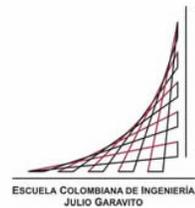


Maestría en Ingeniería Civil

**Modelación hidrodinámica Bi y Tridimensional de dos canales con
disipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de
Ingeniería utilizando ANSYS FLUENT**

Jorge Alejandro Mora Uscátegui

Bogotá D.C., 06 de febrero de 2017



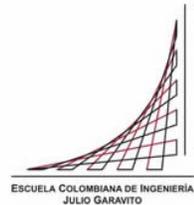
**Modelación hidrodinámica Bi y Tridimensional de dos canales con
disipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de
Ingeniería utilizando ANSYS FLUENT**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis
en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.**

Ing. Germán Ricardo Santos Granados, MSc., PhD.

Director

Bogotá D.C., 06 de febrero de 2017



La tesis de maestría titulada “modelación hidrodinámica Bi y Tridimensional de dos canales con dissipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería utilizando ANSYS FLUENT”, presentada por Jorge Alejandro Mora Uscátegui, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis
Germán Ricardo Santos Granados
Jurado
Héctor Alfonso Rodríguez Díaz
Jurado
Antonio Arenas Amado

Bogotá, D.C., 06 de febrero de 2017 (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

Dedicatoria

A Dios por darme la fuerza para continuar luchando ante las adversidades.

A mis Padres, Hermano y Milena por ser mi apoyo incondicional.

Gracias por impedir que una piedra en el camino me quitara la victoria,

Bendiciones.

Agradecimientos

A mi director de proyecto, por su dedicación y sabiduría inculcada.

A los profesores de la Maestría de la Escuela Colombiana de Ingenieros Julio Garavito, por su experiencia compartida.

Resumen

El presente estudio trata de la modelación de la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) de dos estructuras hidráulicas. La primera parte de la modelación corresponde al canal llamado “ECI No. 2”, el cual contiene una estructura de transición llamada “disipador de energía”, donde se modeló el perfil de lámina de agua con el modelo 1D de Runge Kutta y la herramienta de simulación dinámica computacional ANSYS FLUENT 2D y 3D. Se utilizó el modelo de volumen de fluidos VOF para modelar la interfase de las fases agua y aire. El modelo utilizado para modelar flujo turbulento es el “Baseline (BSL) $k-\omega$ ” en flujo permanente. Se tuvieron en cuenta otros submodelos de discretización para resolver las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento. Los resultados fueron comparados y analizados con mediciones realizadas en el modelo físico para una serie de caudales en la sección central longitudinal del canal, ejecutando actividades de verificación y validación. Se eligió los modelos 1D y 2D como la representación de un caso ideal (sin contemplar flujos en dirección transversal) y los modelos en 3D como los mejores por su representación más aceptable a la realidad. Además, se realizaron análisis complementarios a modelaciones de dos topologías a las cuales no se pudieron medir (canal sin disipador de energía y sin rampa, canal con disipador de energía y sin rampa), realizando modelaciones comparativas de alturas de lámina de agua, energía mecánica, simetría del flujo (distribución de flujos primarios y secundarios, coeficiente de fricción y líneas de corriente) y distribución de la velocidad y presión.

La segunda parte de la modelación corresponde al canal llamado “ECI No. 1”, el cual cuenta con un tanque de amortiguamiento y un canal rectangular con un vertedero aguas abajo. Esta estructura hidráulica fue modelada en flujo no permanente por primera vez por Arenas Amado (2002) con modelos 1D en flujo no permanente y comparados con mediciones de presión registradas por transductores. Esta información fue utilizada para el presente estudio para modelar con ANSYS FLUENT 2D utilizando el modelo VOF y el modelo de turbulencia “ $k-\epsilon$ Realizable”. Se realizó comparaciones con los datos medidos y modelados con el método de las características explícitas en el estudio de referencia. En el análisis de resultados se encontró similitudes al comparar con los resultados de la presión estática, pero con mejores resultados al compararlos con los resultados del nivel de agua modelado con ANSYS FLUENT. Adicionalmente, se realizó un análisis del transductor cercano al vertedero con respecto a la distribución de la presión desde el punto de vista teórico y los resultados de las modelaciones, encontrando que los registros de este transductor no representan el nivel de la lámina de agua.

Índice general

	Pág.
Introducción.....	18
1 Objetivos	19
1.1 Objetivo General.....	19
1.1.1 Objetivos específicos.....	19
2 Marco Teórico	21
2.1 Condiciones Hidráulicas Existentes del Nuevo Canal de la ECI.....	21
2.2 Condiciones Hidráulicas del Primer Canal de Laboratorio ECI, Año 2002.....	26
2.3 Diagnóstico General del Problema.....	28
2.4 Clasificación de Flujos	29
2.5 Ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos	33
2.5.1 Modelación 1D.....	33
2.5.2 Modelación 2D y 3D.....	33
2.5.3 Modelo de turbulencia Baseline (BSL) $k-\omega$	48
2.5.4 Modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ Realizable.....	58
2.5.5 (y^+) “Insensitive”, Tratamiento cercano a la pared para modelos basados en la ecuación ω (omega).....	62
2.5.6 Tratamientos cercanos a la pared para flujos turbulentos limitados por la pared.....	63
2.5.7 Mallado.....	68
2.5.8 Discretización	72
2.5.9 Modelo VOF.....	80
2.5.10 Modelación con VOF para flujos en canales abiertos.....	86
2.6 Revisión de la literatura.....	96
3 Metodología.....	102
3.1 Metodología para la modelación en flujo permanente	103

