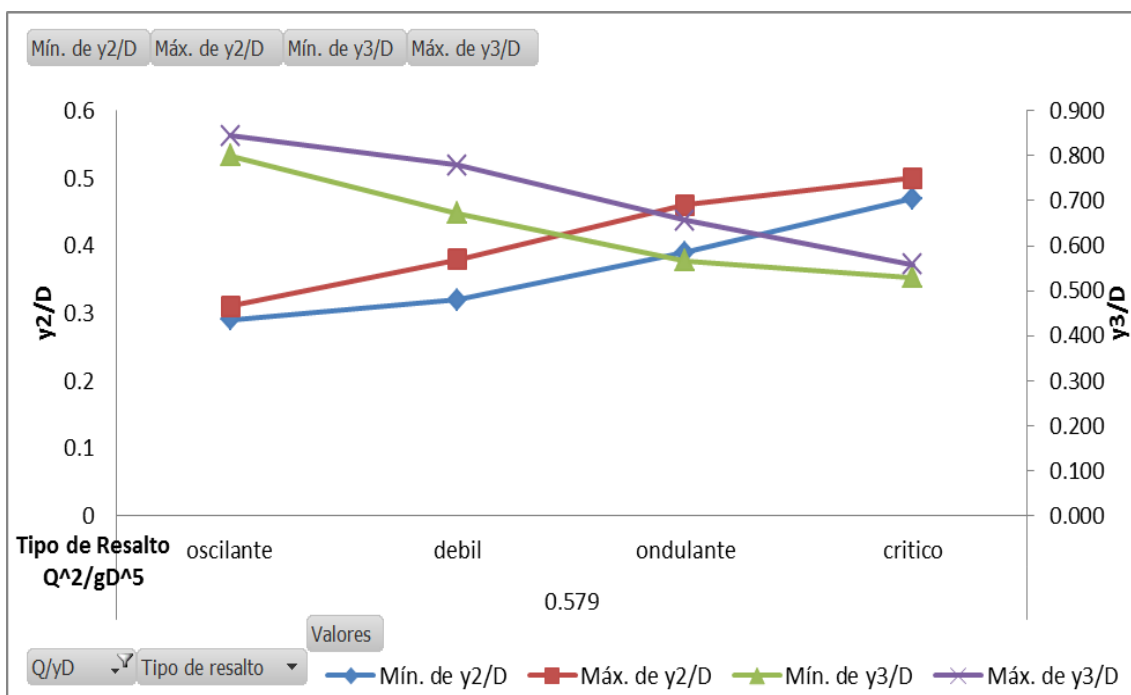


Figura C-3. Relación dimensional entre tipo de resalto vs. y_2/D y tipo de resalto vs. y_3/D , para un valor equivalente al Froude de 0.579.

