



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE
INCEPCIÓN DEL VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE
ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. ILEANA PALOMA CISNEROS CONTRERAS

TUTOR:
DR. VÍCTOR MANUEL ARROYO CORREA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

JIUTEPEC, MORELOS, MÉXICO, ENERO 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. María Joselina C. Espinoza Ayala

Secretario: M.I. José Alfredo González Verdugo

Vocal: Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa

1^{er.} Suplente: Dr. Edmundo Pedroza González

2^{d o.} Suplente: M. en C. Gilberto Salgado Maldonado

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

TUTOR DE TESIS:

Dr. Víctor Manuel Arroyo Correa

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Por el apoyo económico, escolar y profesional a:

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

*... Por su apoyo incondicional,
a mi madre Merly I. Contreras González,
además de su apoyo, su invaluable asesoría académica,
mi padre Ing. Mario A. Cisneros Gómez, les agradezco haberme
guiado y enseñado a alcanzar mis objetivos y metas...*

Por haberme dado la oportunidad de trabajar en el laboratorio de hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UADY, mi primer acercamiento a este bonito e interesante mundo, Ing. Juan Vázquez Montalvo; de igual manera al Ing. Jorge Pacheco Martínez, por su apoyo y quien estaría feliz de presenciar el alcance de una meta que me vio emprender.

Por su apoyo tanto técnico, como palabras y agradable compañía en el laboratorio Enzo Levi del IMTA a:

- Antonio Moyaho Díaz
- Alberto Castro Salazar
 - Ángel Moreno
- Alejandro Martínez Rodríguez

A mi equipo de medición, esperando haya contribuido a su formación académica y profesional, los futuros ingenieros de la Universidad Autónoma de Chiapas:

- Br. Erick Cristóbal Juárez Hernández
- Br. Javier Eduardo Aquino Rodríguez
- Br. Alejandro Vicente Chacón

Por su asesoría en lo relacionado a fotografía y video, así como las fotografías utilizadas para este trabajo, Omar Fonseca Moreno.

Por hacer más agradable la estadía, a mis amigos y compañeros de generación.

Por guiarme, resolver dudas y compartir conocimiento, al personal y profesores de IMTA-UNAM.

A mi director de tesis M. en C. Gilberto Salgado, quien además de resolver mis dudas y compartir su conocimiento, hizo divertido la realización de este trabajo.

*... Por su ingenio, inteligencia, paciencia y apoyo en el
cumplimiento de esta meta, a mi equipo favorito de toda la vida,
Ing. Lázaro López Bautista, no existen palabras para reconocer
ni agradecer lo grande que eres y puedes llegar a ser...*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	10
CAPÍTULO 1	12
INTRODUCCIÓN	12
1.1 ANTECEDENTES	12
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	17
CAPÍTULO 2	20
REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS EN LA HIDRÁULICA DE CANALES ESCALONADOS.....	20
2.2 TIPOS DE FLUJO EN UN VERTEDOR ESCALONADO	21
2.2.1 FLUJO SALTANTE.....	21
2.2.2 FLUJO DE TRANSICIÓN	23
2.2.3. FLUJO RASANTE.....	26
2.3 CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DE AIRE	31
2.3.1 CONCENTRACIÓN DE AIRE.....	39
2.4 CAVITACIÓN	43
2.5 MECANISMOS DE AIREACIÓN	46
2.5.1 AIREACIÓN NATURAL	46
2.5.2 AIREACIÓN INDUCIDA	49
2.6 DISIPACIÓN DE ENERGÍA.....	51
2.7 VENTAJAS DE LOS VERTEDORES ESCALONADOS.....	53
2.8 DESVENTAJAS DE LOS VERTEDORES ESCALONADOS.....	53
CAPÍTULO 3	55
MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	55
3.1 GENERALIDADES	55
3.2 HISTORIA DE LA MODELACIÓN FÍSICA	56
3.3 APLICACIÓN Y APORTE DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS	58
3.4 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS	59

3.4.1 MODELOS FÍSICOS	59
3.4.2 MODELOS ANALÓGICOS	60
3.4.3 MODELOS MATEMÁTICOS.....	61
3.5 BASES TEÓRICAS DE LA MODELACIÓN FÍSICA.....	62
3.6 ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	62
3.7 ANÁLISIS DE SEMEJANZA O SIMILITUD	63
3.7.1 SIMILITUD GEOMÉTRICA.....	63
3.7.2 SIMILITUD CINEMÁTICA	65
3.7.3 SIMILITUD DINÁMICA	66
3.7.4 APLICACIÓN DE LAS LEYES DE SEMEJANZA AL DISEÑO DE MODELOS FÍSICOS	66
3.7.5 LEYES DE SEMEJANZA CONDICIONANTES AL DISEÑO	67
3.7.5.1 MODELOS A SEMEJANZA DE EULER.....	67
3.7.5.2 MODELOS A SEMEJANZA DE FROUDE.....	68
3.7.5.3 MODELOS A SEMEJANZA DE REYNOLDS	68
3.7.5.4 MODELOS A SEMEJANZA DE WEBER	69
3.8 EFECTOS DE ESCALA	69
3.9 CALIBRACIÓN.....	70
3.10 MODELO FÍSICO VERTEDOR DE LA PRESA “EL ZAPOTILLO”	70
3.10.1 SELECCIÓN DE ESCALAS Y DISEÑO DEL MODELO	70
3.10.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO	72
Capítulo 4.....	74
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	74
4.1 INTRODUCCIÓN	74
4.2 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	74
4.2.1 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA.....	78
4.2.2 RÁPIDA ESCALONADA.....	78
4.3 INSTRUMENTACIÓN	81
4.3.1 MEDIDAS DE NIVEL	82
4.3.2 MEDIDAS PRESIÓN	83
4.3.3 CÁMARA DE VIDEO DE ALTA VELOCIDAD	84
4.3.4 SOFTWARE DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES	86
4.4 DISEÑO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	88
4.4.1 TIPO DE ENSAYOS EFECTUADOS.....	88
4.4.2 VARIABLES DE ESTUDIO	89
4.5 PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	91

4.5.1 INTRODUCCIÓN	91
4.5.2 SENSORES DE NIVEL.....	91
4.5.3 SENSORES DE PRESIÓN.....	93
4.5.4 PHOTRON FASTCAM	96
Capítulo 5	102
CARACTERIZACIÓN DEL PUNTO DE INICIO DE AIREACIÓN.....	102
5.1 INTRODUCCIÓN	102
5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PRÁCTICOS.....	102
5.2.1 ANÁLISIS DE LAS CARGAS DE PRESIÓN.....	103
5.2.2 PERFILES.....	112
5.3 ANÁLISIS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES	116
5.3.1 APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS	117
5.3.2 AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS	123
5.4 ANÁLISIS DE IMÁGENES	129
5.5 RESUMEN DE RESULTADOS	135
CAPÍTULO 6	141
CONCLUSIONES	141
Anexo 1.....	144
PROGRAMA EN MATLAB PARA EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES.....	144
Bibliografía	147

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PRESA PABELLÓN (MÉXICO, 1730) (CHANSON H. , 1994)	13
FIGURA 2. PRESA PABELLÓN (MÉXICO, 1730) DETALLE DE LOS CONTRAFUERTES. (CHANSON H. , 1994)	13
FIGURA 3. DEFINICIONES BÁSICAS DEL FLUJO EN UN VERTEDOR ESCALONADO	20
FIGURA 4. FLUJO SALTANTE	21
FIGURA 5. FLUJO SALTANTE CON SALTO HIDRÁULICO COMPLETAMENTE DESARROLLADO (NA1) ...	22
FIGURA 6. FLUJO SALTANTE CON SALTO HIDRÁULICO PARCIALMENTE DESARROLLADO (NA2)	22
FIGURA 7. FLUJO SALTANTE SIN SALTO HIDRÁULICO (NA3)	23
FIGURA 8. FLUJO DE TRANSICIÓN	24
FIGURA 9. DESCRIPCIÓN DEL FLUJO DE TRANSICIÓN. (RENDÓN RICARDI, 2011)	24
FIGURA 10. FLUJO EN TRANSICIÓN TIPO 1	25
FIGURA 11. FLUJO EN TRANSICIÓN TIPO 2	25
FIGURA 12. FLUJO RASANTE	26
FIGURA 13. REGIONES SOBRE UN VERTEDOR ESCALONADO CON RÉGIMEN RASANTE.	27
FIGURA 14. CLASIFICACIÓN DE FLUJO RASANTE SEGÚN BLINDO (1993)	28
FIGURA 15. FLUJO RASANTE TIPO SK1	29
FIGURA 16. FLUJO RASANTE TIPO SK2	29
FIGURA 17. FLUJO RASANTE TIPO SK3	30
FIGURA 18. DIVISIÓN DE FLUJOS PRESENTES EN ESTRUCTURAS ESCALONADAS.	31
FIGURA 19. POSICIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN.	33
FIGURA 20. Li/ks EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE (F) DE ACUERDO AL RE ANÁLISIS DE (CHANSON H. , 1994) DE LOS MODELOS DE LA TABLA 1	38
FIGURA 21. dl/ks EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE FROUDE (F) DE ACUERDO AL RE ANÁLISIS DE (CHANSON H. , 1994) DE LOS MODELOS DE LA TABLA 1	38
FIGURA 22. UBICACIÓN DE LAS VARIABLES DE LA ECUACIÓN (20).	41
FIGURA 23. DAÑOS POR CAVITACIÓN, PRESA KARUN, IRÁN	43
FIGURA 24. ESTRUCTURA DEL FLUJO AIREADO DE (ANDERSON & STRAUB, 1960), TOMADO DE (ARREGUÍN CORTÉS & ALCOCER YAMANAKA, DISEÑO HIDRÁULICO DE VERTEDORES, 2011). ..	47
FIGURA 25. ESTRUCTURA DEL FLUJO AIREADO	48
FIGURA 26. TIPOS BÁSICOS DE AIREADORES (PINTO, NEIDERT, & OTA, 1982)	49
FIGURA 27. AIREADOR DE LA PRESA TRIGOMIL, MÉXICO	50
FIGURA 28. MODELO DE (VOLKART & RUTSCHAMANN, 1984)	51
FIGURA 29. MODELO REDUCIDO DEL ARTIFICIO DE JUANELO TURRIANO PARA SUBIR AGUA, SIGLO XVI.	56
FIGURA 30. DIBUJO DEL MODELO DE JOHN SMEATON PARA ESTUDIAR EL FUNCIONAMIENTO DE LA RUEDA HIDRÁULICA.	57
FIGURA 31. EJEMPLIFICACIÓN DE SEMEJANZA GEOMÉTRICA.	64
FIGURA 32. EJEMPLIFICACIÓN DE SEMEJANZA CINEMÁTICA.	65
FIGURA 33. EJEMPLIFICACIÓN DE SEMEJANZA DINÁMICA.	66
FIGURA 34. ESPACIO QUE SE DESTINÓ PARA EL MONTAJE DEL MODELO FÍSICO.	74
FIGURA 35. VISTA EN PLANTA DEL MODELO FÍSICO DEL VERTEDOR DE LA PRESA EL ZAPOTILLO	77

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

FIGURA 36. PERFIL DEL MODELO FÍSICO DEL VERTEDOR ZAPOTILLO.	77
FIGURA 37. VISTA GENERAL DEL MODELO EL ZAPOTILLO.	78
FIGURA 38. ESQUEMA DE LA RÁPIDA ESCALONADA.	79
FIGURA 39. DETALLE DE LOS ESCALONES DEL VERTEDOR.	79
FIGURA 40. VISTA EN PLANTA DEL ÁREA DE ESTUDIO.	80
FIGURA 41. VISTA FRONTAL DEL MODELO Y ÁREA DE ESTUDIO.	80
FIGURA 42. TRANSMISOR ULTRASÓNICO DE DOS HILOS MARCA SIEMENS.	82
FIGURA 43. POSICIONAMIENTO DE LOS TRANSMISORES DE NIVEL DE DOS HILOS.	82
FIGURA 44. INSTALACIÓN FÍSICA PARA LA MEDICIÓN DE PRESIÓN.	83
FIGURA 45. CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD MARCA PHOTRON.	84
FIGURA 46. OPERACIÓN BÁSICA DEL PROGRAMA DE CONTROL.	85
FIGURA 47. INSTALACIÓN DE EQUIPO DE LA CÁMARA DE VIDEO DE ALTA VELOCIDAD.	85
FIGURA 48. COMPARACIÓN DE LA IMAGEN ORIGINAL (IZQUIERDA) Y EL MAPA DE CONTORNO DE LA IMAGEN ORIGINAL (DERECHA).	86
FIGURA 49. PERFIL 2D DE INTENSIDADES DE LUZ DE LA FIGURA 48.	87
FIGURA 50. PERFIL 3D DE INTENSIDADES DE LUZ DE LA FIGURA 48.	87
FIGURA 51. DETALLE DE LA UBICACIÓN DEL SENSOR EN LA HUELLA DEL ESCALÓN.	90
FIGURA 52. POSICIONAMIENTO UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE PRESIÓN.	90
FIGURA 53. DEFINICIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE LAS NARICES DE LA ESCALONADA Y EL SENSOR. .	92
FIGURA 54. POSICIONAMIENTO DE LOS SENSORES DE NIVEL SOBRE LA ESCALONADA.	92
FIGURA 55. SENSORES DE PRESIÓN INSTALADOS EN SOPORTE RADIAL DEBAJO DE LA CORTINA.	93
FIGURA 56. BURBUJAS DE AIRE EN MANGUERAS DE CONEXIÓN.	93
FIGURA 57. PROCESO DE PURGADO DE LAS MANGUERAS DE CONEXIÓN.	94
FIGURA 58. VERIFICACIÓN DEL PURGADO DE LOS SENSORES DE PRESIÓN.	94
FIGURA 59. UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE PRESIÓN EN LA RÁPIDA ESCALONADA.	95
FIGURA 60. CONFIGURACIÓN “B”.	99
FIGURA 61. CONFIGURACIÓN “C”.	99
FIGURA 62. COMBINACIÓN DE LAS CONFIGURACIONES “I” Y “L”.	99
FIGURA 63. CONFIGURACIÓN “O”.	99
FIGURA 64. INSTALACIÓN DEL CONTRASTE DEBAJO DE LA RÁPIDA.	99
FIGURA 65. INSTALACIÓN DE LA CÁMARA PHOTROM FASTCAM.	100
FIGURA 66. DISTRIBUCIÓN DE PIEZÓMETROS.	103
FIGURA 67. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_1=100.706 L/S$ (FLUJO SALTANTE).	104
FIGURA 68. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_2=131.282 L/S$ (FLUJO SALTANTE).	104
FIGURA 69. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_3=161.242 L/S$ (FLUJO SALTANTE).	105
FIGURA 70. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_4=189.73 L/S$ (FLUJO SALTANTE).	105
FIGURA 71. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_5=217.972 L/S$	106
FIGURA 72. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_6=239.603 L/S$ (FLUJO SALTANTE).	106
FIGURA 73. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_7=251.724 L/S$ (FLUJO RASANTE).	107
FIGURA 74. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_8=264.07 L/S$ (FLUJO RASANTE).	107
FIGURA 75. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_9=274.529 L/S$ (FLUJO RASANTE).	108
FIGURA 76. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_{10}=280.878 L/S$ (FLUJO RASANTE).	108
FIGURA 77. DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES PARA $Q_{11}=283.878 L/S$ (FLUJO RASANTE).	109
FIGURA 78. GASTO 3, $Q_3=161.242 L/S$ (FLUJO SALTANTE TIPO NA1)	110
FIGURA 79. GASTO 7, $Q_7=251.724 L/S$ (FLUJO RASANTE TIPO SK3)	110

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

FIGURA 80. RANGO DE LONGITUD DE LA APARICIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN EN BASE A LOS DATOS DE PRESIÓN.....	111
FIGURA 81. UBICACIÓN DEL SENSOR 1 Y DE LOS DISIPADORES DE ENERGÍA AL FINAL DE LA RÁPIDA	113
FIGURA 82. LECTURAS DE NIVEL PARA UN GASTO $Q_7=251.724 L/S$ (FLUJO RASANTE TIPO SK3)...	113
FIGURA 83. LECTURAS DE NIVEL PARA UN GASTO $Q_8=264.07 L/S$ (FLUJO RASANTE TIPO SK3).....	114
FIGURA 84. LECTURAS DE NIVEL PARA UN GASTO $Q_9=274.529 L/S$ (FLUJO RASANTE TIPO SK3)...	114
FIGURA 85. LECTURAS DE NIVEL PARA UN GASTO $Q_{10}=280.878 L/S$ (FLUJO RASANTE TIPO SK3)..	115
FIGURA 86. LECTURAS DE NIVEL PARA UN GASTO $Q_{11}=283.878 L/S$ (FLUJO RASANTE TIPO SK3)..	115
FIGURA 87. RANGO DE LA APARICIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN EN BASE A LOS SENSORES DE NIVEL.	116
FIGURA 88. VALORES DE L_I	119
FIGURA 89. VALORES DE D_I	120
FIGURA 90. LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN, $Llks$ vs F	120
FIGURA 91. PROFUNDIDAD EN EL PUNTO DE INCEPCIÓN, $dlks$	121
FIGURA 92. RANGO DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE INICIO DE AIREACIÓN.	124
FIGURA 93. CONSTANTES DE AJUSTE PARA L_I	127
FIGURA 94. RESULTADOS DE L_I CON LA APLICACIÓN DE LAS CONSTANTES DE AJUSTE.....	127
FIGURA 95. CONSTANTES DE AJUSTE PARA D_I	128
FIGURA 96. RESULTADOS DE D_I CON LA APLICACIÓN DE LAS CONSTANTES DE AJUSTE.	128
FIGURA 97. PERFIL CENTRAL PARA UN $Q_7=251.724 L/S$	130
FIGURA 98. PERFIL CENTRAL PARA UN $Q_8=264.07 L/S$	130
FIGURA 99. PERFIL CENTRAL PARA UN $Q_9=274.529 L/S$	131
FIGURA 100. PERFIL CENTRAL PARA UN $Q_{10}=280.878 L/S$	131
FIGURA 101. PERFIL CENTRAL PARA UN $Q_{11}=283.878 L/S$	132
FIGURA 102. RESULTADOS OBTENIDOS DEL TRATAMIENTO DE IMÁGENES.	133
FIGURA 103. REPRESENTACIÓN DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DE ACUERDO A LOS SENSORES DE PRESIÓN Y DE NIVEL (TABLA 26).	136
FIGURA 104. REPRESENTACIÓN DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DE ACUERDO AL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES (TABLA 26).....	136
FIGURA 105. REPRESENTACIÓN DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DE ACUERDO A LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS (TABLA 27).	138

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. MODELOS Y PROTOTIPOS ANALIZADOS POR (CHANSON H. , 1994)	34
TABLA 2. PRINCIPALES LIMITACIONES EN LOS MODELOS FÍSICOS Y MATEMÁTICOS.....	62
TABLA 3. ANÁLISIS DE ESCALAS PARA EL MODELO FÍSICO.	71
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DEL MODELO Y SU EQUIVALENCIA EN PROTOTIPO A ESCALA 1:50.....	75
TABLA 5. INSTRUMENTACIÓN PARA EL VERTEDOR ESCALONADO EL ZAPOTILLO.....	81
TABLA 6. RESUMEN DE ENSAYOS EFECTUADOS	88
TABLA 7. UBICACIÓN DE LOS SENSORES DE NIVEL	89
TABLA 8. COMPARACIÓN DE LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES PROBADAS PARA LA CAPTURA DE IMÁGENES.	98
TABLA 9. GASTOS DE EXPERIMENTACIÓN	102
TABLA 10. GASTOS A ANALIZAR.	111
TABLA 11. VALOR DE COTAS OBTENIDAS CON LOS SENSORES DE NIVEL.	112
TABLA 12. RESULTADO DE LAS DIFERENCIAS DE COTAS.	112
TABLA 13. FÓRMULAS DE UBICACIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN.....	117
TABLA 14. PARÁMETROS DEL MODELO EL ZAPOTILLO.	118
TABLA 15. DATOS DE INICIO PARA EL CÁLCULO DEL PUNTO DE INCEPCIÓN.....	119
TABLA 16. RESULTADOS DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN.	119
TABLA 17. FÓRMULAS DE CONCENTRACIÓN DE AIRE EN EL PUNTO DE INCEPCIÓN.....	122
TABLA 18. RESULTADOS DE LA CONCENTRACIÓN EN EL PUNTO DE INCEPCIÓN.....	122
TABLA 19. PROPUESTA DE LA UBICACIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN CORRESPONDIENTE AL GASTO Q_7 $= 251.724 L/S$	124
TABLA 20. GENERACIÓN DEL VECTOR DE GASTO UNITARIO Y DEL PUNTO DE INCEPCIÓN.....	125
TABLA 21. CONSTANTES DE AJUSTE CALCULADOS CON LA HERRAMIENTA CFT.....	126
TABLA 22. RESULTADOS APLICANDO LAS CONSTANTES DE AJUSTE.....	126
TABLA 23. UBICACIÓN DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DE ACUERDO AL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.	132
TABLA 24. RESULTADOS OBTENIDOS DEL TRATAMIENTO DE IMÁGENES EN EL PROGRAMA MATLAB.	133
TABLA 25. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE CONCENTRACIÓN DE AIRE, TRATAMIENTO DE IMAGEN VS MODELOS MATEMÁTICOS.....	134
TABLA 26. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	135
TABLA 27. RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS.	137
TABLA 28. RESULTADOS DE LOS MODELOS AJUSTADOS.	138

NOMENCLATURA

h, H	Altura de escalón
L	Longitud de la huella del escalón
θ	Ángulo de la pendiente formada por los escalones
F	Número de Froude
L_i	Distancia del punto de incepción desde el comienzo del crecimiento de la capa límite
d	Profundidad del agua clara
d_i	Profundidad del flujo en el punto de incepción
d_c	Profundidad de flujo crítico (m), para un canal rectangular: $d_c = \sqrt[3]{q_w^2/g}$
d_b	Profundidad de flujo en el borde del escalón (m)
d_p	Profundidad del flujo en el fondo debajo de la caída libre (m)
d_1	Profundidad del flujo (m) aguas arriba del salto hidráulico
d_2	Profundidad del flujo (m) aguas abajo del salto hidráulico
q_w	Gasto unitario
k_s	Factor de fricción de Nikuradse
g	Aceleración de la gravedad
s	Coordenada medida según el pseudo fondo con origen en el punto de incepción
q_{ar}	caudal específico de aire
V_p	Velocidad media de penetración del aire
v_p	Velocidad ascendente de las burbujas de aire
\bar{C}_i	Concentración media del aire en el punto de incepción
\bar{C}	Concentración media del aire en todo el flujo
\bar{C}_e	Concentración media del aire en equilibrio (flujo uniforme)
α	Pendiente del canal
S'	Coordenada adimensional definida como $s' = \frac{L-L_i}{d_i}$
L	Umbral del vertedor
K'	Constante de integración
D'	Difusividad turbulenta adimensional
y	Distancia normal al pseudo fondo
Y_{90}	Tirante correspondiente a una concentración de aire igual a 90%
U_w	Velocidad media del agua clara
σ	Índice de cavitación
hp	Carga de presión
hv	Carga de vaporización

V, U	Velocidad
σ_i	Índice de cavitación en el punto de inyección
P_{atm}	Presión atmosférica
P_v	Tensión de vapor de agua
γ	Peso específico del agua
σ_{cr}	Índice de cavitación crítico en el punto de inyección
f	Factor de fricción de Darcy-Weisbach
R_h	Radio hidráulico
J	Pérdidas de energía por unidad de longitud
q_a	Demanda de aire
V_r	Velocidad media de la rampa
L_c	Longitud de la cavidad
K_H	Constante cuyo valor define (Hamilton, 1980) entre 0.01 y 0.03.
$PE_{D_{esc}}$	Proporción de energía disipada por la presencia de escalones
E_{pend}^{lisa}	Energía específica sobre la solera de una rápida lisa
E_{pend}^{esc}	Energía específica sobre la solera de una rápida escalonada
LM	Dimensiones lineales en modelo
LP	Dimensiones lineales en prototipo
L_r	Factor de escalas de longitud
Δp	Cambios de presión
Eu	Número de Euler
Re	Número de Reynolds
We	Número de Weber
E_L	Escala de líneas verticales y horizontales
E_v	Escala de velocidades
E_Q	Escala de gastos

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

RESUMEN

En los últimos años, el desarrollo de nuevos materiales y técnicas de construcción ha permitido el incremento considerable del uso de canales escalonados, esto se debe a que tales desarrollos han brindado ventajas en lo que se refiere a rapidez y economicidad al momento de su construcción.

Actualmente el uso de los canales escalonados se ha diversificado, tal es el caso de su uso como vertedores, disipadores de energía o aireadores de flujo.

El enfoque del estudio es el uso de vertedores escalonados como disipadores de energía, ya que la presencia de escalones en estructuras hidráulicas de este tipo se considera una ventaja en términos de riesgos de cavitación y socavación al pie de la obra.

Lo anteriormente señalado abre paso a la necesidad de realizar estudios y/o análisis de los principales parámetros presentes en el comportamiento del flujo propio de este tipo de construcción, teniendo la localización del punto de inyección como objeto de estudio principal en este trabajo.

El presente trabajo se desarrollará para el caso particular del vertedor escalonado de la presa de almacenamiento Zapotillo, los trabajos experimentales se llevarán a cabo en el modelo a escala 1:50 de esta presa ubicado en el laboratorio Enzo Levi del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

En este estudio se propone como método experimental para analizar el flujo sobre vertedores escalonados el uso de técnicas de digitalización de secuencia de imágenes correlacionado con medición de presiones y profundidades del flujo, para obtener en primera instancia un análisis cualitativo del comportamiento hidráulico de este vertedor en particular.

Primeramente se describirán los objetivos que se persiguen en este trabajo, luego se mostrará un resumen de la revisión bibliográfica con respecto a este tema, abordando como tema principal las características del flujo en los vertedores escalonados y el punto de inyección de aire, así mismo se procederá con el desarrollo de la metodología necesaria para la adquisición de datos experimentales describiendo las herramientas que se tienen al alcance y técnicas necesarias para su obtención, para finalmente detallar los resultados esperados, dichos resultados permitirán comparar con trabajos de otros autores para así poder verificar la confiabilidad y validez del desarrollo de este trabajo.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Algunos estudios sugieren que el uso de canales escalonados es una técnica nueva, lo cierto es que los canales escalonados fueron utilizados desde las antiguas civilizaciones como obras de disipación a manera de garantizar la estabilidad de las estructuras hidráulicas utilizadas para conducción o embalse de las aguas.

Los vertedores escalonados más antiguos del mundo son presumiblemente los de la presa Khosr River (o presa Ajilah), en Iraq. Las presas fueron construidas cerca del 694 A.C. por el Rey Asirio Sennacherib. Fueron diseñadas para suministrar agua a la ciudad capital asiria Nineveh, cerca de la actual Mosul, a través de dos canales. Ambas presas cuentan con un lado escalonado aguas abajo y estaban destinados a descargar sobre el cauce del río. Aún existen restos de estas presas (Smith, 1971; Schnitter, 1994).

Luego, en su imperio, los romanos construyeron presas de desbordamiento escalonadas, restos de estas son encontrados en Siria, Libia y Túnez. Después de la caída del imperio romano, ingenieros civiles musulmanes obtuvieron experiencia de los nabateos, los romanos y los sabeos. Construyendo así presas con desbordamientos escalonados en Iraq, Arabia Saudita y España (Chanson H. , 1994).

España ocupa un lugar excepcional en el desarrollo de grandes presas. Después de la reconquista de España, los ingenieros españoles continuaron el uso de las estructuras romanas y musulmanas. Diseñaron también nuevos vertedores y presas con escalones, en 1791, construyeron la presa con escalones más grande, la cual lleva por nombre Puentes, aunque esta fue retirada en 1802 por fallas de cimentación (Chanson H. , 1994).

Siguiendo la reconquista de España, los españoles católicos se beneficiaron de los conocimientos precedentes de los romanos y musulmanes. Después, los españoles conquistaron el Nuevo Mundo donde transfirieron deliberadamente su tecnología desarrollada (Chanson H. , 1994).

Muchos países europeos y asentamientos de estos en América se beneficiaron de su experiencia en presas, incluyendo el campo de diseño de vertedores escalonados, por lo que se puede encontrar una clara evidencia de la influencia española en Francia, México y Estados Unidos.

En el centro de México, varias presas con vertedores escalonados fueron construidos por los españoles durante los siglos XVIII y XIX y algunas aún continuaron en uso al principio del siglo XX, ejemplo de esto tenemos la presa “Pabellón” (1730) en Aguascalientes.



Figura 1. Presa Pabellón (México, 1730) (Chanson H. , 1994)



Figura 2. Presa Pabellón (México, 1730) detalle de los contrafuertes. (Chanson H. , 1994)

Para mediados del siglo XVIII, ingenieros franceses supieron sobre la experiencia de los españoles y es así como bajo el diseño de Riquet y ampliación de Vauban, se construye el sistema de alimentación del Canal de Mediodía para proveer una ruta interna entre el Atlántico y el Mediterráneo a través del sur de Francia, este canal incluía varios cascadas y canales escalonados (Rolt, 1973).

En la actualidad, la introducción de las presas de concreto compactado con rodillo, CCR, en las cuales el material de construcción (mezclas pobres) se compacta en capas sucesivas, logrando con ello una superficie escalonada en talud aguas abajo (Arreguín Cortés & Alcocer Yamanaka, Diseño hidráulico de vertedores, 2011), reavivó el diseño de rápidas escalonadas, a manera de aprovechar la geometría típica de los paramentos secos en estas presas y diseñar estructuras que aumenten la energía disipada y reduzcan los tamaños de los cuencos de disipación al pie de la rápida.

Existe un número importante de autores que han investigado los diferentes flujos en estructuras escalonadas (Chanson, Tozzi, Chinnarasri, entre otros) y cada uno presenta diferentes relaciones de origen empírico para definir los límites entre aquellos (Latessa & Sabarots Gerbec, 2014), aunque no fue hasta 1993 que se comenzó a tomar en cuenta

los efectos de la auto aireación del flujo, a partir de esta fecha la mayoría de los estudios se han enfocado principalmente en aquellos vertedores escalonados con grandes pendientes ($\theta=45^\circ$) (González & Chanson, 2007).

A continuación, a manera de resumen se describen los principales trabajos y avances de investigación que sobresalen por su aportación al estudio de ingreso de aire en el diseño de vertedores escalonados:

Essery and Horner, 1978 Rajaratnam, 1990 Chanson, 1994	Describen que el comportamiento hidráulico en canales escalonados puede ser caracterizado dependiendo del gasto y la geometría de los escalones como flujo saltante, en transición o rasante.
Frizell y Mefford, 1991	Lograron diseños para gastos superiores a $14\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.
Profesor Cristóbal Mateos y Dr. V. Elviro García, 1992	Desarrollaron criterios de diseño de los escalones de transición desde el umbral del vertedor.
Quintilla, 1999	Implementa técnicas de visualización de flujo para realizar una caracterización cualitativa de la recirculación de los vórtices atrapados en los escalones.
Dr. Martí Sánchez Juny y el Profesor Antoni Amador, 1999	Analizaron el campo de presiones sobre vertedores escalonados, para medir explícitamente el riesgo de cavitación.
Profesor Hager, Profesor Minor y Dr. Boes, 2000	Estudiaron los campos de velocidades y las concentraciones de aire disuelto en el flujo.
Sánchez Juny, Pomares, & Dolz, 2000	Caracterizaron el campo de presiones del flujo rasante sobre un vertedor escalonado a través del procesamiento de imágenes.
González & Chanson, 2007	Miden las propiedades del flujo aire-agua en un escalonado utilizando sondas de conductividad con doble punta en conjunto con detector de burbujas.
Bung D. B., 2013	Caracteriza la rugosidad de la superficie en modelos de vertedores lisos y escalonados utilizando una cámara de alta velocidad y un sensor ultrasónico.

Los recientes avances tecnológicos han permitido la construcción de grandes presas, reservorios y canales. Estos progresos han necesitado el desarrollo de nuevos diseños y técnicas de construcción, particularmente con la provisión de instalaciones adecuadas

para evitar inundaciones. Por lo tanto, los vertedores son diseñados para verter grandes cantidades de agua sobre una estructura hidráulica sin mayor daño a la misma estructura y a su entorno (Chanson H. , 1994).

El agua en los vertedores escalonados fluye como en cualquier canal abierto por lo que la velocidad del flujo genera energía cinética, es necesario disipar gran parte de esta energía, ya que de lo contrario el agua que fluye puede dañar al pie de la presa, sus alrededores y eventualmente la presa misma.

El aprovechamiento de la construcción de vertedores escalonados es considerado como uno de los medios más factibles para disipar energía. Esta disipación de energía está basada, además del incremento de la rugosidad y la interrupción del flujo por el efecto de cascada, en parte importante, en los efectos de la cantidad de aire que por las características del vertedor el flujo arrastra consigo. Cabe aclarar que el daño por cavitación en vertedores escalonados puede ocurrir, pero la posibilidad se reduce debido a la aireación que produce la naturaleza de este tipo de vertedores.

La presa el Zapotillo presenta un caso especial debido a la modificación de altura de la cortina, con una geometría única a nivel mundial; cresta circular en planta, lo que induce la convergencia del flujo hacia aguas abajo, hasta una tercera parte del ancho inicial, para 80 metros de altura máxima, prácticamente toda la corona de la presa deberá adaptarse como obra de excedencia, un gran porcentaje de la energía deberá disiparse sobre el talud aguas abajo ya que el tanque amortiguador queda topográfica y geológicamente limitado.

La existencia de aire mezclado en el flujo, previene la posibilidad de cavitación en flujos con altas velocidades, típicos en este tipo de estructuras, y a su vez daños al concreto. De aquí la importancia del análisis de la capacidad para introducir aire al flujo.

El proyecto se localiza en el municipio de Yahualica de González Gallo, Jalisco sobre el río Verde, aproximadamente a 11 Km al sureste de la comunidad de Yahualica.

Su finalidad es de aprovechamiento de agua potable para los Altos de Jalisco y la ciudad de León Gto.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La localización del punto donde se inicia la mezcla agua-aire que se conoce como Punto de Incepción o punto de inicio de aireación (PI) es uno de los conceptos más importantes en lo que se refiere al estudio de los tipos de flujo en un vertedor, éste ha sido ubicado de diversas formas por diferentes investigadores y su importancia radica en ser un parámetro de diseño clave usado en la disipación de energía, profundidad del flujo y en relaciones de predicción de arrastre de aire.

Uno de los principales problemas presentes en los vertedores escalonados es la cavitación, especialmente en la superficie o en los bordes de los escalones ya que las presiones hidrodinámicas pueden caer por debajo de la presión de vaporización (Boes & Hager, 2003), con el conocimiento de la localización del punto de incepción es posible conocer los límites de la zona no aireada propensa a este fenómeno.

Sin embargo, aun siendo un parámetro de importancia, en la actualidad no se cuenta con suficiente información relacionada a su ubicación en vertedores escalonados con descarga convergente y de gran altura, ya que la mayoría de estos estudios se enfoca más a canales rectos y modelos de pequeña escala, por lo tanto, este trabajo se enfoca a localizar el punto de incepción en el vertedor escalonado del modelo físico El Zapotillo, el cual además de ser un modelo de gran altura su descarga es de tipo convergente.

1.3 OBJETIVOS

Se establece como objetivo general de esta tesis caracterizar el punto de incepción del modelo físico del vertedor escalonado El Zapotillo. Dentro del objetivo general se definen los siguientes objetivos específicos:

1. Conocer el límite de la zona no aireada del modelo físico del vertedor escalonado El Zapotillo, que presenta un riesgo mayor de cavitación, y por tanto alterar el buen funcionamiento del mismo.
2. Analizar que los parámetros del modelo físico cumplan con los requerimientos necesarios de tal forma que puedan aplicarse las metodologías existentes al momento.
3. Demostrar que la metodología experimental implementada por los investigadores del tema en modelos de vertedores escalonados a pequeña escala y descarga no convergente puede ser aplicada al modelo físico del vertedor escalonado El Zapotillo.

1.4 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad el estudio del flujo en vertedores escalonados con descarga convergente no cuenta con suficiente información, su naturaleza altamente turbulenta y el gran contenido de aire en el flujo en estos no han permitido el desarrollo de un modelo analítico que se confiable para predecir sus características, lo anterior provoca que el análisis de dicho flujo debe hacerse por medio de modelos experimentales.

En flujos supercríticos sobre los escalones del vertedor, la cantidad de arrastre de aire es un parámetro de diseño importante.

La intrusión de aire en un fluido también conocido como auto-aeración, inicialmente se comenzó a estudiar debido a los efectos que el arrastre de aire produce en el volumen del fluido (Chanson H. , 1994).

Como parámetro de diseño la determinación de la ubicación del punto de incepción es importante para estimar la zona no aireada que es propensa a daños por cavitación, reduciendo estos efectos gracias a la entrada de aire a presión atmosférica.

La localización del punto de incepción en un vertedor escalonado es de particular interés para:

1. Estimar la zona no aireada que es propensa a daños por cavitación.
2. Determinar parámetros de diseño utilizado en la disipación de energía, profundidad de flujo y relaciones de predicción de arrastre de aire para aumentar la eficiencia de los vertedores escalonados.

El desarrollo de fórmulas de las características del punto de incepción en gran parte han sido desarrolladas de manera empírica teniendo como base la aplicación de cálculos de vertedores lisos a vertedores escalonados, sin embargo, (Chanson H. , 1994) reporta que esta aplicación es inexacta ya que sobrestima la localización de la aparición de lo que se conoce como "aguas blancas" fenómeno relacionado con la entrada de aire al flujo, llegando a ser aproximadamente 2.8 veces mayor que en vertedores lisos.

Adicionalmente, los estudios experimentales al momento para el desarrollo de estas fórmulas empíricas han sido realizados y aplicados en modelos físicos de pequeña escala y en vertedores rectos.

Debido a que el arrastre de aire conduce a una aceleración en el fluido cuando se manejan altas velocidades como en vertedores de concreto o desagües de fondo de presas,

puede mitigar la cavitación, la cual produce graves daños en poco tiempo, por lo tanto, con el conocimiento de la cantidad de intrusión de aire en el vertedor escalonado del Zapotillo se podrá evaluar y considerar las medidas necesarias para prevenir o reducir el daño causado por este fenómeno.

CAPÍTULO 2

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS EN LA HIDRÁULICA DE CANALES ESCALONADOS

Un canal escalonado es un canal artificial inclinado formado por escalones, donde h es la altura, L es la huella y θ es la pendiente formada por los escalones (Figura 3).

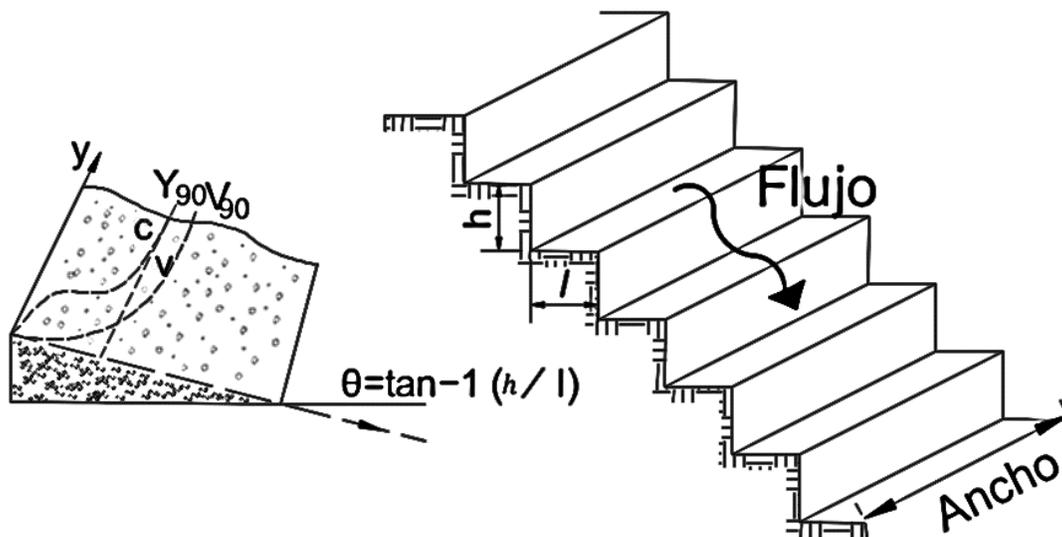


Figura 3. Definiciones básicas del flujo en un vertedor escalonado

Del diseño de estructuras hidráulicas donde están presentes altas velocidades, es común que se presenten problemas debido a las presiones que se puedan producir, lo que puede repercutir en grave deterioro de la estructura debido a la presencia de cavitación. Para poder evitar esta cavitación, uno de los métodos más eficaces es el de introducir aire en el flujo de agua, el cual se puede hacer de manera forzada o de manera natural.

En los vertedores escalonados, el flujo que escurre sobre los escalones es altamente turbulento, se provoca la autoaireación también conocida como aguas blancas. Por lo que, para caracterizar las propiedades del flujo presentes en estas estructuras, siempre debe tomarse en cuenta esta aireación (González & Chanson, 2007).

2.2 TIPOS DE FLUJO EN UN VERTEDOR ESCALONADO

El tipo de flujo que se tenga en este tipo de estructuras se encuentra regido por dos variables, nos referimos primeramente al rango del caudal que se transitará y la geometría del mismo. Con respecto al gasto de operación podemos dividir el tipo de régimen presente en tres diferentes:

- el flujo saltante (*nappe flow*), también se le conoce como flujo de escalón en escalón y flujo en cascada,
- el flujo en transición (*transition flow*)
- y el flujo rasante (*skimming flow*), también recibe el nombre de flujo de superficie y flujo deslizante.

2.2.1 FLUJO SALTANTE

Conocido en la literatura inglesa como *nappe flow*, se presenta para gastos de operación pequeños o de pendientes bajas, se le nombra flujo de cascada ya que como característica principal y a simple vista se puede observar cómo se forman chorros que van cayendo sucesivamente en caída libre sobre la huella del escalón. La Figura 4 representa lo anteriormente descrito, se puede observar como característica principal la presencia de cavidades o celdas que contienen aire, entre el flujo superior, la cara vertical del escalón y la caída del flujo sobre la huella del escalón:

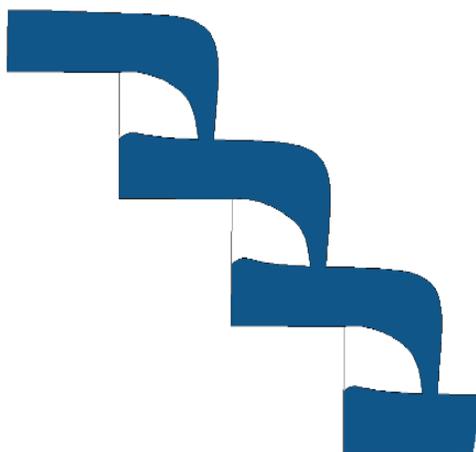


Figura 4. Flujo saltante

La disipación de energía bajo estas condiciones se desarrolla por el impacto de los chorros contra los sucesivos escalones y la posible formación de resaltos hidráulicos (Latessa & Sabarots Gerbec, 2014).

(Chanson H. , 2002a) propuso que el flujo saltante puede a su vez ser dividido en tres subtipos

- Flujo saltante con salto hidráulico totalmente desarrollado (NA1) también conocido como flujo escalón a escalón aislado, para caudales bajos y profundidades pequeñas, aquí se hace presente el flujo crítico cerca de cada vértice exterior de la huella del escalón (Figura 5).

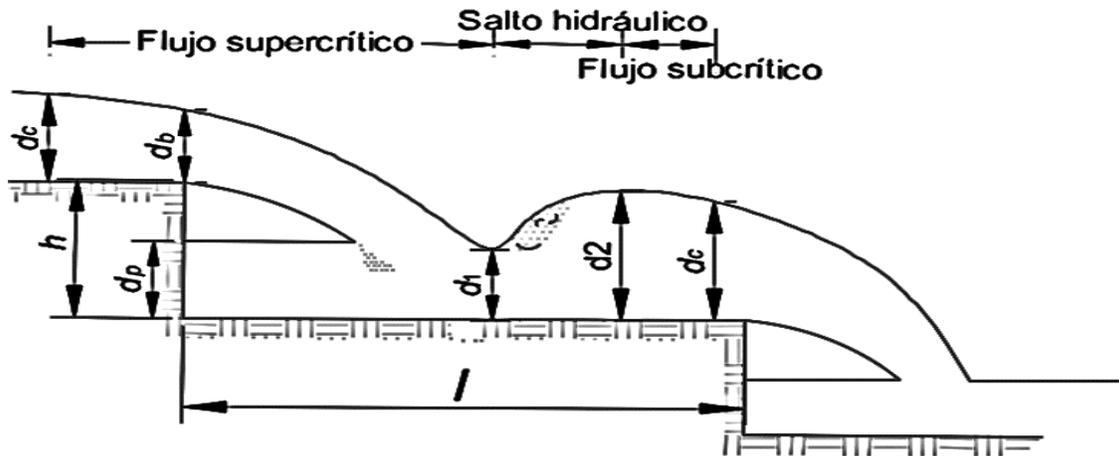


Figura 5. Flujo saltante con salto hidráulico completamente desarrollado (NA1)

- Flujo saltante con salto hidráulico parcialmente desarrollado (NA2) también llamado flujo escalón a escalón parcial, igualmente para gastos bajos y profundidades pequeñas, el flujo presente siempre es supercrítico, existiendo turbulencia únicamente aguas abajo en la zona de impacto (Figura 6).