3.1.1	Definición de las metas de la modelación.....	103
3.1.2	Identificación del dominio.	105
3.1.3	Creación de un modelo del dominio.....	111
3.1.4	Diseño y creación de la malla.	111
3.1.5	Configuración del menú “Solver”.	114
3.1.6	Calcular la solución (verificación) y examinar los resultados (validación).	120
3.1.7	Revisión del modelo (análisis de la validación).	132
3.2	Metodología para la modelación en flujo no permanente.....	135
3.2.1	Definición de las metas de la modelación.....	135
3.2.2	Identificación del dominio.	137
3.2.3	Creación de un modelo del dominio.....	139
3.2.4	Diseño y creación de la malla.	140
3.2.5	Configuración del menú “Solver”.	141
3.2.6	Calcular la solución (verificación) y examinar los resultados (validación).	147
3.2.7	Revisión del modelo (análisis de la validación).	155
4	Memorias de cálculo de las modelaciones en 1D, 2D y 3D.	156
4.1	Memorias de cálculo de las modelaciones en el canal ECI No. 2.....	156
4.2	Memorias de cálculo de las modelaciones en el canal ECI No. 1.....	159
5	Resultados Parte 1. Modelación del canal ECI No. 2 en flujo permanente	160
5.1	Análisis comparativo de modelos en 1D, 2D y 3D.....	160
5.1.1	Modelación comparativa – altura lámina de agua.....	160
5.1.2	Modelación comparativa – energía mecánica	170
5.1.3	Modelación comparativa – simetría del flujo.....	182
5.2	Modelación comparativa – Distribución de la velocidad y presión estática.....	208
5.2.1	Comentarios sobre la modelación comparativa – Distribución de la velocidad	208
6	Resultados Parte 2. Modelación del canal ECI No. 1 en flujo no permanente.	217
6.1	Análisis comparativo de modelos en 2D flujo no permanente	217

6.1.1 Modelación comparativa – altura lámina de agua.....	217
Conclusiones y recomendaciones	227
Bibliografía.....	232

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1. Canal experimental de la ECI.	21
Figura 2. Condiciones iniciales a la entrada del canal.	23
Figura 3. Estabilidad del flujo con y sin dissipador de energía.....	25
Figura 4. Dispositivo de disipación seleccionado “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con dissipadores de energía y corrector de líneas de corriente”.	26
Figura 5. Montaje del primer canal de laboratorio de la ECI.	28
Figura 6. Volumen de control en un dominio.....	34
Figura 7. Modelos de turbulencia disponibles en ANSYS FLUENT.	46
Figura 8. Espectro de energía de turbulencia en función del número de la onda k, con indicación del rango de aplicación de los modelos DNS, LES y RANS.....	47
Figura 9. Representación de un punto para resolver escalas de turbulencia en un flujo turbulento constante.....	47
Figura 10. Capa límite de un flujo turbulento y subcapas en la región interna.	48
Figura 11. Las subdivisiones de la zona próxima a la pared	63
Figura 12. Tratamiento cercano a la pared en ANSYS FLUENT.	64
Figura 13. Movimiento descendente del perfil logarítmico de velocidad.	68
Figura 14. Tipos de celdas para el mallado de la geometría en ANSYS FLUENT.....	69
Figura 15. Grilla computacional en 2D y 3D.	70
Figura 16. Ejemplos de la topología de mallas que acepta ANSYS FLUENT.....	71
Figura 17. Volumen de control utilizado para ilustrar la discretización de un escalón en la ecuación de transporte.....	72
Figura 18. Distribución de la fracción de volumen en una sección transversal de un canal.	82
Figura 19. Determinación del nivel de superficie libre y el nivel del fondo del canal.....	89
Figura 20. Condiciones de frontera para modelos 2D en flujo permanente, con y sin dissipador de energía para el canal ECI No. 2.....	93
Figura 21. Condiciones de frontera para modelos 2D en flujo permanente, con y sin rampa, con entrada larga para el canal ECI No. 2.	93