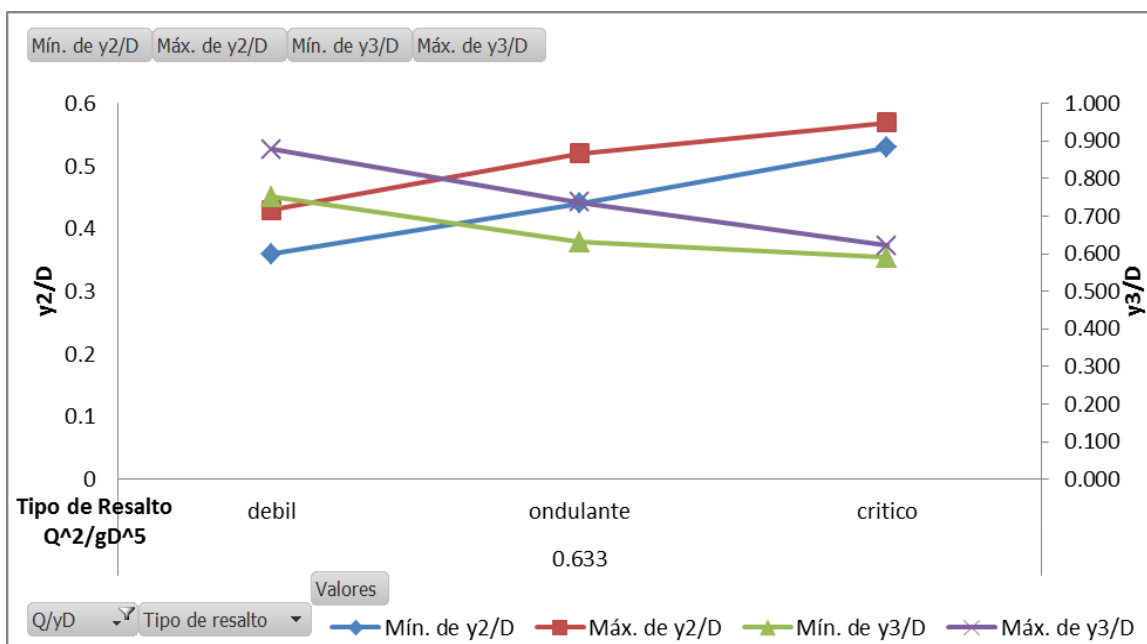


Figura C-4. Relación dimensional entre tipo de resalto vs. y_2/D y tipo de resalto vs. y_3/D , para un valor equivalente al Froude de 0.579

D. TABLAS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES

Tabla D-1. Tabla de la operación de la compuerta en el modelo físico.

LABORATORIO OPERACIÓN COMPUERTA TUBO

Q= 0.0015 m³/s Z= 0.00008
Diámetro= 0.2 m Yc= 0.0312 m

Niveles	Y1 (m)			Y2 (m)			LONGITUD DE RESALTO	Y3 (m)	
	Nivel	Area	Calculado	Apertura	θ	Area		Nivel	Calculado
1	0.040	0.012	0.077	0.077	2.677	0.011	0	0.0450	0.0329
2	0.045	0.014	0.071	0.072	2.574	0.010	0	0.0400	0.0329
3	0.110	0.033	0.114	0.115	3.443	0.019	0.065	0.0900	0.0835
4	0.060	0.018	0.032	0.035	1.726	0.004	0.04	0.0430	0.0329
5	0.065	0.020	0.032	0.030	1.591	0.003	0.04	0.0400	0.0329

Q= 0.002 m³/s Z= 0.00010
Diámetro= 0.2 m Yc= 0.036 m

Niveles	Y1 (m)			Y2 (m)			LONGITUD DE RESALTO	Y3 (m)	
	Nivel	Area	Calculado	Apertura	θ	Area		Nivel	Calculado
1	0.081	0.024	0.049	0.050	2.094	0.006	0.05	0.0450	0.0376
2	0.090	0.027	0.037	0.040	1.855	0.004	0.08	0.0400	0.0376
3	0.098	0.029	0.037	0.036	1.753	0.004	0	0.0900	0.0376
4	0.078	0.023	0.037	0.035	1.726	0.004	0	0.0430	0.0376
5	0.070	0.021	0.045	0.030	1.591	0.003	0	0.0400	0.0376

Q= 0.0025 m³/s Z= 0.00013
Diámetro= 0.2 m Yc= 0.0404 m

Niveles	Y1 (m)			Y2 (m)			LONGITUD DE RESALTO	Y3 (m)	
	Nivel	Area	Calculado	Apertura	θ	Area		Nivel	Calculado
1	0.067	0.020	0.048	0.050	2.094	0.006	0.05	0.0560	0.0420
2	0.078	0.023	0.045	0.045	1.977	0.005	0.065	0.0600	0.0420
3	0.086	0.026	0.048	0.035	1.726	0.004	0.085	0.0550	0.0420
4	0.075	0.023	0.041	0.040	1.855	0.004	0.08	0.0640	0.0420
5	0.085	0.026	0.048	0.035	1.726	0.004	0	0.0590	0.0420

Tabla D-2. Tabla de la operación de la compuerta en el canal con pendiente horizontal.

LABORATORIO OPERACIÓN COMPUERTA EN EL CANAL - PENDIENTE HORIZONTAL

Q= 4.9400 l/s
Q= 0.0049 m³/s
ancho= 0.2500 m
Y_c= 0.0341 m

Nivel	Y1 (m)		Y2 (m)			v	Fr2	Y3 (m)		Y4 (m)	y1	A1	v1
	NIVEL	Area	Apertura	Area	Longitud del Resalto			calculado	medido	medido	calculado	calculado	calculado
1	0.055	0.01375	0.034	0.0085	0.03	0.581	1.006	0.0343	0.055	0.035	0.034	0.0085717	0.5763152
2	0.06	0.015	0.030	0.0075	0.08	0.659	1.214	0.0387	0.054	0.035	0.039	0.0097712	0.5055681
3	0.11	0.0275	0.010	0.0025	1.1	1.976	6.309	0.0844	0.07	0.02	0.209	0.0521381	0.0947484