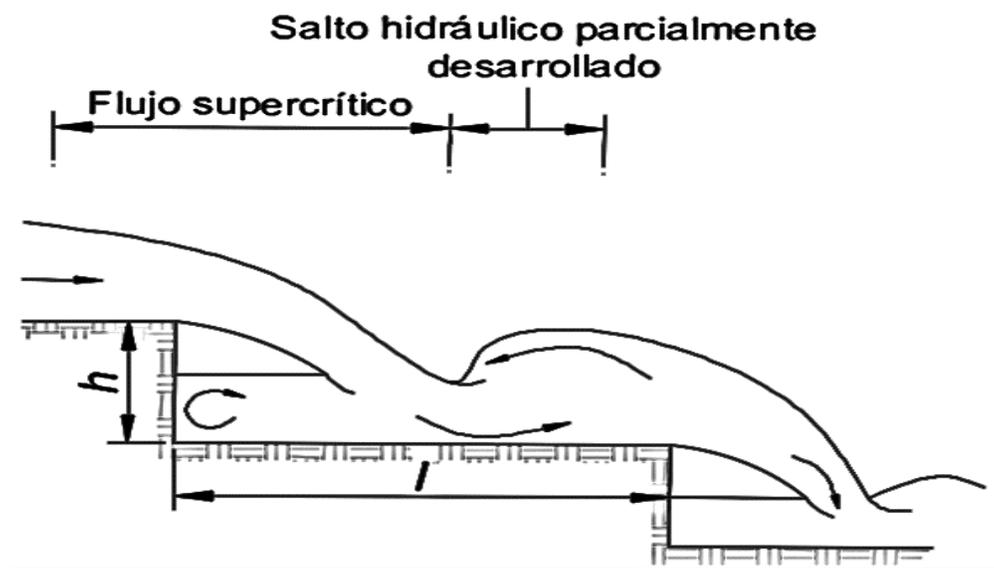


Figura 6. Flujo saltante con salto hidráulico parcialmente desarrollado (NA2)

- Flujo saltante sin salto hidráulico (NA3), este se observa más a menudo en canales o vertedores escalonados con escalones inclinados hacia abajo (Figura 7).

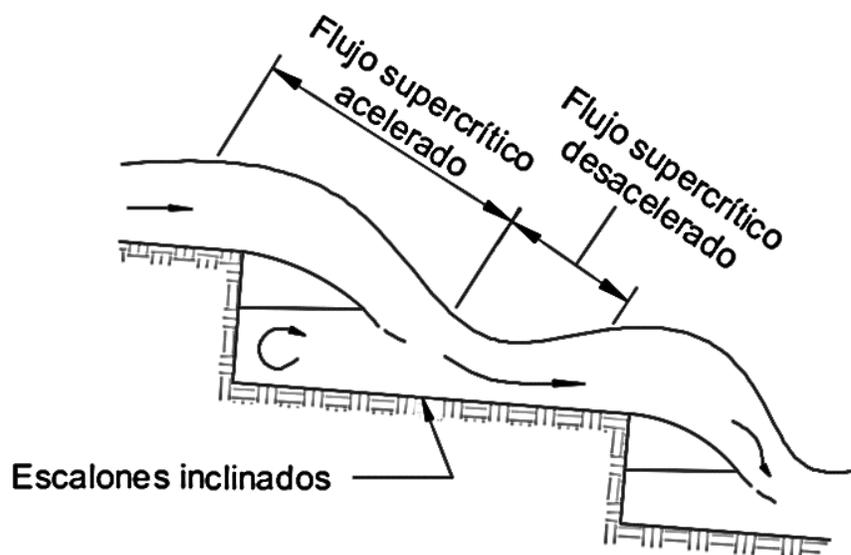


Figura 7. Flujo saltante sin salto hidráulico (NA3)

En el flujo saltante, se puede observar el arrastre de burbujas de aire en cada escalón ya sea por medio del proceso de arrastre de chorro de inmersión, el cual consiste en que el aire es arrastrado hasta la intersección del impacto de la caída del flujo, o en el salto hidráulico que se produce aguas abajo del impacto de la caída.

Es importante mencionar que los efectos del aire a través de las caídas son considerados pequeños por lo que suele descuidarse este aspecto.

2.2.2 FLUJO DE TRANSICIÓN

(Chanson H. , 2002b) estableció la existencia de un flujo entre el flujo saltante y el rasante al que denominó flujo de transición.

Este flujo se observa cuando el vertedor opera con gastos intermedios (González & Chanson, 2007). Este régimen presenta aireación significativa y gran cantidad de atomización o "spray", lo cual provoca que las propiedades del flujo cambien de un escalón a otro, esto hace que la apariencia del flujo no sea homogénea.

Los primeros en describir este tipo de flujo fueron (Elviro & Mateos, 1995) y (Ohtsu & Yasuda, 1997) aunque no lo estudiaron a fondo.

Estudios experimentales han mostrado que para este tipo de régimen la operación segura del vertedor es puesta en riesgo, ya que se presentan grandes fluctuaciones de

velocidad, fuerte rocío cerca de la superficie y numerosas gotas que saltan fuera del vertedor (Rendón Ricardi, 2011). Las características de este régimen se representan en la Figura 8, está presente el comportamiento caótico del flujo, el cual provoca salpicaduras del mismo además de una fuerte aireación de la superficie libre.

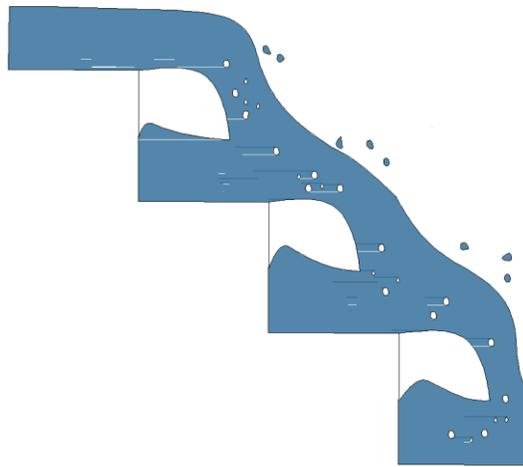


Figura 8. Flujo de transición.

Como se mencionó anteriormente, en este régimen existe una presencia de variaciones de velocidad, estas variaciones provocan fuertes fluctuaciones de presión capaces de romper la base de los escalones, lo que podría ocasionar una falla total de la estructura o provocar un desastre mayor causado por inundación.

Al incrementarse el caudal la zona de aireación debajo de la lámina vertiente comienza a ahogarse (Latessa & Sabarots Gerbec, 2014) y se presentan cavidades donde el flujo recircula.

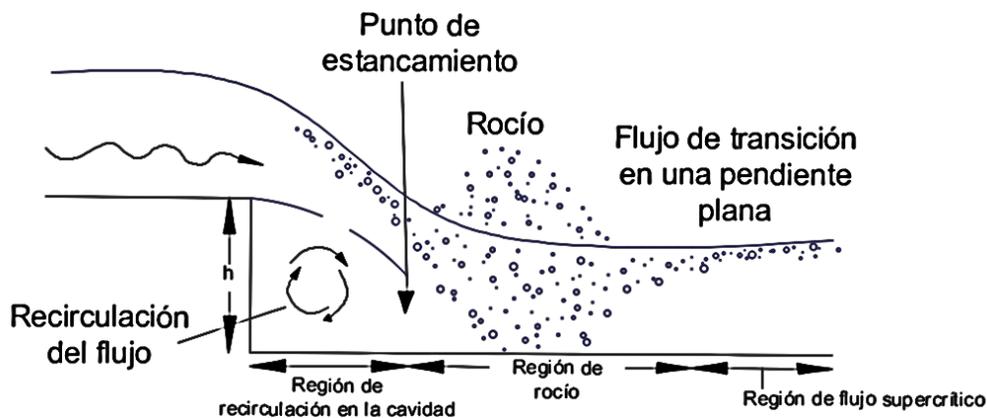


Figura 9. Descripción del flujo de transición. (Rendón Ricardi, 2011)

Hasta la fecha se tienen pocas caracterizaciones de este flujo, entre las que destaca la de (Chanson & Toombes, 2004), así mismo la información es limitada.

Dichos autores dividieron el flujo transitorio en dos subtipos:

- Flujo TRA1, el cual presenta cavidades de aire de diversos tamaños debajo de la corriente principal del flujo.

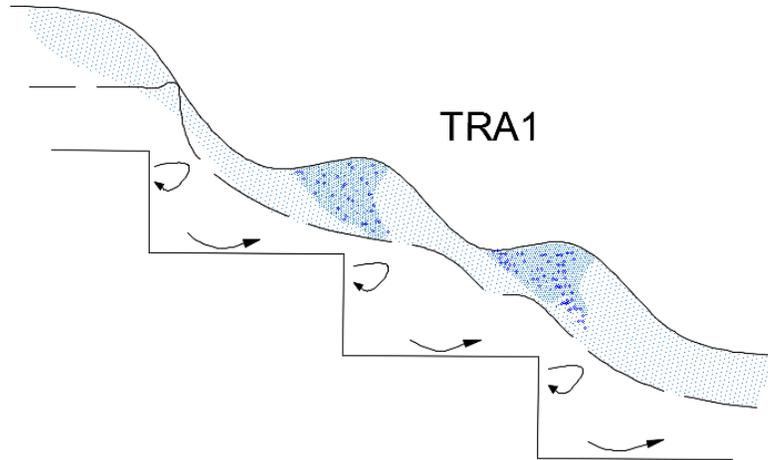


Figura 10. Flujo en transición tipo 1.

- Flujo TRA2, donde dichas cavidades de aire alternan con vórtices de flujo recirculante.

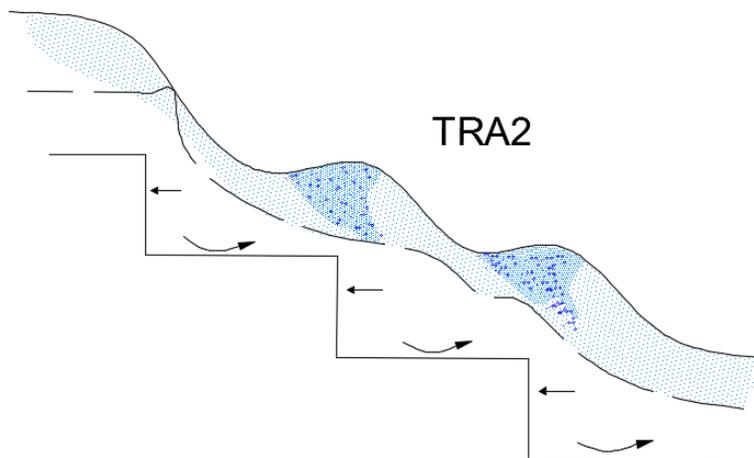


Figura 11. Flujo en transición tipo 2.

2.2.3. FLUJO RASANTE

Conocido en la literatura inglesa como *skimming flow*, se presenta con gastos de operación grandes, se le denomina flujo rasante ya que el agua que fluye hacia aguas abajo sobre los escalones roza con las caras de estos, es decir, se desliza sobre el pseudo fondo o falso fondo, este pseudo fondo se forma con los vértices de los escalones.

El flujo rasante tiene una apariencia similar al flujo en rápidas de fondo liso.

En la Figura 12 se representa la formación del pseudo fondo creado por la región externa sobre los bordes de los escalones del escurrimiento sobre la rápida:

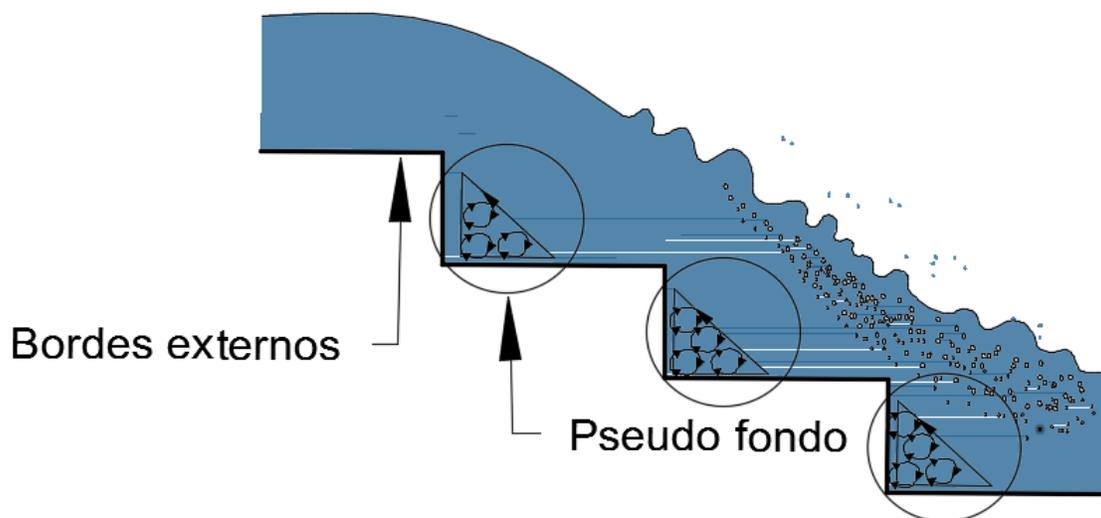


Figura 12. Flujo rasante.

Entre las primeras caracterizaciones (Chamani & Rajaratman, 1999), (Pegram, Officer, & Mottram, 1999) y (Sorensen R. , 1985) se distinguen dos zonas:

- Una zona superior, sobre las caras externas de los escalones los cuales forman el pseudo fondo.
- Una zona baja, debajo del pseudo fondo, formado por cavidades casi triangulares donde el agua queda atrapada, a menos que haya intercambio del agua con la zona superior debido a las altas turbulencias.

En un vertedor escalonado se pueden diferenciar distintas regiones del flujo rasante, en primera instancia se encuentra la zona inicial donde el flujo no es aireado, en esta zona la superficie libre se caracteriza por ser lisa y transparente.

En la siguiente zona desde la cresta se desarrolla la capa límite donde se genera turbulencia, debida a esta turbulencia la capa límite aumenta hasta alcanzar la superficie libre provocando la aireación natural del flujo, la ubicación del inicio de

entrada de aire se le denomina punto de incepción y marca el comienzo de un flujo gradualmente variado.

En esta región, se atrapan grandes cantidades de aire cerca de la superficie libre del flujo. La turbulencia es lo suficientemente grande como para vencer la tensión superficial y la fuerza de flotación de las burbujas, inyectando el aire atrapado al flujo e iniciando la autoaireación o “aguas blancas” (González & Chanson, 2007).

Aguas abajo del punto de incepción, se presenta una zona la cual se extiende gradualmente a través del fluido una capa que contiene una mezcla de agua y aire por lo que ocurre una rápida autoaireación a la que sigue una zona donde el flujo comienza a ser uniforme y no se presentan variaciones en el tirante, en la concentración de aire y en las distribuciones de velocidad para un caudal dado. Aire y agua están completamente mezclados formando un flujo de dos fases homogéneo (Chanson H. , 2002a).

Esta región alcanza el equilibrio entre las fuerzas de gravedad y de fricción por lo que se le denomina como región uniforme.

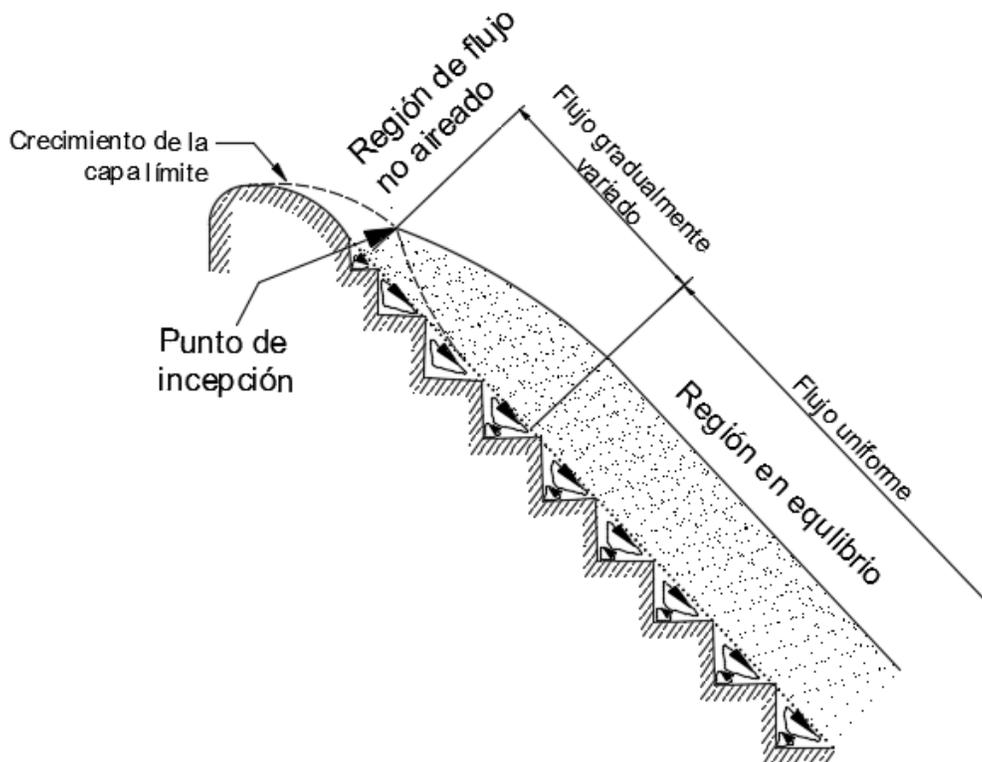


Figura 13. Regiones sobre un vertedor escalonado con régimen rasante.

Debajo de la corriente principal del flujo, en las cavidades formadas por los escalones, se observan vórtices de flujo recirculante (Chamani & Rajaratnam, 1994), los cuales amortiguan el golpe del flujo sobre el escalón y capturan el aire ingresado al flujo.

Dichos vórtices se mantienen debido a la transmisión de esfuerzo cortante con la corriente principal del flujo y contribuyen de manera importante a la disipación de energía (González & Chanson, 2004).

(Bindo, Gautier, & Lacroix, 1993) clasifican el tipo de flujo de una manera más particular, dividiendo el flujo en tres regiones:

Región 1. Esta es la zona no aireada la cual se encuentra en la parte más alta del vertedor y donde se inicia el desarrollo de la capa límite. En este punto el flujo decrece su energía potencial y aumenta su energía cinética, por lo que el tirante decrece con la distancia haciendo que el flujo aumente su velocidad.

Región 2. En esta zona la capa límite alcanza la superficie libre del agua, generando con esto el ingreso del aire en el flujo, este ingreso de aire aumenta el tirante de una manera gradual.

Región 3. Esta es la zona completamente aireada y contiene las características de un flujo completamente desarrollado, esto quiere decir que la profundidad, concentración de aire y velocidad son constantes, con lo anterior se concluye que estas características son función de la pendiente y la rugosidad.

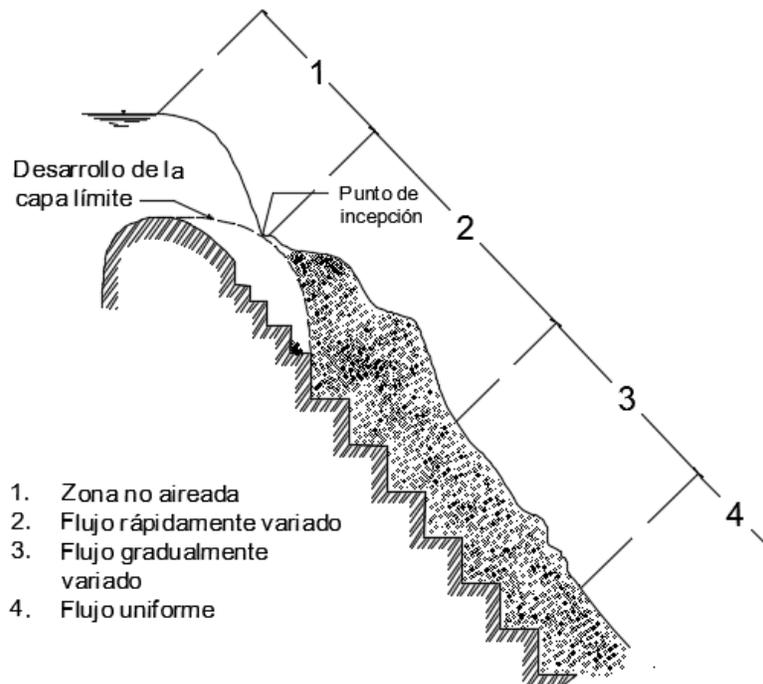


Figura 14. Clasificación de flujo rasante según Bindo (1993)

(Chanson H. , 1997) propuso tres subdivisiones para el flujo rasante con base en las características de los vórtices debajo de la corriente principal del flujo.

(Ohtsu, Yasuda, & Takahashi, 2004) presentaron otra clasificación muy similar con base en el comportamiento de la superficie libre del flujo.

Dichos estudios establecen que en canales con pendiente baja moderada ($5 < \theta < 22^\circ$) se presentan dos tipos de flujo rasante:

- Flujo SK1 para gastos pequeños. Los vórtices recirculantes abarcan solo la parte de aguas arriba de la huella del escalón; la corriente principal del flujo impacta aproximadamente en la mitad de la huella del escalón y escurre paralela al escalón, provocando fricción entre flujo y huella.

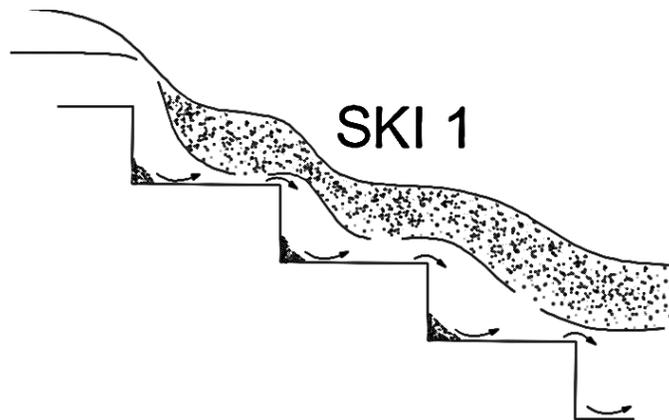


Figura 15. Flujo rasante tipo SK1.

- Flujo SK2 para gastos mayores. el flujo escurre paralelo al pseudo-fondo formado por los escalones. Los vórtices que se presentan debajo del flujo, abarcan casi toda la huella del escalón, interfiriendo en ocasiones con el siguiente vórtice aguas abajo.

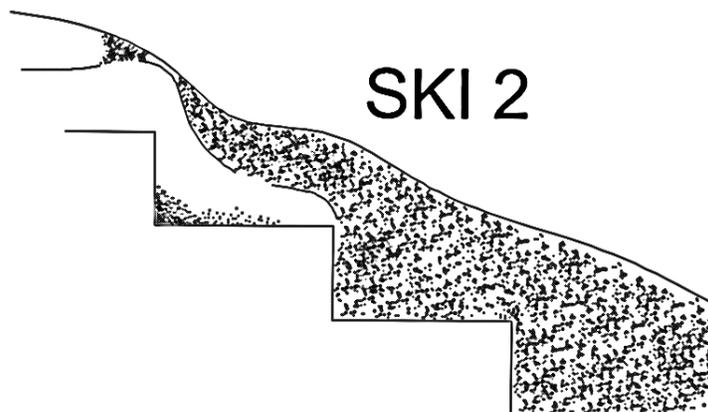


Figura 16. Flujo rasante tipo SK2.

- Flujo SK3 para canales de mayor pendiente ($\theta > 22^\circ$), la corriente también escurre paralela al pseudo-fondo, independientemente de la geometría del escalón. Sin embargo, en este tipo de flujo los vórtices recirculantes presentan un tamaño casi estable.

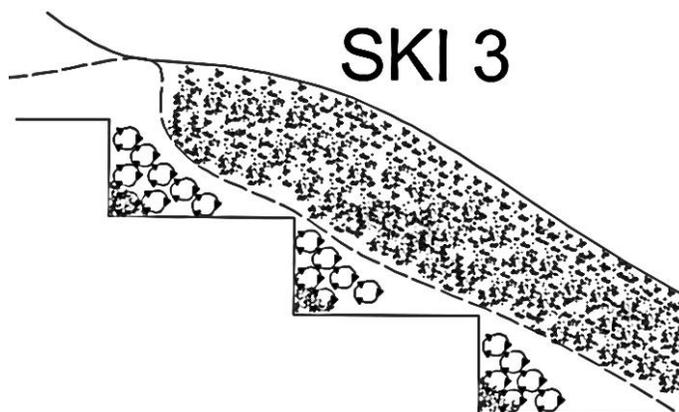


Figura 17. Flujo rasante tipo SK3.

Se dice que este tipo de flujo se vuelve uniforme, ya que aguas abajo, no presenta cambios en el tirante, la concentración de aire o en la distribución de velocidades.

De manera general para este tipo de flujo podemos decir que, si una persona se encuentra de pie observando un vertedor escalonado, la apariencia de la superficie libre aireada tendrá el mismo aspecto que el de un flujo auto aireado que pasa por un vertedor liso.

El tipo de flujo presente en rápidas escalonadas puede predecirse en función de la geometría de los escalones (relación altura/ancho) y el gasto de operación.

(Chanson H. , 2001) vincula las características geométricas de los escalones (relación entre la altura del escalón- h - y longitud de la huella- l -) con las características del escurrimiento (relación entre tirante crítico- dc - y altura del escalón- h -), estableció por medio de una gráfica las relaciones que permiten diferenciar distintos tipos de escurrimiento en un vertedor escalonado, yendo desde el flujo saltante o flujo en láminas (*nappe flow*) para escalones largos y bajos caudales hasta el flujo rasante o flujo de superficie (*skimming flow*) con escalones altos y gastos elevados (Figura 18).

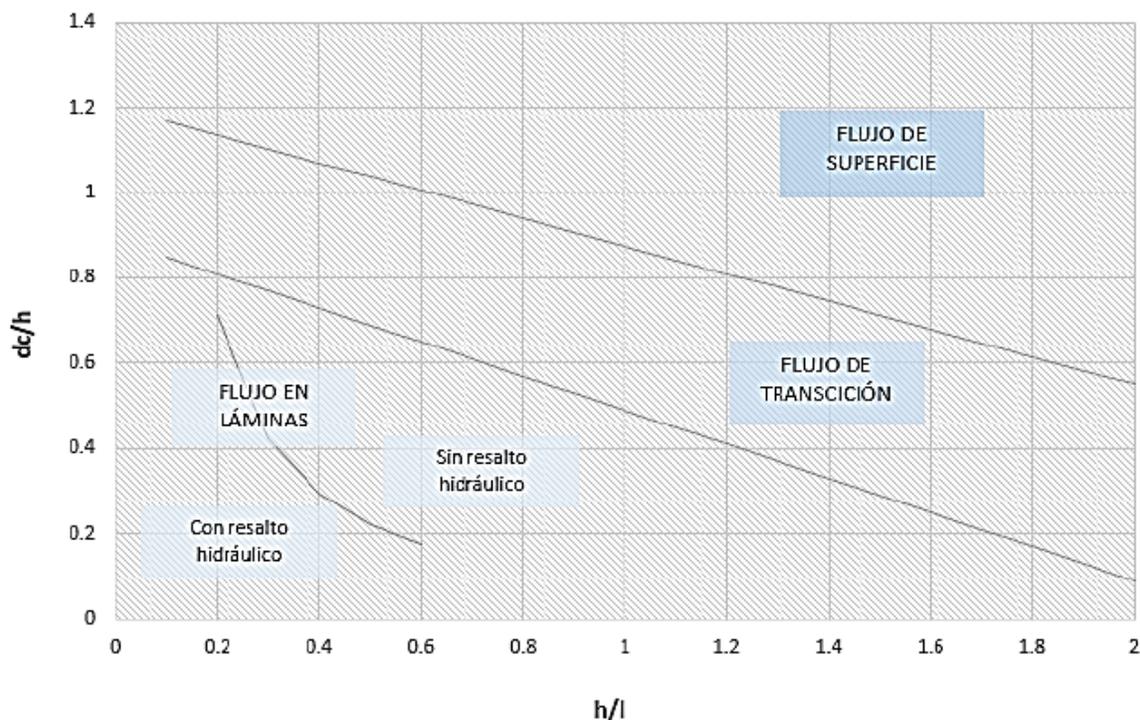


Figura 18. División de flujos presentes en estructuras escalonadas.

2.3 CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DE AIRE

Uno de los conceptos más importantes en lo que se refiere al estudio de los tipos de flujo en un vertedor es la localización del punto donde se inicia la mezcla agua-aire que se conoce como Punto de Incepción o punto de inicio de aireación (PI), este ha sido ubicado de diversas formas por diferentes investigadores, su importancia radica en ser un parámetro de diseño clave usado en la disipación de energía, profundidad del flujo y en relaciones de predicción de arrastre de aire.

(Chanson H. , 1994b), definió el punto de incepción como la localización donde la capa límite turbulenta alcanza la superficie libre.

(Boes & Hager, 2003) lo definen donde la concentración de aire en el fondo es de 0.01.

La manera más tradicional de la ubicación de puntos de incepción en un vertedor es la distancia desde el punto más alto del cimacio. Realizando un recorrido sobre la curvatura y la rápida hasta donde comienza a ingresar aire en el flujo, también se puede

ubicar como la distancia vertical desde el cimacio al punto en el cual la capa límite emerge a la superficie del flujo.

Como parámetro de diseño la determinación de la ubicación del punto de inyección es importante para estimar la zona no aireada que es propensa a daños por cavitación, reduciendo estos efectos gracias a la entrada de aire a presión atmosférica.

Para los modelos experimentales actuales, la ubicación del punto de inyección puede definirse por medio de la observación visual de la superficie del flujo donde el aire es arrastrado dentro del mismo por todo el ancho del vertedor.

Originalmente las investigaciones para desarrollar una relación del punto de inyección para vertedores escalonados se basaron principalmente en vertedores con una sección de control de cresta curva $\theta \geq 26.6^\circ$. Como resultado de lo anterior se tiende a sobrestimar la localización del punto de inyección para vertedores de cresta ancha ($\theta \leq 26.6^\circ$) cuando la rugosidad de la superficie (F_*) es menor que 10.

El punto de inyección en vertedores convencionales lisos está principalmente en función del gasto y de la rugosidad del vertedor, a diferencia de los vertedores escalonados que se encuentran en función del caudal, diseño de la cresta, rugosidad, geometría de los escalones y del canal, además debe notarse que, aunque existan las mismas condiciones para un vertedor escalonado y uno liso, el punto de inyección en una rápida escalonada está situado más arriba que en una rápida lisa.

(Chanson H. , 1994), señala que los cálculos con ecuaciones de vertedores lisos sobreestiman la localización de aparición de la aireación en vertedores escalonados, debido a que el índice de crecimiento de la capa límite en vertedores escalonados es aproximadamente 2.8 veces mayor que para vertedores lisos, es decir, la aireación en vertedores escalonados ocurre mucho antes.

La posición del punto de inyección está definida como la distancia L_I ¹ desde el comienzo del crecimiento de la capa límite, y la profundidad del flujo en el punto de inyección d_I , siendo estas las características principales.

¹ También se puede encontrar en la literatura con la nomenclatura x_I .

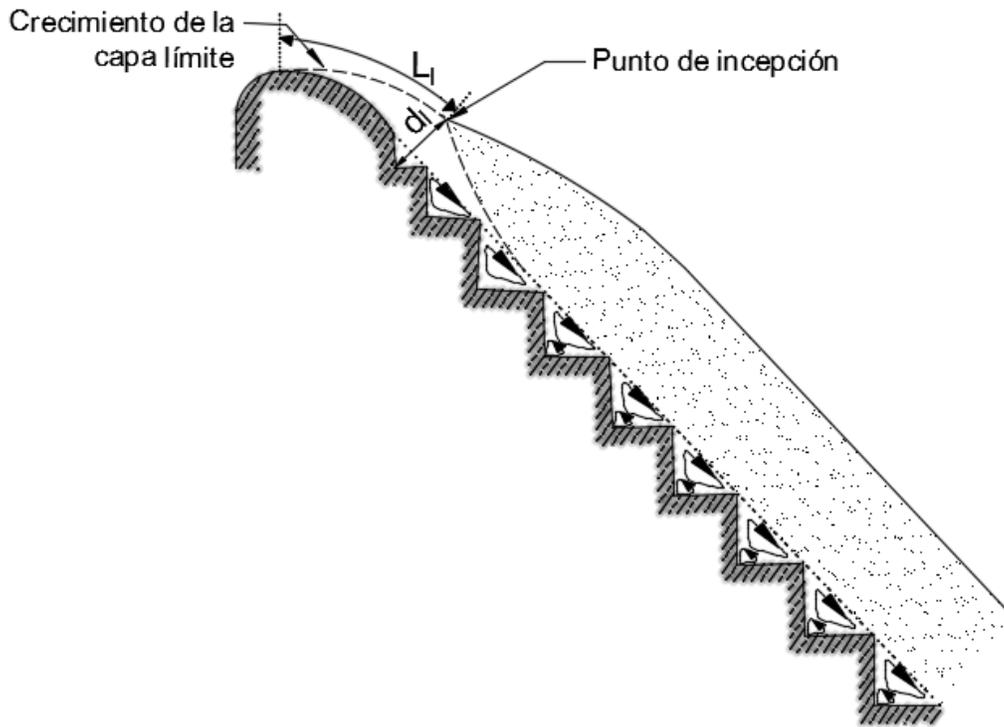


Figura 19. Posición del punto de inyección.

Se ha utilizado diversidad de métodos para estimar la localización y las propiedades de flujo relacionadas del punto de inyección en flujo rasante sobre vertedores escalonados, estos métodos de manera general se basan por ejemplo en:

- La observación visual de la sección transversal donde hay una presencia continua de aire dentro de la superficie de flujo, en las paredes laterales o dentro de las cavidades de los escalones (Sorensen R. , 1985), (Tozzi M. , 1992), (Bindo, Gautier, & Lacroix, 1993), (Chanson H. , 1994), (Chanson H. , 2002a), (Mateos & Elviro, 1997).
- La observación de la sección transversal donde la concentración de aire (C) es igual a 0.01 en el pseudo fondo (Boes & Hager, 2003), (Pfister & Hager, 2011).
- La determinación de la intercepción del borde exterior del desarrollo de la capa límite con la superficie libre (Matos, Sanchez-Juny, Quintela, & Dolz, 2000), (Amador, Sánchez-Juny, & Dolz, 2009), (Meireles & Matos, 2009), (Meireles, Renna, Matos, & Bombardelli, 2012).
- La observación de la sección principal donde la concentración media del aire es igual a 0.20 (Bung D. , 2011).

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

(Chanson H. , 1994) vuelve a analizar las propiedades del flujo en el punto de incepción de los siguientes modelos experimentales:

Modelos estudiados	Año	Pendiente (Grados)	Escala	Altura de escalón h [m]	Gasto unitario q_w [m ² /s]	Régimen estudiado
Moore	1943	-	-	0.15-0.46	-	Saltante
Rand	1955	-	-	0.2	0.000-0.004	Saltante
Horner	1969	22-40				Saltante
Essery y Horner	1978	11-40	-	0.03-0.05	-	Saltante y rasante
Essery et al	1978	11-45		0.025-0.5	0.01-0.145	Saltante y rasante
Stephenson	1979	18.4-45	0.15			Saltante y rasante
			0.1			
Noori	1984	5.7		0.004	0.007-0.09	Rasante
		11.3		0.013	0.025-0.2	
Sorensen	1985	52.05	1/10	0.061	0.006-0.28	Saltante y rasante
			1/25	0.024	0.006-0.028	
Baker	1990	21.8		0.0096-0.058	Hasta 0.5	Rasante
		33.7				
Diez-Cascon et al	1991	53.1	1/10	0.03 y 0.06	0.022-0.28	Rasante
Bayat	1991	51.3	1/25	0.024	0.006-0.07	
				0.03		
				0.02		
Frizzell y Mefford	1991	26.6		0.051	0.077	Rasante
Stephenson	1991	54.5				
Peyras et al	1991, 1992	18.4, 26.6, 45	1/5	0.20	0.04-0.27	Saltante y rasante
Beitz y Lawless	1992	51.3 y 48.0	1/60	0.02	6E-4-0.093	Saltante y rasante
Frizell	1992	26.6		0.051	0.58	Rasante

Tabla 1. Modelos y prototipos analizados por (Chanson H. , 1994) .

Continuación Tabla 1...

Modelos estudiados	Año	Pendiente (Grados)	Escala	Altura de escalón h [m]	Gasto unitario q_w [m ² /s]	Régimen estudiado
Tozzi	1992	53.13	1/15	0.0083 0.0166 0.0333 0.05 0.10	0.086- 0.201	Rasante
Bindo et al	1993	51.34	1/21.3	0.038	0.01- 0.142	Rasante
			1/42.7	0.019	0.007- 0.04	Rasante
Christodoulou	1993	55		0.025	0.02-0.09	Rasante

Prototipos estudiados	Año	Pendiente (Grados)	Escala	Altura de escalón h (m)	Gasto unitario q_w (m ² /s)	Régimen estudiado
Grinchuk	1977	8.7	--	0.41	1.8-60	Rasante

Para estos datos, la localización del comienzo de entrada de aire y la profundidad fueron grabados a un lado.

Chanson ajusta los datos experimentales obtenidos por otros autores y a través de un análisis estadístico de los datos indicó que la localización del punto de incepción y la profundidad del flujo en la incepción fueron mejor correlacionados por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{L_I}{ks} = 9.719(\sin\theta)^{0.0796}(F)^{0.713} \quad (1)$$

$$\frac{d_I}{ks} = \frac{0.4034}{(\sin\theta)^{0.04}}(F)^{0.592} \quad (2)$$

Donde:

$ks = h \cos\theta$; h es la altura del escalón

$F = q_w / \sqrt{g \sin\theta (h \cos\theta)^3}$ es el número de Froude; q_w es la descarga por unidad de ancho, θ es el ángulo entre el pseudo fondo formado por las caras de los escalones y la horizontal y g es la aceleración gravitacional.

El resultado de este ajuste se expresa de manera similar a la función de un vertedor liso, sin embargo, se puede notar que cambia el parámetro de rugosidad k_s de Nikuradse por la altura geométrica del escalón en la dirección perpendicular al paramento ($k_s = h \cos\theta$).

Se recuerda que las ecuaciones (1) y (2) fueron deducidas de datos obtenidos con pendientes de canal entre 27 a 53 grados, por lo que debe tener especial cuidado si se quieren aplicar fuera de este rango.

(Iguacel & García, 1999) adoptan un criterio diferente, en el cual para fijar la cota a la que comienza la aireación determinan el escalón en el cual las burbujas de aire permanecen estables dentro del mismo. A la diferencia de cotas del cimacio y la altura media del escalón lo denominaron “ L ”, “ H ” la altura de los escalones en la rápida y “ g ” la aceleración de la gravedad. El caudal unitario “ q ” viene dado en $m^3/\text{seg} \cdot m$.

$$\frac{L}{H} = 5.6 \left(\frac{q}{\frac{1}{3} g^2 H^2} \right)^{0.8} \quad (3)$$

(Matos, 1999) propone las siguientes expresiones válidas para pendientes comprendidas entre 1v:0.7h a 1v:0.8h, basándose en medidas de perfil de velocidad y concentración de aire:

$$\frac{L_I}{k_s} = 6.289F^{0.734} \quad (4)$$

$$\frac{d_I}{k_s} = 0.361F^{0.606} \quad (5)$$

(Chamani M. , 2000) propone una ecuación en la que introduce la pendiente del vertedor en la definición del número de Froude:

$$\frac{L_I}{k_s} = 8.29F^{0.85} \quad (6)$$

(Sánchez Juny, 2001) ajustó una expresión válida para pendiente típicas de presas de CCR, utilizando sus datos obtenidos en laboratorio y los presentados por (Sorensen R. , 1985), (BaCaRa, 1991), (Bindo, Gautier, & Lacroix, 1993), (Tozzi & Brighetti, 1994) y (Lejeune, Lejeune, & Lacroix, 1994):

$$\frac{L_I}{k_s} = 10.2F^{0.7} \quad (7)$$

(Boes & Hager, 2003), definen el punto donde la concentración de aire en el pseudo fondo es igual a 0.01, en base a esto presenta una expresión con una forma distinta a las anteriores, válida para $26^\circ < \theta < 75^\circ$, en esta expresión el caudal se considera como un parámetro importante para la localización de L_I mientras que la altura del escalón (h) tiene una influencia menor.

$$L_I = \frac{5.90q^{6/5}}{(\sin\theta)^{7/5}h^{1/5}} \quad (8)$$

Se puede ver que cuanto mayor es la pendiente del vertedor más aguas arriba ocurrirá el inicio de la inyección de aire en el vertedor.

(Hunt & Kadavy, 2011) optimizan la relación del punto de inyección de Chanson aplicable para vertedores escalonados de cresta ancha con pendientes tan planas como de 14° cuando $1 \leq F \leq 100$, aunque recomiendan validación para pendientes adicionales.

(Meireles, Renna, Matos, & Bombardelli, 2012) basados en la intersección del borde exterior de la capa límite con el desarrollo de la superficie libre indican que el punto de inyección en vertedores escalonados de cresta curva puede ser estimado por medio de las siguientes expresiones:

$$\frac{L_I}{k_s} = 6.75F^{0.76} \quad (9)$$

$$\frac{d_I}{k_s} = 0.35F^{0.59} \quad (10)$$

La posición del inicio de aireación está en función de la descarga, el diseño de cresta, la rugosidad, la geometría de los escalones y de la geometría del canal, esto hace que el análisis del crecimiento de la capa límite donde se presenta el punto de inyección se vuelva difícil (Chanson H. , 1994)

(Chanson H. , 1994) reanaliza las propiedades del flujo en el punto de incepción de los modelos experimentales de la Tabla 1, presentando los resultados como $\frac{L_1}{k_s}$ y $\frac{d_1}{k_s}$ en función del número de Froude (F):

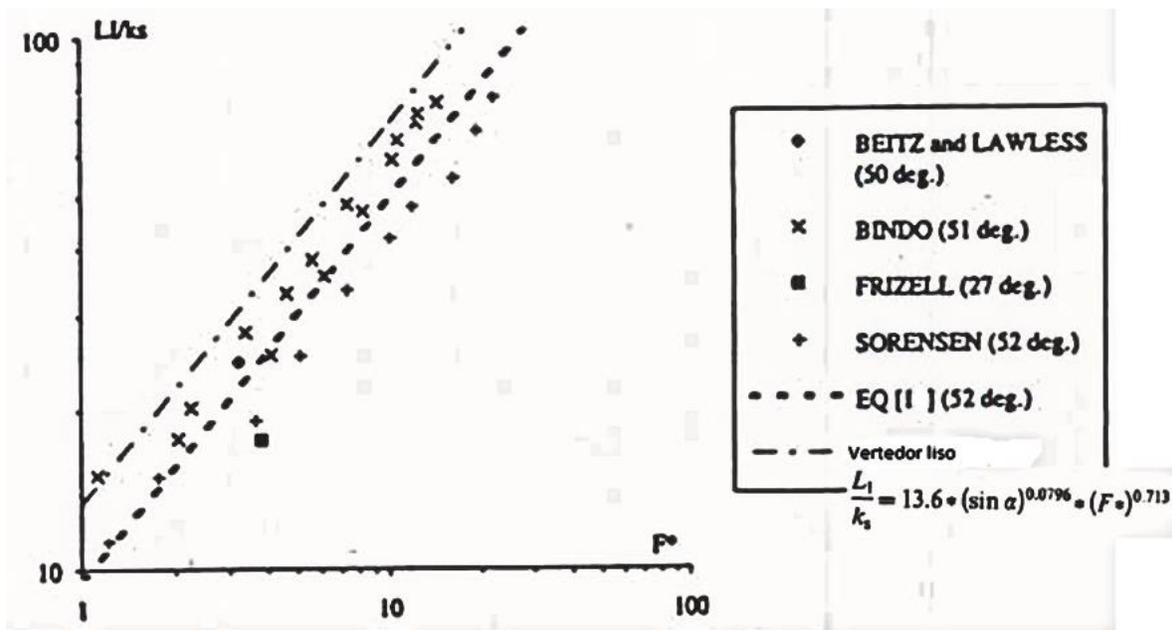


Figura 20. L_1/k_s en función del número de Froude (F) de acuerdo al re análisis de (Chanson H. , 1994) de los modelos de la Tabla 1.