Figura 22. Condiciones de frontera para modelos 3D en flujo permanente, con y sin dissipador de energía, con y sin rampa para el canal ECI No. 2.....	94
Figura 23. Condiciones de frontera para modelos 2D en flujo no permanente para el canal ECI No. 1.	94
Figura 24. Condiciones ideales del flujo a la entrada de un canal abierto.....	96
Figura 25. Actividades y productos generales de verificación y validación para modelaciones en 1D, 2D y 3D.....	102
Figura 26. Plan de trabajo para modelaciones.	103
Figura 27. Simplificación del dissipador de energía del canal ECI No. 2 en 2D.	104
Figura 28. Topologías ideales propuestas antes de la validación del modelo del canal ECI No. 2 en 1D.	106
Figura 29. Topologías reales propuestas antes de la validación del modelo del canal ECI No. 2 en 1D.	107
Figura 30. Topologías ideales utilizadas del canal ECI No. 2 en 2D.....	107
Figura 31. Topologías reales propuestas antes de la validación del modelo del canal ECI No. 2 en 2D.	108
Figura 32. Topologías reales propuestas antes de la validación del modelo del canal ECI No. 2 en 3D.	109
Figura 33. Ejemplo malla estructurada e híbrida utilizada para modelaciones en 2D.	112
Figura 34. Ejemplo malla híbrida utilizada para modelaciones en 3D.....	113
Figura 35. Perfiles de monitoreo de residuales (derecha) y perfiles de monitoreo de las cantidades de interés (izquierda).	123
Figura 36. Perfiles de monitoreo de residuales (derecha) y perfiles de monitoreo de las cantidades de interés (izquierda).	124
Figura 37. Perfil lámina de agua medido vs 1D, T3_1D_Q1 (En el eje central).....	125
Figura 38. Perfil lámina de agua medido vs 1D, T3_1D_Q2 (En el eje central).....	125
Figura 39. Perfil lámina de agua medido vs 1D, T3_1D_Q3 (En el eje central).....	125
Figura 40. Perfil lámina de agua Medido vs 2D, T3_2D_Q1 (En el eje central).....	126
Figura 41. Perfil lámina de agua Medido vs 2D, T3_2D_Q2 (En el eje central).....	127
Figura 42. Perfil lámina de agua Medido vs 2D, T3_2D_Q3 (En el eje central).....	128
Figura 43. Perfil lámina de agua Medido vs 3D, T3_3D_Q1 (En el eje central).....	129
Figura 44. Perfil lámina de agua Medido vs 3D, T3_3D_Q2 (En el eje central).....	130
Figura 45. Perfil lámina de agua Medido vs 3D, T3_3D_Q3 (En el eje central).....	131

Figura 46. Simplificación del canal ECI No. 1 en 2D.....	136
Figura 47. Hidrograma de entrada para modelaciones en flujo no permanente del canal ECI No.1 en 2D.	138
Figura 48. Topología propuesta antes de la validación del modelo del canal ECI No. 1 en 2D. T#: Transductor.....	139
Figura 49. Ejemplo malla estructurada utilizada para modelaciones en 2D.....	141
Figura 50. Perfiles de monitoreo de residuales (derecha) y perfiles de monitoreo de las cantidades de interés (izquierda).	150
Figura 51. Fracción de volumen de la fase agua para los escenarios CTT_2D_ Qmín y CTT_2D_ Qmáx.....	151
Figura 52. Contornos de magnitud velocidad de la fase agua y aire para los escenarios CTT_2D_ Qmín y CTT_2D_ Qmáx. Línea de color negro: interfase agua – aire.	152
Figura 53. Contornos de presión estática de la fase agua para los escenarios CTT_2D_ Qmín y CTT_2D_ Qmáx.	153
Figura 54. Presión estática en toda la extensión del fondo del canal rectangular para los escenarios CTT_2D_ Qmín y CTT_2D_ Qmáx.	154
Figura 55. Perfiles de lámina de agua para T0a_1D_Q1 vs T0a_2D_Q1 y T0b_1D_Q1 vs T0b_2D_Q1 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).....	162
Figura 56. Perfiles de lámina de agua para T1_3D_Q1, T2_3D_Q1 y T3_3D_Q1 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).....	163
Figura 57. Perfiles de lámina de agua para T0a_1D_Q2 vs T0a_2D_Q2 y T0b_1D_Q2 vs T0b_2D_Q2 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).....	164
Figura 58. Perfiles de lámina de agua para T1_3D_Q2, T2_3D_Q2 y T3_3D_Q2 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).....	165
Figura 59. Perfiles de lámina de agua para T0a_1D_Q3 vs T0a_2D_Q3 y T0b_1D_Q3 vs T0b_2D_Q3 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).....	166
Figura 60. Perfiles de lámina de agua para T1_3D_Q3, T2_3D_Q3 y T3_3D_Q3 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).....	167
Figura 61. Perfiles de lámina de agua para T0a_1D_Q4 vs T0a_2D_Q4 y T0b_1D_Q4 vs T0b_2D_Q4 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).....	168
Figura 62. Perfiles de lámina de agua para T1_3D_Q4, T2_3D_Q4 y T3_3D_Q4 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).....	169

Figura 63. Ejemplo de la ubicación de las secciones verticales de control para el análisis de escenarios en 2D y 3D. (En a) y b): Línea negra = curva de nivel de presión estática. Líneas azules = líneas de corriente en dirección al flujo).....	174
Figura 64. Ejemplo de la ubicación de las secciones de control para el análisis de escenarios con topología T1 en 3D.	175
Figura 65. Ejemplo de la ubicación de las secciones de control para el análisis de escenarios con topologías T2 y T3 en 3D.....	176
Figura 66. Valores de la cabeza de energía potencial h_{EP} (m.c.a) y la cabeza de energía cinética promedio h_{EC} (m.c.a). T#: Topología.....	179
Figura 67. Valores de la cabeza energía total h (m.c.a) y la pérdida por fricción h_f (m.c.a). T#: Topología.	180
Figura 68. Valores de la cabeza de energía cinética turbulenta h_k (m.c.a). T#: Topología.	181
Figura 69. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 6 de la topología 1 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.....	188
Figura 70. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 7 de la topología 1 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.....	188
Figura 71. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 8 de la topología 1 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.....	189
Figura 72. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 10 de la topología 1 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.....	189
Figura 73. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 6 de la topología 3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.....	190
Figura 74. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 7 de la topología 3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.....	190
Figura 75. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 8 de la topología 3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.....	191
Figura 76. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 10 de la topología 3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.....	191
Figura 77. Corrientes secundarias celulares ideales y los correspondientes esfuerzos de corte en el fondo.	197
Figura 78. Esquema de curvas teóricas y medidas del coeficiente de fricción local versus número de Reynolds de diferentes tipos de flujo para una placa plana lisa.	197
Figura 79. Valores de número de Reynolds Re_x y el coeficiente de fricción. T#: Topología.....	198