Q= 5.5000 l/s
Q= 0.0055 m³/s
ancho= 0.2500 m
Y_c= 0.0367 m

Nivel	Y1 (m)		Y2 (m)			v	Fr2	Y3 (m)		Y4 (m)	y1	A1	v1
	NIVEL	Area	Apertura	Area	Longitud del Resalto			calculado	medido	medido	calculado	calculado	calculado
1	0.04	0.01	0.035	0.00875	0.065	0.629	1.073	0.0384	0.045	0.04	0.038	0.0096156	0.5719848
2	0.055	0.01375	0.050	0.0125	0	0.440	0.628	0.0260	0.044	0.05	0.050	0.0125	0.44
3	0.125	0.03125	0.015	0.00375	0	1.467	3.823	0.0740	0.068	0.015	0.123	0.0307521	0.1788496

Q= 6.2500 l/s
Q= 0.0063 m³/s
ancho= 0.2500 m
Y_c= 0.0399 m

Nivel	Y1 (m)		Y2 (m)			v	Fr2	Y3 (m)		Y4 (m)	y1	A1	v1
	NIVEL	Area	Apertura	Area	Longitud del Resalto			calculado	medido	medido	calculado	calculado	calculado
1	0.05	0.0125	0.065	0.01625	0.09	0.385	0.482	0.0224	0.055	0.065	0.065	0.01625	0.3846154
2	0.065	0.01625	0.054	0.0135	0.65	0.463	0.636	0.0286	0.078	0.06	0.054	0.0135	0.462963
3	0.08	0.02	0.030	0.0075	0	0.833	1.536	0.0519	0.08	0.06	0.055	0.0136947	0.4563804

Tabla D-3. Tabla de la operación de la compuerta en el canal con pendiente horizontal.

LABORATORIO OPERACIÓN COMPUERTA EN EL CANAL - PENDIENTE SUAVE

Q= 4.60 l/s
Q= 0.0046 m³/s
ancho= 0.25 m
Yc= 0.033 m

Nivel	Y1 (m)		Y2 (m)			v	Fr2	Y3 (m)		Y4 (m)	y1	A1	v1
	NIVEL	Area	Apertura	Area	Longitud del Resalto			calculado	medido	medido	calculado	calculado	calculado
1	0.125	0.03125	0.030	0.0075	0.03	0.613	1.129	0.0352	0.063	0.048	0.035	0.0088421	0.5197413
2	0.103	0.02575	0.050	0.0125	0.08	0.368	0.525	0.0198	0.078	0.055	0.050	0.0125	0.3676471
3	0.096	0.024	0.065	0.01625	1.1	0.283	0.354	0.0135	0.08	0.055	0.065	0.01625	0.2828054

Q= 6.25 l/s
Q= 0.00625 m³/s
ancho= 0.25 m
Yc= 0.04 m

Nivel	Y1 (m)		Y2 (m)			v	Fr2	Y3 (m)		Y4 (m)	y1	A1	v1
	NIVEL	Area	Apertura	Area	Longitud del Resalto			calculado	medido	medido	calculado	calculado	calculado
1	0.087	0.02175	0.050	0.0125	0.05	0.500	0.714	0.0313	0.07	0.05	0.058	0.0143851	0.3194696
2	0.098	0.0245	0.040	0.01	0.82	0.625	0.998	0.0399	0.067	0.049	0.054	0.013501	0.3403879
3	0.103	0.02575	0.030	0.0075		0.833	1.536	0.0519	0.06	0.04	0.061	0.015181	0.3027196

Q= 5.09 l/s
Q= 0.00509 m³/s
ancho= 0.25 m
Yc= 0.03 m

Nivel	Y1 (m)		Y2 (m)			v	Fr2	Y3 (m)		Y4 (m)	y1	A1	v1
	NIVEL	Area	Apertura	Area	Longitud del Resalto			calculado	medido	medido	calculado	calculado	calculado
1	0.086	0.0215	0.035	0.00875	0.57	0.582	0.993	0.0347	0.063	0.43	0.043	0.0107202	0.4286854
2	0.09	0.0225	0.030	0.0075	1.8	0.679	1.251	0.0402	0.06	0.43	0.045	0.0112381	0.4089299
3	0.12	0.03	0.020	0.005	3	1.018	2.298	0.0558	0.051	0.45	0.069	0.0173065	0.2655417