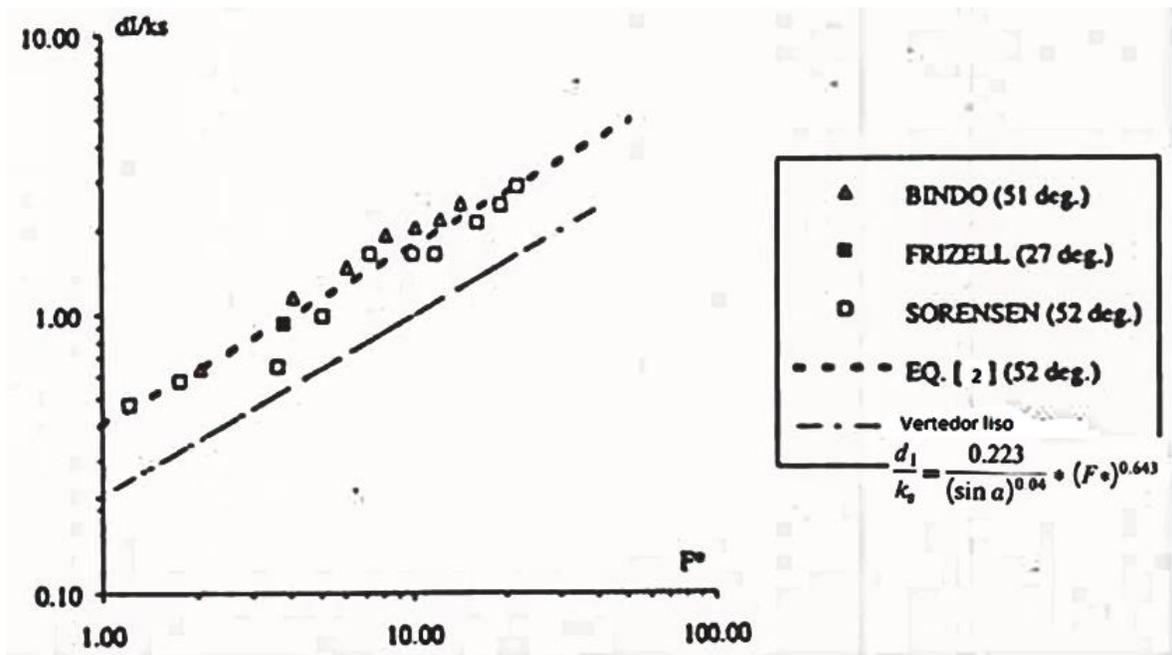


Figura 21. d_1/k_s en función del número de Froude (F) de acuerdo al re análisis de (Chanson H. , 1994) de los modelos de la Tabla 1.

2.3.1 CONCENTRACIÓN DE AIRE

Mediciones realizadas en el punto de inicio de aireación indican que los valores de la concentración media del aire no son nulos. La concentración de aire o relación de vacíos está definida como el volumen de aire no disuelto contenido en un volumen de flujo aire-agua, la mezcla agua-aire que se obtiene por la autoaireación está formada por una masa líquida con burbujas de aire en la parte más profunda y en la parte superior por aire con gotas de agua.

(Wood, 1983) adaptó la siguiente aproximación a vertedores escalonados:

$$\frac{dq_{ar}}{ds} = V_p - \bar{C}v_b \cos \alpha \quad (11)$$

Donde s es la coordenada medida según el pseudo fondo, con origen en el punto de incepción, q_{ar} es el caudal específico de aire:

$$q_{ar} = \frac{\bar{C}}{1 - \bar{C}} q \quad (12)$$

V_p es la velocidad media de penetración del aire a través de la superficie libre en dirección perpendicular al pseudo fondo, v_b es la velocidad ascendente de las burbujas de aire en el seno del fluido, según (Matos, 1999) para vertedores escalonados este valor es igual a $0.49m/s$.

Suponiendo que en un régimen uniforme $\frac{dq_{ar}}{ds} = 0$, y despreciando las variaciones de penetración de aire y ascensional de las burbujas de aire, entonces:

$$\frac{dq_{ar}}{ds} = (\bar{C}_e - \bar{C}(s))v_b \cos \alpha \quad (13)$$

Sustituyendo la ecuación (12) en la ecuación (13) se tiene que:

$$\frac{d(\bar{C})s}{ds} = (\bar{C}_e - \bar{C}(s))(1 - \bar{C}(s))^2 \frac{v_b \cos \alpha}{q} \quad (14)$$

La solución analítica de la ecuación anterior es:

$$\frac{1}{(1 - \bar{C}_e)^2} \ln \frac{1 - \bar{C}(s)}{\bar{C}_e - \bar{C}(s)} - \frac{1}{(1 - \bar{C}_e)(1 - \bar{C}(s))} = k_o s + K_o \quad (15)$$

Donde

$$Ko = \left[\frac{1}{(1 - \bar{C}_e)^2} \ln \frac{1 - \bar{C}_l}{\bar{C}_e - \bar{C}_l} - \frac{1}{(1 - \bar{C}_e)(1 - \bar{C}_l)} \right]_{s=0} \quad (16)$$

Para las ecuaciones anteriores, teniendo un caudal dado y conocidos los valores de \bar{C}_l (concentración media del aire en el punto de incepción), \bar{C}_e (concentración media de aire en equilibrio) y v_b , es posible calcular la concentración media del aire $\bar{C}(s)$ en cualquier sección transversal a lo largo del vector donde el flujo sea gradualmente variado a través de la solución de la ecuación (14) o (15).

(Chanson H. , 1994) determinó que la concentración de aire media puede ser estimada por medio de la ecuación:

$$\bar{C} = 0.9s \sin \alpha \quad (17)$$

Donde α se refiere a la pendiente del canal, esta ecuación puede ser aplicada a pendientes menores de 50° y con régimen uniforme.

Debido a las inadecuaciones del modelo numérico de (Wood, 1983) en la zona donde el flujo es rápidamente variado, (Matos, 1999) propone otro modelo teórico-experimental el cual solo es válido para vertedores con pendientes típicas de presas de CCR, que cerca del punto de incepción ($s' < 30$) arroja mejores resultados de la evolución de la concentración media del aire para $0 \leq s' \leq 3$:

$$\bar{C}(s') = 0.210 + 0.29 \exp(-0.497(\ln s' - 2.972)^2) \quad (18)$$

$$\bar{C}(s') = \left(0.888 - \frac{1.065}{\sqrt{s'}} \right)^2 \text{ para } 30 \leq s' \leq 100 \quad (19)$$

Donde s' es la coordenada adimensional definida como:

$$s' = \frac{L - L_i}{d_i} \quad (20)$$

L corresponde al umbral del vertedor, L_i la distancia del punto de incepción al umbral del vertedor (ecuación (4)) y d_i la altura equivalente del agua al punto de inicio de aireación (ecuación (5)).

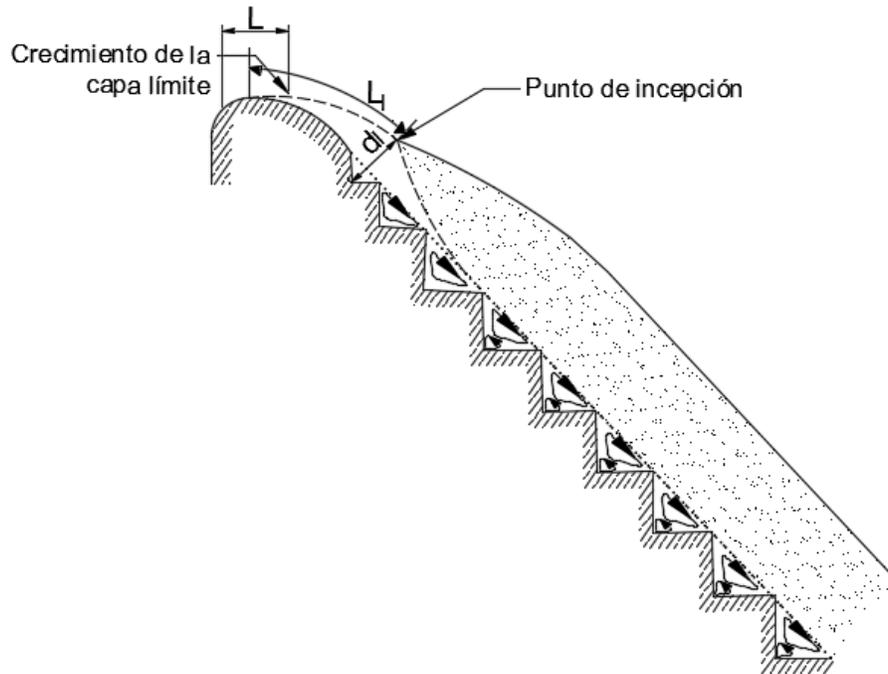


Figura 22. Ubicación de las variables de la Ecuación (20).

(Matos, 1999) también indica que la concentración media del aire en punto de inicio de aireación es igual a 0.20 e independiente del número de Froude, propone la siguiente expresión:

$$\bar{C} = 0.76 \sin \alpha^{0.82} \quad (21)$$

(Chanson H. , 2002a) describe un modelo de difusión turbulenta de las burbujas:

$$\bar{C} = 1 - \tanh^2 \left(K' - \frac{y}{2DY_{90}} \right) \quad (22)$$

Donde “tanh” corresponde a la tangente hiperbólica, K' es una constante de integración que está en función de la concentración media del aire y se obtiene con la siguiente expresión:

$$K' = 0.32745015 + \frac{0.5}{D'} \quad (23)$$

Finalmente, D' corresponde a la difusividad turbulenta adimensional y también está en función de la concentración media del aire:

$$D' = \frac{0.848\bar{C} - 0.00302}{1 + 1.1375\bar{C} - 2.2925\bar{C}^2} \quad (24)$$

(Boes & Hager, 2003) proponen una ecuación para el cálculo de concentración media del aire limitada a condiciones de $26^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$:

$$\bar{C}_l = 1.2 \times 10^{-3}(240^\circ - \theta) \quad (25)$$

La concentración de aire media definida por (González & Chanson, 2007) se calcula como:

$$\bar{C} = \int_0^{Y_{90}} C \cdot dy \quad (26)$$

Donde y es la distancia normal al pseudo fondo e Y_{90} es el tirante correspondiente a una concentración de aire igual a 90% ($C=0.9$).

Como se puede notar a la definición de la profundidad de la mezcla agua-aire, se introdujeron dos magnitudes importantes que son Y_{90} ya definidos en el párrafo anterior y el tirante del flujo aire-agua o profundidad del agua clara d , que se calcula tomando en cuenta la concentración de aire:

$$d = \int_0^{Y_{90}} (1 - C) \cdot dy = (1 - \bar{C}) \cdot Y_{90} \quad (27)$$

La ecuación anterior multiplicada por la velocidad media del agua clara U_w tendrá como resultado el gasto unitario (q_w) medido sobre la cresta del vertedor:

$$U_w = \frac{q_w}{d} \quad (28)$$

2.4 CAVITACIÓN

La cavitación es un serio problema resultado de presiones hidrodinámicas negativas, en la superficie de las obras hidráulicas, como consecuencia de que estas presiones caen por debajo de las presiones de vapor (Boes & Hager, 2003).

En primera instancia, este fenómeno lo que forma es una zona o cavidades de baja presión debido a grandes velocidades, que al pasar súbitamente a un punto de mayor presión genera que las burbujas de vapor que se encuentran en esas cavidades vuelvan a su fase líquida (condensación) en un instante de tiempo tan rápido que provoca que imploten.

En el momento en que las burbujas de vapor implotan la reducción de volumen es del orden de 100 a 1000 veces en milésimas de segundo, si esto sucede cerca de una frontera rígida, al pasar la burbuja del estado gaseoso al líquido inducirá esfuerzos muy altos de hasta 10 000 kg/cm², que al repetirse continuamente hará que el material sometido se desprenda (Arreguín Cortés, 2005).

Las condiciones de cavitación pueden expresarse por medio del número de Thoma:

$$\sigma = \frac{h_p - h_v}{V^2/2g} \quad (29)$$

Siendo σ el índice de cavitación, h_p la carga de presión (m) y h_v la carga de vaporización (m).



Figura 23. Daños por cavitación, Presa Karun, Irán

Para el caso de obras de excedencia, es común aceptar que la cavitación tiene inicio cuando aparecen las primeras manchas blancas sobre la superficie expuesta a flujo de alta velocidad (Echavez, 1979).

En una obra hidráulica puede presentarse erosión por cavitación ante cualquier cambio de dirección, atrás de un obstáculo, o debido a la rugosidad de la superficie sobre la cual ocurre el flujo de alta velocidad. Este último caso puede ser el más crítico, debido a las grandes áreas que sería necesario si se quieren evitar perjuicios, además debe tenerse en cuenta que una vez que el daño se inicia, el mismo sirve de obstáculo para acelerar el proceso de erosión (Arreguín Cortés & Alcocer Yamanaka, 2011).

En un vertedor, las regiones de baja presión puede ser el resultado de la separación del flujo de alta velocidad de la superficie del vertedor. Esta separación puede deberse a diversos factores tales como discontinuidades debidas a las juntas de construcción o a irregularidades de la superficie como protuberancias y depresiones por un mal acabado. También se ha presentado casos de cavitación debido a cambios bruscos de dirección como curvas horizontales y verticales o por cambios de pendiente.

Una alternativa de prevención del daño por cavitación es por medio de la amortiguación de los efectos de colapso de las burbujas por medio de la entrada de aire al flujo, es decir por medio de aireación, para el caso de vertedores escalonados, se pensaba que se encontraba exento de este fenómeno, sin embargo, puede causar severos daños en los escalones.

De acuerdo a (Peterka, 1953) la prevención de daños potenciales por cavitación requiere una concentración media de aire de al menos de 5 a 8%.

(Matos, 1999) basado en las ecuaciones (29) y (10) señala que el índice de cavitación en el punto de incepción de vertedores escalonados es:

$$\sigma_i = 0.064F^{-0.23} \left[1 + \frac{4.762 \left(\frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} \right)}{kF^{0.59}} \right] \quad (30)$$

Donde P_{atm} corresponde a la presión atmosférica en [Pa], P_v es la presión de vaporización del agua en [Pa].

(Matos, Quintela, & Ramos, 2001) proponen una expresión para el parámetro de cavitación en el punto de incepción en vertedores escalonados basados en las características del flujo en ese punto:

$$\sigma_i = 0.094 \cdot \tan\theta^{-1} \cdot F^{-0.182} \left[1 + \frac{42.77/k_s \left(\frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} \right)}{\cos\theta \cdot F^{0.606}} \right] \quad (31)$$

Donde P_{atm} corresponde a la presión atmosférica en [Pa], P_v es la presión de vaporización del agua en [Pa] y γ es el peso específico de agua (N/m^3).

Adicionalmente Matos con base en la expresión de (Arndt, 1977), define el índice de cavitación crítico en el punto de incepción:

$$\sigma_{cr} = 4f \quad (32)$$

Donde f es el factor de fricción de Darcy-Weisbach dado por:

$$f = \frac{8R_h g J}{U^2} \quad (33)$$

R_h corresponde al radio hidráulico $\left(\frac{wd}{w+2d} \right)$, J son las pérdidas de energía por unidad de longitud y U la velocidad.

Sustituyendo la ecuación (33) en la (32) se obtiene finalmente que:

$$\sigma_{cr} = \frac{4}{(1.696 + 0.691 \cdot \log(F))^2} \quad (34)$$

Para pendientes típicas de presas CCR de 1v:0.75h, los gastos específicos máximos para el cual $\sigma_i = \sigma_{cr}$ están comprendidos entre 30 a 20 m^2/s para alturas de escalones entre 0.3 a 1.2m respectivamente.

Es importante mencionar que la aireación necesaria para reducir los daños por cavitación puede darse de dos maneras, de manera natural o de manera inducida.

2.5 MECANISMOS DE AIREACIÓN

La aireación es un procedimiento eficiente y de bajo costo, con este se elimina la preocupación generada por la formación de defectos de la superficie ahorrando la implementación de tratamientos especiales al concreto o el empleo de mezclas especiales.

Algunos investigadores indican que la dispersión de aire inyectado en la región en la que se origina la cavitación es la que limita el crecimiento de las cavidades y provee un efecto amortiguador. Por otro lado, hay quienes establecen que el fuerte incremento en la compresibilidad del líquido permite absorber el impacto debido al colapso de las burbujas evitando el daño de la superficie de la estructura (Gómez Arteaga, 2016).

Queda claro que la presencia de burbujas de aire en un flujo es un recurso útil para prevenir el daño por cavitación.

En las obras hidráulicas con flujos de alta velocidad, el aire contenido en el agua puede ser de manera natural o inducida.

2.5.1 AIREACIÓN NATURAL

Diversos autores han tratado de explicar el proceso de atrapamiento de aire por la alta velocidad de los flujos utilizando la teoría del desarrollo de la capa límite, esta consiste en comparar el espesor de la capa límite con el tirante del flujo, y cuando ambos sean iguales la capa límite habrá alcanzado la superficie del flujo y se iniciará la aireación (punto crítico) o punto de inyección.

(Anderson & Straub, 1960), dividieron el flujo en dos regiones en función de la concentración del aire (c_t), la región inferior consiste de burbujas de aire distribuidas en el flujo por las fluctuaciones turbulentas y la región superior está constituida por una mezcla agua-aire en forma de rocío, ambas regiones están separadas por un tirante de transición (d_t).

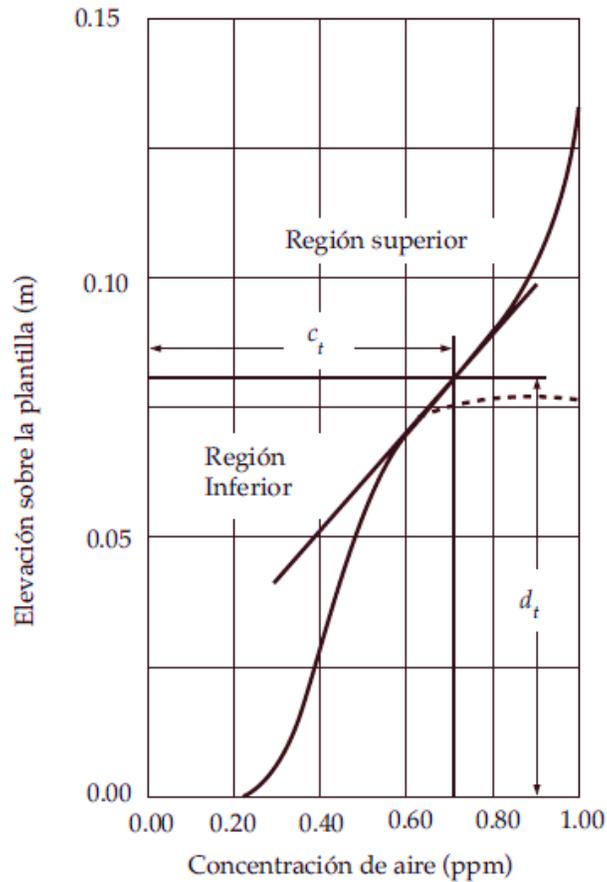


Figura 24. Estructura del flujo aireado de (Anderson & Straub, 1960), tomado de (Arreguín Cortés & Alcocer Yamanaka, Diseño hidráulico de vertedores, 2011).

(Keller, Lai, & Wood, 1974), definieron en tres zonas el perfil del agua según la dirección de la misma, estas zonas pueden estar en:

- Desarrollo con flujo parcialmente aireado
- Desarrollo con flujo totalmente aireado o
- Flujo totalmente aireado

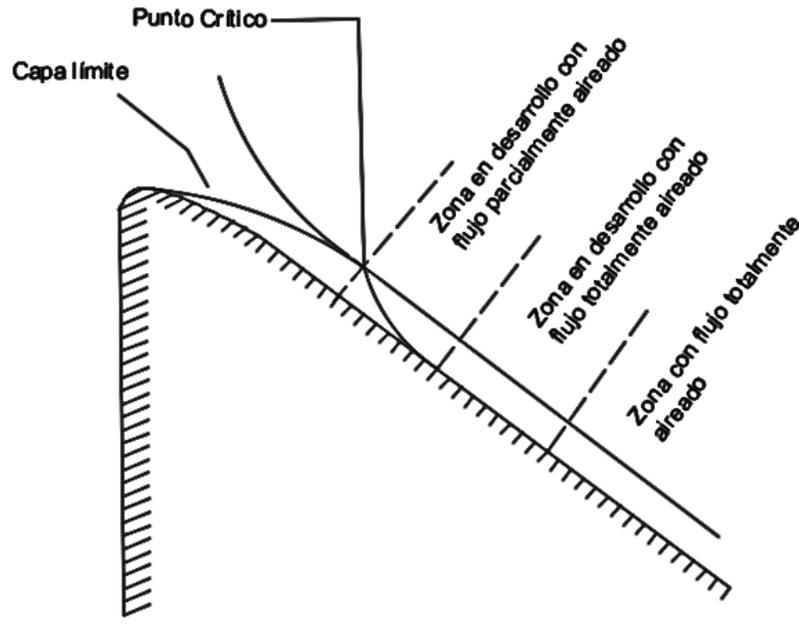


Figura 25. Estructura del flujo aireado.

Esta división es de las importantes ya que una vez determinado el punto crítico, permite conocer la distancia a la cual se tiene una concentración elevada de aire en el agua, lo que permitiera en algún momento dado proteger de forma natural la obra contra la cavitación.

(Levi, 1964) explica mediante la teoría de las estrías longitudinales que la ruptura de los vórtices longitudinales es un factor esencial en el fenómeno de agua blanca, ya que esta no solo provocaría una agitación sino también una mezcla muy fuerte de agua.

(Gangadharaiah, Rao, & Seetharamiah, 1970), desarrollaron las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y de energía para un flujo aireado, y relacionaron la concentración media de aire con el número de Froude, y las pérdidas de carga para un flujo uniformemente aireado.

(Falvey, 1979), relacionó la concentración media de aire con el número de Froude, a partir de un análisis adimensional y utilizando datos de modelo y prototipo.

2.5.2 AIREACIÓN INDUCIDA

Se define como aireación inducida al fenómeno de inclusión de aire por medio de dispositivos artificiales construidos en la obra.

(Paterka, 1953), estudió la relación entre concentración de aire y los daños por cavitación para flujos de 30 m/s y encontró que para concentraciones de aire del orden de 7.40% no se presentan daños en el concreto y para un valor del 2% los daños son pequeños.

Cuando se habla de dispositivos de aireación (aireadores) se deben tomar en cuenta variables de suma importancia en el proceso de inclusión de aire, tales como la velocidad del chorro (v) y la longitud de la cavidad (L) que se forma debajo. Su importancia radica en que las presiones de aire en las cavidades son inferiores que la atmosférica y dicha longitud no es fácil de calcular, ya que la longitud del chorro sufre una depresión disminuyendo como consecuencia el largo de la cavidad.

Existen diferentes geometrías de aireadores, en los que las ranuras, escalones y deflectores o una combinación de ellos son las formas más comunes para lograr la separación del agua de la superficie del vertedor.

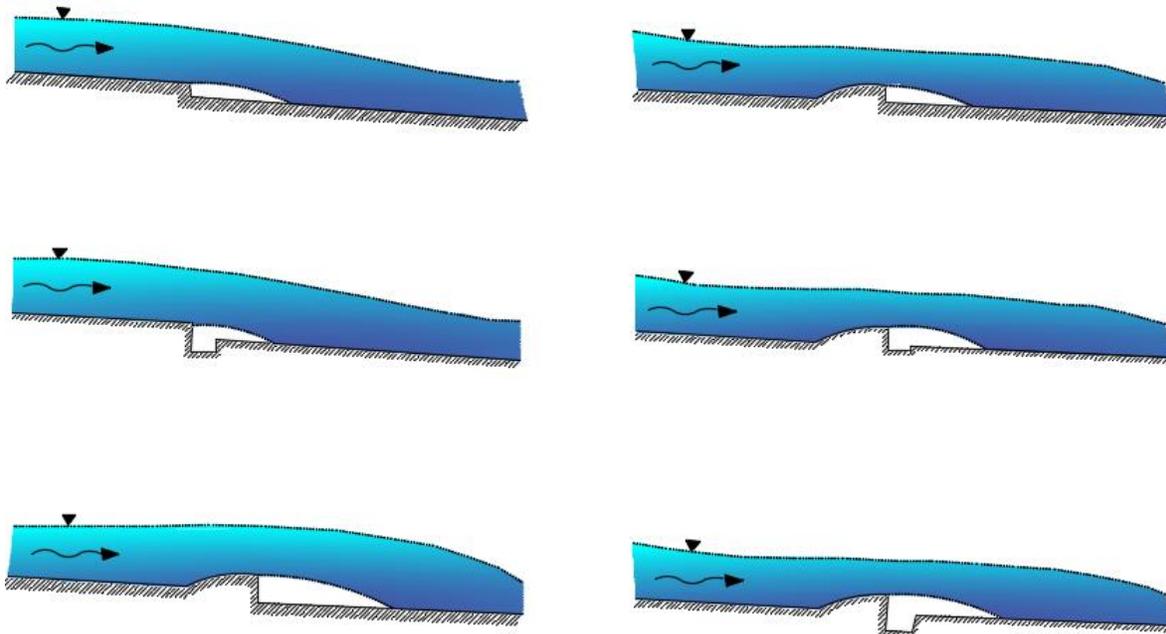


Figura 26. Tipos básicos de aireadores (Pinto, Neidert, & Ota, 1982).

Las ranuras tienen como desventaja que se ahogan con gastos pequeños, provocan áreas expuestas al cortante de poca longitud y su drenaje es deficiente, aunque la construcción de estos es fácil sobre todo en túneles.

Los escalones producen poco disturbio en el flujo sin embargo el área expuesta al cortante es más pequeña que para un deflector

Los deflectores introducen grandes cantidades de aire, son útiles para gastos considerables y su construcción es fácil en obras de servicio y canales a cielo abierto, aunque por otro lado presentan la desventaja de que producen ondas en el flujo.



Figura 27. Aireador de la presa Trigomil, México.

(Volkart & Rutschamann, 1984) describen el funcionamiento de un aireador mediante un modelo que divide el flujo en cuatro zonas.

- Zona de aproximación: corresponde a la zona inmediata al aireador, aquí el flujo puede ser aireado o no aireado dependiendo de las condiciones del flujo aguas arriba.
- Zona de transición: donde está el flujo sobre el deflector del aireador, para el caso de ranuras o escalones esta zona puede reducirse a cero.
- Zona de aireación: que se divide en tres subzonas
 - De turbulencia o cortante: los esfuerzos cortantes que actúan en las líneas inferiores son pequeños y el flujo no es acelerado, pero sí lo suficiente para iniciar el movimiento de aire en la cavidad formada bajo el chorro, se inicia en el labio de la salida del aireador y su final depende de la geometría y condiciones de aproximación.
 - De rocío o spray: se inicia el atrapamiento de aire por parte del flujo, la energía de la turbulencia es mayor que la de tensión.
 - De mezcla: presente en la zona donde se produce el impacto del chorro contra la plantilla del canal.

- Zona de pérdida de aire: se empieza a escapar el aire del flujo debido a la flotación de burbujas.

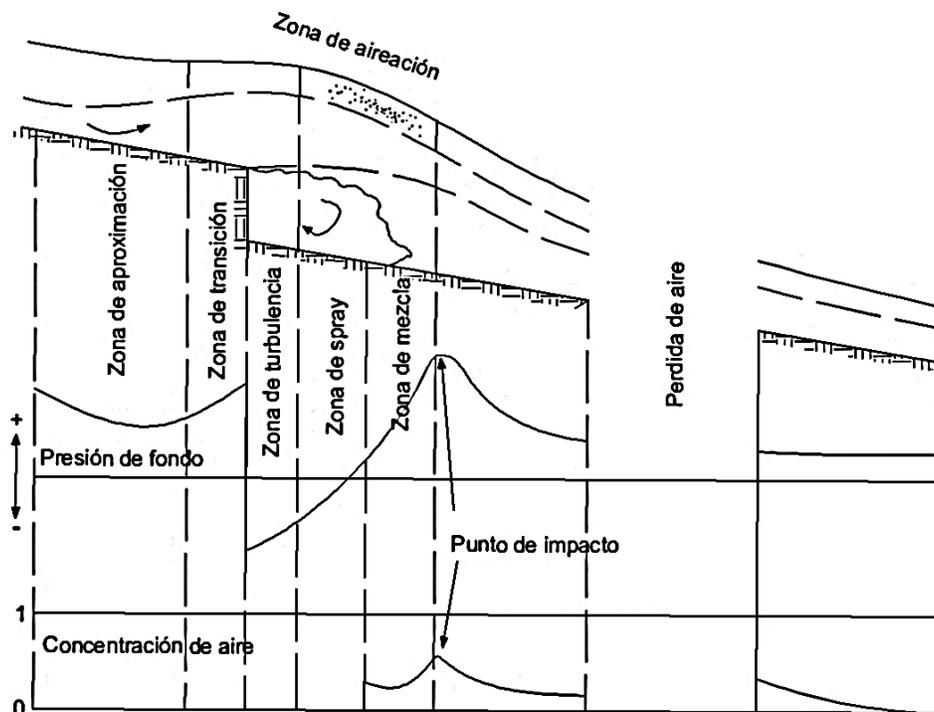


Figura 28. Modelo de (Volkart & Rutschamann, 1984)

(Hamilton, 1980) estableció que la demanda de un aireador q_a , puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$q_a = K_h V_r L_c \quad (35)$$

Donde q_a es el volumen de aire demandado por el chorro, por unidad de tiempo y por unidad de ancho del vertedor, V_r es la velocidad media de la rampa, L_c es la longitud de la cavidad y K_h es una constante cuyo valor define (Hamilton, 1980) entre y 0.01 y 0.03.

2.6 DISIPACIÓN DE ENERGÍA

La disipación de energía es un tema de crucial importancia en estructuras de alivio debido a que es necesario controlar la energía cinética del flujo y garantizar la seguridad de la obra. Las pérdidas en las rápidas lisas resultan sustancialmente menores a aquellas logradas en rápidas con escalones. En estos últimos, la relación de energía disipada con respecto a la energía total disponible depende del tipo de escurrimiento presente (Latessa & Sabarots Gerbec, 2014). Diversos estudios sobre vertedores

escalonados se han centrado en estimar la disipación de energía a lo largo de dichas estructuras, así como determinar el coeficiente de fricción existente en ellas.

Las condiciones sobre un vertedor escalonado se caracterizan por un alto nivel de turbulencia y grandes cantidades de aire son arrastradas. El arrastre de aire es causado por velocidades turbulentas actuando cerca de la superficie libre aire-agua.

Retomando el tema de los tipos de flujo en un vertedor escalonado (saltante, en transición y rasante), cada una tiene formas de disipación diferentes.

La disipación de energía depende de la altura de la presa pudiéndose decir que a mayor altura mayor disipación.

El caudal unitario circulante en relación con el tamaño del escalón es un factor que también influye, en presas de pequeña altura para grandes caudales con pequeños escalones las pérdidas de energía son similares a las de un vertedor convencional.

Una usual evaluación de la capacidad de disipación de energía de un vertedor escalonado es comparar con lo que ocurriría en una rápida lisa con las mismas características de pendiente y altura.

(Rajaratman, 1990) define la proporción de energía disipada por la presencia de escalones (PED_{esc}) con la siguiente expresión:

$$PED_{esc} = \frac{E_{pend}^{lisa} - E_{pend}^{esc}}{E_{pend}^{lisa}} \quad (36)$$

Donde E_{pend}^{lisa} y E_{pend}^{esc} corresponde a la energía específica sobre la solera de una rápida lisa y sobre una la solera de una rápida escalonada respectivamente.

Por otro lado (Pegram, Officer, & Mottram, 1999) calcularon la proporción, pero calculando la energía específica al pie del vertedor (E_1), obteniendo la siguiente expresión:

$$PED_{esc} = \frac{E_1^{lisa} - esc}{E_1^{lisa}} \quad (37)$$

Debido a las pérdidas de energía en la transición del vertedor para el cuenco amortiguador horizontal se tiene que $E_1 < E_{pend}$. Si el resalto hidráulico se forma cerca del pie del vertedor no provocando el anegamiento de la altura inicial y_1 , entonces los valores de E_1 y E_{pend} serán muy próximos.

Considerando que ambas expresiones se pueden comparar los resultados, se observa una importante diferencia en los valores obtenidos. Por ejemplo, para el caso de (Rajaratman, 1990) quien utilizó datos de la presa Monskville de (Sorensen R. , 1985) y asumiendo condiciones de equilibrio en vertedor de 1v:0.78h, obtuvo un valor de $PED_{esc} = 89\%$, (Pegram, Officer, & Mottram, 1999) en un vertedor de pendiente 1v:0.6h determinaron valores de PED_{esc} entre 60 y 54% en condiciones de equilibrio.

De los resultados obtenidos el que se acerca más a la realidad es (Pegram, Officer, & Mottram, 1999), ya que los valores de (Rajaratman, 1990) tiene asociados errores de cálculo de la energía específica con base en la altura característica del flujo (Y_{90}) al no tener en cuenta la aireación del flujo subestimando el valor de la misma.

2.7 VENTAJAS DE LOS VERTEDORES ESCALONADOS

- Son económicos debido al proceso constructivo (CCR) y el tiempo de construcción es menor.
- Tienen mayor disipación de energía del flujo al pasar por lo largo de los escalones en comparación de un vertedor liso.
- Disminuyen los problemas de cavitación.
- La dimensión del tanque de amortiguamiento es menor con relación al de vertedor liso.
- Recientemente el arrastre de aire en vertedores escalonados ha sido reconocido tanto por su contribución a la transferencia aire-agua de gases atmosféricos tales como oxígeno y nitrógeno. Este proceso debe tomarse en cuenta ya que contribuye a la re-oxigenación de ríos y arroyos contaminados (Wilhelms & Gulliver, 1989).

2.8 DESVENTAJAS DE LOS VERTEDORES ESCALONADOS

- Su aplicación se limita a cortinas de alturas máximas alrededor de los 70m.
- La naturaleza altamente turbulenta y el gran contenido de aire en el flujo sobre dichas estructuras no han permitido el desarrollo de un modelo analítico confiable para predecir sus características, por lo que el análisis de dicho flujo debe hacerse por medio de modelos experimentales.

CAPÍTULO 3

MODELACIÓN HIDRÁULICA

3.1 GENERALIDADES

Muchos de los fenómenos físicos que ocurren en la naturaleza y dentro del campo de la hidráulica son tan complejos que no es fácil tratarlos únicamente con métodos matemáticos, por lo que para obtener soluciones prácticas se conviene a recurrir al empleo de técnicas experimentales como herramientas aplicadas a problemas de ingeniería y obras hidráulicas en general (Vergara Sánchez, 1995).

Los modelos hidráulicos permiten atacar problemas donde no hay métodos analíticos o numéricos adecuados. Generalmente esto ocurre en tres casos:

- Problemas en los que intervienen simultáneamente varios efectos en el escurrimiento,
- Cuando el escurrimiento es tridimensional y
- Cuando se tienen presentes problemas con condiciones de frontera complicada.

Actualmente, casi todas las obras hidráulicas tales como presas, puertos, obras fluviales o marítimas, requieren estudios en modelo los cuales permiten al diseñador probar su funcionamiento, detectar problemas, así como realizar los cambios necesarios antes de iniciada la obra.

En hidráulica, el término modelo corresponde a un sistema que simula un objeto real llamado prototipo, mediante la entrada de cierta información que se procesa y presenta en forma adecuada para emplearse en el diseño y operación de obras de ingeniería.

Por tanto, un modelo físico a escala reducida, al cual se denomina modelo hidráulico, representa a escala al objeto real o prototipo, por ejemplo, un fenómeno, una estructura o una máquina, y cumple ciertas condiciones matemáticas definidas.

Los principios en que se basa la modelación incluyen las teorías de similitud hidráulica, el análisis de las relaciones básicas de las diversas cantidades físicas incluidas en el movimiento y la acción dinámica del fluido denominada análisis dimensional.

Actualmente se disponen de técnicas avanzadas en la modelación física de fenómenos hidráulicos las cuales, junto con el desarrollo de instrumentos de medición y equipos generadores de fenómenos a escala, permiten predecir con alto grado de certidumbre lo que pueda ocurrir en el prototipo y así obtener resultados óptimos en los aspectos de

funcionalidad, estabilidad y economía de las estructuras futuras. Lo anterior justifica ampliamente la utilización de los modelos hidráulicos.

3.2 HISTORIA DE LA MODELACIÓN FÍSICA

Es muy posible que en la antigüedad se hayan hecho reproducciones de barcos o incluso de obras de riego y drenaje, pero estas no pasaban de ser maqueta que, a falta de leyes de similitud, únicamente darían indicaciones cualitativas del comportamiento real del problema.

No fue hasta Galileo Galilei que en su publicación “Diálogos acerca de dos ciencias nuevas” hace notar que un cambio en el tamaño de un hombre, animal u objeto, implica diferentes cambios en su peso, vigor o resistencia por mencionar algunas propiedades, es decir, que cada propiedad se escala de acuerdo con una ley específica que depende de la naturaleza del problema y de la propiedad que interese.

Antes que Galileo, a mediados del siglo XVI, el italiano Juanelo Turriano fue encargado de construir un artificio para elevar el agua del Tajo a la ciudad de Toledo, para realizar esto hizo previamente un modelo pequeño, finalmente acabó la construcción de dos artificios, el segundo mayor que el primero capaz de elevar casi cien metros a 16 000 litros de agua por día, desde una distancia de 600 metros.

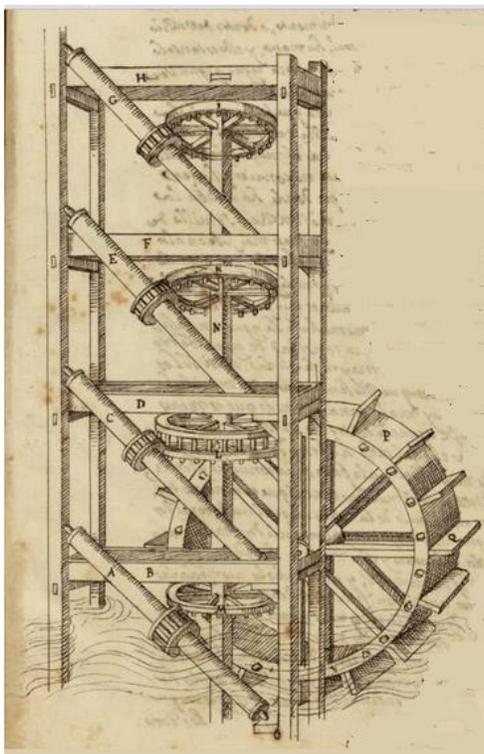


Figura 29. Modelo reducido del artificio de Juanelo Turriano para subir agua, siglo XVI.

Dos siglos después, en 1759, el ingeniero inglés John Smeaton, presentó un artículo donde, por primera vez, se describe un estudio en modelo de comportamiento de una rueda de paletas movida por agua.

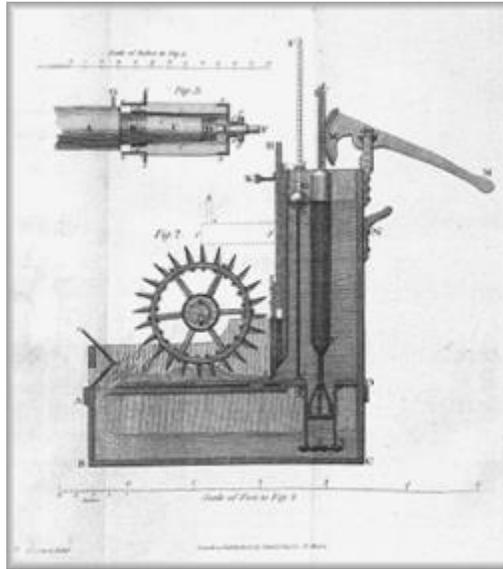


Figura 30. Dibujo del modelo de John Smeaton para estudiar el funcionamiento de la rueda hidráulica.

En la segunda mitad del siglo XVIII, un grupo integrado por los franceses Jean Charles Borda, Charles Bossut y Pierre Pouis Georges Dubuat, continuaron utilizando modelos para estudiar diversos problemas hidráulicos, en 1852 el francés Ferdinand Reech recomendaba hacer pruebas en modelo y, en sus cursos, presentaba la ley de semejanza cuando el efecto dominante es la gravedad, o sea el criterio conocido como ley de Froude.

Se realizaron algunos intentos para formular leyes básicas de similitud, estas fueron en Inglaterra, William Froude en conjunto con su hijo Robert Edmund hicieron experimentos para encontrar la resistencia al avance de los barcos y, en la misma época, Osborne Reynolds encontró y aplicó escalas de semejanza en sus experimentos hechos en 1885 sobre el río Mersey.

Finalmente, después de mediados del siglo XIX, quedó fuera de duda la capacidad predictiva y la utilidad de los modelos físicos en la hidráulica, como consecuencia de esto se establecieron laboratorios especializados en todo el mundo, donde se ensayan las obras propuestas por los proyectistas para verificar su funcionamiento en diversas condiciones de escurrimiento, pudiendo modificar y corregir lo que haga falta, incluso se prueban las teorías novedosas que los investigadores vayan desarrollando en el día a día.

El empleo de los modelos se inicia en México en la década de 1930.

3.3 APLICACIÓN Y APORTE DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

En hidráulica, la modelación se usa para la simulación de situaciones reales que se producen en el prototipo y cuyo comportamiento se desea conocer; puesto que modelo y prototipo están ligados el uno con el otro, las observaciones y estudio del modelo constituyen la información necesaria para comprender la naturaleza del prototipo, debiendo para ello, estar ambos relacionados.

Debido a que las simulaciones se producen bajo condiciones controladas de laboratorio los modelos hidráulicos tienen múltiples aplicaciones.

Los modelos hidráulicos se utilizan para la solución de problemas relacionados con las estructuras hidráulicas, fenómenos de infiltración, tramos de ríos y transporte de sedimentos, este último es reciente.

Es importante destacar que la modelación hidráulica al lograr representar el flujo de manera tridimensional de un río o a través de una estructura o suelo con mayor fidelidad y detalle que un simple cálculo teórico, aumenta la confiabilidad de las estructuras proyectadas. Esto significa que los diseños se ajustan más al comportamiento real del flujo, lo cual tiene un importante impacto económico. Por un lado, se disminuye el riesgo de diseñar una obra poco resistente que colapse fácilmente con las consecuentes pérdidas económicas o lo que es peor, en vidas humanas; mientras que por otro lado también se reduce la posibilidad de un diseño sobredimensionado que requiera de inversiones innecesarias. En otras palabras, la modelación hidráulica constituye una importante herramienta de optimización para el diseño de obras hidráulicas.

Los modelos se plantean cuando conduzcan a una solución más económica y segura o cuando sean imprescindibles. Se han visto casos en los cuales, por no realizar un modelo, el prototipo, que es muy costoso comparándolo con el modelo, ha quedado inutilizado en un tiempo relativamente corto al no poder prever los fenómenos con anticipación y corregirlos de antemano. En este sentido, hay que tomar conciencia de la necesidad de hacer un modelo hidráulico cuando las circunstancias así lo ameriten.

Existen diversas situaciones en las cuales es posible recurrir a modelos físicos como una forma de investigar, bajo condiciones relativamente simples, seguras y controlados ciertos tipos de fenómenos más básicos que sería muy difícil o costoso investigar directamente en el prototipo.

Es conocido que en la hidráulica no todos los fenómenos pueden ser descritos completamente en forma matemática, especialmente aquellas que involucran la interacción con las partículas sólidas; como por ejemplo la erosión local en una

estructura de forma complicada. Para esos casos, la modelación física sigue siendo aún una herramienta poderosa de análisis y en esto radica la importancia de la investigación en modelos físicos, principalmente en lo concerniente a la hidráulica donde existe un gran avance, pero donde el cálculo hidráulico no ha alcanzado la técnica suficiente para sustituirlos, resultando su uso cada vez más frecuentes.

3.4 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS

3.4.1 MODELOS FÍSICOS

Es la simulación física de un fenómeno hidráulico, que ocurre en relación con una obra de ingeniería, en un sistema semejante simplificado que permite observar y controlarlo con facilidad, además de confirmar la validez del diseño de la obra, optimizarla o tomar nota de los efectos colaterales, que deberán ser considerados durante la operación misma.

Según las características propias de los modelos estos pueden ser clasificados como sigue:

A. Clasificación respecto de la semejanza geométrica con el prototipo

Modelos geoméricamente semejantes:

Son aquellos en los que se conserva la semejanza de todas las variables geométricas, existe un único factor de reducción o amplificación denominado escala, que incluye todas las magnitudes geométricas y las que se derivan de ellas, así como la igualdad de ángulos correspondientes entre el modelo y el prototipo, es decir, la escala de magnitudes lineales horizontales, verticales e inclinadas son iguales.

Modelos geoméricamente distorsionados:

Se conserva la semejanza con el prototipo, pero los factores a usar de reducción o ampliación son distintos para diferentes dimensiones del mismo, es frecuente que las dimensiones horizontales tengan una escala o factor diferente de las dimensiones verticales.

Las causas que ocasionan la distorsión son diferentes, siendo entre otras:

- Rugosidad. Cuando la rugosidad necesaria a representar es tan pequeña que físicamente es imposible de conseguirla.
- Flujo. Cuando el tipo de flujo en el modelo no corresponde al prototipo.

- Disponibilidad de espacio. Es decir, cuando el modelo resulte muy grande respecto a la superficie disponible, lo que significa aumentar numéricamente las escalas de líneas, que a su vez implica reducir la escala de las magnitudes verticales, como consecuencia la influencia de otros fenómenos será más notoria, por ejemplo, el caso de la tensión superficial que en el prototipo es de consideración.
- Equipos de medición. Es caso de disponer o construir equipo de medición, cuyas proporciones no permiten obtener la información correcta.

B. Clasificación respecto de la movilidad y deformabilidad del fondo

Modelos de fondo fijo:

Hay casos en que la deformabilidad del fondo no es relevante al fenómeno estricto, por tanto, puede representarse simplificada en el modelo como si fuera fijo o indeformable. Se emplean para reproducir fenómenos en donde la variación de niveles y las velocidades del flujo son parámetros determinantes.