Figura 80. Tipo de flujo y valores de n de Manning. T#: Topología.	199
Figura 81. Distribución del coeficiente de fricción por ancho de canal de la topología 1 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4. (Vista de planta).	200
Figura 82. Influencia de los flujos secundarios en la distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, en la sección 7 y 8 de la topología 1, para el caudal Q4.	200
Figura 83. Distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, de la topología 3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4. (Vista de planta).	201
Figura 84. Influencia de los flujos secundarios en la distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, en la sección 7 y 8 de la topología 3, para el caudal Q4.	201
Figura 85. Distribución de líneas de corriente y trazas de partículas de agua modelado desde la tubería de alimentación, de la topología 1, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.	203
Figura 86. Distribución de líneas de corriente y trazas de partículas de agua modelado desde la tubería de alimentación, de la topología 3, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.	204
Figura 87. Registro fotográfico de toma de datos para T3 Q1.	205
Figura 88. Registro fotográfico de toma de datos para T3 Q2.	206
Figura 89. Registro fotográfico de toma de datos para T3 Q3.	207
Figura 90. Distribución de la magnitud velocidad vertical, en las secciones de la topología 1, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.	211
Figura 91. Distribución de la magnitud velocidad transversal, en las secciones de la topología 1, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.	212
Figura 92. Distribución de la presión estática, en las secciones de la topología 1, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.	213
Figura 93. Distribución de la magnitud velocidad vertical, en las secciones de la topología 3, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.	214
Figura 94. Distribución de la magnitud velocidad transversal, en las secciones de la topología 3, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.	215
Figura 95. Distribución de la presión estática, en las secciones de la topología 3, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.	216
Figura 96. Comparación de limnigramas del transductor 1 y 2, medidos y modelados con ANSYS FLUENT y con el método de las características utilizando un hidrograma en la entrada.	221
Figura 97. Comparación de limnigramas del transductor 4 y 5, medidos y modelados con ANSYS FLUENT y con el método de las características utilizando un hidrograma en la entrada.	222

Figura 98. Comparación de limnigramas del transductor 6 y 7, medidos y modelados con ANSYS FLUENT y con el método de las características utilizando un hidrograma en la entrada.....	223
Figura 99. Comparación de limnigramas del transductor 8, medido y modelados con ANSYS FLUENT y con el método de las características utilizando un hidrograma en la entrada.....	224
Figura 100. Comparación de hidrogramas en los transductores modelados con ANSYS FLUENT y con el método de las características utilizando un hidrograma en la entrada medido.....	225
Figura 101. Comparación de perfiles de presión estática y dinámica en el transductor T8 con ANSYS FLUENT 2D y un perfil teórico.	226

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Ventajas y desventajas generales para diferentes clases de modelos de turbulencia.....	44
Tabla 2. Caudales utilizados para el canal ECI No. 2.	106
Tabla 3. Escenarios propuestos antes de la validación para modelaciones del canal ECI No. 2.....	109
Tabla 4. Configuración general en ANSYS FLUENT en 2D.....	114
Tabla 5. Configuración general en ANSYS FLUENT en 3D.....	114
Tabla 6. Configuración de modelos en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.....	114
Tabla 7. Configuración de materiales en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.....	115
Tabla 8. Configuración en las celdas de las zonas en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.....	115
Tabla 9. Configuración en las condiciones de frontera en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.....	116
Tabla 10. Configuración de los métodos de solución en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.....	117
Tabla 11. Configuración de los controles de solución en ANSYS FLUENT en 2D.	118
Tabla 12. Configuración de los controles de solución en ANSYS FLUENT en 3D.	118
Tabla 13. Configuración de los monitores de residuales en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.	118
Tabla 14. Configuración de superficies de monitoreo con ANSYS FLUENT en 2D y 3D.	119
Tabla 15. Configuración de la inicialización de la solución con ANSYS FLUENT en 2D y 3D....	119
Tabla 16. Configuración de actividades en los cálculos con ANSYS FLUENT en 2D y 3D.	119
Tabla 17. Configuración del arranque de cálculos con ANSYS FLUENT en 2D y 3D.	120
Tabla 18. Costo computacional de modelaciones en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.....	121
Tabla 19. Verificación de modelaciones en 1D, 2D y 3D.....	122
Tabla 20. Evaluación del perfil de lámina de agua medida vs modelada.....	132
Tabla 21. Escenarios utilizados para modelaciones del canal ECI No. 2.....	134
Tabla 22. Caudales utilizados para modelaciones en flujo permanente en el canal ECI No.1.	137
Tabla 23. Ecuaciones para hidrograma de entrada para modelaciones en flujo no permanente.....	138
Tabla 24. Longitudes y pendientes del fondo del canal entre transductores del canal ECI No. 1. ...	139
Tabla 25. Escenarios propuestos antes de la validación para modelaciones del canal ECI No. 1...	139
Tabla 26. Configuración general en ANSYS FLUENT en 2D.....	141
Tabla 27. Configuración de modelos en ANSYS FLUENT en 2D.	142
Tabla 28. Configuración de materiales en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.	143
Tabla 29. Configuración en las celdas de las zonas en ANSYS FLUENT en 2D.	143
Tabla 30. Configuración en las condiciones de frontera en ANSYS FLUENT en 2D.	143

Tabla 31. Configuración de los métodos de solución en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.	144
Tabla 32. Configuración de los controles de solución en ANSYS FLUENT en 2D.	144
Tabla 33. Configuración de los monitores de residuales en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.	145
Tabla 34. Configuración de superficies de monitoreo con ANSYS FLUENT en 2D y 3D.	145
Tabla 35. Configuración de la inicialización de la solución con ANSYS FLUENT en 2D.	146
Tabla 36. Configuración de actividades en los cálculos con ANSYS FLUENT en 2D.	146
Tabla 37. Configuración del arranque de cálculos con ANSYS FLUENT en 2D.	146
Tabla 38. Costo computacional de modelaciones en ANSYS FLUENT en 2D flujo permanente. .	148
Tabla 39. Verificación de modelaciones en 2D flujo permanente.	149
Tabla 40. Escenario utilizado para la modelación en flujo no permanente del canal ECI No. 1.	155
Tabla 41. Coordenadas válidas para T0a_2D_Q1 y T0b_2D_Q1.	171
Tabla 42. Coordenadas válidas para T0a_2D_Q2, T0b_2D_Q2, T0a_2D_Q3 y T0b_2D_Q3.	171
Tabla 43. Coordenadas válidas para T0a_2D_Q4 y T0b_2D_Q4.	172
Tabla 44. Coordenadas válidas para T1_3D_Q1, T2_3D_Q1 y T3_3D_Q1.	172
Tabla 45. Coordenadas válidas para T2_3D_Q1, T2_3D_Q1, T2_3D_Q1, T3_3D_Q1, T3_3D_Q2 y T3_3D_Q3.	172
Tabla 46. Coordenadas válidas para T1_3D_Q4, T2_3D_Q4 y T3_3D_Q4.	172
Tabla 47. Costo computacional de modelaciones en ANSYS FLUENT en 2D flujo no permanente.	217
Tabla 48. Análisis de resultados de alturas de lámina de agua medidos y calculados.	219

Introducción

Los métodos para que un ingeniero pueda diseñar y evaluar cualquier sistema, llámese estructura u obra, en cuanto a la dinámica de fluidos son la experimentación (modelo físico) y el cálculo (modelo matemático) (Çengel Yunus; Cimbala John, 2006). En la actualidad, los ingenieros en general, diseñan estructuras hidráulicas con relaciones empíricas donde el análisis de resultados es limitado, ya que no se toma en cuenta fenómenos que pueden presentarse en otras dimensiones. Sin embargo, el análisis de estas estructuras con modelos numéricos más poderosos están disponibles en 2D y 3D, que según (Chung, 2010) al introducir información correcta, arrojan resultados al detalle de carácter cuantitativo y cualitativo, disminuyendo la incertidumbre, permitiendo mejoras en el diseño, los cuales podrían evitar errores costosos a la hora de ser construidos y puestos en marcha.

Estos modelos matemáticos 2D y 3D, pueden proporcionar información sobre lo que ocurrirá en una instalación existente, modificada, o simplemente proponer una serie de situaciones en las que el modelo podría funcionar bien del lado de la confiabilidad (Butler & Davies, 2011). En el presente trabajo se analizarán dos estructuras hidráulicas usando modelos numéricos 2D y 3D. La primera es el nuevo canal de laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería (ECI), donde la modelación se compondrá de dos fases, la primera solamente en el canal rectangular y la segunda de manera conjunta con la estructura de disipación de energía que tiene en su interior. La segunda obra hidráulica se trata del primer canal de laboratorio de la ECI, en el que se desarrolló el proyecto de grado del Ingeniero Antonio Arenas Amado, al que se pretende darle continuidad, donde el objetivo del citado proyecto fue *“implementar los modelos matemáticos, en un computador, para predecir el comportamiento de las variables del flujo en un canal rectangular, cuando éste se encuentra bajo condiciones de régimen no permanente subcrítico, y contrastar los resultados obtenidos utilizando diversos métodos numéricos, con mediciones físicas tomadas con instrumentos electrónicos de precisión”* (Arenas Amado, 2002), el cual dejó las puertas abiertas para que se evalúe el objeto de la investigación con otros modelos numéricos, como es el caso de la modelación con CFD de flujo no permanente con ANSYS FLUENT.

El presente trabajo pretende, con estas dos estructuras hidráulicas, analizar la dinámica de fluidos en 1D, 2D y 3D, realizando una comparación y análisis de resultados. Finalmente se establecen conclusiones y recomendaciones a la hora de planear, diseñar y estudiar estructuras hidráulicas en general con la ayuda de la dinámica de fluidos computacional.

1 Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar con modelos 2D y 3D la dinámica de fluidos en dos estructuras hidráulicas, tomando como caso de estudio los resultados de trabajos de grado realizados en el nuevo canal de laboratorio con disipador de energía y en el primer canal de laboratorio con transductores de presión relativa de la Escuela colombiana de Ingeniería.