Modelos de fondo móvil:

Existen situaciones en que el modelo debe representar el fondo móvil en una forma fiel y confiable, ya que los fenómenos que ocurren vienen determinados por la movilidad y deformabilidad de la sección. El modelo puede tener sólo lecho móvil y bordes fijos, o bien tener el lecho móvil por zonas.

3.4.2 MODELOS ANALÓGICOS

Es la reproducción de un fenómeno en estudio de un prototipo en un sistema físico diferente al original (modelo), pero que aprovecha la similitud de las leyes matemáticas que gobiernan el fenómeno en ambos sistemas. Su uso no es muy frecuente en la actualidad.

Es común que uno de los dos fenómenos sea de menor dificultad, por lo que éste se emplea para resolver el otro. Lo anterior ofrece una posibilidad de resolver problemas hidráulicos basándose en mediciones hechas sobre un fenómeno análogo, siendo los más comunes:

- Analogía entre un flujo a través de medios permeables y flujo laminar en capas delgadas (Modelos de Hele-Shaw).
- Analogía entre flujo laminar y flujo turbulento.
- Analogía entre un flujo a través de medios permeables y la deformación de una placa elástica bajo carga.
- Analogía eléctrica y otros fenómenos físicos (como hidráulicos, mecánicos, etc.).

3.4.3 MODELOS MATEMÁTICOS

Son aquellos que representan de una manera simplificada el fenómeno que ocurre en el prototipo por medio del uso de ecuaciones o expresiones matemáticas.

Son tres los modelos matemáticos:

- Modelos determinísticos. Los procesos físicos involucrados se expresan a través de relaciones funcionales determinísticas en los que no se considera la probabilidad de ocurrencia del fenómeno.
- Modelos estocásticos. Los procesos físicos se representan haciendo uso de variables aleatorias que involucran el fenómeno en estudio.
- Modelos de simulación numérica. Son modelos en los que se emplea, principalmente, ecuaciones diferenciales y condiciones iniciales de frontera, que son resueltos utilizando técnicas de análisis numérico, tales como métodos de diferencias finitas y elementos finitos. Ambos métodos resuelven las ecuaciones que tienen dominio continuo mediante la solución en un número finito de puntos discretos en dicho dominio, llamados nodos. Cuando los valores buscados (tirante, velocidad, etc.) en dichos puntos discretos son encontrados, la solución en cualquier otro punto puede ser aproximada mediante métodos de interpolación.

El método de elementos finitos hace discreto el medio en el que tiene lugar el fenómeno en estudio utilizando por lo común una red de triángulos, en cambio el método de diferencias finitas utiliza una red de rectángulos, el cual es menos complicada y proporciona una descripción suficiente de los contornos.

Algunas diferencias entre los modelos físicos y los modelos matemáticos vienen dadas principalmente por las limitaciones a la que se ven sometidas durante su ejecución, por lo general, los modelos físicos son deseables para investigar configuraciones locales del flujo mientras que los modelos numéricos son deseables para simular procesos de flujo a gran escala.

En la Tabla 2 se hace una comparación de las limitaciones existentes entre los modelos físicos y los matemáticos:

MODELOS FÍSICOS	MODELOS MATEMÁTICOS
Tamaño del modelo (espacio en el laboratorio)	Capacidad de almacenamiento en la memoria de la computadora
Caudal de bombeo	Velocidad del cálculo
Carga hidráulica (capacidad de bombeo)	Conjunto incompleto de ecuaciones
Leyes de similitud	Hipótesis de turbulencias
Escala mínima del modelo (tensión superficial, viscosidad, rugosidad)	En ecuación de simplificación: <ul style="list-style-type: none"> • Exactitud de relaciones supuestas • Disponibilidad de coeficientes
Tamaño del modelo (límite superior)	Resolución espacio-tiempo (límite inferior)
Método de medida y recolección de datos	Estabilidad numérica, convergencia del cálculo numérico

Tabla 2. Principales limitaciones en los modelos físicos y matemáticos.

3.5 BASES TEÓRICAS DE LA MODELACIÓN FÍSICA

La base teórica de la modelación está constituida por la similitud en conjunto con el análisis dimensional. El análisis dimensional es una técnica que ha probado ser muy útil para reducir al mínimo el número de experimentos requerido, no produce soluciones analíticas de los problemas, pero proporciona información acerca de la forma de las relaciones que guardan entre sí las variables pertinentes, y sugiere el modo más efectivo de agrupar estas variables entre sí, dando lugar a las leyes de semejanza.

En relación cercana al análisis dimensional, se encuentra el concepto de similitud que es la condición por la cual las variables características, en el modelo y en el prototipo, guardan perfecta correspondencia; gracias a ellas las observaciones efectuadas en el modelo pueden ser utilizadas para predecir el comportamiento del prototipo y viceversa.

3.6 ANÁLISIS DIMENSIONAL

El requisito de la homogeneidad dimensional impone condiciones sobre las cantidades implicadas en un fenómeno físico, y así provee valiosos indicios acerca de las relaciones que conectan entre sí sus magnitudes. La búsqueda correcta de estas relaciones se llama análisis dimensional.

(Echavez Aldape, 1996) define el análisis dimensional como una técnica que da información utilizando las dimensiones de las variables que intervienen en un problema.

En general, las magnitudes físicas se clasifican en dos grupos: las básicas o fundamentales y las derivadas o secundarias. Al primer grupo corresponden la longitud (L), masa (M), y tiempo (T). Al segundo grupo corresponden el área (A), volumen (V), velocidad (v), gasto (Q), fuerza (F) o cualquiera otra (X) en función de las primeras, es decir:

$$[X] = f(L, M, T) \text{ ó } [X] = [L^{x_1} M^{x_2} T^{x_3}] \quad (38)$$

Siendo el exponente $x_i = (i = 1, 2, 3)$ la dimensión de la magnitud fundamental respectiva, esta representación para cualquier magnitud derivada se llama ecuación dimensional.

En ingeniería el uso del análisis dimensional es frecuente en la verificación de fórmulas, comprobando que las unidades de los dos lados de la ecuación sean iguales, y en la transformación de fórmulas de un sistema de unidades a otro, usualmente del inglés al métrico o al sistema internacional. Además, permite reducir el número de variables de un problema, simplificándolo en forma importante, ya que la información crece geoméricamente con cada nueva variable.

Los resultados obtenidos en el análisis dependen de qué cantidades se consideran al principio que afectan al fenómeno que se está estudiando.

El análisis dimensional no proveerá por sí mismo una solución completa a un problema, pero la solución parcial que proporciona, indicará que cualquiera que sea la forma de una relación desconocida que conecta las magnitudes implicadas, ciertas características de ésta son necesarias. Además, la técnica puede guiar al experimentador de modo que pueda obtener la cantidad máxima de información a partir del menor número de experimentos

3.7 ANÁLISIS DE SEMEJANZA O SIMILITUD

Para asegurar que el modelo represente adecuadamente al prototipo, es necesario que aquel sea mecánicamente similar con éste, es decir, exista similitud geométrica, cinemática y dinámica, además de las similitudes relacionadas con los sedimentos.

3.7.1 SIMILITUD GEOMÉTRICA

Esta similitud es independiente de la clase de movimiento y contempla sólo similitud en la forma. La propiedad característica de los sistemas geoméricamente similares, ya sea figuras planas, cuerpos sólidos o modelos de flujo, es que la relación de cualquier longitud en el modelo con respecto a la longitud correspondiente en el prototipo, es en

todas partes igual (homólogas). Así, la relación de tirantes, anchos, distancias, etcétera, correspondientes debe ser constante.

Esta relación de longitud entre modelo y prototipo se conoce como factor de escala y puede expresarse como sigue:

$$Lr = \frac{LM}{LP} \quad (39)$$

Siendo LM las dimensiones lineales correspondientes en modelo, LP las correspondientes a prototipo y Lr el factor de escalas.

La similitud geométrica es quizá el requisito más obvio en un sistema modelo proyectado para corresponder a un sistema prototipo dado. Sin embargo, la similitud geométrica perfecta no siempre es fácil de obtener. No sólo debería ser la forma general del modelo geoméricamente similar a la del prototipo, sino que también deberían ser geoméricamente similares las inevitables rugosidades de la superficie.

En un modelo pequeño la rugosidad superficial podría no ser reducida de acuerdo con el factor de escala, a menos que las superficies del modelo se pudieran hacer mucho más pulidas que las del prototipo.

La siguiente figura ejemplifica la similitud geométrica.

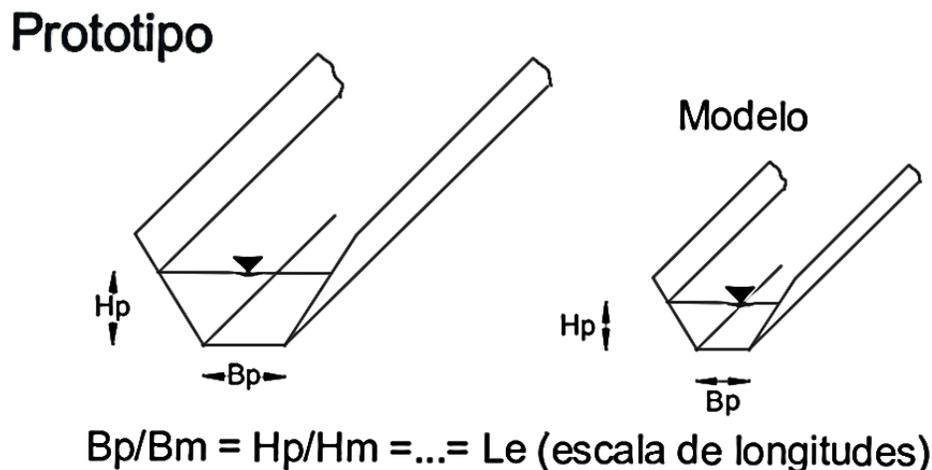


Figura 31. Ejemplificación de semejanza geométrica.

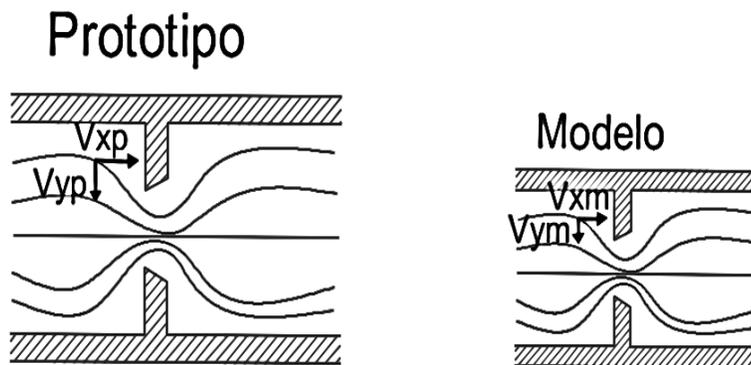
3.7.2 SIMILITUD CINEMÁTICA

La similitud cinemática implica similitud en el movimiento. Esto implica similitud de longitud (similitud geométrica) y en adición similitud de intervalos de tiempo. Entonces, ya que las longitudes correspondientes se encuentran en una relación fija, las velocidades de las partículas correspondientes deben estar en una relación fija de magnitudes de tiempos correspondientes. Es decir, hay semejanza cinemática si los componentes de la velocidad, de todos los puntos correspondientes, son semejantes geoméricamente.

Si la relación de longitudes correspondiente es L_r y la relación de intervalos de tiempo correspondiente es T_r , entonces las magnitudes de las velocidades correspondientes están en la relación:

$$V_r = \frac{L_r}{T_r} \quad (40)$$

Cuando los movimientos de los fluidos son cinemáticamente similares, los patrones formados por líneas de corriente son geoméricamente similares en los tiempos correspondientes. Ya que los límites consisten de líneas de corriente, los flujos cinemáticamente similares sólo son posibles a través de límites geoméricamente similares.



$$V_{xp}/V_{xm} = V_{yp}/V_{ym} = V_{zp}/V_{zm} = \dots = V_e \text{ (escala de velocidades)}$$

Figura 32. Ejemplificación de semejanza cinemática.

3.7.3 SIMILITUD DINÁMICA

La similitud dinámica entre dos sistemas geométrica y cinemáticamente similares, requiere que la razón de todas las fuerzas homólogas (incluyendo la fuerza de inercia) en los dos sistemas sea la misma.

En la similitud dinámica, al igual que en la similitud geométrica, existen escalas de velocidades, de fuerzas, viscosidades, etcétera, que miden la relación entre las características de los flujos o propiedades de los fluidos utilizados en los mismos y referidas a dos puntos R homólogos, que se designaran con los símbolos correspondientes pero añadiendo el subíndice e (escala), por ejemplo, ρ_e, μ_e, v_e que se refieren a las propiedades de los fluidos que se utilicen en el prototipo y el modelo.

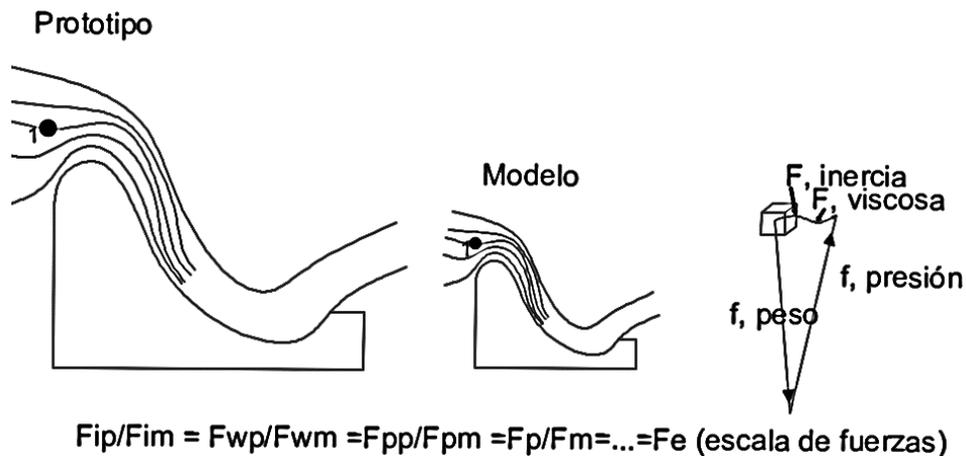


Figura 33. Ejemplificación de semejanza dinámica.

El movimiento de un fluido se explica por las ecuaciones de movimiento que consideran a las fuerzas por unidad de masa más importantes que intervienen en el flujo. Sin embargo y según el problema particular que se requiera estudiar, cada fenómeno se caracteriza por la importancia de una fuerza determinada cuya influencia es predominante en el movimiento y que prácticamente elimina a las restantes, ejerciendo su acción sobre la fuerza de inercia.

3.7.4 APLICACIÓN DE LAS LEYES DE SEMEJANZA AL DISEÑO DE MODELOS FÍSICOS

Como se ha dicho con anterioridad la experimentación en modelos hidráulicos está basada en la aplicación de un conjunto de relaciones conocidas con el nombre de leyes de semejanza, las cuales se han derivado del análisis dimensional y expresan las relaciones entre los distintos parámetros que gobiernan el comportamiento de un fluido.

Debido a razones prácticas no se puede asegurar una similitud mecánica total tanto en el modelo como en su prototipo. El conjunto de leyes de semejanza que aseguran esta similitud no podrá ser aplicado a los fines de diseño de los modelos por resultar incompatibles. El hecho de que normalmente se use el mismo fluido (agua) en el modelo y en el prototipo ya impide lograr una semejanza hidráulica completa.

Como consecuencia de lo anterior, la mayoría de los modelos físicos se diseñan aceptando que cumplan sólo de manera aproximada las condiciones de similitud mecánica, por lo que lo usual es imponer una condición de similitud dinámica, por ejemplo, aquella asociada a la fuerza predominante del fenómeno, despreciando las demás condiciones.

Es así como un modelo físico cumple normalmente con la semejanza de Reynolds, Froude Weber o de Mach. Sin embargo, esto introduce errores o desviaciones que se han de tener en cuenta en la reproducción del fenómeno, conocidos como efectos de escala. Por tal motivo, el diseño debe apuntar a minimizar estos efectos que se traduce en imponer límites en la escala adoptada.

3.7.5 LEYES DE SEMEJANZA CONDICIONANTES AL DISEÑO

Para poder determinar que las condiciones de diseño de un modelo sean dinámicamente semejantes con su prototipo es importante la interpretación dada a los números adimensionales o leyes de semejanza en donde existe una relación entre la fuerza de inercia y la fuerza específica asociada a una propiedad del fluido o del flujo, y al concepto de semejanza planteado como la constancia de dichos números en la transformación de la escala en un modelo físico.

3.7.5.1 MODELOS A SEMEJANZA DE EULER

Rige aquellos fenómenos donde los cambios de presión (Δp) son predominantes, este parámetro tiene gran importancia en fenómenos de flujo ocasionados por un gradiente de presiones donde la densidad y la aceleración del fluido intervienen primordialmente en el fenómeno y las fuerzas viscosas pierden importancia, es decir, el movimiento depende de la forma del flujo, con una configuración prácticamente sin variación en las líneas de corriente. Lo anterior puede observarse en problemas de flujo a presión como tuberías, orificios, válvulas, etcétera. Se expresa de la siguiente manera:

$$Eu = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerza de presión}} = \frac{\rho v^2}{\Delta p} \quad (41)$$

3.7.5.2 MODELOS A SEMEJANZA DE FROUDE

El número de Froude representa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitatorias, por tanto, para aquellos prototipos en que los fenómenos están, principalmente, determinados por fuerzas gravitacionales se acepta que la condición de semejanza dinámica esté dada para el modelo $Fr = 1$, siendo Fr la relación de los números de Froude entre modelo y prototipo, lo que implica que las demás escalas estarán gobernadas por esta relación.

$$Fr = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza gravitacional}} = \frac{v}{\sqrt{gl}} \quad (42)$$

A medida que aumenta el número de Froude, mayor es la reacción inercial de cualquier fuerza, por lo contrario, si disminuye, mayor es el efecto de la fuerza gravitacional.

Este tipo de modelación es aplicable a flujos con superficie libre, particularmente, cuando el escurrimiento es bruscamente variado donde los efectos friccionales son despreciables.

Cuando el flujo es horizontal, la acción del peso desaparece y con ella la influencia del número de Froude.

3.7.5.3 MODELOS A SEMEJANZA DE REYNOLDS

El número de Reynolds expresa la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de fricción interna, debido a la viscosidad. La condición de semejanza viene expresada por $Re = 1$, siendo Re la relación de los números de Reynolds entre modelo y prototipo.

$$Re = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza viscosa}} = \frac{vl}{\nu} \quad (43)$$

Un número de Reynolds grande indica una preponderancia marcada de las fuerzas de inercia sobre las viscosas. Se usa a menudo como criterio de semejanza en la prueba de modelos de naves aéreas, cuerpos sumergidos en un flujo, medidores de gasto, etcétera, en los cuales las características del flujo están sujetas a efectos viscosos.

3.7.5.4 MODELOS A SEMEJANZA DE WEBER

El número de Weber expresa el efecto de la tensión superficial entre líquidos y gases y entre dos líquidos; por ser la fuerza de origen molecular, la fuerza resulta significativa sólo cuando las dimensiones del flujo son pequeñas.

Raramente se emplea en las pruebas con modelos, ya que los efectos de la tensión superficial en la mayoría de los flujos líquidos raramente afectan al flujo y en los modelos de ríos, por ejemplo, estos deben ser lo suficientemente grandes para minimizar la influencia de dicha fuerza.

$$We = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza de capilaridad}} = \frac{v}{\sqrt{\frac{\sigma}{\rho l}}} \quad (44)$$

3.8 EFECTOS DE ESCALA

Al no darse las condiciones de completa semejanza mecánica, pueden aparecer “efectos de escala” en los modelos donde en razón de la magnitud de la transformación adoptada existen fuerzas que cobran importancia, fundamentalmente, las fuerzas moleculares que son, por lo general, insignificantes en el prototipo y que, en cambio, por el reducido tamaño del modelo se hacen relevantes los fenómenos observados en éste.

En general los efectos de escala pueden ser pequeños, pero en conjunto estos ya no son tan insignificantes.

Las fuerzas que se asocian principalmente con los efectos de escala son las fuerzas capilares derivadas de la tensión superficial y las fuerzas viscosas o de fricción interna, debido a esto en el diseño del modelo se deben considerar ciertos límites para evitar o minimizar estos efectos de escala.

En el estudio de un vertedor, la fuerza principal de estudio está designada por sus efectos predominantes, como es el caso de flujos a superficie libre generalmente la fuerza gravitacional es la dominante y es la que origina que el fluido se desplace a lo largo de la rápida (escalonada o lisa) definiendo su comportamiento en todo su recorrido.

(Mateos & García, 1999) establecen que para el caso de un modelo de rápida escalonada y dada la intensa agitación de este tipo de flujos, es adecuado utilizar una semejanza de Froude, vigilando únicamente que el número de Weber sea suficientemente alto.

Estos mismos autores recomiendan utilizar modelos con tamaño de los escalones igual o superior a 4.5 cm, con la finalidad de que los errores por efecto de escala sean inferiores al 5% y del lado de la seguridad, más aún para valores del número de Weber superiores a 40, que generalmente es el caso cuando se pretenden estudiar problemas de cavitación. No obstante, comentan que se pueden utilizar escalas que resulten tamaños de escalones entre 2.5cm y 4 cm (rango de escalas 1/25), y esperando que la estimación del inicio de la aireación se encuentren errores entre un 5% y un 20% del lado de la seguridad o incluso más si el número de Weber es menor de 30. Finalmente, proponen no utilizar modelos de menor tamaño de escalones para estudiar el comienzo de la aireación.

3.9 CALIBRACIÓN

Para que el modelo en estudio refleje las cualidades del prototipo que se trata de reproducir, es necesario verificar si es efectivamente capaz de reproducirlas o si es necesario efectuar cambios para superar todo aquello que discrepe con la realidad. Estos pasos son esenciales antes de empezar cualquier investigación. La calibración, generalmente, consiste en adecuar las condiciones y características físicas e hidráulicas, como la rugosidad del lecho, la descarga y los niveles de agua, con las del prototipo. En modelos de cauces naturales, generalmente, la calibración consiste en un proceso iterativo en el cual se modifica la rugosidad del cauce hasta hacer equivalentes las curvas tirante-caudal del modelo con las del prototipo, en secciones de medición establecidas de antemano en el prototipo.

3.10 MODELO FÍSICO VERTEDOR DE LA PRESA “EL ZAPOTILLO”

3.10.1 SELECCIÓN DE ESCALAS Y DISEÑO DEL MODELO

Disponiendo del análisis dimensional y las leyes de semejanza y tomando en cuenta la información de diseño, topográfica y de construcción disponible de la obra en el IMTA y la que proporcionará Conagua, se efectuó la revisión analítica, el diseño y montaje del modelo físico su implementación, instrumentación y operación.

En el caso de aplicación para el modelo físico del vertedor de la presa el Zapotillo, ubicado en el laboratorio de hidráulica Enzo Levi en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), el modelo se construyó sin distorsión a escala 1:50.

Debido a que el comportamiento del flujo en el modelo es dominado por las fuerzas de gravedad e inercia (número adimensional de Froude (Fr)) sobre los efectos de viscosidad

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

(número adimensional de Reynolds (Re)), se utilizó para el análisis del modelo la teoría de similitud de Froude.

Utilizar la relación de Froude es suficiente para el tipo de fenómeno de este estudio experimental, siempre y cuando se mantenga el flujo dentro de la condición de flujo turbulento.

En la Tabla 3 se muestra el análisis y la selección de la escala del modelo.

OPCIONES DE ESCALA PARA EL MODELO FÍSICO DEL VERTEDOR DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO "ZAPOTILLO" PARA ALTURA MÁXIMA DE 80 METROS, EN EL RÍO VERDE, YAHUALICA DE GONZÁLEZ GALLO, JALISCO										
CONDICIÓN DE SIMILITUD										
Parámetros	EULER		FROUDE		REYNOLDS					
	Escala	Valor	Escala	Valor	Escala	Valor				
	$E = \frac{v^2 \rho}{p}$		$F_r = \frac{v^2}{y g}$		$R_e = \frac{v y}{\nu}$					
Longitud (E_L):	E_L	50.00	E_L	50.00	E_L	50.00				
Area (E_A):	E_L^2	2500.00	E_L^2	2500.00	E_L^2	2500.00				
Volumen (E_V):	E_L^3	125000.00	E_L^3	125000.00	E_L^3	125000.00				
Tiempo (E_t):	$(E_L/E_g)^{1/2}$	7.07	$(E_L/E_g)^{1/2}$	7.07	E_L^2/E_v	2500.00				
Velocidad (E_v):	$(E_L E_g)^{1/2}$	7.07	$(E_L E_g)^{1/2}$	7.07	E_v/E_L	0.02				
Gasto (E_Q):	$(E_L^5/E_g)^{1/2}$	17677.67	$(E_L^5/E_g)^{1/2}$	17677.67	$E_L E_v$	50.00				
Fuerza (E_F):	$E_L^3 E_v$	125000.00	$E_L^3 E_v$	125000.00	$E_\rho E_v^2$	1.00				
Presión (E_p):	$E_v E_L$	50.00	$E_v E_L$	50.00	$E_\rho E_v^2/E_L^2$	0.00				
Pendiente (E_s):	1.000	1.00	1.000	1.00	1.000	1.00				
Dimensiones:			Ancho	Largo	Unidad.					
Area del prototipo por representar:			300.00	550.00	m					
Area disponible en la mesa:			3.50	50.00	m					
Gasto máximo a representar:			5212.00		m ³ /s					
Gasto mínimo:			521.20		m ³ /s					
Coeficiente de rugosidad (Manning) en prototipo:			0.016							
Profundidad para el gasto mínimo:			0.90		m					
Área hidráulica mínima en prototipo (A):			288.00		m ²					
Tirante hidráulico (T=A/B):			0.90		m					
Coeficiente de rugosidad del acabado del modelo:			0.010							
Ancho medio de la SLA En prototipo (B):			320.00		m					
E S C A L A S			DIMENSIONES EN MODELO			GASTOS EN LITROS POR SEGUNDO			Número de Reynolds**	
Horizontal	Distorsión	Vertical	Ancho	Largo	Prof.@ 1m.	Escala	Mínimo	Máximo		
40	1	40	7.50	13.75	0.0250	10,119.3	51.5	515.1	6,074	Euler y Froud
45	1	45	6.67	12.22	0.0222	13,584.1	38.4	383.7	5,090	Euler y Froud
50	1	50	6.00	11.00	0.0200	17,677.7	29.5	294.8	4,346	Euler y Froud
55	1	55	5.45	10.00	0.0182	22,434.0	23.2	232.3	3,767	Euler y Froud
60	1	5	5.00	9.17	0.2000	670.8	777.0	7769.6	137,434	Reynolds
65	1	10	4.62	8.46	0.1000	2,055.5	253.6	2535.7	48,590	Reynolds
70	1	15	4.29	7.86	0.0667	4,066.6	128.2	1281.7	26,449	Reynolds
75	1	20	4.00	7.33	0.0500	6,708.2	77.7	777.0	17,179	Reynolds
80	1	25	3.75	6.88	0.0400	10,000.0	52.1	521.2	12,292	Reynolds
Escalas de líneas recomendables para un modelo de flujo en vertedores y cubetas deflectoras: El 1:10 a 1:100, sin distorsión										
** Número de Reynolds para el gasto mínimo del flujo en la sección de la corona del modelo considerando : $Re=VT/\nu$										
Se considera el limite entre flujo turbulento y laminar $Re=500$										

Tabla 3. Análisis de escalas para el modelo físico.

La selección de escala se basó principalmente en:

- El espacio disponible en el laboratorio.
- La precisión (concordancia entre el valor del dato -resultado de la medición- y el valor real), representatividad (reproducción del fenómeno de estudio en el modelo) y facilidad de la medición de los parámetros hidráulicos.
- El gasto disponible en el laboratorio

A manera de resumen se tiene que el modelo físico a escala reducida se construyó en acrílico de acuerdo a la ley de similitud de Froude y además es un modelo sin distorsión, con las siguientes escalas:

Escala de líneas verticales y horizontales; $E_L = 1:50$

Escala de velocidades; $E_v = E_L^{1/2} = 1:7.071$

Escala de gastos; $E_Q = E_L^{5/2} = 1:17,677.67$

3.10.2 CALIBRACIÓN DEL MODELO

Dado que no se tiene una estructura vertedora adecuada, tal como un cimacio, que optimice la descarga, y un tanque amortiguador limitado tanto en ancho, longitud y profundidad se realizaron ensayos preliminares, de calibración y ajuste del modelo físico, con el fin de determinar el coeficiente de descarga para estas condiciones, disipar energía y orientar el flujo sobre el talud de descarga.

Además, se procuró distribuir el flujo a lo largo del talud de descarga, en los deflectores y en el acceso al tanque amortiguador. La intención fue verificar el funcionamiento del modelo integral, desde las probables fugas, la curva de caracterización de la válvula, la calibración y ajuste del vertedor de control en el canal de descarga, y del vertedor de aforo al final.

Capítulo 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1 INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de la presente tesis, se realizaron ensayos en el modelo físico del vertedor escalonado de la presa El Zapotillo. En este capítulo se procede a la descripción de las instalaciones, se detalla la instrumentación utilizada en la toma de datos y finalmente se describen las series de ensayo realizadas.

4.2 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El modelo del vertedor de la presa El Zapotillo se encuentra construido en las instalaciones del laboratorio de hidráulica Enzo Levi del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

A continuación, se presentan datos generales del modelo en el momento de su construcción.

La zona del prototipo que fue representada es aproximadamente de 615 m de largo y 360 m de ancho, (12.30m y 7.20m en modelo para una escala 1:50). Se dispuso dentro del laboratorio un espacio de 17m de largo y 8.50m de ancho.



Figura 34. Espacio que se destinó para el montaje del modelo físico.

El diseño del modelo, por tratarse de flujo a superficie libre, se aplica el criterio de similitud de Froude, verificando que el número de Reynolds se encuentre dentro de la condición turbulenta. La escala 1:50 se cumple con estos requisitos, además un metro de prototipo es representado por 2 cm en el modelo, cantidad que es medible mediante la instrumentación disponible, como piezómetros, sensores ultrasónicos de nivel y celdas de presión con resolución de 0.1mm y precisión de ± 1.4 mm.

Referente a la pendiente del vertedor se tiene una relación de $1v/1.23h$ con un ángulo de aproximadamente 39° .

La Tabla 4 resume las características geométricas más significativas del vertedor escalonado del modelo El Zapotillo.

	Modelo	Prototipo
Escala	1:50	
Canal de descarga sobre talud de fondo escalonado (m)	4.87 aguas arriba 1.50 aguas abajo	243.5 aguas arriba 75 aguas abajo
Altura de escalón h (m)	0.024	1.20
Huella de escalón l (m)	0.030	1.50
Pendiente $[v/h]$	1/1.23	50/61.5
Gasto	294.83 (l/s)	5211.00 (m ³ /s)

Tabla 4. Características geométricas del modelo y su equivalencia en prototipo a escala 1:50.

El vertedor escalonado parte de la corona desde una altura de 2.32m del suelo.

Se llevó a cabo el montaje del modelo físico en el sitio dispuesto para ello de acuerdo a las siguientes especificaciones generales:

Consistió en montar, realizar pruebas preliminares, y las modificaciones correspondientes a la geometría en el modelo físico, escala 1:50, construido en un área aproximada de 131m² y un gasto máximo de 295 litros por segundo. Las principales componentes del modelo son:

1. Tubería de alimentación de PVC hidráulico de 30.48 cm de diámetro.
2. Tanque de alimentación de 8.5x3.3 metros formado con muros de block hueco de 20x20x40 cm y 3 metros de altura.
3. Red de tubos de PVC de 1" sanitario y filtro de grava para drenaje del relleno compactado.
4. Topografía del cauce aguas arriba de la cortina; longitud 5.30m y 48m² en modelo.
5. Cortina de 1.6m de altura y 7.25m de longitud formado con muro de block hueco de 20x20x40cm y 2.3 metros de altura.

6. Acrílico de 19mm de espesor de 0.50m de ancho x 6.5m de largo para representar la corona.
7. Canal de descarga sobre talud de fondo escalonado de 1.78m de largo; 4.87m de ancho, aguas arriba y 1.50m aguas abajo.
8. Dado de concreto (mochila) de 1.50m x 0.62m x 0.6m con 14 deflectores de concreto.
9. Tanque amortiguador a la salida de 1.50m x 2.70m x 0.4m formado con muro de block hueco de 20x20x40cm y 0.90 metros de altura.
10. Tanque de descarga y control de 2.00m x 1.45m x 1.10m muro de block hueco de 20x20x40cm.
11. Compuerta de placa de acero de 1.00m x 1.65m x 6mm con mecanismo elevador.
12. Canal de descarga y aforo de mampostería de block hueco de 20x20x40cm de 7.70m de longitud y 0.65m de altura y 2.00m de ancho.
13. Vertedor de aforo rectangular con contracciones laterales de placa de acero de 2.05m x 0.30m x 6mm.
14. Escalera de acceso de mampostería de block de 2.00m de largo x 1.10m de altura con pasamanos y barandal de acero de tubo negro de 32mm de diámetro.
15. Escalera marina de 3.00m de largo fabricada con tubo negro de 32mm de diámetro.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

En la Figura 35 y Figura 36 se puede observar un esquema del modelo y en la Figura 37 una fotografía del modelo El Zapotillo.

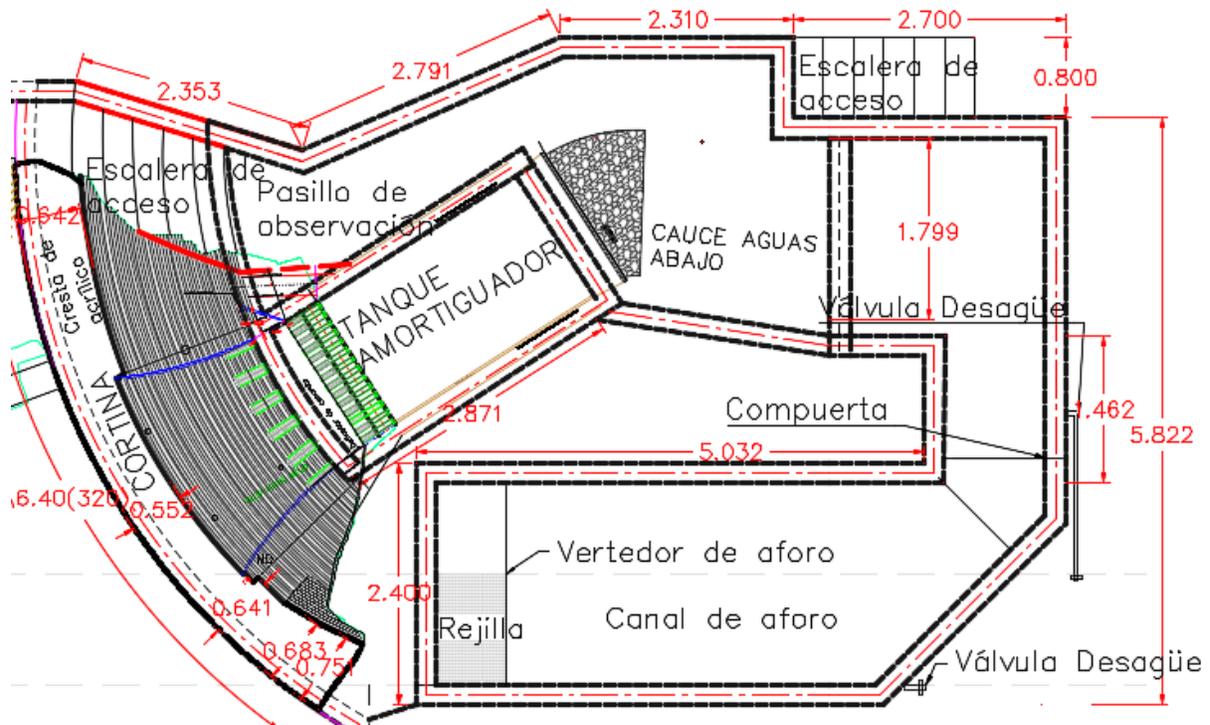


Figura 35. Vista en planta del modelo físico del vertedor de la presa El Zapotillo.

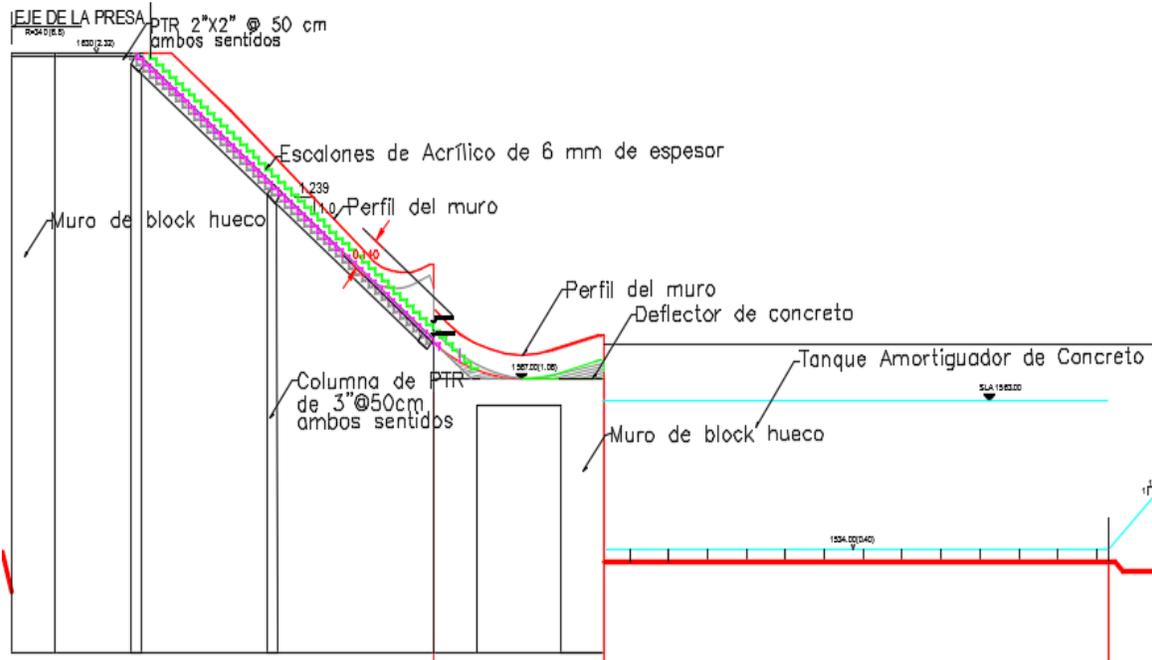


Figura 36. Perfil del modelo físico del vertedor Zapotillo.



Figura 37. Vista general del modelo El Zapotillo.

Para describir en mayor detalle el modelo es necesario distinguir dos partes: el sistema de suministro de agua y la rápida escalonada.

4.2.1 SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA

El flujo de agua en el modelo es suministrado en forma de recirculación del agua desde el sistema de bombeo con capacidad nominal de 500 litros por segundo de gasto. El gasto máximo requerido en el modelo es de 300 litros por segundo aproximadamente.

4.2.2 RÁPIDA ESCALONADA

La rápida consta en 47 escalones idénticos de 24mm de altura y 30mm de huella. Sus dimensiones son 1.78m de longitud, 4.87m de ancho aguas arriba y 1.50m aguas abajo.

Cabe aclarar que no toda la sección de la rápida escalonada fue tomada en cuenta como área de estudio, la longitud corresponde a partir de la corona hasta donde se encuentran los deflectores de madera, es decir 36 escalones y el ancho está definido por los muros concentradores internos de flujo.

Las siguientes figuras ilustran la configuración de la rápida escalonada, así como del área de estudio.



Figura 38. Esquema de la rápida escalonada.

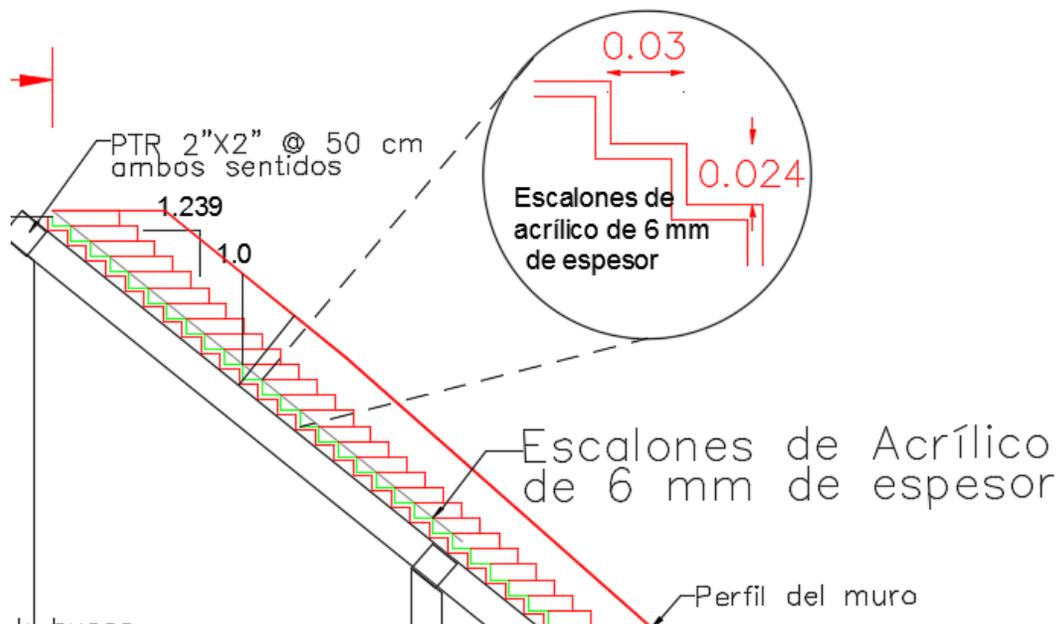


Figura 39. Detalle de los escalones del vertedor.

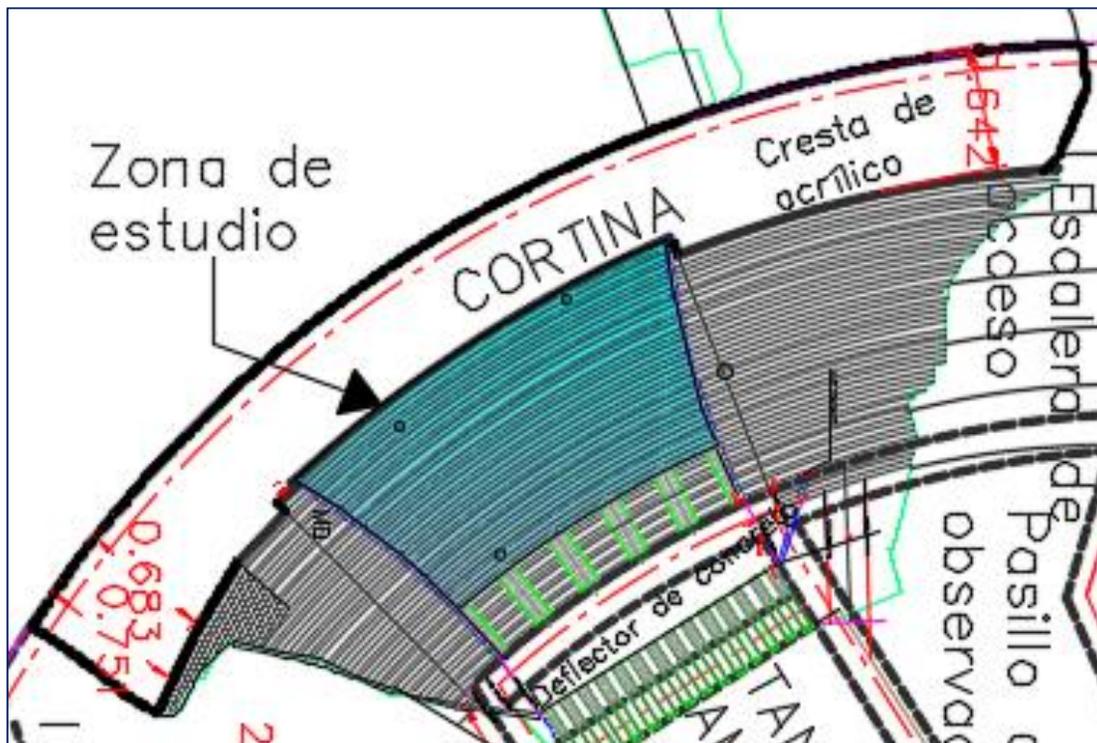


Figura 40. Vista en planta del área de estudio.



Figura 41. Vista frontal del modelo y área de estudio.

La rápida escalonada fue construida en acrílico transparente de 6mm de espesor que permite visualizar el flujo a través de él.

4.3 INSTRUMENTACIÓN

En Tabla 5 se presentan los equipos de medida utilizados durante la serie de ensayos.

Tipo de medida	Zona de estudio	Instrumento	Marca
Nivel	Toda la rápida	Sensor ultrasónico	Siemens
Imagen	Toda la rápida	Cámara de alta velocidad	Photron
Presión	Toda la rápida	Sensores piezorresistivos	Keller America
Velocidad	Toda la rápida	Cámara de alta velocidad	Photron

Tabla 5. Instrumentación para el vertedor escalonado El Zapotillo

Las medidas evaluadas son las características principales de los puntos de incepción de aire, estas mediciones permitirán realizar una correlación con medición de presiones y profundidades del flujo, para obtener en primera instancia un análisis cualitativo del comportamiento hidráulico de este vertedor en particular.

El análisis para la carga de diseño fue realizado por la coordinación de hidráulica del IMTA² para este modelo en específico y se determinó con el análisis de un vertedor de cresta ancha o bien, de un canal corto que fue en lo que estribó la dificultad del cálculo.

Las consideraciones para el análisis de la carga de diseño se describen a continuación:

- I. Se verificó que el funcionamiento hidráulico sea, de acuerdo a la metodología empleada, de un vertedor de cresta ancha y no la de un canal debido a la longitud de la corona en esta elevación que resulta de 28m, es decir, la relación $e/h < 10$, donde e es el ancho de la corona y h la carga hidráulica.
- II. Se determinaron los tirantes críticos para las secciones del vertedor, suponiéndolas como rectangulares. Las cargas hidráulicas h deben ser mayores a los tirantes críticos calculados.
- III. Se determinaron las cargas hidráulicas y sus correspondientes coeficientes de descarga.

Con estos resultados, los datos del hidrograma de diseño y las curvas de elevaciones-áreas-volúmenes, se realizó el tránsito mediante el programa TAV1.0. Con el resultado del “gasto pico de salida total”, se realizó una nueva iteración y así sucesivamente hasta obtener diferencias prácticamente iguales del gasto y tirante entre dos iteraciones sucesivas.

² Informe final “Estudio en modelo físico del funcionamiento hidráulico del vertedor de la presa de almacenamiento “Zapotillo” para altura máxima de 80 metros, en el Río Verde, Yahualica de González Gallo, Jalisco

4.3.1 MEDIDAS DE NIVEL

Para la obtención de las medidas de nivel en la rápida se dispuso de cinco transmisores ultrasónicos de nivel (Figura 42), colocados de manera paralela al flujo con una separación aproximada de 30cm y en posición central a la rápida (Figura 43), el mecanismo de funcionamiento de estos transmisores de dos hilos se basa en pulsos ultrasónicos que son transmitidos desde la cara del transmisor y luego reflejados por la superficie del líquido para nuevamente ser recibidos por el mismo transmisor. El tiempo que transcurre entre la transmisión y recepción de las señales, permite que el microprocesador electrónico calcule el nivel de agua existente. El rango de medida es de 6 o 12 m (20 o 40 ft) y entre sus ventajas están la función de supresión automática para la eliminación de falsos ecos de componentes fijos, la relación mejorada señal/ruido y una precisión del 0.15% del rango de medida o 6mm (0.25”).



Figura 42. Transmisor ultrasónico de dos hilos marca Siemens.



Figura 43. Posicionamiento de los transmisores de nivel de dos hilos.

4.3.2 MEDIDAS PRESIÓN

Para la medida de presión se dispuso de sensores tipo piezorresistivo con un rango de medida entre 0-2 PSIG (lb/in²).

Los sensores piezorresistivos se conectan al sistema de adquisición de datos mediante los siguientes componentes, los cuales se representa en la Figura 44:

- Fuente de alimentación (110VAC – 20VDC) que permite la conexión a la red eléctrica.
- Concentrador de datos para transmisión de información al convertidor.
- Convertidor de protocolos de información RS-485 – RS-232.
- Software especializado que permite la gestión de información.
- Rango de error del $\pm 0.1\%$.

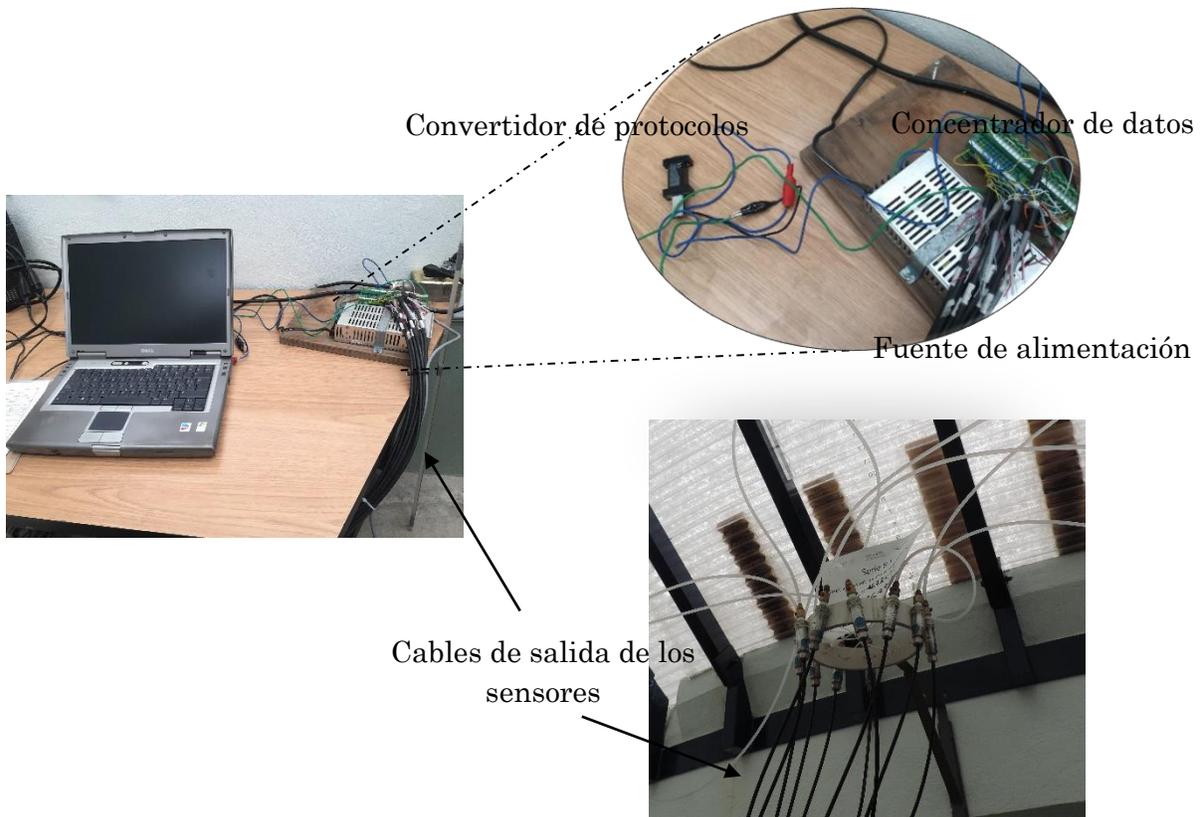


Figura 44. Instalación física para la medición de presión.

4.3.3 CÁMARA DE VIDEO DE ALTA VELOCIDAD

Las cámaras de alta velocidad permiten tener imágenes con gran resolución espacial lo que permite ver fenómenos que el ojo humano no detecta.

La cámara utilizada es de la marca Photron, modelo Fastcam mini UX50, esta cámara de alta velocidad tiene 1.3 megapíxeles (1280 x 1024 píxeles) de resolución de imagen y es capaz de registrar hasta 2,000 fps (cuadros por segundo) y 160,000 fps con una resolución de imagen reducida (Figura 45).



Figura 45. Cámara de alta velocidad marca Photron.

Componentes de la cámara de velocidad:

- Cámara Photron Fastcam mini UX50
- Lente Nikon Af Nikkor 24-85mm F/2.8-4d If
- Trípode profesional con Adaptador a montura tipo 4 x 1/4-20UNC, 4 x M5
- Cables + fuente de alimentación
- Filtros
- Sistema de iluminación

Adicionalmente la cámara incluye su propia laptop donde se encuentra instalado el controlador, dicho programa de control lleva por nombre Photron FASTCAM Viewer (PFV).

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

La siguiente imagen describe la operación básica del PFV:



Figura 46. Operación básica del programa de control.



Figura 47. Instalación de equipo de la cámara de video de alta velocidad.

4.3.4 SOFTWARE DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Para el caso de manipulación de imágenes se emplea el toolbox "Image Processing".

MATLAB puede leer imágenes almacenadas mediante la función «imread» esta función es la parte central del programa generado para esta tesis, el cual tomando un archivo de imagen (jpg, jpeg, png, bmp, raw, tiff, gif, xwd) la descompone en sus canales de color (rojo, verde y azul) y las ingresa en una matriz con valores de unit8, es decir se le asigna un valor específico a cada pixel en rojo, verde y azul en el rango de 0-255, a esta matriz se le denomina matriz RGB (red, green, blue).

Una vez obtenida esta matriz RGB, se le aplica una fórmula matemática de conversión de RGB a escala de grises, la conversión del modelo RGB a una escala de grises de blanco al negro obedece a la respuesta cromática de los sensores en el ojo humano y se da mediante la fórmula siguiente:

$$gris = 29.9\%rojo + 58.7\%verde + 11.4\%azul \quad (45)$$

Esos porcentajes corresponden con los porcentajes de conos sensores al rojo, los conos sensores al verde y los conos sensores al azul.

Con la matriz de escala de grises, se representa el gráfico de contorno mediante la función «contour». La función «contour» dibuja las curvas de nivel de la superficie representativa de un gráfico 3D, es decir, la proyección 2D del gráfico 3D.

Se utiliza el «contour» para facilitar la observación superponiendo la imagen original y las líneas de nivel representadas en el mapa de contorno, las siguientes imágenes representan lo anteriormente mencionado.

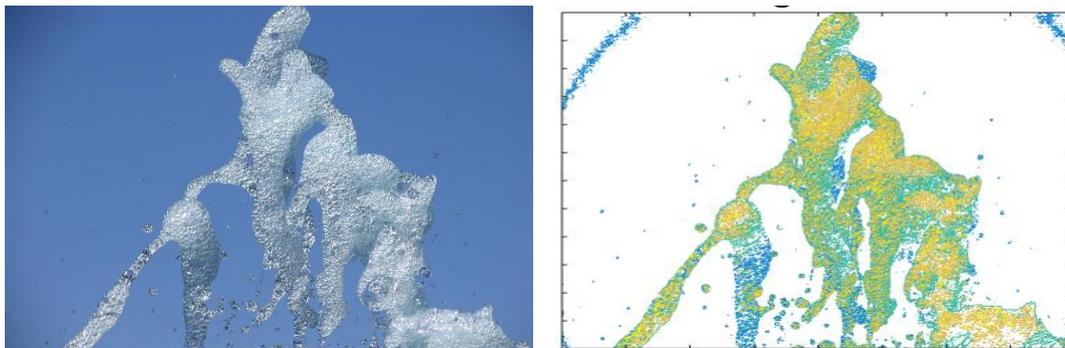


Figura 48. Comparación de la imagen original (izquierda) y el mapa de contorno de la imagen original (derecha).

Finalmente, para tener una mejor idea del comportamiento en la imagen se grafica la columna central, es decir el perfil de intensidad de color de la imagen que se esté tratando.

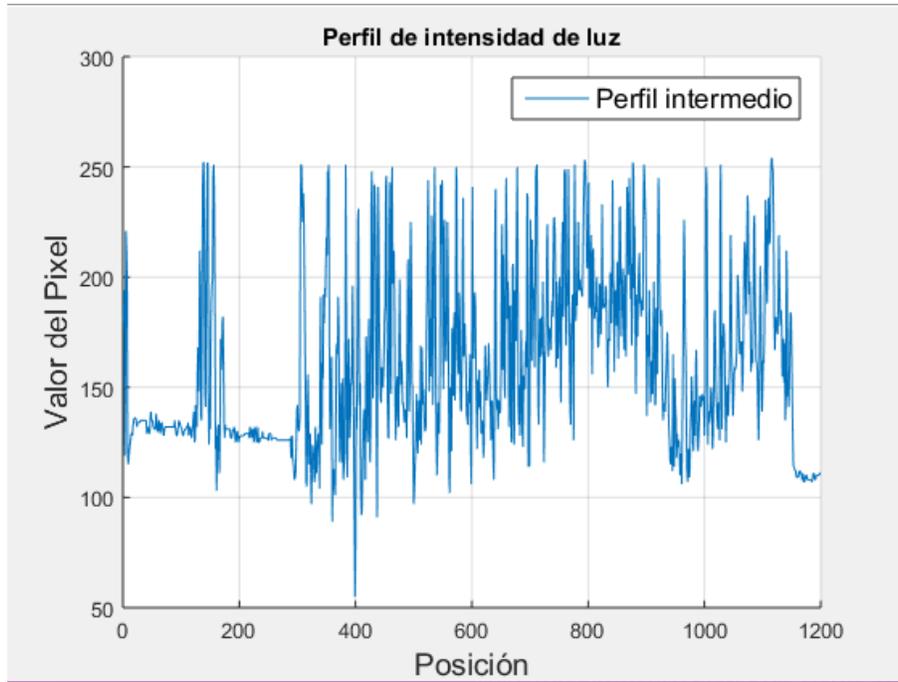


Figura 49. Perfil 2D de intensidades de luz de la Figura 48.

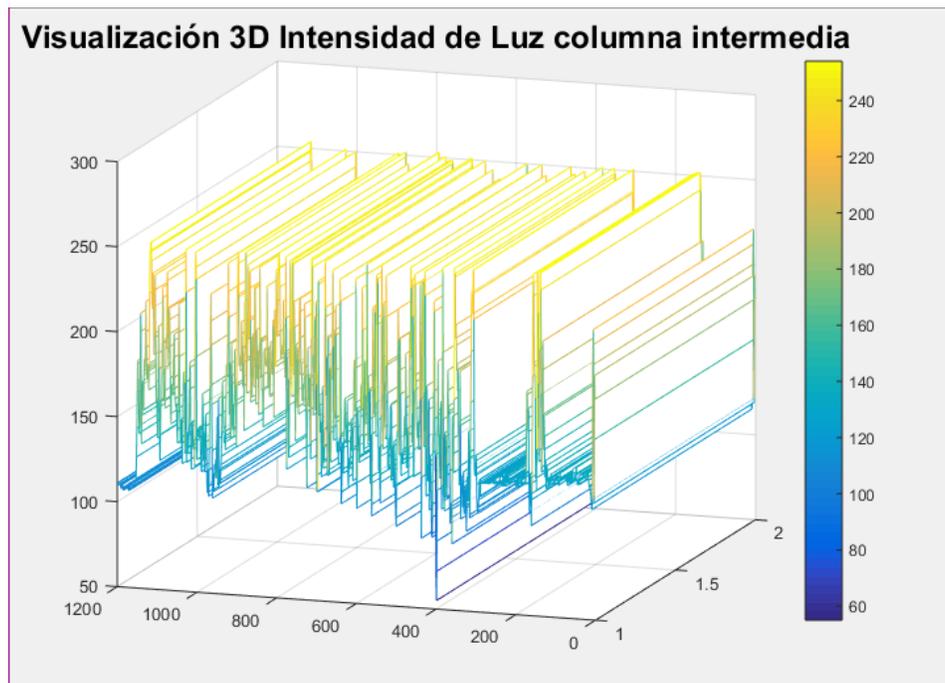


Figura 50. Perfil 3D de intensidades de luz de la Figura 48

4.4 DISEÑO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

En esta sección se describen los ensayos realizados y las variables de estudio utilizadas.

4.4.1 TIPO DE ENSAYOS EFECTUADOS

En la Tabla 6 se reúne el tipo y número de pruebas realizadas. Las pruebas experimentales se pueden caracterizar en dos grupos:

1. La construcción de las instalaciones del experimento ya había sido realizada con anterioridad, por lo que se procedió a la puesta a punto de los instrumentos de medición, para lo cual se validó el correcto funcionamiento de la instrumentación y sus complementos para la optimización de las medidas. Se realizaron pruebas de funcionamiento de los equipos de medición a la par con las pruebas experimentales y en el caso de dudas o errores, la repetición de las pruebas de funcionamiento.
2. Las pruebas, las cuales se realizaron mediante una serie con 11 diferentes gastos de 100.706 l/s a 283.878 l/s, repitiendo ésta 3 veces para determinar su reproducibilidad, en la que el objetivo ha sido analizar mediante la simulación física, las características del punto de incepción de la intrusión de aire generada en el flujo de descarga del vertedor escalonado de la presa Zapotillo, tomando en cuenta los parámetros y geometría físicos del modelo, así como de la obtención de datos.

Una vez validada la información se procedió al tratamiento de los datos y descripción del comportamiento del vertedor escalonado con respecto a sus puntos de incepción.

Pruebas de funcionamiento	No. De Pruebas
Pruebas de la cámara de alta velocidad	57
Pruebas del código para el tratamiento de imágenes	53
Pruebas de iluminación para captura de imágenes	53
Pruebas sensor de nivel	6
Pruebas de sensores de presión	8
Total de ensayos	177

Tabla 6. Resumen de ensayos efectuados

4.4.2 VARIABLES DE ESTUDIO

Tal como se menciona en el apartado 4.4.1 se tomaron medidas para 11 gastos diferentes, al no tener referencia del rango de ubicación donde se presentaría el fenómeno de punto de incepción con respecto al gasto de operación se tomó como gasto de partida un gasto medio en base al gasto máximo de operación del modelo.

- Nivel

Se han obtenido los niveles del flujo para generar su perfil, en la Tabla 7 se presenta la ubicación exacta de cada sensor medido de aguas arriba hacia aguas abajo (partiendo de la corona hacia los deflectores (Figura 43)), recordando que el área de estudio es de 1.38 m.

	SENSOR 1	SENSOR 2	SENSOR 3	SENSOR 4	SENSOR 5
Posición (cm)	131.50	102.50	72.50	41.50	21.50

Tabla 7. Ubicación de los sensores de nivel

- Presión

Se han medido las presiones totales (presión hidrostática y presión dinámica) sobre los escalones. Para ello se han utilizado los sensores descritos en el apartado 4.3.2., se han dispuesto de 10 sensores (numerados en dirección de aguas abajo hacia aguas arriba, partiendo de los deflectores hacia la corona) en el centro de la escalonada, el primer sensor se encuentra ubicado en el escalón número 19, a partir de éste los sensores están separados cada dos escalones hasta el sensor número 10 que se encuentra localizado en el escalón inmediato del sensor número 9, y se encuentran ubicados en el centro de la huella de los escalones, como se muestra enseguida.

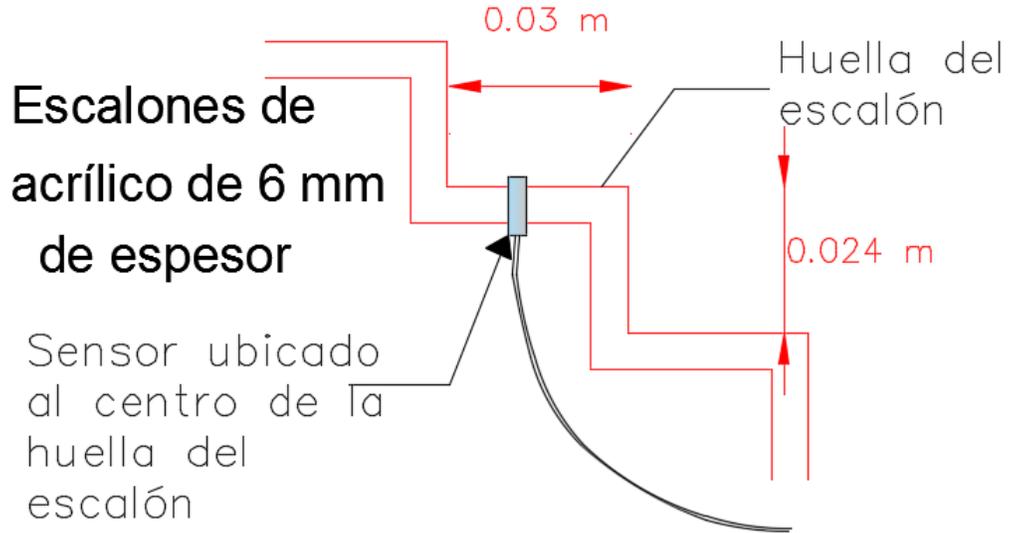


Figura 51. Detalle de la ubicación del sensor en la huella del escalón.



Figura 52. Posicionamiento ubicación de los sensores de presión.

4.5 PUESTA A PUNTO DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

4.5.1 INTRODUCCIÓN

Una vez definida la metodología, se llevó a cabo una primera fase experimental con el fin de realizar la puesta a punto de la instalación. Para ello, se realizaron diversos trabajos de calibración según el requerimiento del proceso y del equipo de medición utilizado.

4.5.2 SENSORES DE NIVEL

Con el objeto de realizar las medidas del nivel de los tirantes de flujo en la rápida tuvo que ser necesaria la calibración de cada sensor, para ello fue necesario realizar lo siguiente:

1. Definir las unidades de lectura (mm, cm, m, ft, etcétera).
2. Definir la distancia de la altura de los sensores (Figura 53) cuando la rápida está ausente de escurrimiento. Para que no exista variaciones de medida debido a los escalones, estas se consideraron a partir de las narices de los escalones hacia el transductor del sensor, para la obtención de esta medida preliminar se requirió del auxilio de un distanciómetro laser marca Leica, esta distancia será el cero, la diferencia de cotas tendrá como resultado el perfil de niveles.
3. Definir la separación mencionada en el apartado 4.4.2 de tal manera que se logre cubrir toda la zona de estudio, además se procuró que los sensores concuerden con la ubicación de los sensores de presión con el fin de hallar alguna relación (Figura 54).



Figura 53. Definición de la distancia entre las narices de la escalonada y el sensor.

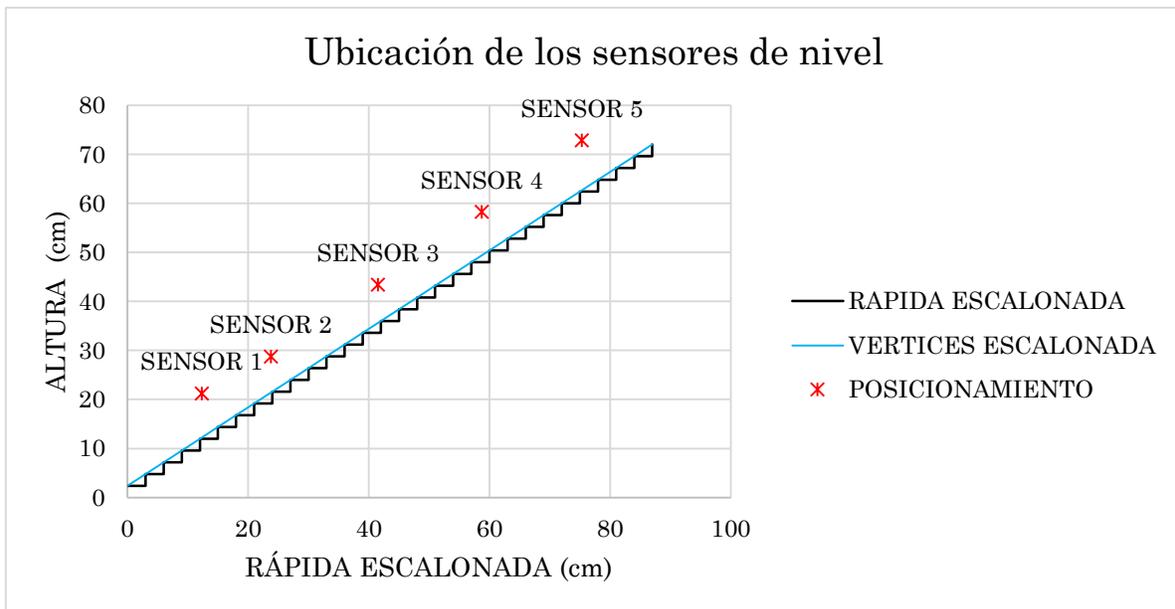


Figura 54. Posicionamiento de los sensores de nivel sobre la escalonada.

4.5.3 SENSORES DE PRESIÓN

Para la puesta a punto de la instalación experimental de los sensores de presión se instaló un soporte radial debajo de la cortina (Figura 55) para mitigar las vibraciones ocasionadas por el escurrimiento.

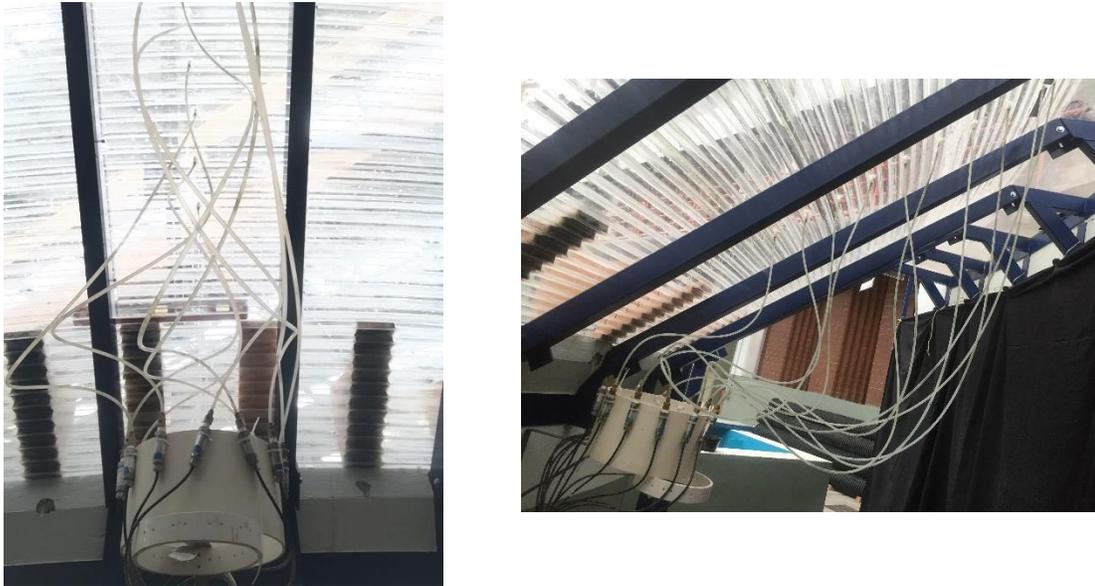


Figura 55. Sensores de presión instalados en soporte radial debajo de la cortina

Adicionalmente se purgaron cada una de las mangueras de conexión sensor-rápida con el fin de eliminar las burbujas de aire (Figura 56) y otras impurezas, reduciendo así el error de la medición de la carga total de presión, para esto fue necesario realizar una inyección continua de líquido (Figura 57) hasta su llenado y eliminación completa de aire.

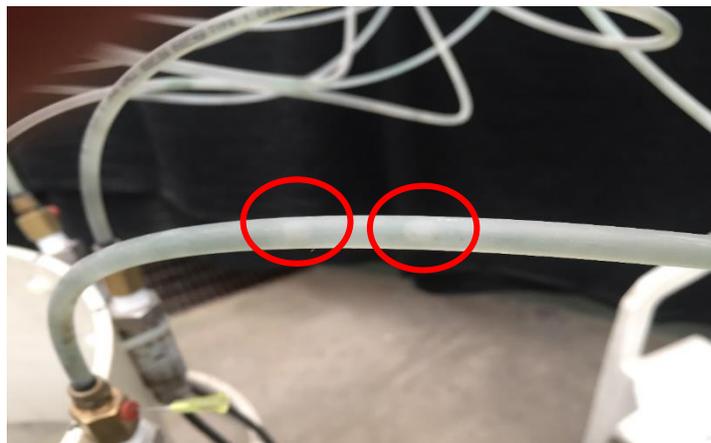


Figura 56. Burbujas de aire en mangueras de conexión



Figura 57. Proceso de purgado de las mangueras de conexión.

Para corroborar que efectivamente las mangueras se encontraban libres de aire e impurezas se utilizó el programa de adquisición de datos de dichos sensores, donde al no tener carga debido a la ausencia de escurrimiento la presión marcada por los sensores debe estar cercanos a cero (Figura 58).

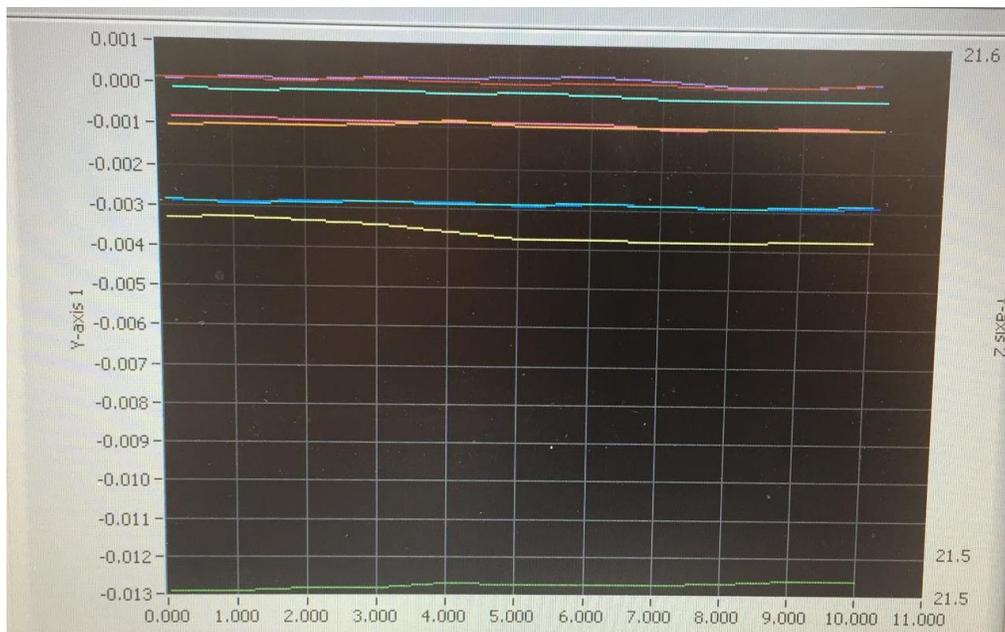


Figura 58. Verificación del purgado de los sensores de presión.

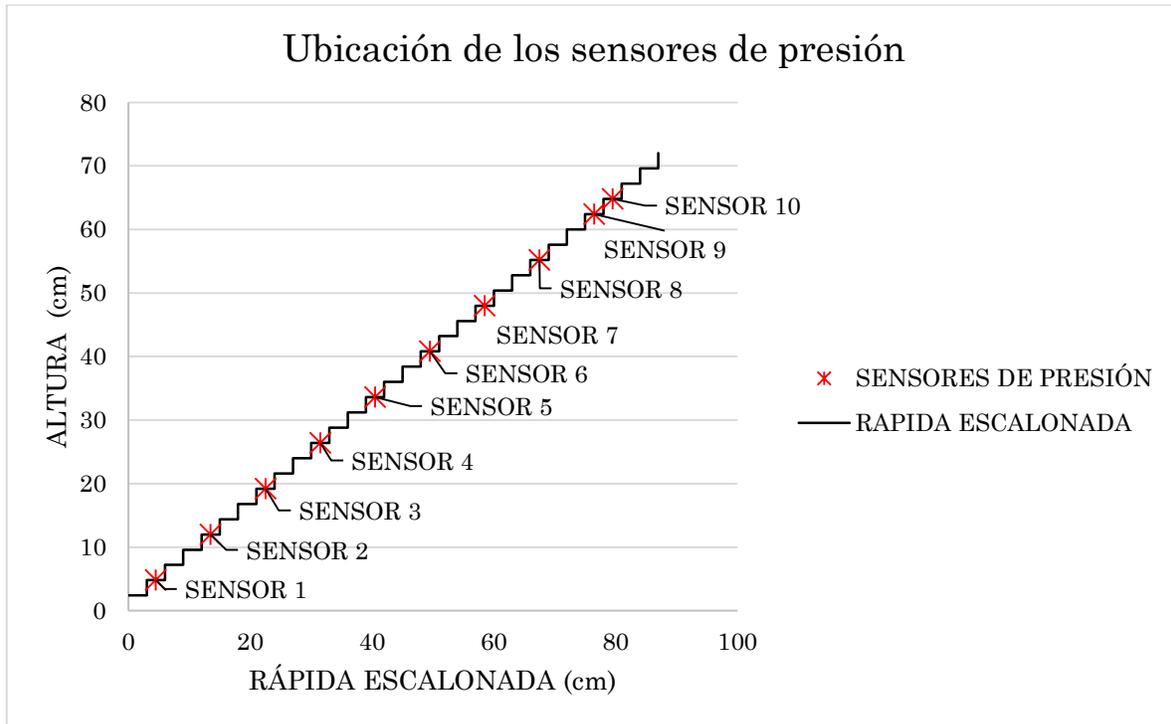


Figura 59. Ubicación de los sensores de presión en la rápida escalonada.

4.5.4 PHOTRON FASTCAM

Una de las mayores problemáticas presentes en este trabajo de investigación fue el control de la iluminación en el modelo, esto, debido a la naturaleza propia de sus dimensiones.

Con el fin de obtener la mejor calidad de imagen posible para nuestro análisis cualitativo tuvieron que ser probadas diferentes configuraciones de iluminación, para seleccionar nuestra configuración final se realizó una comparación de imágenes previamente procesadas por el código en Matlab mencionado en el apartado 4.3.4 seleccionando finalmente la opción con menos perturbaciones debido a la intensidad de luz.

En la siguiente tabla se resume las configuraciones implementadas, seguidamente se presentan algunas imágenes como ejemplo (Figura 60, Figura 61, Figura 62, Figura 63).

Prueba	Configuración	Observaciones	Configuración seleccionada
A	Iluminación natural	La principal desventaja de esta configuración es la dependencia de la posición del sol con respecto a la ubicación del modelo en laboratorio y en general el clima presente, lo que limita los horarios de pruebas.	X
B	Papel albanene debajo de la rápida para la difuminación de luz con iluminación natural.	El papel cumplía con su función de distribuir la intensidad de luz, el inconveniente resulta de las limitaciones debido a la iluminación natural utilizada.	X

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

Prueba	Configuración	Observaciones	Configuración seleccionada	
C	Papel albanene debajo de la rápida + lámpara de luz led iluminando directo al papel.	Al utilizar como auxiliar de iluminación una lámpara con luz led en cualquiera de las configuraciones efectivamente ayudaron al aumento de la intensidad de luz sobre el papel, el inconveniente que se presenta en la disposición de una sola lámpara es la insuficiencia de la misma para cubrir el área de estudio, por lo que no se logra una distribución adecuada al ser afectadas solamente ciertas áreas, impidiendo así la obtención de una imagen homogénea del área de estudio.	X	
D	Papel albanene debajo de la rápida + lámpara de luz led iluminando desde arriba directo a la rápida.		X	
E	Papel albanene debajo de la rápida + lámpara de luz led con filtros albanene iluminando directo al papel.		X	
F	Papel albanene debajo de la rápida + lámpara de luz led con filtros albanene iluminando desde arriba directo a la rápida.		X	
G	Lámpara de luz led con filtros albanene iluminando debajo de la rápida.		X	
H	Lámpara de luz led con filtros albanene iluminando desde arriba directo a la rápida.		X	
I	Papel aluminio debajo de la rápida separado de los escalones con iluminación natural.		Estas configuraciones no fueron apropiadas debido a que el papel aluminio reflejó demasiado cualquier tipo de iluminación, por lo que al momento de la captura de imágenes se podría observar círculos de luz en zonas definidas lo que impedía la homogeneidad de la imagen.	X
J	Papel aluminio debajo de la rápida separado de los escalones + lámpara de luz led iluminando desde arriba directo a la rápida.			X
K	Papel aluminio debajo de la rápida separado de los escalones + lámpara de luz led con filtros albanene iluminando desde arriba directo a la rápida.			X

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

Prueba	Configuración	Observaciones	Configuración seleccionada
L	Papel aluminio debajo de la rápida pegado a los escalones con iluminación natural.	Estas configuraciones no fueron apropiadas debido a que el papel aluminio reflejó demasiado cualquier tipo de iluminación, por lo que al momento de la captura de imágenes se podría observar círculos de luz en zonas definidas lo que impedía la homogeneidad de la imagen.	X
M	Papel aluminio debajo de la rápida pegado a los escalones + lámpara de luz led iluminando desde arriba directo a la rápida.		X
N	Papel aluminio debajo de la rápida pegado a los escalones + lámpara de luz led con filtros albanene iluminando desde arriba directo a la rápida.		X
O	Contraste con telón oscuro detrás de la cortina con iluminación natural.	El contraste permite que la imagen obtenida del área de estudio sea homogénea independientemente de la intensidad de luz natural que se tenga, este contraste además elimina el ruido de los soportes sobre el que descansa el vertedor, ya que en las anteriores configuraciones no se podía eliminar que estos sobresalieran en la imagen.	✓

Tabla 8. Comparación de las diferentes configuraciones probadas para la captura de imágenes.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

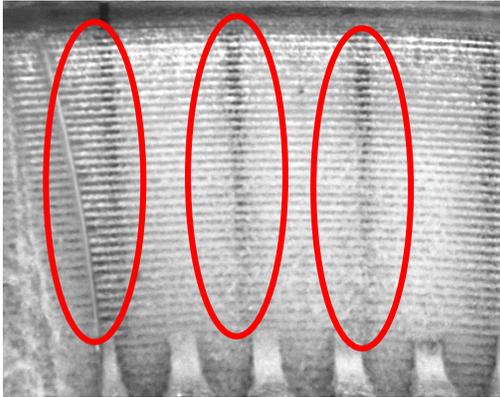


Figura 60. Configuración "B".

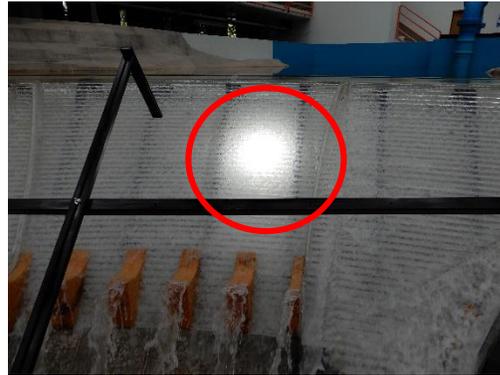


Figura 61. Configuración "C".

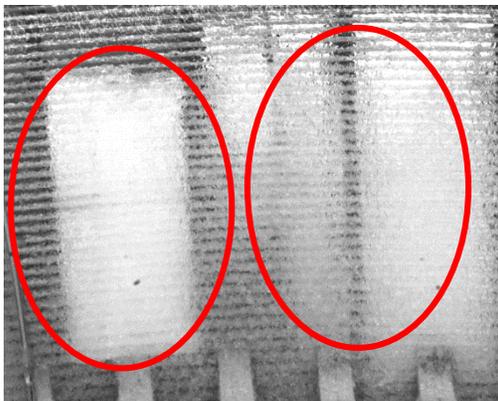


Figura 62. Combinación de las configuraciones "I" y "L".

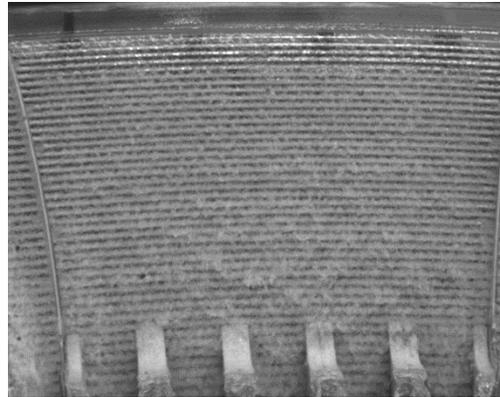


Figura 63. Configuración "O".

Finalmente, la configuración seleccionada fue la de utilizar un contraste oscuro detrás de la rápida (Figura 64), este contraste sirve para enfocar la intensidad de luz a través de las burbujas de aire que se encuentra en el escurrimiento de la rápida hacia una sola dirección de distribución, ya que estas reflectan la luz hacia todas direcciones.



Figura 64. Instalación del contraste debajo de la rápida.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

Como medida de seguridad la cámara fue instalada sobre una plataforma de 1.20 metros de altura con el fin de evitar que la fuerza de la descarga del flujo en el tanque de amortiguación ponga en riesgo el equipo, a esta plataforma le fueron agregados barandales de seguridad para evitar cualquier accidente o riesgo, también se consideró la nivelación del trípode de la cámara para asegurar la estabilidad de la imagen.



Figura 65. Instalación de la cámara Photrom Fastcam.

Capítulo 5

CARACTERIZACIÓN DEL PUNTO DE INICIO DE AIREACIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las características del punto de incepción de aire.

El principal interés de caracterizar el punto de inicio de aireación es conocer el límite de la zona no aireada, que presenta un riesgo mayor de cavitación, y por tanto puede dañar la estructura del vertedor.

Inicialmente se describen y analizan los resultados obtenidos de las pruebas en laboratorio. A continuación, en base a los resultados prácticos se evalúan los modelos matemáticos empíricos descritos en la revisión de literatura.

5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PRÁCTICOS

A continuación, se presentan los datos correspondientes de cada variable de estudio mencionados en el apartado 4.4.2, estos resultados indicarán qué variable se debe tomar en cuenta con respecto al gasto de operación como significativa para la determinación del rango de ubicación del punto de incepción del vertedor escalonado El Zapotillo.

La Tabla 9 presenta los 11 gastos analizados para cada prueba, para que estos se encuentren en el mismo rango, se tomó como base el número de vueltas de la válvula de alimentación, el valor del gasto correspondiente se obtuvo por medio de la curva de carga-descarga del vertedor aforador.

No. De gasto	No de vueltas	Carga h en mm	Gasto [l/s]
1	10	105	100.706
2	11	125	131.282
3	12	143	161.242
4	13	159	189.73
5	14	174	217.972
6	15	185	239.603

Tabla 9. Gastos de experimentación

Continuación Tabla 9. Gastos de experimentación

No. De gasto	No de vueltas	Carga h en mm	Gasto [l/s]
7	16	191	251.724
8	17	197	264.07
9	18	202	274.529
10	19	205	280.878
11	20	206	283.878

Tabla 9. Gastos de experimentación

5.2.1 ANÁLISIS DE LAS CARGAS DE PRESIÓN

Se obtuvieron presiones en el centro de la rápida del vertedor en puntos ubicados como se muestra en la Figura 66. Las presiones obtenidas con respecto a los gastos de experimentación se observan en las Figura 67 a Figura 77, comparando las gráficas se observa que existe un cambio en el comportamiento del campo de presiones a partir del gasto 6 así como el tipo de flujo, lo que nos permite acotar nuestro análisis de resultados.

El cambio en el comportamiento del campo de presiones se debe a la ausencia de burbujas de aire en los escalones asociados a los sensores 9 y 10, los cuales indican presiones positivas, mientras que en los sensores restantes existe la presencia de burbujas de aire lo cual presenta lecturas de presiones negativas. El cambio en la presencia o ausencia de aire se debe al aumento de la velocidad del flujo la cual está directamente relacionada con el aumento de gasto.



Figura 66. Distribución de piezómetros.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

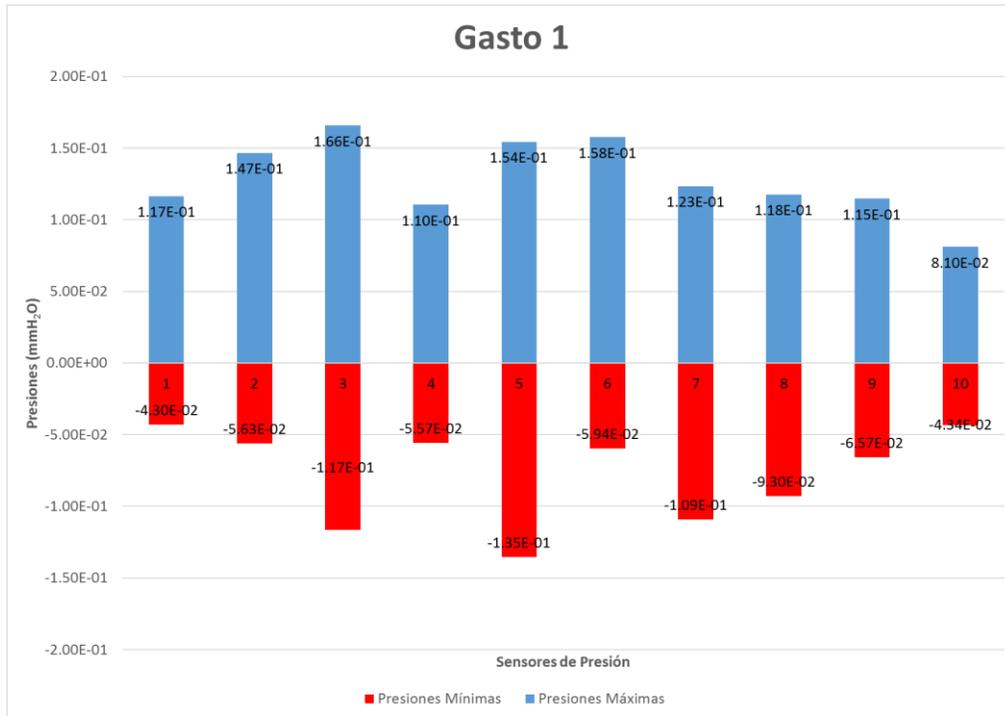


Figura 67. Distribución de presiones para Q₁=100.706 l/s (flujo saltante).