1.1.1 Objetivos específicos

- a. Recopilación bibliográfica de modelación en 2D y 3D con Dinámica de Fluidos Computacional en canales de laboratorio y estructuras hidráulicas en general.
- b. Reconocer ventajas y limitaciones del software ANSYS FLUENT como paquete computacional de la Dinámica de fluidos.
- c. Establecer un mapa conceptual de la modelación de las estructuras hidráulicas a estudiar.
- d. Realizar mediciones del nuevo canal de laboratorio y su disipador de energía de la ECI, en cuanto a las características geométricas y caudal de operación.
- e. Realizar mediciones del primer canal de laboratorio de la ECI, en cuanto a las características geométricas y caudal de operación.
- f. Definir escenarios para la modelación de las estructuras hidráulicas.
- g. Realizar la modelación en 2D y 3D con ANSYS FLUENT, comparando los resultados con modelos en 1D, resultados obtenidos en los diferentes estudios de referencia y mediciones obtenidas de los modelos físicos dentro de las instalaciones de la ECI, para posteriormente ser analizados.

- h. Definir conclusiones de las modelaciones en las estructuras analizadas y establecer recomendaciones en la planificación, diseño y estudio con la ayuda de la dinámica de fluidos computacional de estructuras hidráulicas en general.

2 Marco Teórico

A continuación, se hace una descripción de las estructuras a estudiar desde el punto de vista hidráulico. Finalmente se relaciona lo anterior con la teoría de la dinámica de fluidos computacional como parte fundamental para establecer las condiciones iniciales de las modelaciones y su respectivo análisis.

2.1 Condiciones Hidráulicas Existentes del Nuevo Canal de la ECI

Con la ayuda de la información del trabajo de grado “Diseño y construcción de un dispositivo de disipación de energía a la entrada del canal experimental de pendiente variable de la ECI” y registros fotográficos actuales Figura 1, se estable las condiciones hidráulicas de esta estructura hidráulica.

Según el documento anteriormente citado y lo observado, el canal fue diseñado y construido tal que, este sea alimentado por una tubería de 4” de diámetro, compuesta por tres materiales, donde el primero es de PVC que está conectado al tanque elevado del sistema de bombeo, el segundo con material de manguera flexible con características tales que ayudan a que la entrega de agua no tenga problema cuando el canal cambie de pendiente con el apoyo escalizable.

En el momento el caudal volumétrico máximo de operación es de $Q= 20$ lps (con 2 bombas existentes), pero se tiene proyectado a futuro un caudal volumétrico máximo de operación $Q= 30$ lps.



Figura 1. Canal experimental de la ECI.

Fuente. *Este estudio.*

Según Rodríguez Cárdenas & Camargo (2013, pág. 27) cuando el canal funciona sin el disipador de energía, el flujo que pasa por la entrada de 4" de diámetro presenta las siguientes condiciones, (se asumió que la velocidad que mencionan los autores es igual a la velocidad media de la sección) (Figura 2):

- La entrega del flujo al canal se realiza mediante un tubo de diámetro de \varnothing 4", dispuesto de tal manera que el flujo entra de forma ascendente por la base del canal, generando altos valores de velocidad y de energía cinética.
- En la entrada el canal no dispone de una profundidad de agua adecuada que permita disipar los altos valores de energía cinética generados por la tubería de alimentación de \varnothing 4".
- La diferencia del área de la sección de entrada del canal por la tubería de alimentación de \varnothing 4", en comparación con el área de la sección transversal del canal experimental de pendiente variable (ancho de 0,375 * profundidad normal) implica que para un mismo caudal se produzcan dos velocidades diferentes, siendo la velocidad de la sección de la tubería de \varnothing 4" que alimenta el canal mayor que la velocidad de la sección transversal de éste. Esta diferencia incide directamente sobre el comportamiento del canal, ya que cualquier cambio a la entrada se refleja inmediatamente en toda la longitud del mismo. Este comportamiento exige implementar un elemento de transición.
- La limitación en la longitud no permite que los efectos de las perturbaciones producidos en la entrada del canal experimental de pendiente variable sean absorbidos a lo largo del trayecto.
- Considerando la limitación de las dimensiones a la entrada del canal y debido a que se debe disipar la energía cinética a la salida del flujo de la tubería de alimentación de \varnothing 4", se evaluaron las condiciones iniciales dependiendo el tipo de flujo que se desarrolla por el canal. Para flujo subcrítico, la profundidad de la lámina de agua es mayor permitiendo mejor disipación. Para flujo supercrítico,

la profundidad de la lámina de agua es desfavorable, puesto que se presenta turbulencia con caudales menores a los utilizados para el régimen subcrítico.



Figura 2. Condiciones iniciales a la entrada del canal.

Fuente. (Rodríguez Cárdenas & Camargo, 2013)

Después de las observaciones y análisis realizadas, Rodríguez Cárdenas & Camargo (2013, págs. 36 - 41) proceden a describir, calcular y construir los diferentes dispositivos de transición, propuestos para disipar la energía cinética a la salida de la tubería de alimentación del canal experimental con pendiente variable, las estructuras propuestas son:

- Tubería de Ø6" con orificios circulares.
- Tuberías concéntricas de Ø 6" con orificios circulares y de Ø 10" con orificios rectangulares.
- Tuberías concéntricas de Ø 6" tipo vertedero de planta circular y tubería de Ø 12" con descarga sumergida.
- Tuberías concéntricas de Ø 6" con orificios rectangulares y tubería de Ø 12" con descarga sumergida.
- Tuberías concéntricas de Ø 6" con orificios rectangulares y tubería de Ø 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente.