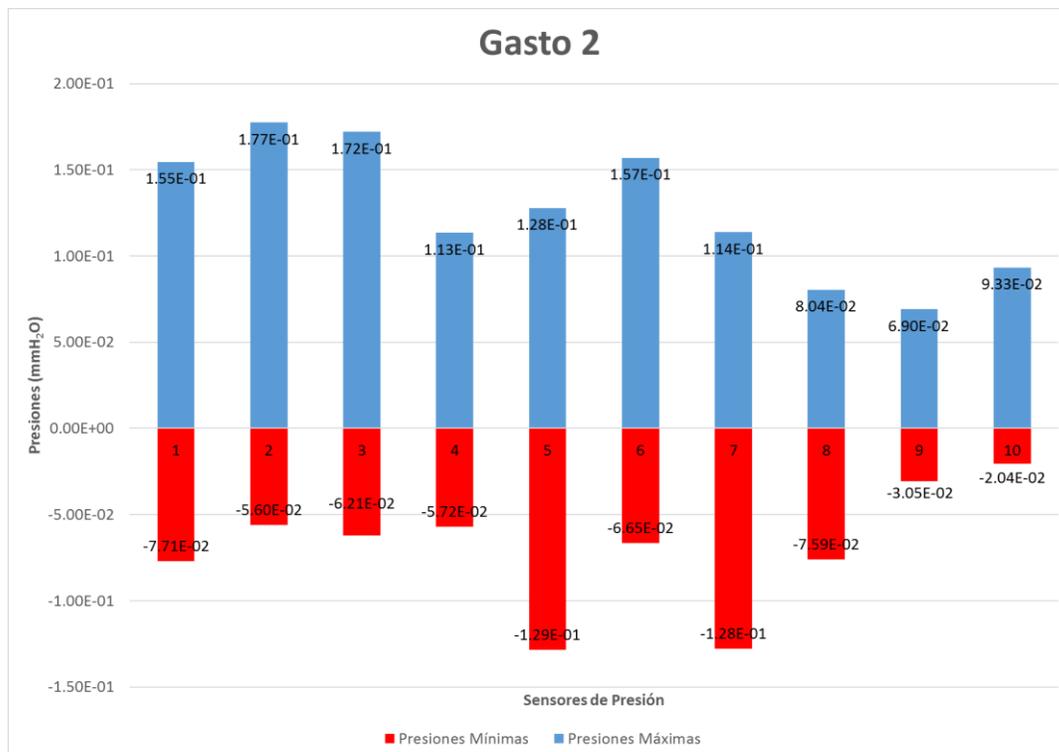


Figura 68. Distribución de presiones para Q₂=131.282 l/s (flujo saltante).

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

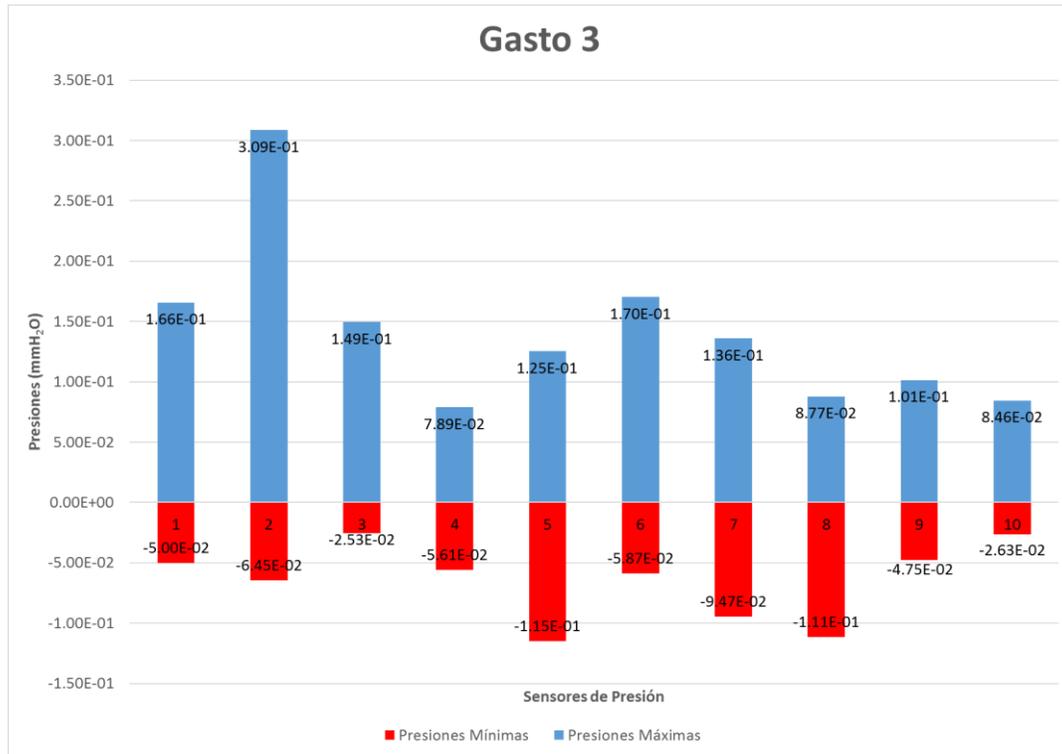


Figura 69. Distribución de presiones para $Q_3=161.242$ l/s (flujo saltante).

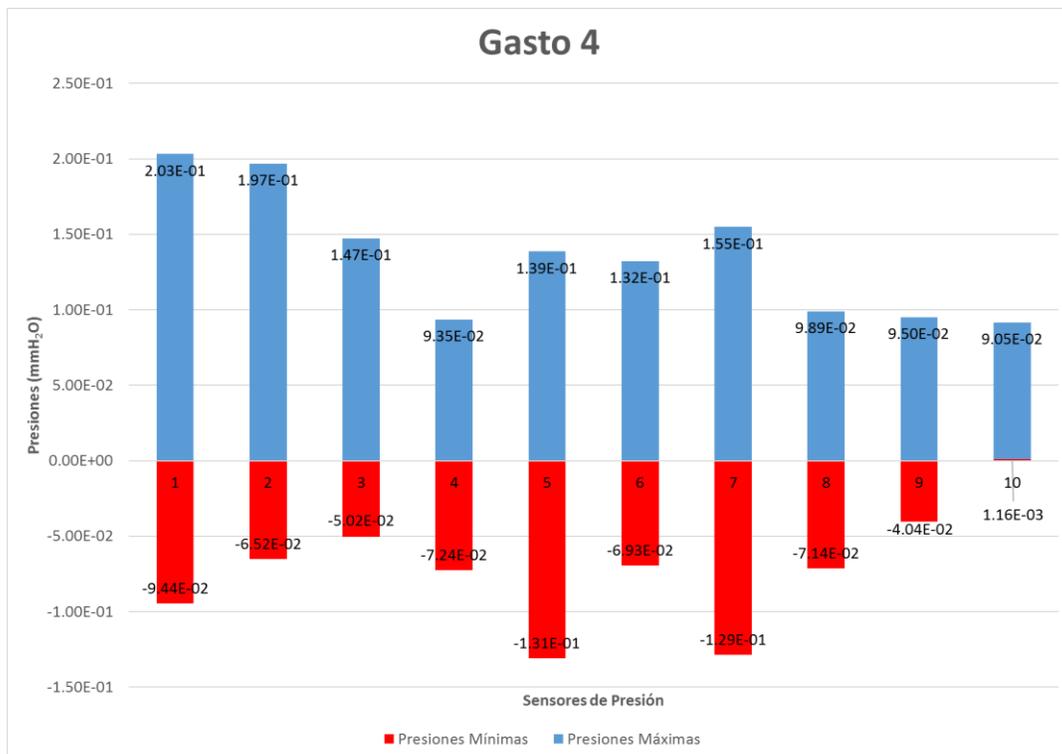


Figura 70. Distribución de presiones para $Q_4=189.73$ l/s (flujo saltante).

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

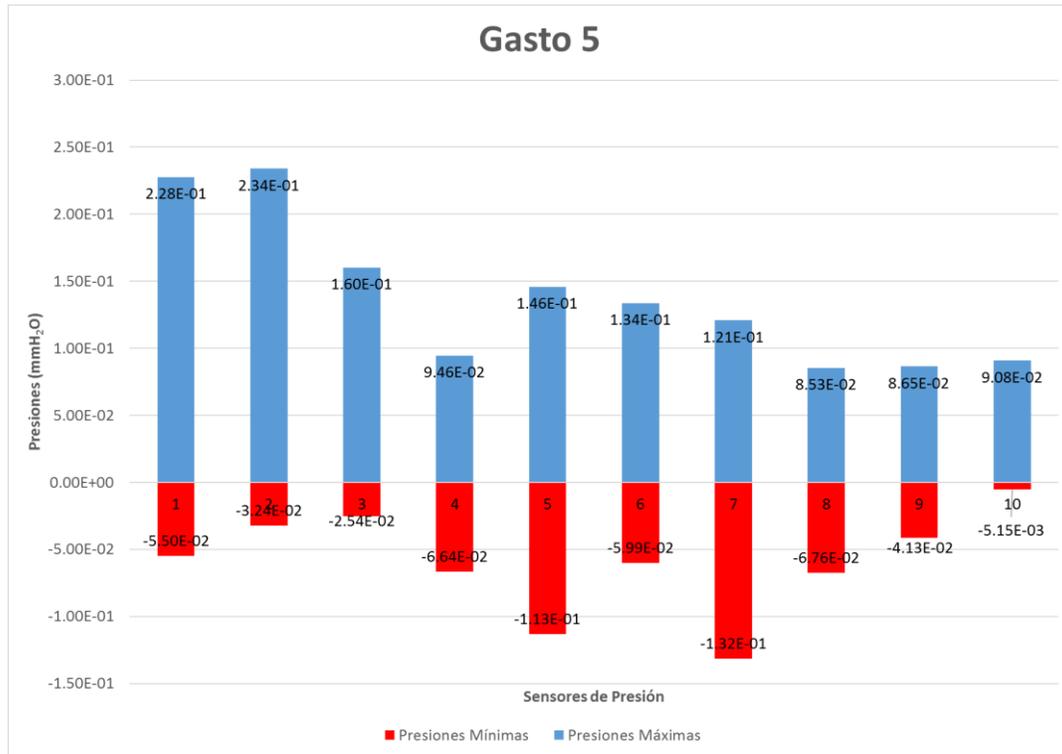


Figura 71. Distribución de presiones para $Q_5=217.972$ l/s.

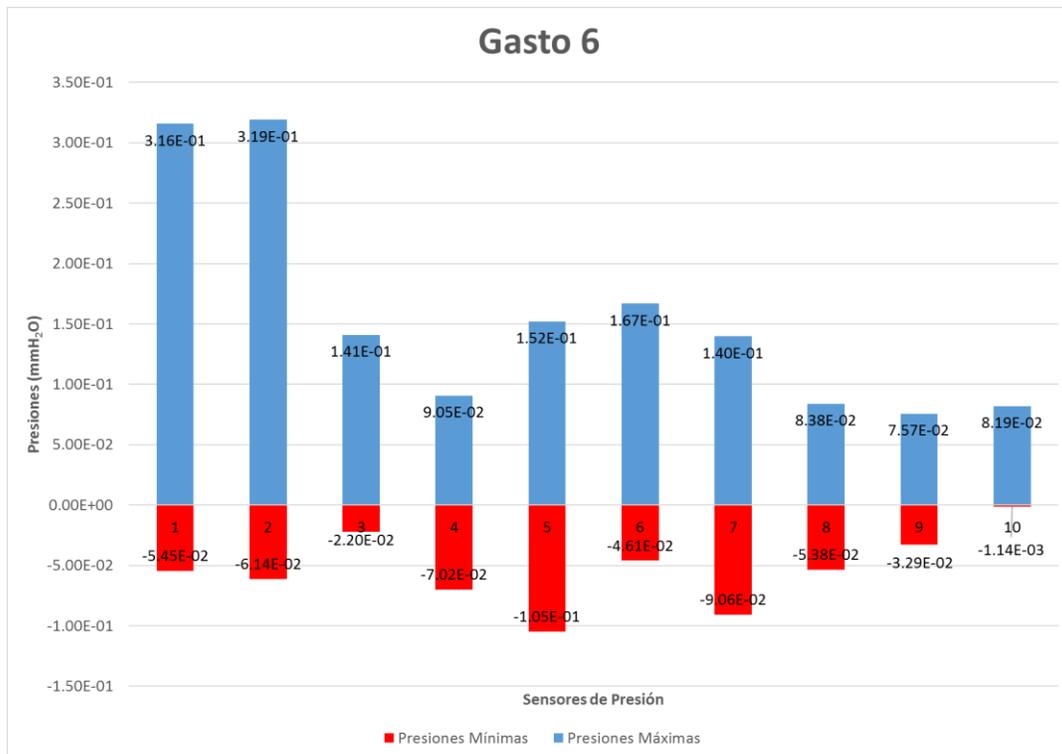


Figura 72. Distribución de presiones para $Q_6=239.603$ l/s (flujo saltante).

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

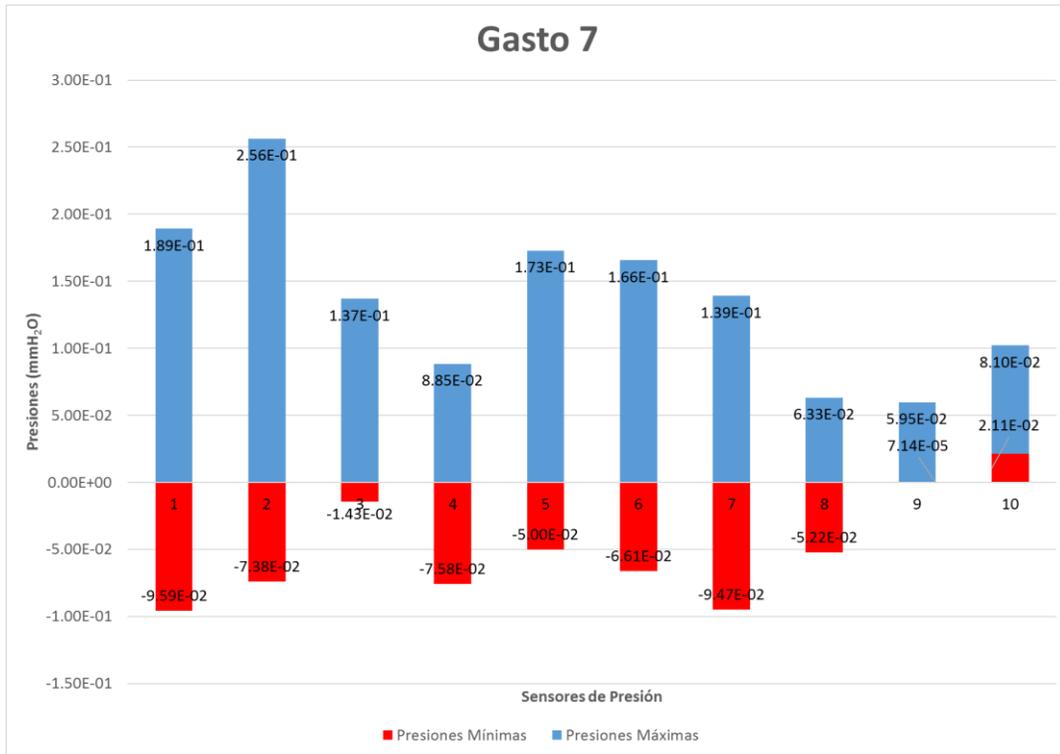


Figura 73. Distribución de presiones para $Q_7=251.724$ l/s (flujo rasante).

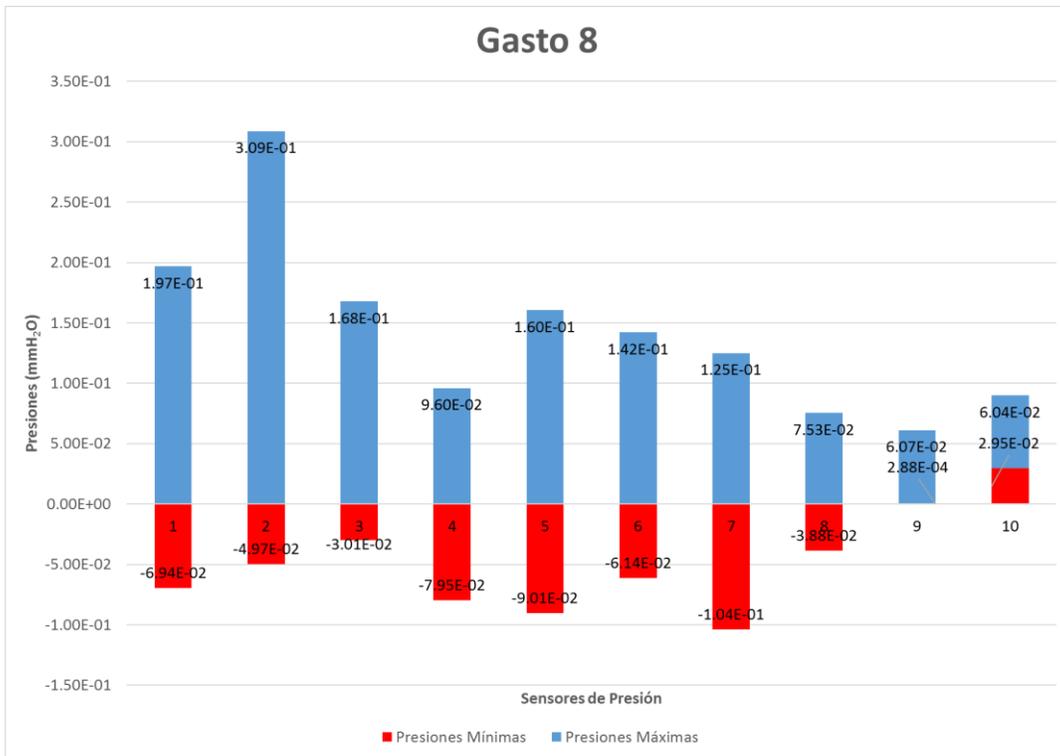


Figura 74. Distribución de presiones para $Q_8=264.07$ l/s (flujo rasante).

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

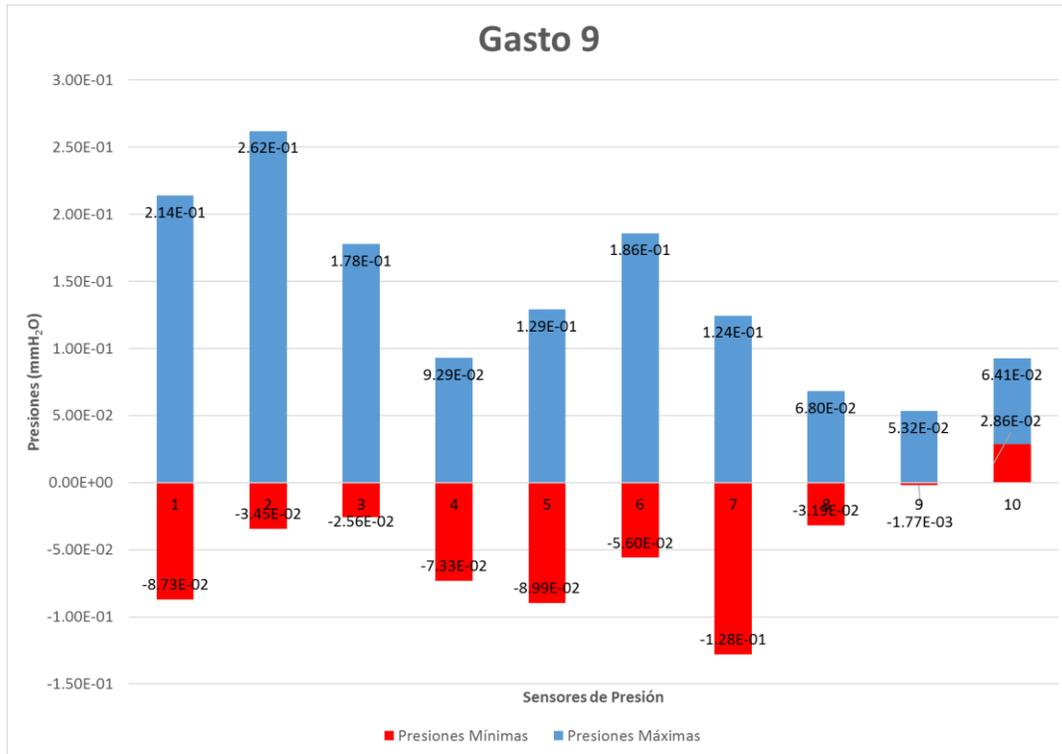


Figura 75. Distribución de presiones para $Q_9=274.529$ l/s (flujo rasante).

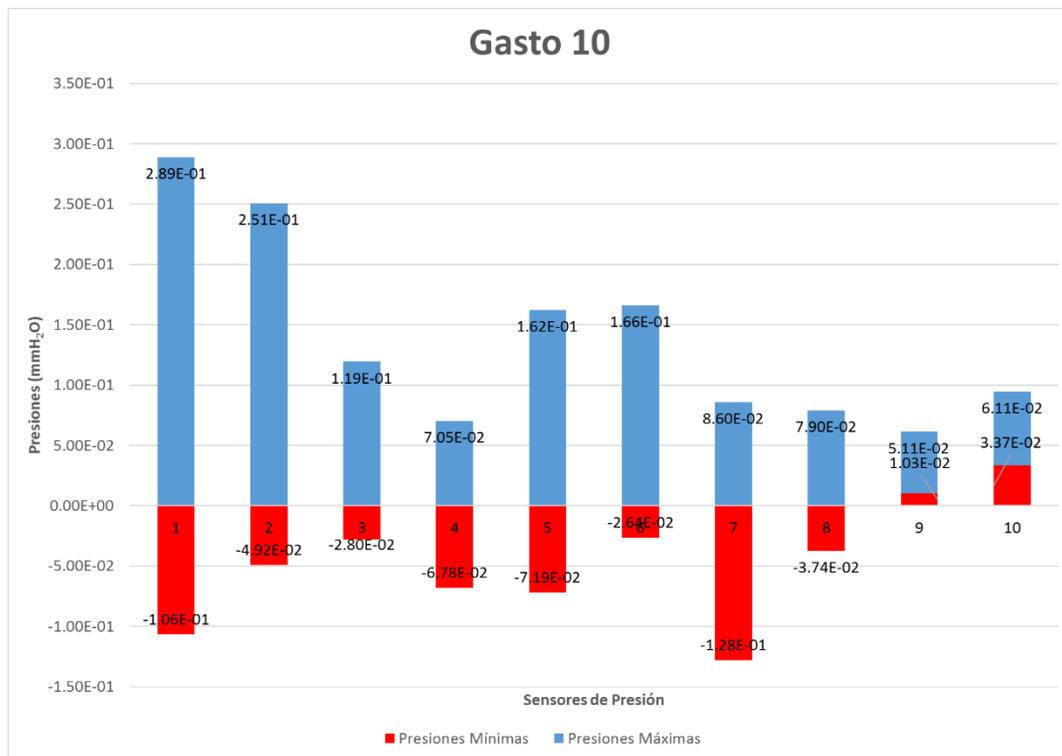


Figura 76. Distribución de presiones para $Q_{10}=280.878$ l/s (flujo rasante).

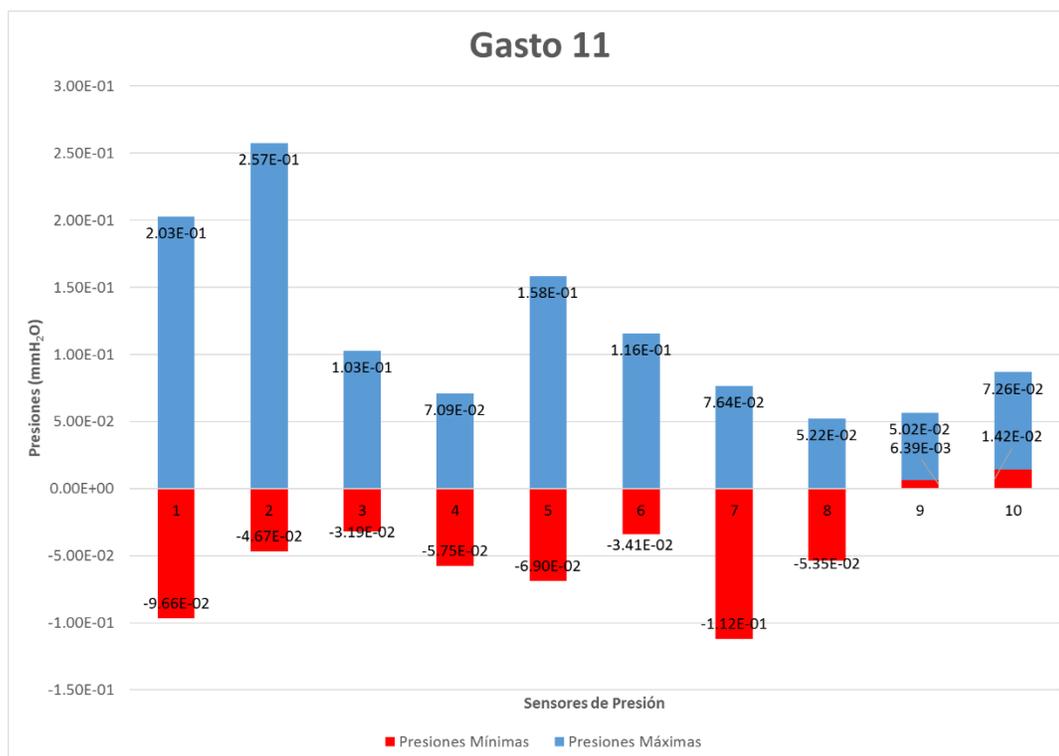


Figura 77. Distribución de presiones para $Q_{11}=283.878$ l/s (flujo rasante).

Puede observarse que a partir de un gasto igual a 251.724 l/s (Figura 73) en los piezómetros 9 y 10 las presiones máximas y mínimas son positivas a diferencia de los anteriores gastos y este comportamiento permanece en los gastos sucesivos, esto quiere decir que en la carga total no se encuentra cavidades de aire en el pseudo fondo de los escalones, por lo que se cuenta con la presencia de una zona no aireada. Se deduce que existe un cambio de régimen en el flujo, es decir, se pasó de un flujo saltante donde desde el inicio de vertido se presentan caídas sucesivas, es por esto que en gastos por debajo de los 251.724 l/s en todos los piezómetros se presentan presiones negativas, a un flujo rasante donde de acuerdo a la revisión de literatura (Apartado 2.2.3) en primera instancia se encuentra la zona inicial donde el flujo es no aireado (presiones positivas), seguidamente se desarrolla la capa límite que aumenta hasta alcanzar la superficie libre provocando la aireación natural del flujo, que es donde se encuentra presente el punto de incepción y con ello el comienzo de un flujo gradualmente variado.

Debajo de la corriente principal en las cavidades formadas por los escalones se observan vórtices de flujo recirculante que no son sólo visibles a simple vista, sino que también lo indican las lecturas de los piezómetros por la presencia de presiones negativas.

Para gastos a partir de los 251.724 l/s se presenta lo que se conoce como aguas blancas.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

Para observar lo anteriormente dicho se presenta una comparación de imágenes con un gasto por debajo a los 251.724 l/s y otro por encima de este.



Figura 78. Gasto 3, $Q_3=161.242$ l/s (flujo saltante tipo NA1)

Se puede observar que el flujo es completamente aireado desde el vertido por lo que prácticamente se observa igual en toda la rápida.

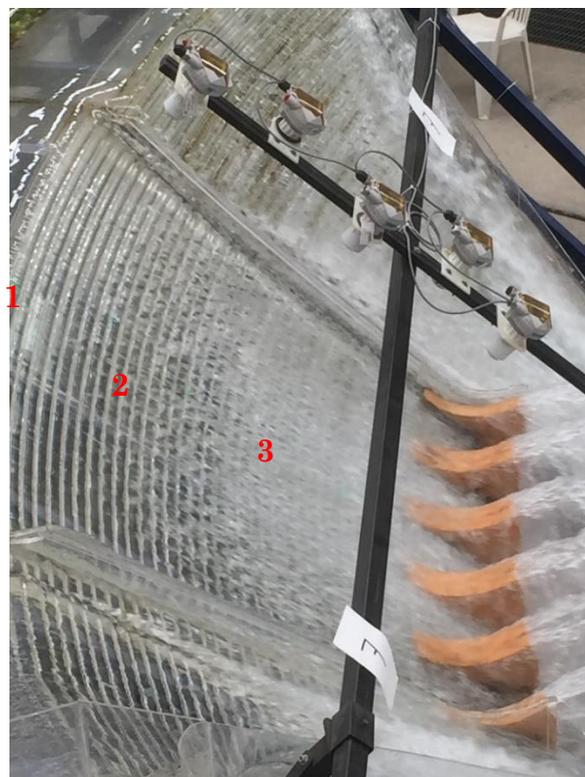


Figura 79. Gasto 7, $Q_7=251.724$ l/s (flujo rasante tipo SK3)

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

Pueden observarse tres diferentes zonas, la zona 1 o inicial donde el flujo no es aireado y la superficie libre se caracteriza por ser lisa y transparente, la zona 2 donde se marca el comienzo de un flujo gradualmente variado y la zona 3 donde ocurre una rápida autoaireación (presencia de aguas blancas) y el flujo es relativamente uniforme.

Con ayuda del análisis de presiones se sabe el régimen de flujo y se obtiene una primera idea de la magnitud del rango de la distancia a partir de la corona donde se presentaría el punto de incepción, encontrándose entre el sensor 10 y el sensor 8 (Figura 80), debido a que no se encuentran sensores de presión sucesivos (en cada escalón) se toma como referencia de la ubicación del punto de incepción el sensor de presión 9, por lo que solo para gastos de operación superiores a los 251.724 l/s serán tomados en cuenta en los siguientes análisis.

No. De gasto	No de vueltas	Carga h en (mm)	Gasto (l/s)
7	16	191	251.724
8	17	197	264.07
9	18	202	274.529
10	19	205	280.878
11	20	206	283.878

Tabla 10. Gastos a analizar.

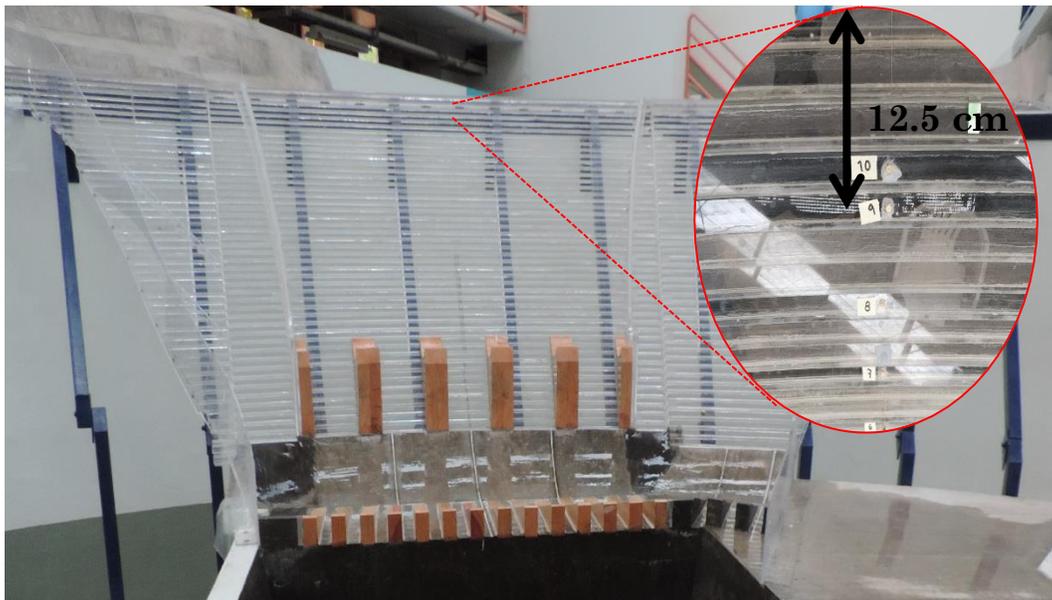


Figura 80. Rango de longitud de la aparición del punto de incepción en base a los datos de presión.

5.2.2 PERFILES

A continuación, se presentan los resultados de las cotas obtenidas con los sensores para generar el perfil de la rápida escalonada.

NR se refiere a la distancia tomada a partir de las narices de los escalones a los sensores, N7 a N11 se refiere a la altura de la lámina de agua hasta los sensores para cada gasto correspondiente, es decir, para el gasto 7 (Q_7) al gasto 11 (Q_{11}).

NIVEL CORRESPONDIENTE A CADA GASTO	SENSOR 1 (cm)	SENSOR 2 (cm)	SENSOR 3 (cm)	SENSOR 4 (cm)	SENSOR 5 (cm)
NR	62.50	64.30	66.80	70.10	70.80
N7	57.85	60.15	62.65	65.60	65.40
N8	57.75	60.05	62.55	65.55	65.30
N9	57.80	60.05	62.55	65.55	65.25
N10	57.75	59.95	62.45	65.35	65.10
N11	57.65	59.95	62.45	65.40	65.10

Tabla 11. Valor de cotas obtenidas con los sensores de nivel.

Si se quiere saber el valor del tirante del flujo lo único que se tiene que realizar es la diferencia de NR con las lecturas de los sensores, como se muestra en la siguiente tabla.

NIVEL CORRESPONDIENTE A CADA GASTO	SENSOR 1 (cm)	SENSOR 2 (cm)	SENSOR 3 (cm)	SENSOR 4 (cm)	SENSOR 5 (cm)
N7	4.65	4.15	4.15	4.50	5.40
N8	4.75	4.25	4.25	4.55	5.50
N9	4.70	4.25	4.25	4.55	5.55
N10	4.75	4.35	4.35	4.75	5.70
N11	4.85	4.35	4.35	4.70	5.70

Tabla 12. Resultado de las diferencias de cotas.

Como puede observarse en la Tabla 12 en los sensores 2 y 3 no se presenta ningún cambio en el tirante para ninguno de los gastos de estudio, esto concuerda con el tipo de régimen rasante que se tiene ya que las características del flujo permanecen casi constantes volviéndose el flujo uniforme sin presentar cambios en el tirante o concentración de aire (Apartado 2.2.3).

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

El cambio del valor del tirante que se presenta en el sensor 1 se debe a la presencia de disipadores de energía al final de vertedor escalonado, estos elementos aguas abajo repercutieron en las medidas tal como se observa.



Figura 81. Ubicación del sensor 1 y de los disipadores de energía al final de la rápida

Se presentan los perfiles resultantes junto con la escalonada y los vértices de las narices de los escalones para una mejor observación.

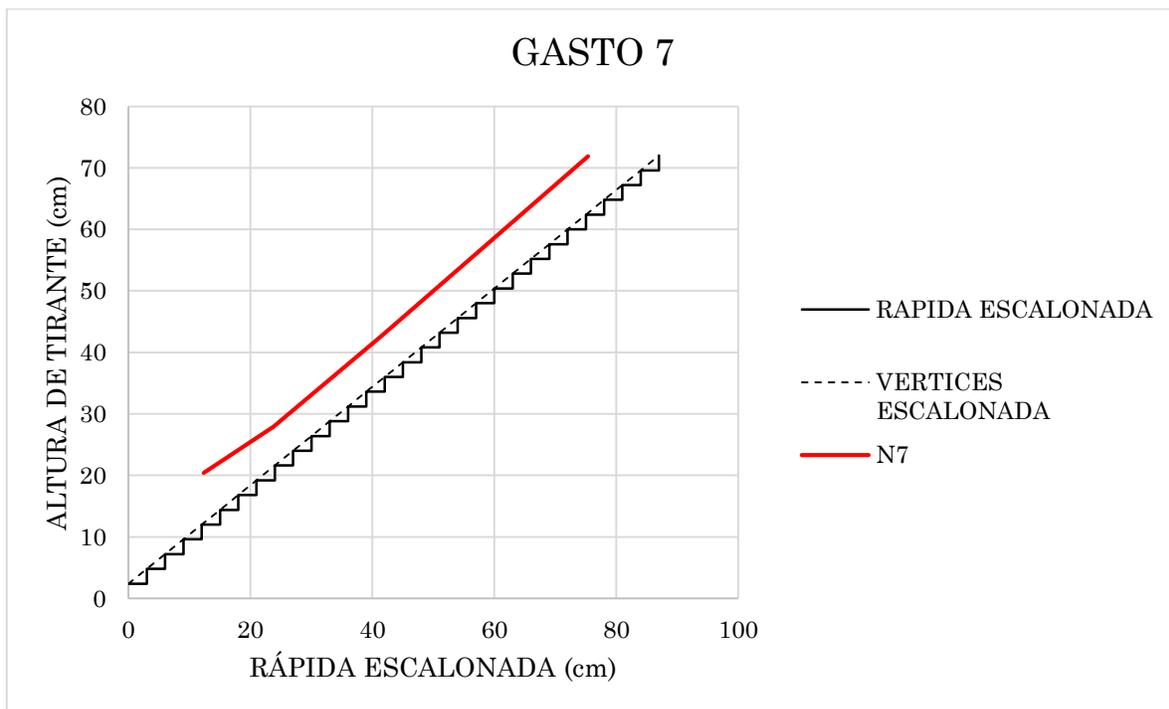


Figura 82. Lecturas de nivel para un gasto $Q_7=251.724$ l/s (flujo rasante tipo SK3).

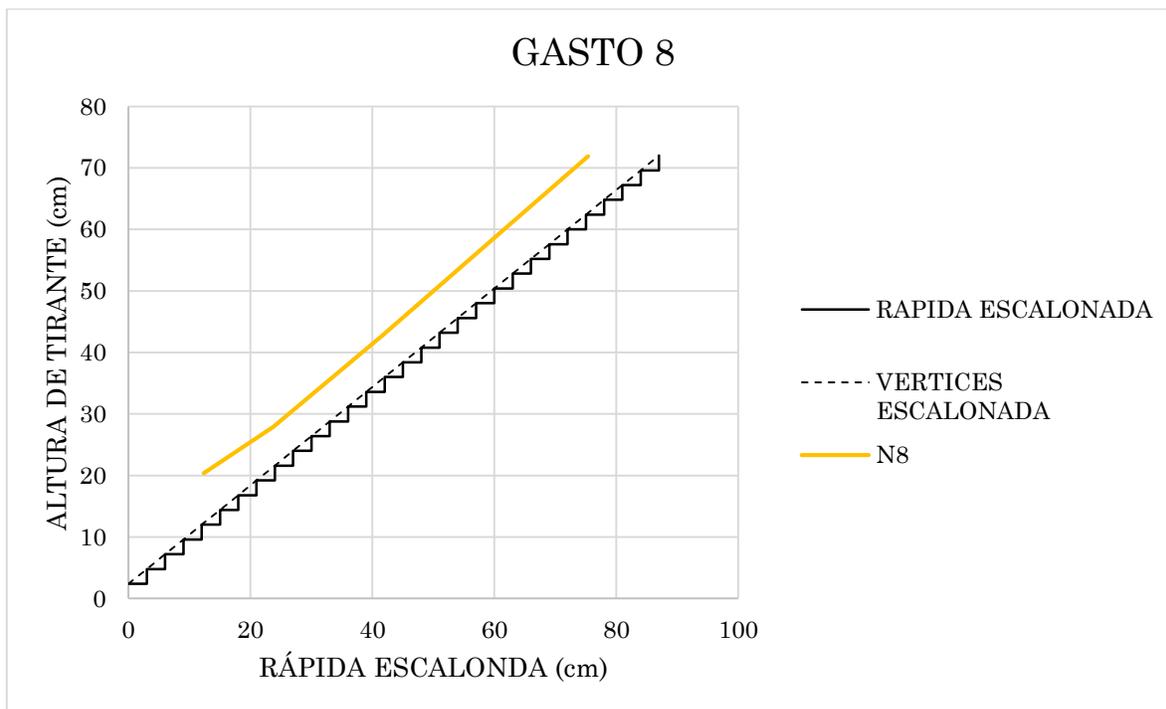


Figura 83. Lecturas de nivel para un gasto $Q_8=264.07$ l/s (flujo rasante tipo SK3).

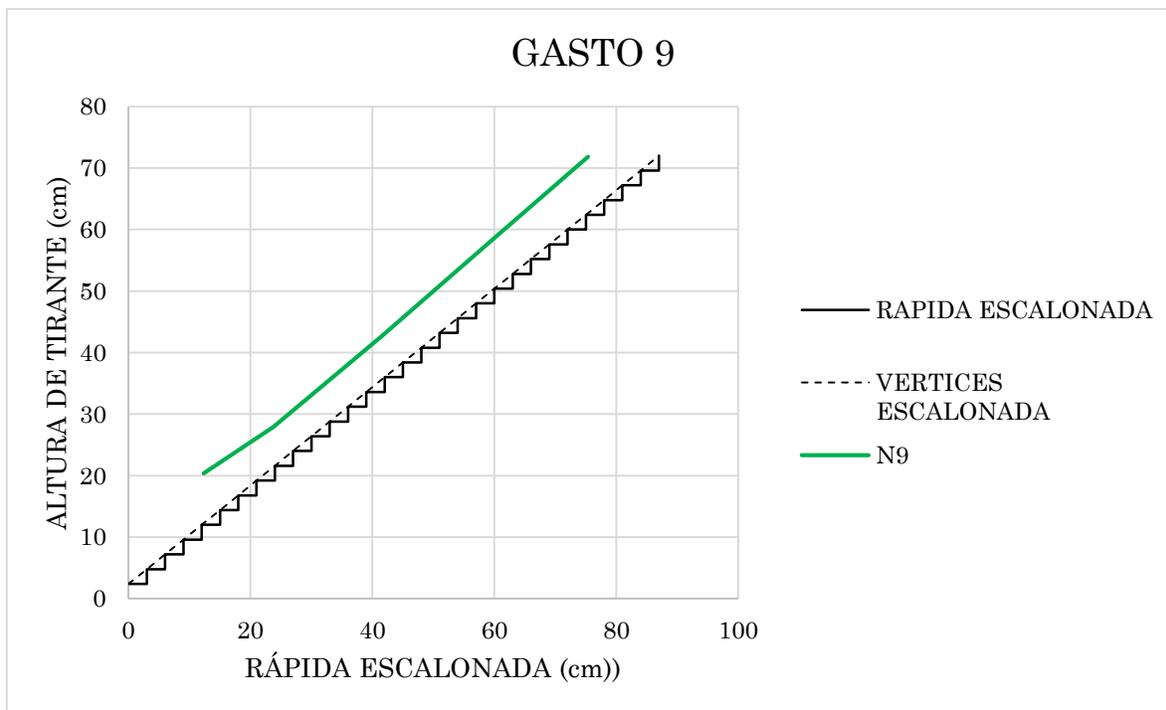


Figura 84. Lecturas de nivel para un gasto $Q_9=274.529$ l/s (flujo rasante tipo SK3).

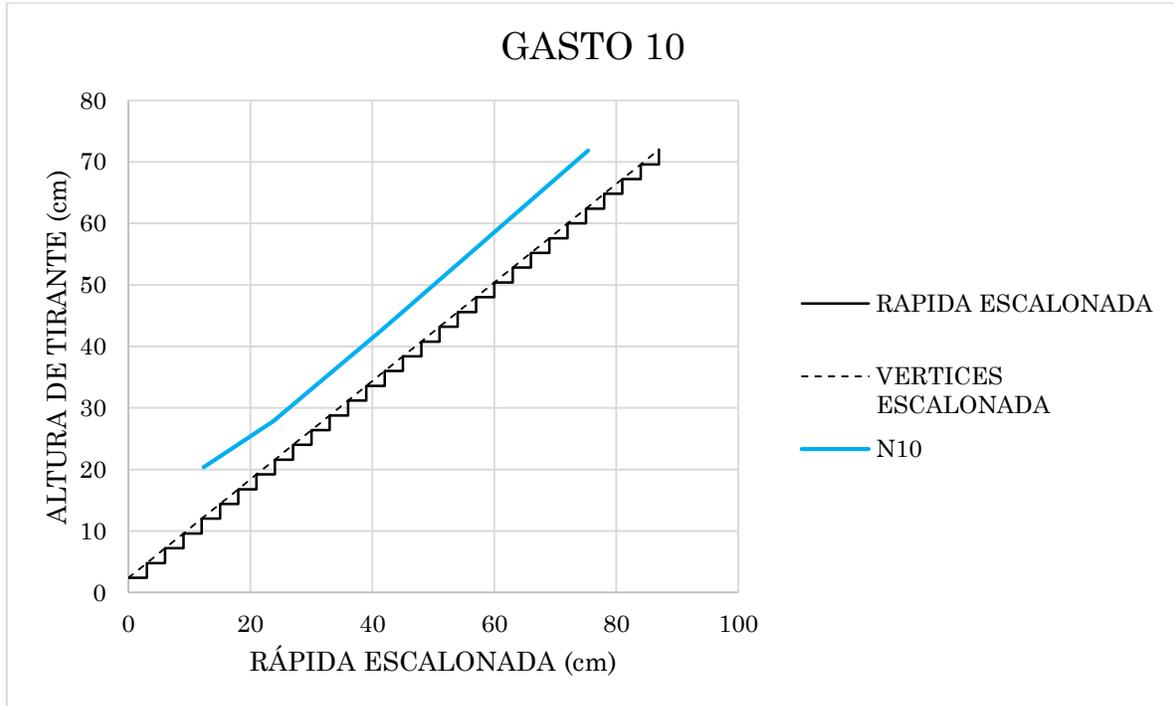


Figura 85. Lecturas de nivel para un gasto $Q_{10}=280.878$ l/s (flujo rasante tipo SK3).

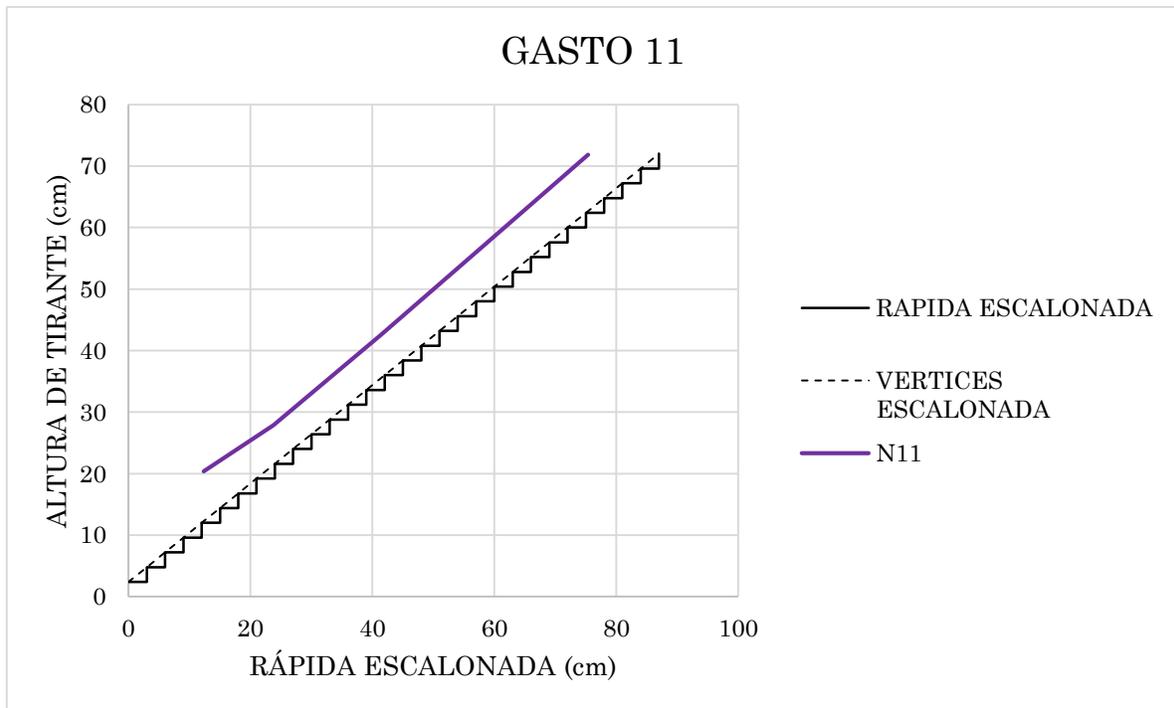


Figura 86. Lecturas de nivel para un gasto $Q_{11}=283.878$ l/s (flujo rasante tipo SK3).

De acuerdo a los datos obtenidos por los sensores de nivel y los piezómetros se señala la posible distancia (L_I) en el cual se está presentando el punto de incepción, esto es a partir de la posición del sensor de nivel 4 hacia aguas arriba, es decir, a 41.50 cm a partir de la corona, donde se presenta el crecimiento de la capa limite.

Lo mencionado anteriormente se debe al cambio de presiones que señalan la desaparición de presiones negativas (sensores 9 y 10, Apartado 5.2.1) y lo que señala el sensor de nivel 4, el inicio de flujo gradualmente variado y el comienzo de la región de flujo uniforme (Figura 13), cumpliéndose así lo mencionado en el Apartado 2.2.3 y en el Apartado 2.3 (Figura 19).

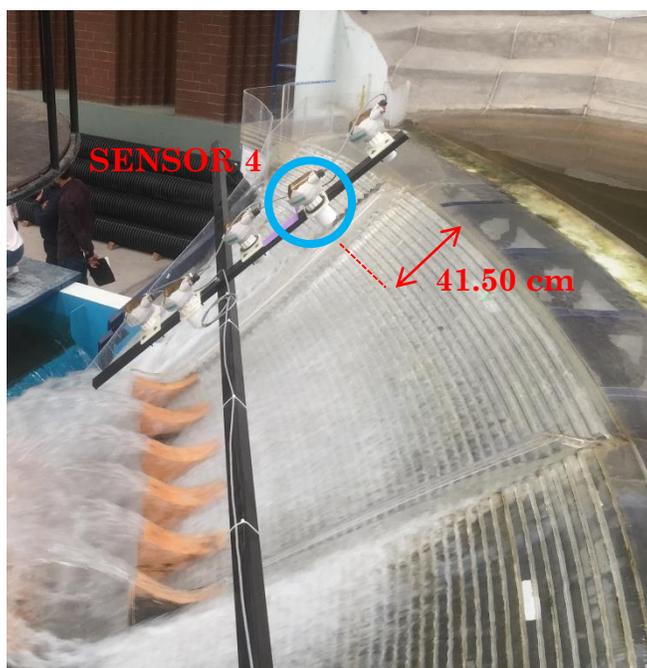


Figura 87. Rango de la aparición del punto de incepción en base a los sensores de nivel.

5.3 ANÁLISIS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS Y COMPARACIÓN CON LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presenta la aplicación de los diferentes modelos empíricos que han deducido los investigadores del tema, tal como se menciona en la revisión de literatura. Se verifica que el modelo del Zapotillo cumpla con los requerimientos necesarios para cada fórmula, el resultado cuantitativo que se obtenga será comparado con lo que se ha deducido hasta el momento de las pruebas experimentales.

5.3.1 APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS

Desde inicio de las décadas de los 80, que empezó a extenderse en todo el mundo la construcción de presas de CCR, se ha ido avanzando en el conocimiento de las características del flujo que se establece en vertedores escalonados, sin embargo, a pesar de esto, aún existen aspectos del flujo sobre vertedores y canales escalonados que no han sido totalmente comprendidos, ejemplo de esto es la ubicación del punto de incepción, se han propuesto metodologías para la estimación de sus características, empleando básicamente, resultados experimentales de modelos de laboratorio por lo que las metodologías para el cálculo son de carácter empírico.

A continuación en la Tabla 13, se presentan las metodologías para el cálculo de las características del punto de incepción presentadas en la revisión de literatura (Apartado 2.3), la implementación de estas metodologías dependerá de sus respectivas restricciones, por lo que también se señala cuales serán aplicadas al modelo El Zapotillo.

- Ubicación del punto de incepción

Autor	Fórmula	Limitaciones	Aplica
(Chanson H. , 1994)	$\frac{L_I}{k_s} = 9.719(\sin\theta)^{0.0796}(F)^{0.713}$	$27^\circ < \theta < 53^\circ$	$\theta_{Zapotillo} = 39^\circ$ ✓
	$\frac{d_I}{k_s} = \frac{0.4034}{(\sin\theta)^{0.04}}(F)^{0.592}$		
(Iguacel & García, 1999)	$\frac{L}{H} = 5.6 \left(\frac{q}{g^{\frac{1}{2}} H^{\frac{3}{2}}} \right)^{0.8}$	No se menciona	✓
(Matos, 1999)	$\frac{L_I}{k_s} = 6.289F^{0.734}$	$1v:0.7h \leq S \leq 1v:0.8h$	$S_{Zapotillo} = 0.81$ X
	$\frac{d_I}{k_s} = 0.361F^{0.606}$		
(Chamani M. , 2000)	$\frac{L_I}{k_s} = 8.29F^{0.85}$	No se menciona	✓
(Sánchez Juny, 2001)	$\frac{L_I}{k_s} = 10.2F^{0.7}$	No se menciona	✓
(Boes & Hager, 2003)	$L_I = \frac{5.90q^{6/5}}{(\sin\theta)^{7/5} h^{1/5}}$	$26^\circ < \theta < 75^\circ$	$\theta_{Zapotillo} = 39^\circ$ ✓
(Meireles, Renna, Matos, & Bombardelli, 2012)	$\frac{L_I}{k_s} = 6.75F^{0.76}$	No se menciona	✓
	$\frac{d_I}{k_s} = 0.35F^{0.59}$		

Tabla 13. Fórmulas de ubicación del punto de incepción.

Para la Tabla 13 se considera lo siguiente:

$$ks = h \cos\theta \quad (46)$$

$$F = q_w / \sqrt{g \sin\theta (h \cos\theta)^3} \quad (47)$$

q_w es la descarga por unidad de ancho ($m^3/s/m$);

θ es el ángulo ($^\circ$) entre el pseudo fondo formado por las caras de los escalones y la horizontal;

g es la aceleración gravitacional (m/s^2).

Los datos correspondientes al modelo de El Zapotillo que se utilizaron para las formulas de la Tabla 13 son los siguientes:

Parámetro	Unidades	Valor	
Ángulo de la pendiente [θ]	Grados	39°	
Pendiente [S]	Adimensional	0.81	
Longitud de la huella [L]	m	0.030	
Altura del escalón [H]	m	0.024	
Gravedad [g]	m/s ²	9.81	
Ancho de vertido	m	5.3964	
Gasto [Q]	m ³ /s	Q ₇	0.251724
		Q ₈	0.26407
		Q ₉	0.274529
		Q ₁₀	0.280878
		Q ₁₁	0.283878
Gasto unitario [q _w]	m ³ /s/m ²	q _{w7}	0.046646653
		q _{w8}	0.048934475
		q _{w9}	0.050872619
		q _{w10}	0.052049144
		q _{w11}	0.05260507
Numero de Froude (F)	Adimensional	F ₇	7.37020098
		F ₈	7.73167823
		F ₉	8.03790621
		F ₁₀	8.22379793
		F ₁₁	8.31163462
Factor de fricción de Nikuradse [ks]	Adimensional	0.0186515	

Tabla 14. Parámetros del modelo El Zapotillo.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

Debido a las restricciones del modelo matemático empírico de (Matos, 1999), no es posible realizar un análisis del cálculo del índice de cavitación en el punto de inyección (σ_i) y del índice de cavitación crítico en el punto de inyección (σ_{CR}) deducido por el mismo autor como se menciona en el Apartado 2.4.

Ahora se presentan los resultados de la aplicación de las fórmulas anteriores.

No. De gasto	Gasto		Gasto unitario	ks	No. De Froude F
	lps	m ³ /s	m ³ /s/m		
7	251.724	0.252	0.047	0.01865	7.3702
8	264.07	0.264	0.049	0.01865	7.7317
9	274.529	0.275	0.051	0.01865	8.0379
10	280.878	0.281	0.052	0.01865	8.2238
11	283.878	0.284	0.053	0.01865	8.3116

Tabla 15. Datos de inicio para el cálculo del punto de inyección.

GASTOS	Chanson, 1994		Iguacel & García, 1999	Chamani, 2000	Sanchez Juny, 2001	Boes & Hager, 2003	Meireles et al, 2012	
	L _i (m)	d _i (m)	L _i (m)	L _i (m)	L _i (m)	L _i (m)	L _i (m)	d _i (m)
7	0.726	0.025	0.408	0.845	0.770	0.601	0.575	0.021
8	0.751	0.026	0.424	0.880	0.796	0.637	0.596	0.022
9	0.772	0.026	0.437	0.909	0.818	0.667	0.614	0.022
10	0.785	0.027	0.445	0.927	0.832	0.686	0.624	0.023
11	0.791	0.027	0.449	0.935	0.838	0.694	0.629	0.023

Tabla 16. Resultados de la ubicación del punto de inyección.

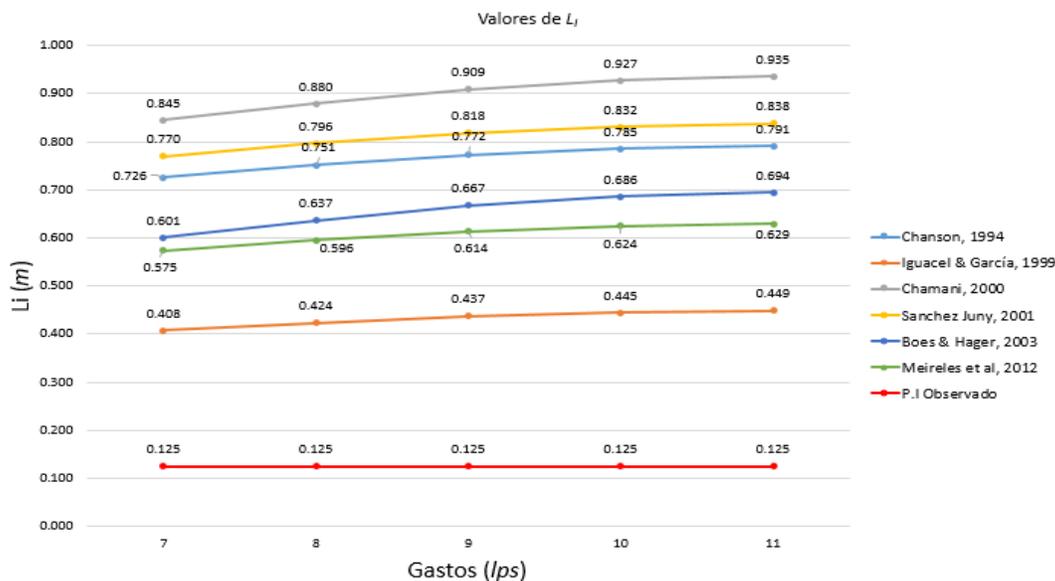


Figura 88. Valores de L_i.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

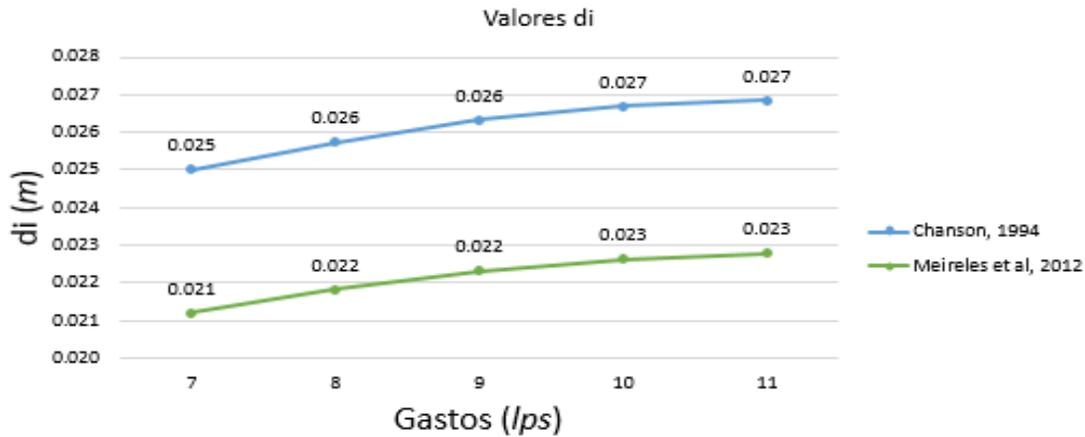


Figura 89. Valores de d_i .

De la tabla y gráfica anteriores se puede observar que los resultados que más se acercan a los rangos de la ubicación del punto de incepción son los de Iguacel & García *et al*, sin embargo, estos solo cumplen para el rango definido anteriormente por los sensores de nivel (41.50 cm a partir de la corona), pero no cumplen con el rango observado experimentalmente (14 cm a 25 cm a partir de la corona).

A continuación, para una mejor visualización de los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos matemáticos empíricos al modelo del Zapotillo, se presentan los resultados como $\frac{L_I}{k_s}$ y $\frac{d_I}{k_s}$ versus el número de Froude (F), donde k_s se estimó como la profundidad normal a la superficie (46).

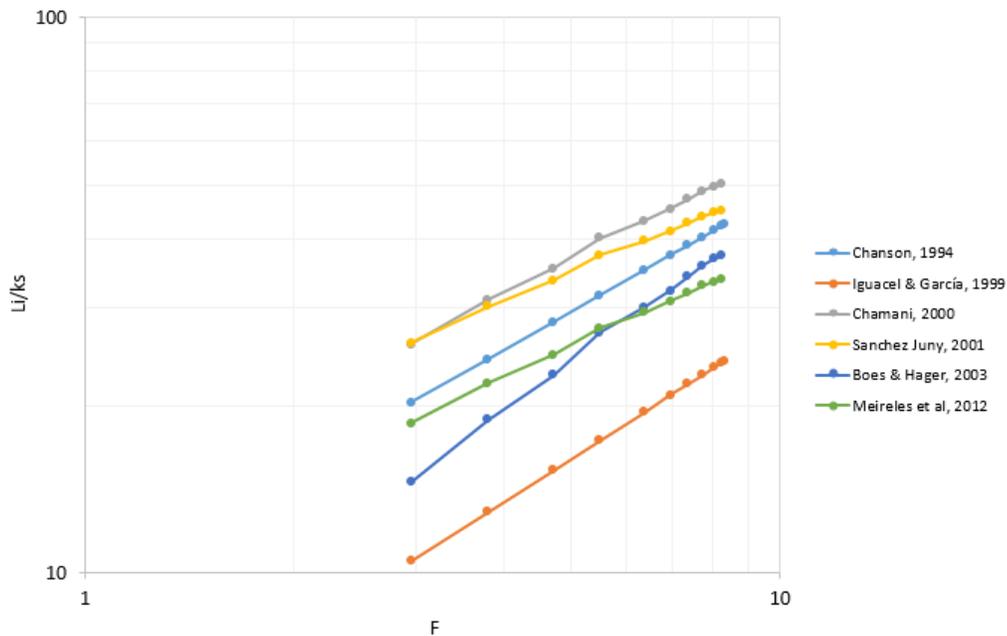


Figura 90. Localización del punto de incepción, L_I/k_s vs F .

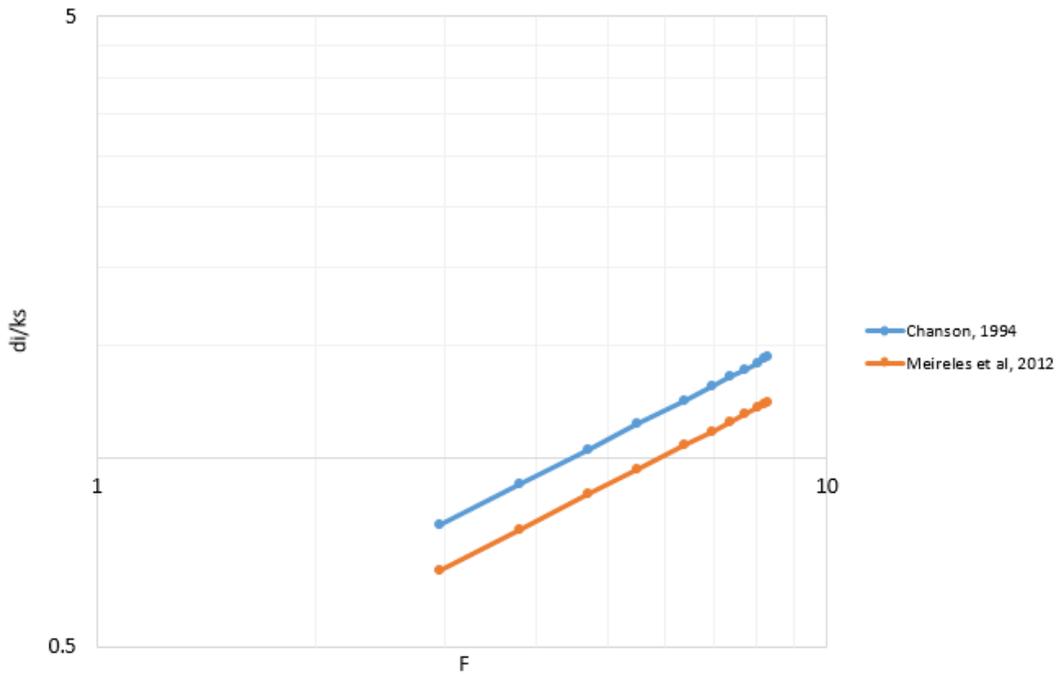


Figura 91. Profundidad en el punto de inyección, d_1/k_s .

Comparando la Figura 90 y la Figura 91 con la Figura 20 y la Figura 21, respectivamente, se puede observar que existe una tendencia del comportamiento de las propiedades del flujo con respecto de los trabajos realizados por otros autores, aun siendo las características geométricas del modelo físico de la presa el Zapotillo, como se ha mencionado con anterioridad únicas a nivel mundial debido a la modificación de altura de la cortina.

- Concentración de aire en el punto de incepción

A continuación, se presentarán las fórmulas aplicables no solo al modelo del Zapotillo, sino que también se adecuen a los instrumentos de medición disponibles en el laboratorio. Los parámetros que se consideraron se mencionan con anterioridad en la Tabla 14.

Autor	Fórmula	Limitaciones	Aplica
(Wood, 1983)*	$\frac{dq_{ar}}{ds} = V_p - \bar{C}v_b \cos\alpha$	No se menciona	X
(Chanson H. , 1994)	$\bar{C} = 0.9 \sin\alpha$	$50^\circ < \theta$	✓
(Matos, 1999)	$\bar{C}(s') = 0.210 + 0.29 \exp(-0.497(\ln s' - 2.972)^2)$	$0 \leq s' \leq 30$	✓
	$\bar{C}(s') = \left(0.888 - \frac{1.065}{\sqrt{s'}}\right)^2$	$30 \leq s' \leq 100$	
(Matos, 1999)	$\bar{C} = 0.76 \sin\alpha^{0.82}$	No se menciona	✓
(Chanson H. , 2002a)*	$\bar{C} = 1 - \tanh^2\left(K' - \frac{y}{2DY_{90}}\right)$	No se menciona	X
(Boes & Hager, 2003)	$\bar{C}_i = 1.2 \times 10^{-3}(240^\circ - \theta)$	$26^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$	✓
(González & Chanson, 2007)*	$\bar{C} = \int_0^{Y_{90}} C \cdot dy$	No se menciona	X

Tabla 17. Fórmulas de concentración de aire en el punto de incepción.

Autor	Resultado de \bar{C}
(Chanson H. , 1994)	0.56638835
(Matos, 1999)	Para un $Li=17.5$ cm y $di=4.95$ cm calculado mediante las fórmulas de (Chanson H. , 1994), se obtiene una $s'=94.8484848$. $\bar{C} = 0.6062897$
(Matos, 1999)	0.50652544
(Boes & Hager, 2003)	0.2412

Tabla 18. Resultados de la concentración en el punto de incepción.

* No aplica debido a que no se cuenta con la instrumentación necesaria para la obtención de ciertos datos.

* No aplica debido a que no se cuenta con la instrumentación necesaria para la obtención de ciertos datos.

5.3.2 AJUSTE DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS

Debido a que los valores medidos en el mundo real difícilmente se ajustan de forma perfecta a un modelo, en primer lugar debido a errores de medida, pero principalmente a que cualquier modelo matemático dado que es una simplificación del mundo real, si éste tuviera en cuenta todos los factores que influyen en un conjunto de variables, sería inmanejable, en ocasiones es necesario ajustar el o los modelo matemáticos, eligiendo aquellos valores de los parámetros tales que la distancia entre los valores medidos de la variable X y los valores predichos aplicando el modelo minimizan el error cometido.

Los resultados de la aplicación de los modelos matemáticos empíricos al caso del Zapotillo para la ubicación del punto de inyección no coinciden con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, una de las principales causas podría adjudicarse entre otras razones a la escala de línea del modelo, pero sobre todo a su tipo de descarga convergente.

Por tanto, existe la necesidad de realizar un ajuste a los modelos matemáticos empíricos ya descritos mediante un ajuste de curva con los datos obtenidos experimentalmente, es decir, encontrar los valores de los parámetros que mejor ajustan los modelos matemáticos a los datos experimentales, cabe aclarar que los ajustes realizados para cada modelo matemático serán solo de aplicación particular al modelo del Zapotillo.

Para realizar el ajuste de curva se utilizó una herramienta numérica en Matlab® llamada Curve Fitting Toolbox (CFT), la cual está diseñada para realizar ajustes de series de datos con funciones definidas por el usuario, determinando los valores de las constantes de la función que mejor ajustan a dicha serie (minimiza una función de distancia entre la serie de datos y la función definida por el usuario).

Para el uso de esta herramienta es necesario tener un conjunto de datos específicos relacionados entre sí, por tanto, para el ajuste de la curva que describe la relación entre el gasto unitario y el punto de inyección se requiere un número de gastos y conocer el punto de inyección correspondiente a cada uno, por ejemplo, el tener 10 gastos diferentes se requiere conocer sus 10 puntos de inyección correspondientes. De acuerdo a los resultados experimentales se tiene solamente un rango de la ubicación del punto de inyección correspondiente a los 5 gastos en régimen rasante.

Para la definición de la distancia de la posible ubicación del punto de inyección fue necesario considerar como parámetro de referencia los datos de los sensores de presión 9 y 10, debido a que señalan el cambio de régimen y la presencia o ausencia de aire en los escalones, como se menciona en el apartado 5.2.1, en el caso particular del modelo El Zapotillo se utiliza como punto de partida el primer gasto en régimen rasante ($Q_7=251.724 \text{ l/s}$), donde para la ubicación de su respectivo punto de inyección se propone

con una media aritmética dentro del rango establecido, en la Figura 92 se ejemplifica el rango de la ubicación del punto de incepción.

Número de sensor	Posición de sensor a partir de la corona hacia aguas abajo (cm)	Distancia entre los sensores (cm)	Media de la distancia (cm)	Distancia de la corona al punto de incepción propuesto (cm)
10	10	15	7.5	17.5
8	25			

Tabla 19. Propuesta de la ubicación del punto de incepción correspondiente al gasto $Q_7 = 251.724$ l/s.

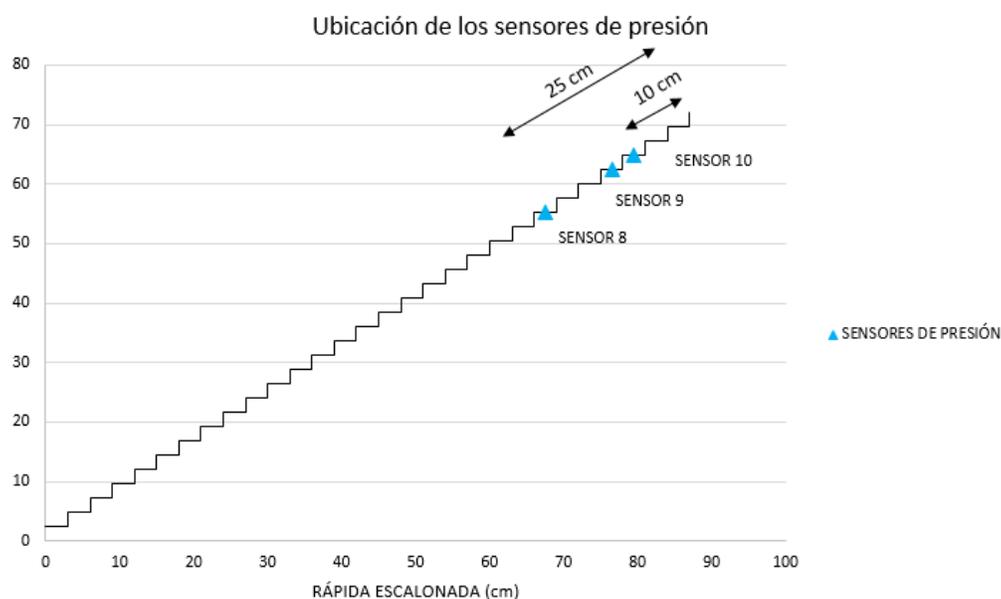


Figura 92. Rango de la ubicación del punto de inicio de aireación.

Como se menciona en el Apartado 5.2.1, los sensores de presión y de nivel no fueron colocados de manera continua (en cada escalón) esto dificulta la obtención de datos suficientes para encontrar una curva que se ajuste al comportamiento de los mismos.

Por lo tanto, para definir una curva con solo un gasto unitario y un punto de incepción propuesto, se genera un vector de gastos unitarios y otro de puntos de incepción, haciendo un incremento de 1×10^{-9} .

Dicho incremento del gasto unitario se considera igual al incremento lineal de la ubicación del punto de incepción, debido a que el cambio de la ubicación está directamente relacionado con el gasto unitario como se puede observar en los modelos matemáticos descritos en la revisión de literatura (Capítulo 2), a su vez, estos

incrementos se consideran que tienden a cero debido a la diferencia de magnitud de cuando menos 1×10^{-7} .

Partiendo de lo anteriormente descrito se proponen las siguientes ecuaciones para generar los vectores necesarios en el ajuste de curva.

$$f(q_w) = P_I \quad (48)$$

$$f(q_w + \Delta q_w) = P_I + \Delta P_I \quad \leftrightarrow \quad \Delta q_w = \Delta P_I \rightarrow 0 \quad (49)$$

Donde:

$f(q_w)$ describe la ubicación PI en función del gasto unitario (q_w);

P_I es el punto de incepción;

Δq_w es el incremento del gasto unitario y

ΔP_I es el incremento lineal de la ubicación del punto de incepción.

En la ecuación (48) se describe el punto de incepción en función del gasto unitario tal como se maneja en los modelos matemáticos propuestos por los investigadores del tema, en la ecuación (49) se propone el caso donde se incrementa a este gasto unitario un Δq_w que tienda a cero de tal forma que el resultado obtenido sea el punto de incepción con el incremento ΔP_I .

Este incremento Δq_w y ΔP_I , así como la representación numérica de las ecuaciones (48) y (49) se presenta en la Tabla 20.

Gasto unitario (q_w)	Incremento de Δq_w y ΔP_I	Longitud del Vector	Gasto unitario final ($q_w + \Delta q_w$)
0.052108008	0. 0.000000001	10	.052108009
Punto de incepción propuesto (P_I)			Punto de incepción propuesto final ($P_I + \Delta P_I$)
0.175			0.175000001

Tabla 20. Generación del vector de gasto unitario y del punto de incepción.

Una vez obtenidos los vectores se ingresan a la herramienta numérica en Matlab® llamada Curve Fitting Toolbox (CFT) para obtener las constantes de ajuste de curva por cada modelo matemático aplicable al modelo El Zapotillo descritos en la Tabla 13.

La configuración de las constantes de ajuste se presenta de la siguiente forma:

$$Li_{ajustado} = a \times Li + b \quad (50)$$

Donde a y b son las constantes multiplicativa y aditiva de ajuste correspondientemente.

A continuación, se presentan los resultados de ajuste de los modelos matemáticos analizados.

Constantes de ajuste	Chanson ajustado		Iguacel & García ajustado	Chamani ajustado	Sánchez Juny ajustado	Boes & Hager ajustado	Meireles et al ajustado	
	L_i	d_i	L_i	L_i	L_i	L_i	L_i	d_i
a	0.08629	0.46690	0.06747	0.09672	0.10060	0.05940	0.1041	1.82100
b	0.1101	0.03993	0.14490	0.06240	0.09896	0.15250	0.1107	0.01735

Tabla 21. Constantes de ajuste calculados con la herramienta CFT.

GASTOS	Chanson ajustado		Iguacel & García ajustado	Chamani ajustado	Sánchez Juny ajustado	Boes & Hager ajustado	Meireles et al ajustado	
	L_i (m)	d_i (m)	L_i (m)	L_i (m)	L_i (m)	L_i (m)	L_i (m)	d_i (m)
7	0.17273	0.05161	0.17242	0.14408	0.17643	0.18821	0.17051	0.05598
8	0.17491	0.05194	0.17349	0.14748	0.17907	0.19032	0.17272	0.05709
9	0.17673	0.05222	0.17440	0.15033	0.18128	0.19212	0.17458	0.05801
10	0.17782	0.05239	0.17494	0.15206	0.18261	0.19323	0.17570	0.05856
11	0.17834	0.05247	0.17520	0.15287	0.18323	0.19375	0.17623	0.05882

Tabla 22. Resultados aplicando las constantes de ajuste.

Para tener una idea más ilustrativa de los resultados anteriores, a continuación, se presentan los gráficos de las constantes el cálculo de L_i y d_i , así como el gráfico correspondiente al resultado final con las constantes de ajuste aplicadas.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

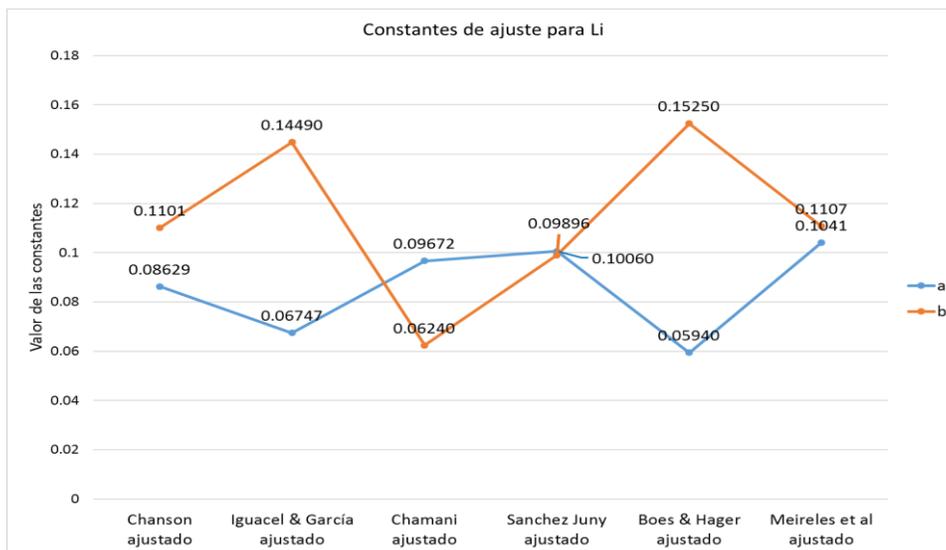


Figura 93. Constantes de ajuste para L_i .

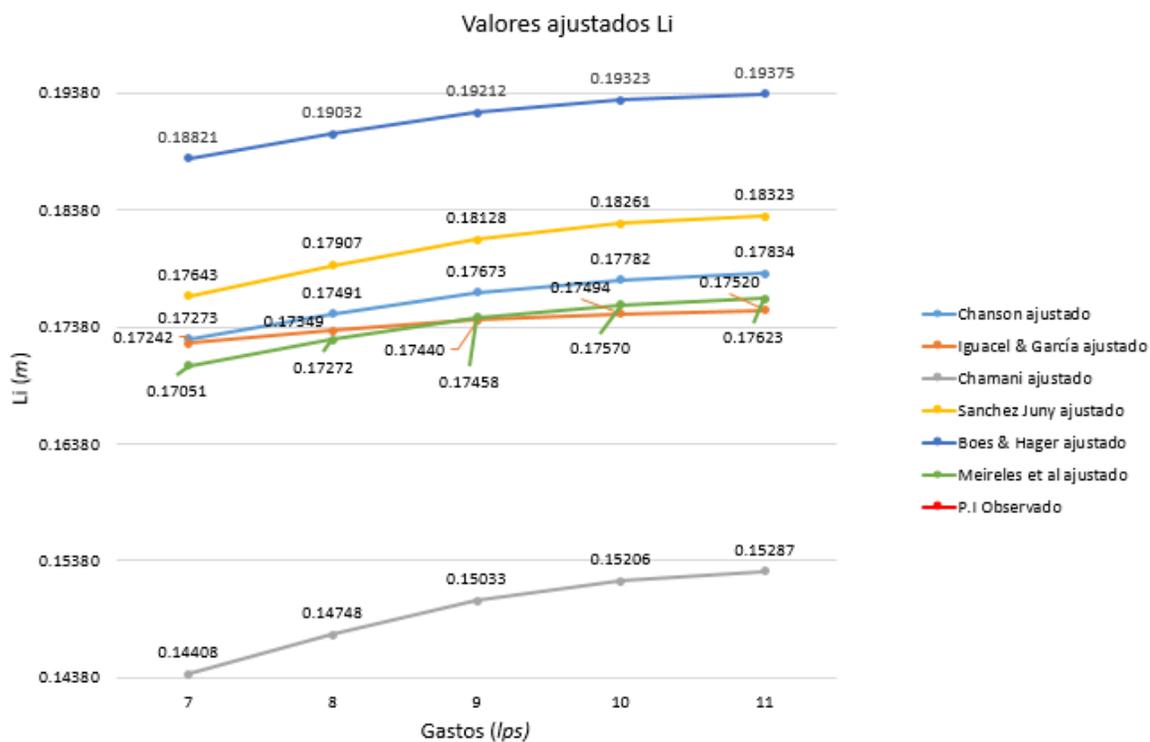


Figura 94. Resultados de L_i con la aplicación de las constantes de ajuste.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

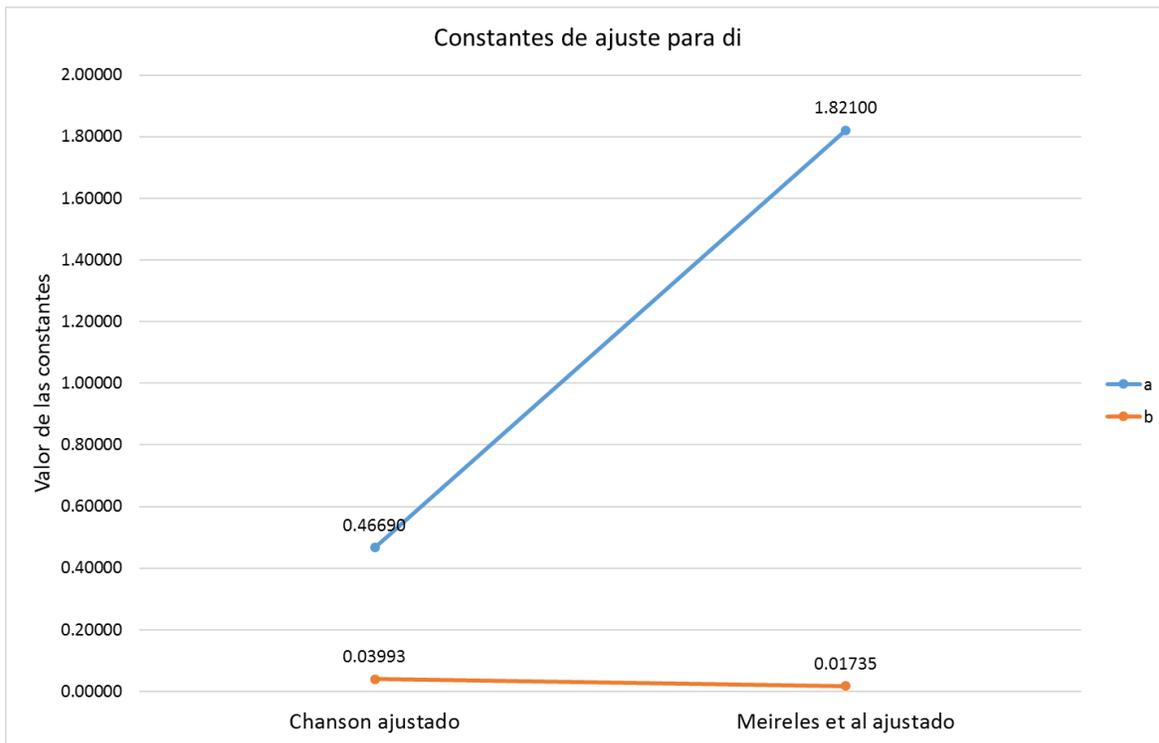


Figura 95. Constantes de ajuste para d_i .

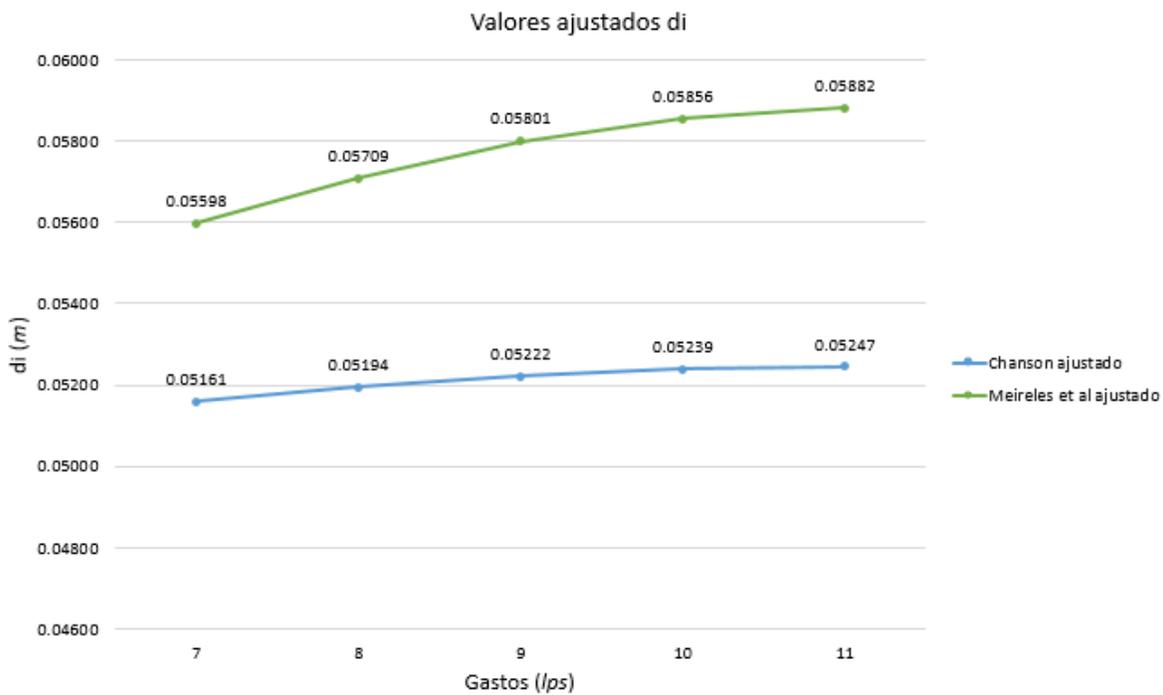


Figura 96. Resultados de d_i con la aplicación de las constantes de ajuste.

De los resultados ajustados se puede observar que con ayuda de la herramienta CFT todos los modelos matemáticos empíricos aplicables al caso del Zapotillo tienden a converger al rango de la ubicación del punto de incepción propuesto, debe prestarse especial atención a que las constantes de ajuste calculadas solamente son aplicables al caso particular del vertedor escalonado de la presa El Zapotillo.

5.4 ANÁLISIS DE IMÁGENES

La utilización de imágenes digitales y su procesamiento provee una técnica útil no intrusiva para realizar un análisis cualitativo del flujo.

De la Figura 97 a Figura 101, se describe el comportamiento oscilatorio del valor de los pixeles alrededor de un eje o línea de equilibrio marcado con una línea horizontal de color rojo, este valor es calculado como el punto medio entre el valor mínimo y el valor máximo de puede obtener cualquier pixel de la columna central de la matriz de pixeles.

Como se ha comentado anteriormente se delimita el área de interés entre el sensor 10 ubicado a 10 cm de la corona y el sensor 8 ubicado a 25 cm de la corona, y se propone el punto de incepción a 17.5 cm (Apartado 5.3.2), marcadas con una “x” respectivamente.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de imágenes para los gastos definidos en el apartado del análisis de las cargas de presión, se presenta el perfil de la intensidad de luz de la columna del centro de nuestra imagen, la cual está compuesta por una matriz de pixeles.

Se observa que el comportamiento oscilatorio corresponde al comportamiento generado por la carga de presiones, asumiendo que en la zona cercana a la corona hay una ausencia de aire debido al tipo de régimen que se tiene (rasante), mientras que después del sensor 8 existe una amplitud mayor correspondiente a las presiones negativas, es decir, una zona aireada. Por lo tanto, el perfil de la columna central nos arroja información homóloga a los análisis de los resultados observados prácticos.

Para saber la distancia equivalente del punto de incepción en cm con respecto a los pixeles de la imagen, se considera el número de pixeles en la columna central de la imagen y la longitud de área de estudio, es decir:

$$\frac{\text{longitud del área de estudio}}{\text{número de pixeles en la columna central de la imagen}} = \frac{138 \text{ cm}}{800 \text{ pixeles}} \quad (51)$$

El resultado de la ecuación anterior es 0.1725 cm/pixel, es decir, el valor de cada pixel es igual a 0.1725 cm.

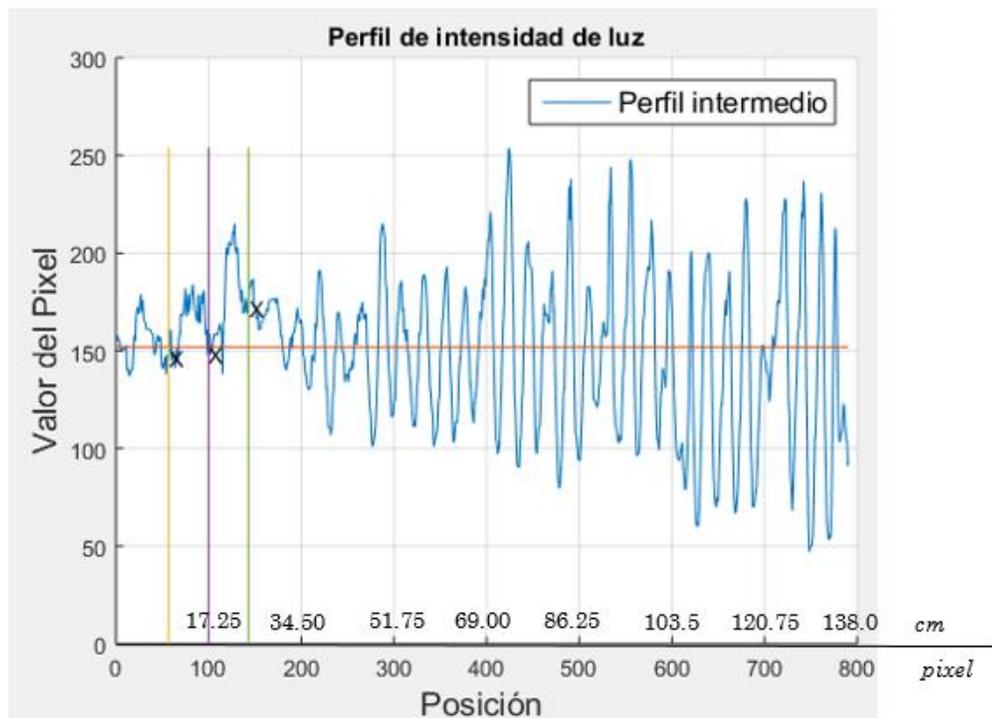


Figura 97. Perfil central para un $Q_7=251.724$ l/s.