Las conclusiones de este trabajo de grado por Rodríguez Cárdenas & Camargo (2013, pág. 113) fueron las siguientes:

- Durante el desarrollo de este proyecto se diseñaron y construyeron diversos elementos, los cuales se ensayaron, mejoraron e implementaron según su funcionalidad, basada en las observaciones, los cálculos y los análisis realizados.
- Tomando en cuenta los dispositivos planteados durante la etapa de experimentación, se mejoraban las condiciones hidráulicas y se diseñaba uno nuevo hasta llegar al seleccionado.
- Una vez realizado el análisis de resultados teóricos y experimentales se procede a la construcción definitiva del dispositivo seleccionado, que está compuesto por tuberías concéntricas de \varnothing 6" con orificios rectangulares y tubería de \varnothing 12" con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente. Cabe anotar que la construcción de este dispositivo se realizó con los materiales indicados para las condiciones de trabajo en contacto con el agua.
- Analizadas las condiciones iniciales y el dispositivo seleccionado se determinó un caudal límite, donde las condiciones hidráulicas para determinada pendiente no presentaban perturbaciones considerables y se estableció lo siguiente: Situación 1. Condición Inicial sin montajes. El caudal límite sin presencia de turbulencia es 4,65 lps. Situación 2. Dispositivo seleccionado. El caudal límite sin presencia de turbulencia es 19,89 lps.
- A pesar de que a la salida de los dispositivos planteados se logró una energía cinética baja se presentaron otros fenómenos como las ondas superficiales, la producción de burbujas de aire ocasionadas por la caída libre y líneas de corriente no paralelas al canal. Estas situaciones obligaron a implementar un dispositivo más complejo para corregir en gran medida todos estos fenómenos.

- Adicionalmente, cabe aclarar que como el canal requiere unas condiciones de toma confiable de datos experimentales y cualquier situación de cambio interno o externo puede afectar considerablemente los resultados obtenidos.
- Después del análisis teórico y experimental se decidió implementar la alternativa seleccionada porque cumplía con las condiciones hidráulicas que mejoraban considerablemente las condiciones de entrada de la tubería de alimentación a la entrada del canal, eliminando en gran medida las perturbaciones en este sector. Adicionalmente, con la implementación de algunos elementos complementarios se corrigieron las líneas de corriente generadoras de ondulaciones en la superficie del canal presentadas para flujo subcrítico (Ver Figura 3 y Figura 4).

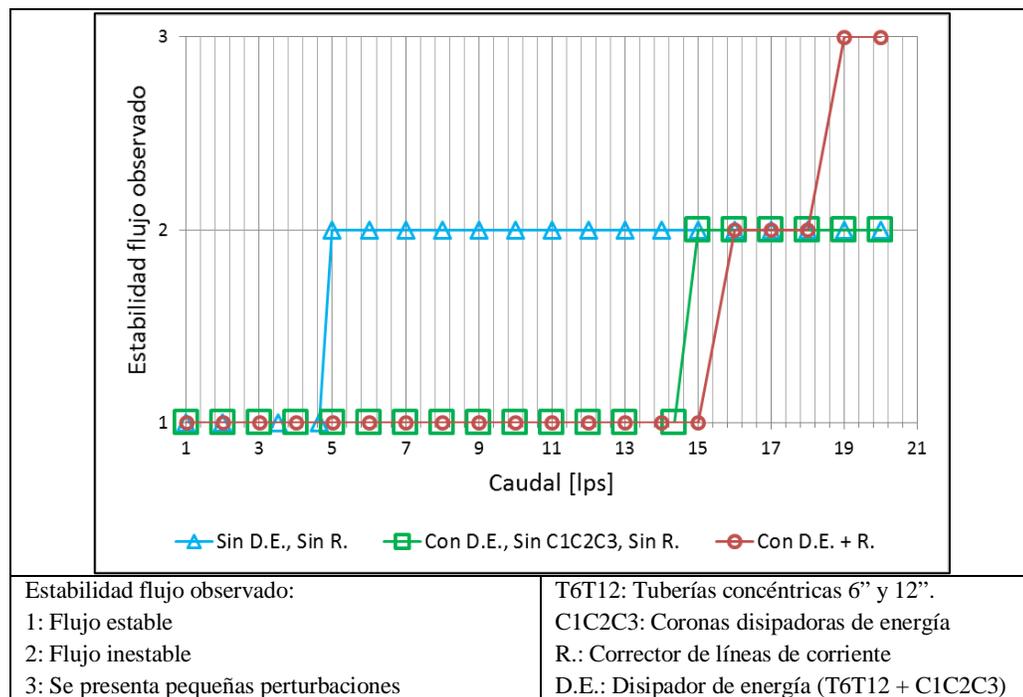


Figura 3. Estabilidad del flujo con y sin disipador de energía.

Fuente. Adaptado de (Rodríguez Cárdenas & Camargo, 2013, págs. 32-34, 87-88, 107-110)

Esta información se confrontó con mediciones en situ y se establece escenarios para la modelaciones y análisis del nuevo canal experimental de la ECI del presente estudio.