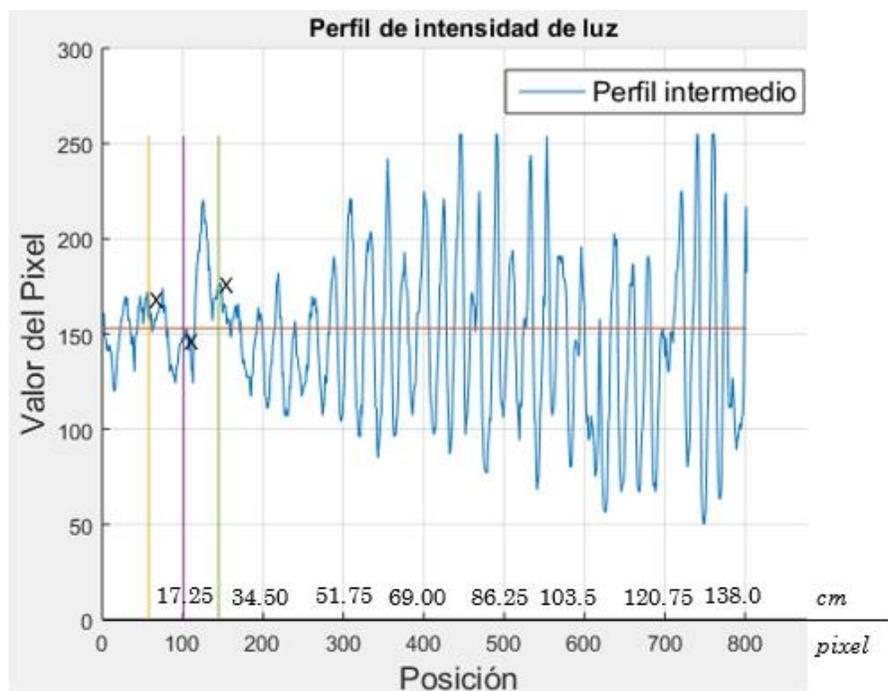


Figura 98. Perfil central para un $Q_8=264.07$ l/s.

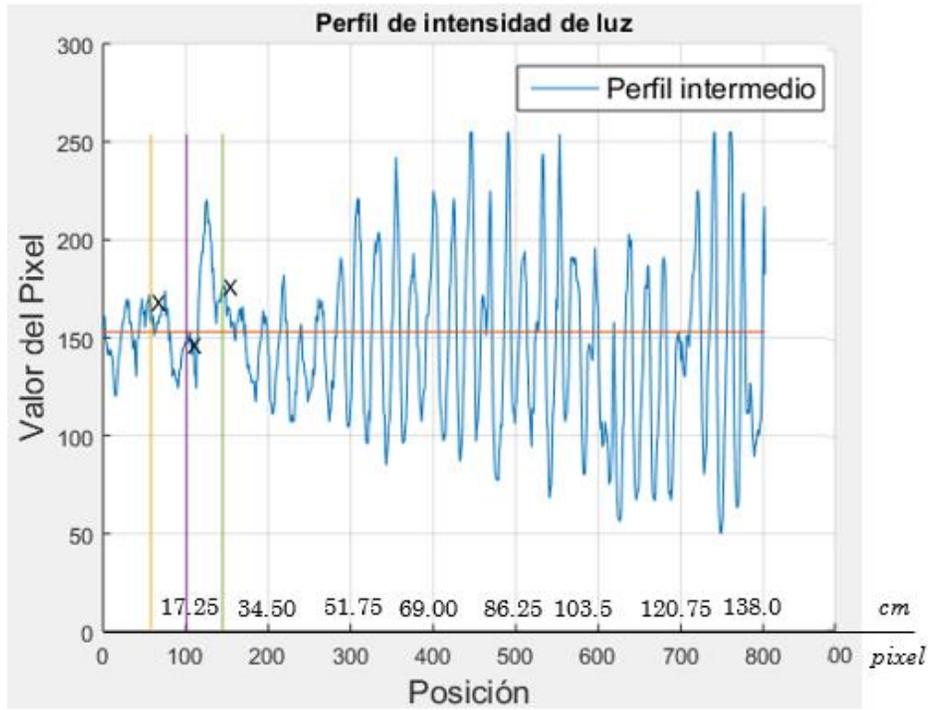


Figura 99. Perfil central para un $Q_9=274.529$ l/s.

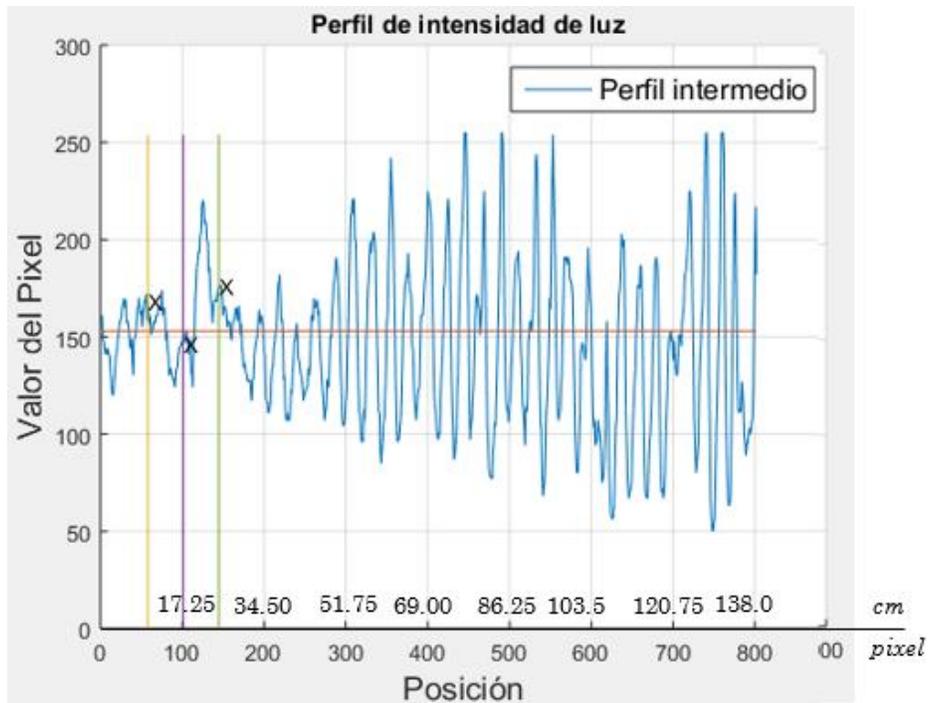


Figura 100. Perfil central para un $Q_{10}=280.878$ l/s.

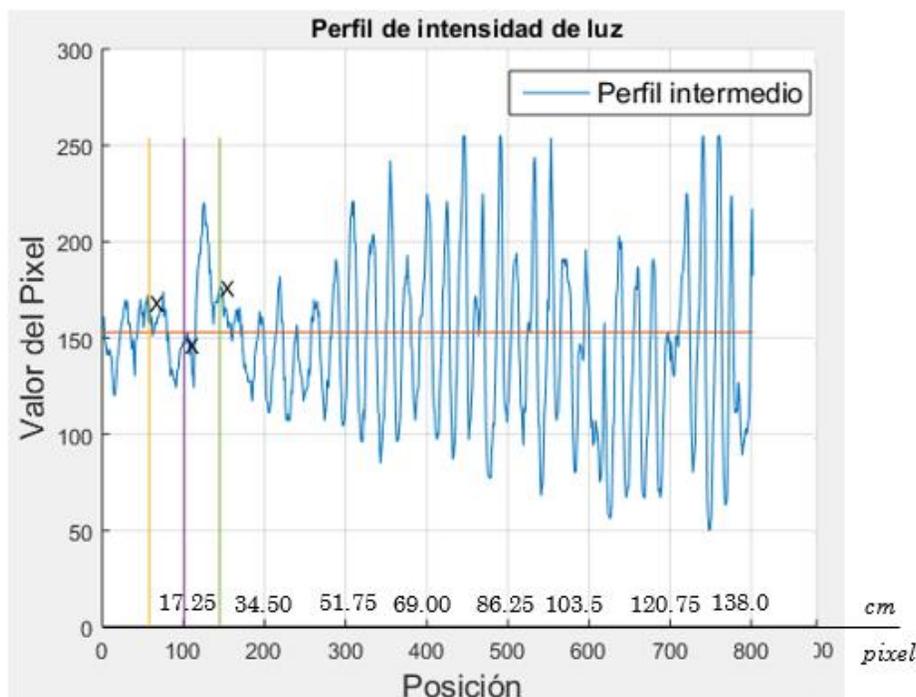


Figura 101. Perfil central para un $Q_{11}=283.878 \text{ l/s}$

A continuación, en base al comportamiento del flujo del procesamiento de imágenes (Figura 97 a Figura 101), en la siguiente tabla se muestra los resultados de la ubicación del punto de inyección.

No de gasto	Gasto (lps)	Distancia L_I (cm)	Imagen correspondiente
7	251.724	17.595	Figura 97
8	264.070	15.70	Figura 98
9	274.529	20.53	Figura 99
10	280.878	16.215	Figura 100
11	283.878	17.25	Figura 101

Tabla 23. Ubicación del punto de inyección de acuerdo al procesamiento de imágenes.

Con respecto al cálculo de porcentaje de aire, se toma como punto de referencia la línea de equilibrio siendo esta el 100% de agua, por tanto, el valor mínimo y máximo del conjunto de píxeles se considera 100% de aire, para el cálculo de porcentaje se considera si el punto es mayor al valor de la línea de equilibrio o si es menor.

En caso de ser mayor se calcula de la siguiente manera:

$$\%aire = \frac{valor\ de\ pixel - valor\ de\ línea\ de\ equilibrio}{valor\ máximo - valor\ de\ línea\ de\ equilibrio} * 100 \quad (52)$$

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

En caso de ser menor:

$$\%aire = \frac{\text{valor de línea de equilibrio} - \text{valor de pixel}}{\text{valor de línea de equilibrio} - \text{valor mínimo}} * 100 \quad (53)$$

A continuación, se presenta la tabla de resultados obtenidos:

Gasto (lps)		L_1 (cm)	Concentración de aire (%)
7	251.724	17.595	2.857
8	264.070	15.70	28.155
9	274.529	20.53	0.99
10	280.878	16.215	2.020
11	283.878	17.25	17.143

Tabla 24. Resultados obtenidos del tratamiento de imágenes en el programa Matlab.

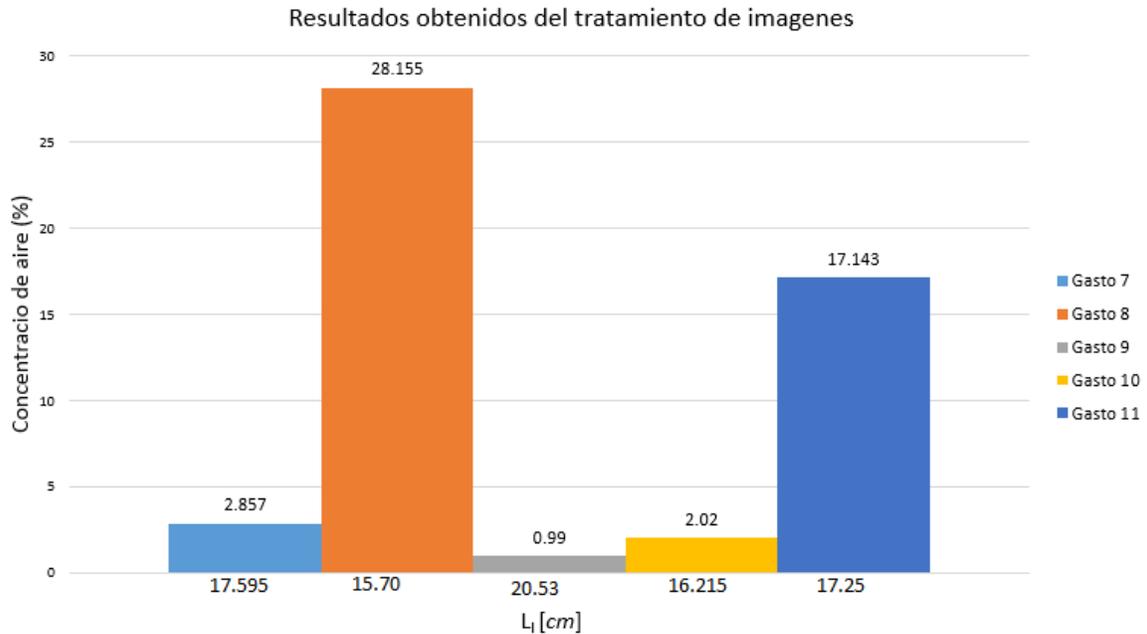


Figura 102. Resultados obtenidos del tratamiento de imágenes.

A continuación, se presenta una tabla comparativa de los resultados obtenidos con los modelos matemáticos y con las imágenes tratadas.

Gasto (<i>lps</i>)		Tratamiento de imagen		Modelos matemáticos empíricos	
		L_I (cm)	Concentración de aire (%)		
7	251.724	17.595	2.857	(Chanson H. , 1994)	56.638835
8	264.070	15.70	28.155	(Matos, 1999)	60.62897
9	274.529	20.53	0.99	(Matos, 1999)	50.652544
10	280.878	16.215	2.020	(Boes & Hager, 2003)	24.12
11	283.878	17.25	17.143		

Tabla 25. Comparación de resultados de concentración de aire, tratamiento de imagen vs modelos matemáticos.

Como puede observarse los resultados en ambos procedimientos son diferentes, sin embargo, para poder validar cualquiera de los resultados se requiere de implementar mejores técnicas de medición, por el contrario, independientemente del resultado cuantitativo del tratamiento de imágenes, se considera una técnica que puede ser implementada como una inspección visual general del comportamiento del flujo en la rápida.

Es importante mencionar, que la utilización de la técnica de análisis de imágenes en este trabajo ha demostrado ser un recurso útil para la ubicación del punto de incepción en el vertedor escalonado El Zapotillo, ya que en base a las pruebas de experimentación se ha visto que la intensidad de luz no es un factor en el comportamiento de las variaciones observadas en las gráficas de la Figura 97 a la Figura 101.

5.5 RESUMEN DE RESULTADOS

En este apartado se muestra a manera de resumen, los resultados de la caracterización del punto de incepción de acuerdo a los análisis realizados de las pruebas experimentales de presión, nivel y procesamiento de imágenes, igualmente se presentan los resultados de los modelos matemáticos, así como de los ajustes realizados a los mismo.

El índice de cavitación en el punto de incepción (σ_i) no pudo ser analizado ya que de acuerdo a la investigación bibliográfica solo (Matos, 1999) ha definido el índice de cavitación crítico en el punto de incepción (Apartado 2.4), la limitante radica en que esta definición parte de las Ecuaciones (4) y (8) la cual solo son válidas para pendientes comprendidas entre 1v:0.7h a 1v:0.8h, quedando así el modelo El Zapotillo fuera de este rango.

	Gasto	Características del punto de incepción			No. De escalón
		L_i	d_i	\bar{C}	
		(cm)	(cm)	(%)	
Sensores de presión	Q7-Q11	10-12.5	-	-	43
Sensores de nivel	Q7	20.5-41.5	4.5	-	36
	Q8		4.55		
	Q9		4.55		
	Q10		4.75		
	Q11		4.7		
Procesamiento de imágenes	Q7	17.595	-	2.857	42
	Q8	15.7		28.155	
	Q9	20.53		0.99	41
	Q10	16.215		2.020	
	Q11	17.25		17.143	

Tabla 26. Resultados de las pruebas experimentales.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

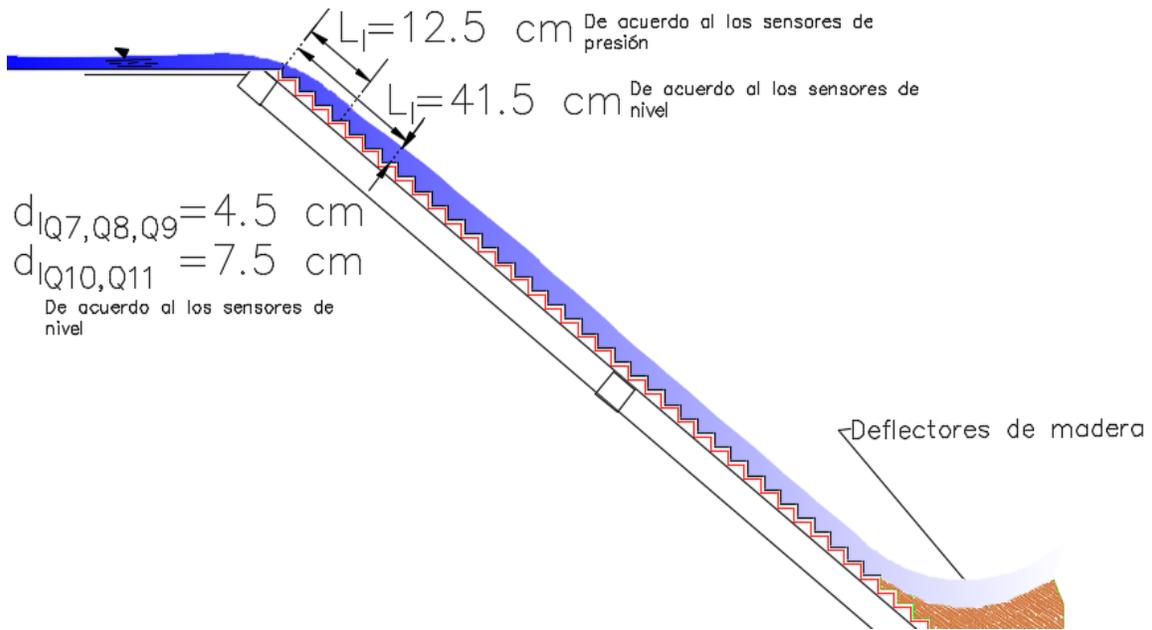


Figura 103. Representación de la ubicación del punto de incepción de acuerdo a los sensores de presión y de nivel (Tabla 26).

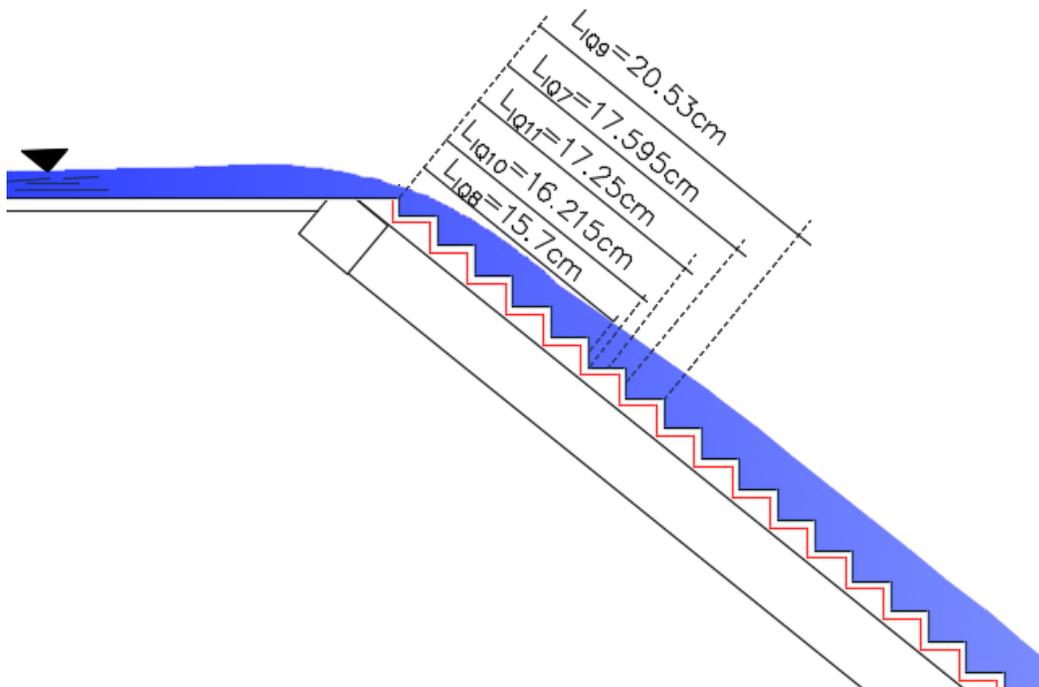


Figura 104. Representación de la ubicación del punto de incepción de acuerdo al procesamiento de imágenes (Tabla 26).

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

Modelos matemáticos empíricos					
Autor	Gasto	Características del punto de incepción			No. de escalón
		L_i	d_i	\bar{C}	
		(m)	(m)	(%)	
Chanson, 1994	Q7	0.73	0.0251	0.5664	27
	Q8	0.7426	0.0255		
	Q9	0.7679	0.0262		
	Q10	0.7764	0.0264		26
	Q11	0.7848	0.0267		
Matos, 1999	Q7-Q11	-	-	0.6063	-
Matos, 1999	Q7-Q11	-	-	0.5065	-
Iguacel & García, 1999	Q7	0.4105	-	-	36
	Q8	0.4185	-	-	35
	Q9	0.4345	-	-	
	Q10	0.4399	-	-	
	Q11	0.4453	-	-	
Chamani, 2000	Q7	0.8504	-	-	24
	Q8	0.8679	-	-	23
	Q9	0.9032	-	-	
	Q10	0.9151	-	-	
	Q11	0.927	-	-	22
Sánchez Juny, 2001	Q7	0.7745	-	-	26
	Q8	0.7876	-	-	25
	Q9	0.8139	-	-	
	Q10	0.8227	-	-	
	Q11	0.8315	-	-	
Boes & Hager, 2003	Q7	0.607	-	0.2412	31
	Q8	0.6247	-		30
	Q9	0.6609	-		29
	Q10	0.6732	-		
	Q11	0.6856	-		
Meireles et al, 2012	Q7	0.5781	0.0213	-	31
	Q8	0.5887	0.0216	-	
	Q9	0.6101	0.0222	-	
	Q10	0.6172	0.0224	-	30
	Q11	0.6244	0.0226	-	

Tabla 27. Resultados de la aplicación de los modelos matemáticos.

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

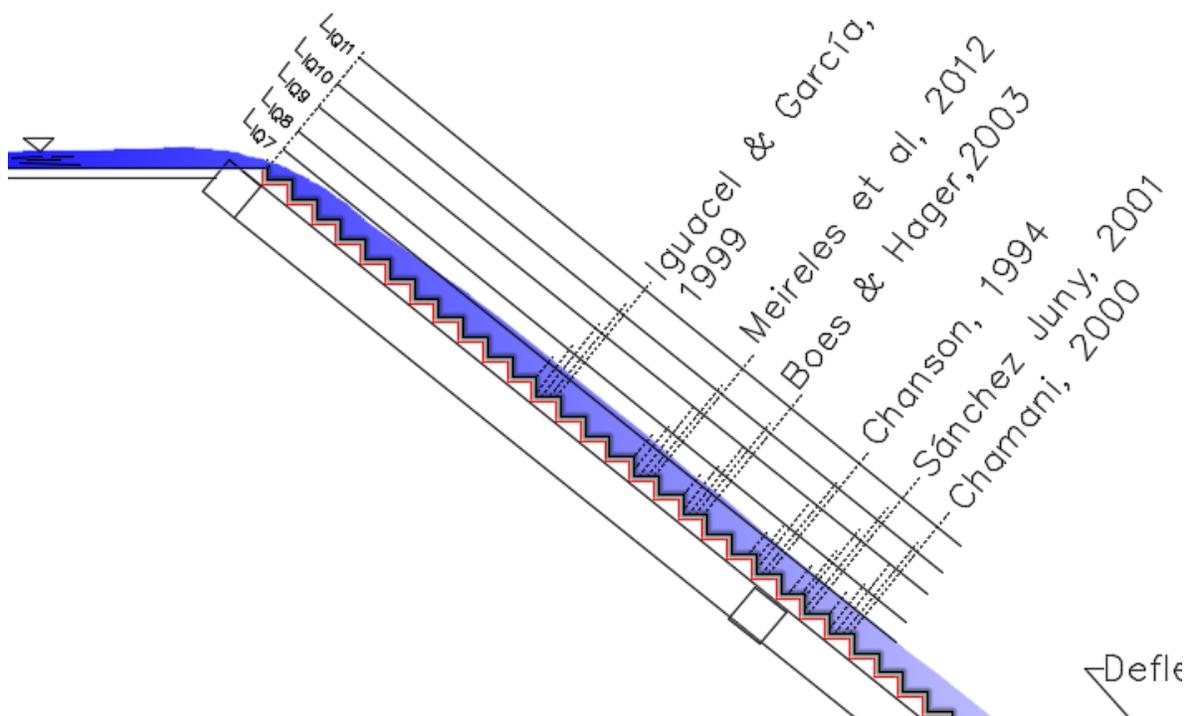


Figura 105. Representación de la ubicación del punto de inyección de acuerdo a la aplicación de los modelos matemáticos (Tabla 27).

Modelos matemáticos ajustados				
Autor	Gasto	Características del punto de inyección		No. de escalón
		L_i	d_i	
		(m)	(m)	
Chanson ajustado	Q7	0.17273	0.05161	42
	Q8	0.17491	0.05194	
	Q9	0.17673	0.05222	
	Q10	0.17782	0.05239	
	Q11	0.17834	0.05247	
Iguacel & García ajustado	Q7	0.17242	-	42
	Q8	0.17349	-	
	Q9	0.17440	-	
	Q10	0.17494	-	
	Q11	0.17520	-	

Tabla 28. Resultados de los modelos ajustados.

Continuación Tabla 28. Resultados de los modelos ajustados.

Modelos matemáticos ajustados				
Autor	Gasto	Características del punto de incepción		No. de escalón
		L_i	d_i	
		(m)	(m)	
Chamani ajustado	Q7	0.14408	-	43
	Q8	0.14748	-	42
	Q9	0.15033	-	
	Q10	0.15206	-	
	Q11	0.15287	-	
Sanchez Juny ajustado	Q7	0.17643	-	42
	Q8	0.17907	-	
	Q9	0.18128	-	
	Q10	0.18261	-	
	Q11	0.18323	-	
Boes & Hager ajustado	Q7	0.18821	-	42
	Q8	0.19032	-	41
	Q9	0.19212	-	
	Q10	0.19323	-	
	Q11	0.19375	-	
Meireles et al ajustado	Q7	0.17051	0.05598	42
	Q8	0.17272	0.05709	
	Q9	0.17458	0.05801	
	Q10	0.17570	0.05856	
	Q11	0.17623	0.05882	

De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 26, y Tabla 28, se puede observar que la ubicación del punto de incepción se presenta entre los escalones 41 y 42, por otro lado, de acuerdo a la Tabla 27, los resultados de los modelos quedan limitados con respecto a los resultados de las pruebas experimentales, presentándose la ubicación del PI entre los escalones 22 a 35, siendo los resultados de (Iguacel & García, 1999) los más cercanos, pero fuera del rango que señalan las pruebas experimentales.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

En primera instancia se debe tener en cuenta que la descarga del vertedor escalonado El Zapotillo es convergente y el comportamiento de flujo en este tipo de vertedores ha sido escasamente estudiado por lo que no se cuenta con información suficiente, sin embargo, cumpliendo con uno de los objetivos específicos, el presente trabajo demuestra que la metodología experimental usada por los investigadores en modelos de pequeña escala y con descarga no convergente para estudiar la localización del punto de inyección puede ser aplicada igualmente a modelos de gran escala y de descarga convergente, de esta manera, se puede evitar que los resultados del modelo no sean contradictorios con respecto al prototipo debido a los fuertes efectos de escala.

En relación a los estudios realizados y revisados en la literatura la ubicación del punto de inyección de aire se definió en función de la concentración de aire para cierto gasto determinado, en el caso particular del modelo El Zapotillo al no contarse con la instrumentación adecuada se recurrió al análisis de una variable diferente, en este caso el análisis de presiones presentó un papel fundamental tanto para la definición del régimen deseado como para la definición del rango de la distancia a partir de la corona donde se presenta el PI, las presiones en los escalones fueron indicadores de la presencia o ausencia de aire, ya que para un determinado gasto los datos de presión presentaron valores negativos por lo que se puede asumir la presencia de aire en un escalón específico, conforme se aumentó el gasto los valores de la presión tendieron a ser positivos, es decir, sin registro de aire en el mismo escalón, permitiendo así definir la presencia de aireación cubriendo así el objetivo de esta tesis.

Debido a la naturaleza de la escala del modelo resulta difícil tener un control de gasto de operación exacto, esto limita la obtención exacta de la ubicación del punto de inicio de la aireación, por lo que para futuras investigaciones del tema en el modelo se recomienda un control de gasto más refinado o la implementación de nuevas tecnologías para el suministro de agua.

De igual forma para futuras investigaciones sobre el tema se recomienda la instalación de mayor cantidad de sensores de presión en el rango de ubicación de la inyección de aire para obtener mayor cantidad de datos y con ellos definir adecuadamente el comportamiento físico de la relación punto de inyección de aire-gasto.

Es importante hacer notar lo expresado anteriormente al momento de la aplicación de los modelos matemáticos, debido a que estos fueron obtenidos de manera empírica bajo ciertos criterios particulares, es decir, bajo ciertas condiciones controladas.

Durante la aplicación de los modelos matemáticos se comprobó que estos no pueden ser aplicables al modelo del Zapotillo, primeramente, debido a su geometría única ya que esta no cuenta con cimacio, a su descarga convergente, así como la escala de líneas 1:50 ya que no es común realizar estudios del PI en modelos con escalas de grandes dimensiones, de ahí la necesidad de realizar ajustes de curva que hagan converger los modelos matemáticos con el resultado de las pruebas experimentales.

Si bien como se mencionó con anterioridad, la utilización de imágenes digitales y su procesamiento provee una técnica útil no intrusiva para realizar un análisis cualitativo del flujo, más información acerca del uso de esta técnica debe tomarse en cuenta a fin de determinar la influencia de diferentes factores del flujo al momento de realizar estas pruebas y no limitar así las ventajas que esta herramienta podría ofrecer.

La utilización de la técnica de análisis de imágenes en este trabajo ha demostrado ser un recurso útil para la ubicación del punto de incepción en el vertedor escalonado El Zapotillo, ya que en base a las pruebas de experimentación se ha visto que la intensidad de luz no es un factor en el comportamiento de las variaciones observados en las gráficas de la Figura 97 a la Figura 101, lo que, en el caso particular de esta tesis permitió bosquejar la ubicación de posibles posiciones del punto de incepción, sin embargo, para obtener un análisis más confiable y exacto, se recomienda la obtención de un mayor número de imágenes bajo las mismas condiciones, concluyendo la utilización de esta técnica un método viable para ubicar el punto de incepción en vertedores escalonado.

Con las recomendaciones antes mencionadas y en base a la experiencia del desarrollo de esta tesis se considera la posibilidad de continuar con la línea de investigación, lográndose la deducción de un modelo matemático de la ubicación del punto de incepción que tome en cuenta las características particulares del modelo El Zapotillo.

Anexo 1

PROGRAMA EN MATLAB PARA EL TRATAMIENTO DE IMÁGENES

```
clc;      % Limpiar comando
close all; % Cerrar Todo
clear all;
workspace; % workspace panel se muestra.
format compact;
fontSize = 18;
%-----
% Pedir imagen
% Inicialización de buscador en carpeta
startingFolder = 'UBICACIÓN DEL ARCHIVO';
defaultFileName = fullfile(startingFolder, '*.*');
[baseFileName, folder] = uigetfile(defaultFileName, 'Select a file');
if baseFileName == 0
    return;
end
fullFileName = fullfile(folder, baseFileName);

% Guardar la imagen en rgb, en una matriz con valor unit8
rgbImage= imread(fullFileName);
% Obtener las dimensaiones de la imagen. numberOfColorBands debe ser =
3.
[rows, columns, numberOfColorBands] = size(rgbImage);
num_dim=ndims(rgbImage);
if num_dim ==2
    Zt=rgbImage;
else

    % Extraer los 3 canales de colores.
    redChannel = rgbImage(:, :, 1);
    greenChannel = rgbImage(:, :, 2);
    blueChannel = rgbImage(:, :, 3);
    %Conversión a escala de grises
    Zt=redChannel*0.2989+ 0.5870 * greenChannel + 0.1140 * blueChannel;
end;

% Imprimir imagen original
subplot(1, 2, 1);
imshow(rgbImage, []);
title('Imagen Original', 'FontSize', fontSize);
% La impresión de imagen en pantalla completa
set(gcf, 'units','normalized','outerposition',[0 0 1 1]);
%Arreglo espacial de datos para superposición.
Ztr=flipud(Zt);
```

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

```
% Impresión de la imagen a escala de grises
subplot(1, 2, 2);
imshow(Zt, []);
title('Imagen en Escala de grises ', 'FontSize', fontSize);
grid on;
%Impresión de los mapas de contorno del valor de los pixeles
figure(2)
contour(Ztr);
colorbar();
title('Escala de grises Contorno', 'FontSize', fontSize)
%determinación de la columna central
basex=fix(columns/2);

% Cálculo del punto medio estabilizacion 100% agua
ver=Ztr(:,basex);
valm=min(ver);
prom=(max(max(Ztr)))/2+valm/2;
xr=[0 rows];
yr=[prom prom];

%calculo de untos de rango

%valor de pixel
pix10=floor((rows/1.38)*.1);
pix175=floor((rows/1.38)*.175);
pix25=floor((rows/1.38)*.25);

% valor y del punto

y10=Ztr(pix10,basex);
y175=Ztr(pix175,basex);
y25=Ztr(pix25,basex);

%Impreseión de los valores de pixeles de la primera,ultima columna y
%central
figure(3)
grid on;
hold on;
plot(Ztr(:,basex));
plot(xr,yr);
text(double(pix10),double(y10),'X');
text(double(pix175),double(y175),'X');
text(double(pix25),double(y25),'X');
xlabel('Posición','FontName','Arial','FontSize',14);
ylabel('Valor del Pixel','FontName','Arial','FontSize',14);
title('Perfil de intensidad de luz');
leyenda=legend('Perfil intermedio');
set(leyenda,'FontName','arial','FontUnits','points','FontSize',13,'FontWe
ight','normal')
hold off
por='%';

%calculo de porcentajes
```

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PUNTO DE INCEPCIÓN DEL
VERTEDOR ESCALONADO DE LA PRESA DE ALMACENAMIENTO ZAPOTILLO

```
if y10>prom
    maxf=max(max(Ztr))-prom;
    dif=y10-prom;
    p1=(double(dif)/double(maxf))*100;
else
    maxf=prom-min(ver);
    dif=prom-y10;
    p1=(double(dif)/double(maxf))*100;
end;

if y175>prom
    maxf=max(max(Ztr))-prom;
    dif=y175-prom;
    p2=(double(dif)/double(maxf))*100;
else
    maxf=prom-min(ver);
    dif=prom-y175;
    p2=(double(dif)/double(maxf))*100;
end;

if y25>prom
    maxf=max(max(Ztr))-prom;
    dif=y25-prom;
    p3=(double(dif)/double(maxf))*100;
else
    maxf=prom-min(ver);
    dif=prom-y25;
    p3=(double(dif)/double(maxf))*100;
end;
display('Porcentaje de aire :');
fprintf('Porcentaje 10 cm  %4.3f %1s \n',p1,por);
fprintf('Porcentaje 17.5 cm  %4.3f %1s \n',p2,por);
fprintf('Porcentaje 25 cm  %4.3f %1s \n',p3,por);
```

Bibliografía

- Amador, A., Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. (2009). Developing flow region and pressure fluctuations on steeply sloping stepped spillways. *Journal Hydraulic Engineering*, 135(12), 1092-1100.
- Anderson, A., & Straub, F. (1960). Self-aerated flow in open channels. *American Society of Civil Engineers*, 125, 456-481.
- Arndt, R. (1977). Discussion of cavitation from surface irregularities in high velocity flow. *American Society of Civil Engineers*, 103, 469-472.
- Arreguín Cortés, F. (2005). *Cavitación y aeración en obras de exedencia*. México: Asociación Mexicana de Hidráulica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Arreguín Cortés, F., & Alcocer Yamanaka, V. (2011). *Diseño hidráulico de vertedores*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- BaCaRa. (1991). Study of the energy dissipation on stepped spillway, report. *CEMAGREF*.
- Bindo, M., Gautier, J., & Lacroix, F. (1993). The stepped spillway of M'Bali dam. *Water Power and Dam Construction*, 45(1), 35-46.
- Boes, R., & Hager, W. (2003). Two-phased flow characteristics of stepped spillways. *Journal Hydraulic Engineering*, 129(9), 661-670.
- Bung, D. (2011). Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 49(5), 639-648.
- Bung, D. B. (2013). Non-intrusive detection of air-water surface roughness in self-aerated chute flows. *Journal of Hydraulic Research*, 51(3), 322-329.
- Chamani, M. (2000). Air inception in skimming flow regime over stepped spillways. *In Proc., Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways*, 61-67.
- Chamani, M., & Rajaratman, N. (1999). Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(4), 361-368.
- Chamani, M., & Rajaratnam, N. (1994). Jet flow on stepped spillway. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 45(9).
- Chanson, H. (1993). Stepped Spillway Flows and Air Entrainment. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 20(3), 422-435.

- Chanson, H. (1994). *Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways*. Gran Bretaña: Pergamon.
- Chanson, H. (1994b). Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *Journal Hydraulic Engineering*, 32(3), 445-460.
- Chanson, H. (1997). Flow aeration at stepped cascades. CE155. Brisbane, Australia: Department of Civil Engineering, The University of Queensland.
- Chanson, H. (2001). Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Disipators. *Dam Enginneering*, 11(4), 205-242.
- Chanson, H. (2002a). *The hydraulic of stepped chutes and spillways*. Balkema Publishers.
- Chanson, H. (2002b). A transition flow regimen on stepped spillways? The facts. *In Proceedings XXIX IAHR Congress, theme D.*, 1-9.
- Chanson, H., & Toombes, L. (2002a). Experimental investigation and air entrainment in a stepped storm waterway: an experimental study. *Can. J. Civil Engng*, 29(1), 145-156.
- Chanson, H., & Toombes, L. (2004). Experimental study of gas-liquid interfacial properties. *Environmental Fluid Mechanics*, 2, 241-263.
- Echavez Aldape, G. (1996). *Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental*. UNAM, CONACYT, AMH.
- Echavez, G. (1979). *Cavitación en vertedores*. México, D. F: Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de México.
- Elviro, V., & Mateos, C. (1995). Spanish Research into Stepped Spilways. *International Journal of Hydropower and Dams*, 2(5), 61-65.
- Falvey, H. (1979). Mean air concentration of self-aerated flows. *Mean air concentration of self-aerated flows*, 105(1), 91-96.
- Flores Alarcón, W. (2015). *Comportamiento del flujo en vertedores escalonados con descarga convergente*.
- Gangadharaiah, T., Rao, L., & Seetharamiah, K. (1970). Inception and entrainment in selfaerated flows. *Journal oh the Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers*, 96(7), 1549-1563.
- González, C., & Chanson, H. (2004). Interactions between cavity flow and mainstream skimming flows: an experimental study. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(1).

- González, C., & Chanson, H. (2007). Diseño hidráulico de vertedores escalonados con pendientes moderadas: metodología basada en un estudio experimental. *Ingeniería hidráulica en México*, 22(2).
- Hamilton, W. (1980). Aeration of Flows down Spillway. *Harza Engineering Company Memorandum*.
- Hunt, S., & Kadavy, K. (2011). Inception point relationship for flat-sloped stepped spillways. *Journal Hydraulic Engineering*, 137(2), 262-266.
- Iguacel, C., & García, V. (1999). Aliviaderos escalonados: comienzo de la aireación natural. Disipación de energía en la rápida. *Ingeniería Civil*, 113, 27-34.
- Keller, R., Lai, K., & Wood, I. (1974). Developing region in self-aerated flows. *Journal of the Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers*, 553-568.
- Khatsuria, R. (2005). *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipation*. Nueva York, Estados Unidos: Marcel Dekker.
- Khdhiri, H., Potier, O., & Leclerc, J.-P. (2014). Aeration efficiency over stepped cascades: Better predictions from flow regimes. *Water Research. A Journal of the International Water Association*, 55, 194-202.
- Latessa, P., & Sabarots Gerbec, M. (2014). Vertedores escalonados, abordaje teórico, experimental y numérico. *2do Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos*.
- Lejeune, A., Lejeune, M., & Lacroix, F. (1994). Study of skimming flow over stepped spillway. *Hydropower and Dams*, 285-296.
- Levi, E. (1964). Investigación acerca de las estrias longitudinales de las laminas vertientes. *Revista de Ingeniería. Universidad Autónoma de México*, 34, 237-244.
- Mateos, C. I., & García, V. E. (1999). Aliviaderos escalonados: comienzo de la aireación natural. Disipación de energía en la rápida. *Ingeniería civil*(113), 27-34.
- Mateos, C., & Elviro, V. (1997). Initiation of aeration in stepped spillways, in Holly Jr., F. M. and Alsaffar, A. *Preprints of the 27th IAHR Congress*, 589-594.
- Matos, J. (1999). Emulsiónamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores de cheias em degraus. *Tese de doutoramento-Instituto Superior Tecnico*.
- Matos, J., Quintela, A., & Ramos, C. (2001). Segurança contra a erosão por cavitação em. *Recursos Hídricos*.

- Matos, J., Sanchez-Juny, M., Quintela, A., & Dolz, J. (2000). Air entrainment and safety against cavitation damage in stepped spillways over RCC dams. *Preprints of the Int. Workshop on Hydraulics of Stepped Spillway*, 69-76.
- Meireles, I., & Matos, J. (2009). Skimming flow in the non-aerated region of stepped spillway over embankment dams. *Journal Hydraulic Engineering*, 135(8), 685-689.
- Meireles, I., Renna, F., Matos, J., & Bombardelli, F. (2012). Skimming, nonaerated flow on stepped spillways over roller compacted concrete dams. *Journal Hydraulic Engineering*, 138(10), 870-877.
- Ohtsu, I., & Yasuda, Y. (1997). Characteristics of flow conditions on stepped channels. *27th IAHR Biennial Congress, D*, 583-588.
- Ohtsu, I., Yasuda, Y., & Takahashi, M. (2004). Flow characteristic of skimming flow in stepped channels. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE*, 130(9).
- Paterka, A. (1953). The Effect of Entrained Air on Cavitation Pitting. *Proceedings of the Joint Meeting of the International Association for Hydraulic Research, American Society of Civil Engineers*, 507-518.
- Pegram, G., Officer, A., & Mottram, S. (1999). Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(5), 500-510.
- Pegram, G., Officer, A., & Mottram, S. (1999). Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(5), 500-510.
- Peterka, A. (1953). The effect of entrained air on cavitation pitting. *Proc., 5th IAHR Congress, Joint meeting paper, IAHR/ASCE*, 507-518.
- Pfister, M., & Hager, W. (2011). Self-entrainment of air on stepped spillways. *International Journal of Multiphase Flow*, 37(2), 99-107.
- Pinto, N., Neidert, S., & Ota, J. (1982). Aeration at high velocity flows. *Water Power and Dam Construction*, 2(34), 34-38.
- Rajaratman, N. (1990). Skimming flow in stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(4), 587-591.
- Rendón Ricardi, G. (2011). *Diseño hidráulico de vertedores escalonados*.
- Rolt, L. T. (1973). *From Sea to Sea - The Canal du Midi*. Allen Lane. London, UK.
- Sánchez Juny, M. (2001). *Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado. Análisis del campo e presiones*.

- Sánchez Juny, M., Pomares, J., & Dolz, J. (2000). Pressure field in skimming flow over a stepped spillway. *In Proceedings of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Zurich. Edited by HE Minor and WH Hager.*, 137-146.
- Schnitter, N. (1994). *A History of Dams: the Useful Pyramids*. Rotterdam, Paises Bajos: Balkema Publ.
- Smith, N. (1971). *A History of Dams. The Chaucer Press. Peter Davies*. Londres, UK.
- Sorensen, R. (1985). Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(12), 1461-1472.
- Sorensen, R. (1985). Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal Hydraulic Engineering*, 111(12), 1461-1472.
- Sorensen, R. (1985). Stepped spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111, 1461-1472.
- Sotelo Avila, G. (1991). *Hidráulica general: fundamentos*. Limusa.
- Tozzi, M. (1992). *Caracterização/Comportamento de escoamentos em vertedouros com paramentoem degraus*. Sao Paulo, Brazil: Ph. D. thesis, Escola Politécnica da Universidade de San Paulo.
- Tozzi, M., & Brighetti, G. (1994). Vertedourus em degraus, posiau de inicio de aeraao do escoamento. *XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 5, 477-484.
- Vergara Sánchez, M. (1995). *Técnicas de modelación en hidráulica*. Alfaomega.
- Volkart, P., & Rutschamann, P. (1984). Rapid Flow In Spillway Chutes with and without Deflectors. *Proceedings of the Symposium on Scale Effects in Modeling Hydraulic Research, Esslingen*, 3-.
- Wilhelms, S. C., & Gulliver, J. S. (1989). Self-Aeration Spillway Flow. En P. editor (Ed.), *National Conference on Hydraulic Engineering, ASCE* (págs. 881-533). New Orleans, USA: M.A. PORTS editor.
- Wood, I. (1983). Uniform region of self aerated flow. *Journal of Hydraulic Enginnering*, 109(3), 447-461.