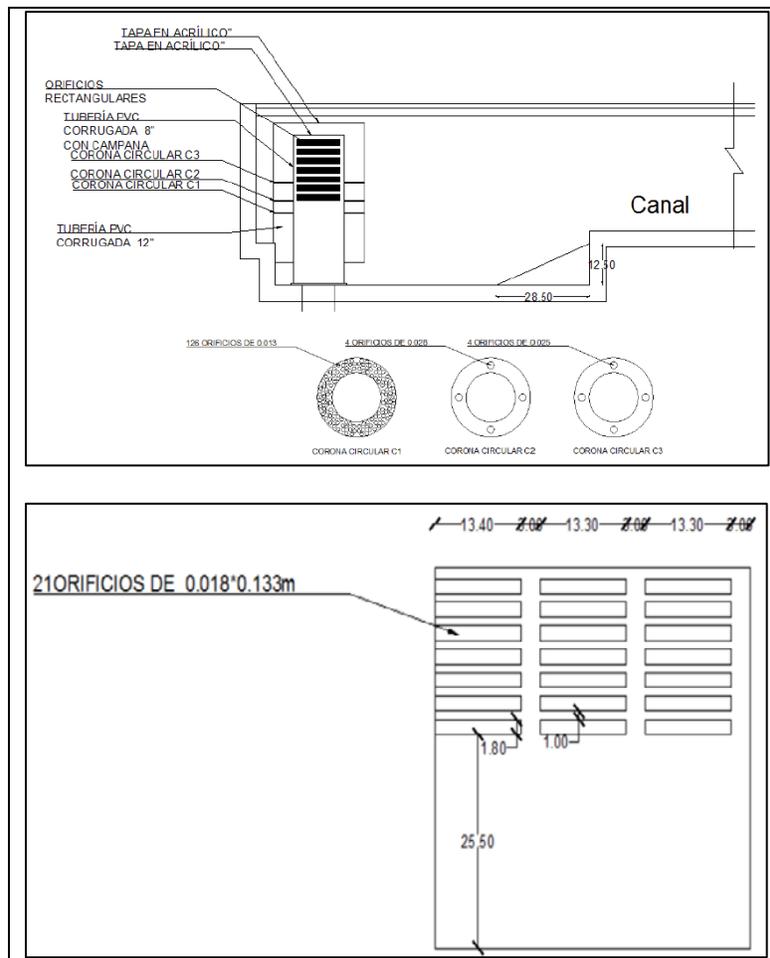


Figura 4. Dispositivo de disipación seleccionado “tuberías concéntricas de Ø 6” con orificios rectangulares y tubería de Ø 12” con descarga sumergida con disipadores de energía y corrector de líneas de corriente”.

Fuente. (Rodríguez Cárdenas & Camargo, 2013)

2.2 Condiciones Hidráulicas del Primer Canal de Laboratorio ECI, Año 2002.

Mediante la revisión de la información del trabajo de grado “*Métodos numéricos para la solución de las ecuaciones de Saint-Venant. Comparación con datos experimentales*” y registros fotográficos actuales, se establece las condiciones hidráulicas de esta estructura. Cabe mencionar que los transductores de presión relativa que se describe a continuación ya no se encuentran en funcionamiento actualmente, pero si el primer canal donde se emplea para realizar prácticas de laboratorio.

El montaje de la Figura 5 en el cual se tomaron datos experimentales consta de:

- Medidor de flujo. Utilizado para obtener un hidrograma en el punto donde él se encuentre instalado. Toma datos cada 30 milisegundos en promedio.
- Válvula de mariposa. Gracias a ella se modifica el caudal que ingresa al canal.
- Transductores de presión relativa. Están ubicados a lo largo del canal. Registran la presión en función del tiempo (cada 30 milisegundos en promedio) de donde es posible obtener una relación $y = y(t)$ en el punto.
- Apoyo escalizable. Utilizado para variar la pendiente a lo largo del canal.
- Tanque de quietamiento. Su función es amortiguar la turbulencia generada por la descarga de la tubería para que la entrada de flujo al canal se realice en forma tranquila.
- Tubería de descarga. En ella está ubicada el medidor de flujo y la válvula de mariposa, sirve para alimentar el canal. Su diámetro es de 4".
- Canal. Posee una sección rectangular de 0.195 m de ancho y 0.35 m de altura en promedio. Sus paredes laterales son de vidrio y su fondo está construido en acrílico con un coeficiente de rugosidad de Manning promedio de 0.0087.
- Vertedero de cresta delgada. Ubicado en el extremo final del canal. Su vertido cumple con la ecuación de la forma

$$Q = C_d(y_0 - y)^{3/2}$$

- El C_d que arrojó el proceso de calibración llevado a cabo se encuentra en el intervalo de 0.4 a 0.47. Durante la toma de datos experimentales se encontró que al modificar el apoyo escalizable el canal no presentaba una única pendiente sino

diferentes pendientes para cada tramo comprendido entre los diferentes transductores. Por esta razón se realizaron análisis para dos pruebas diferentes. Una de ellas toma en cuenta la longitud total del canal y las diferentes pendientes que se presentan, la otra sólo toma como tramo de análisis la parte del canal comprendido entre los transductores 6 y 8, donde es posible suponer una pendiente uniforme.

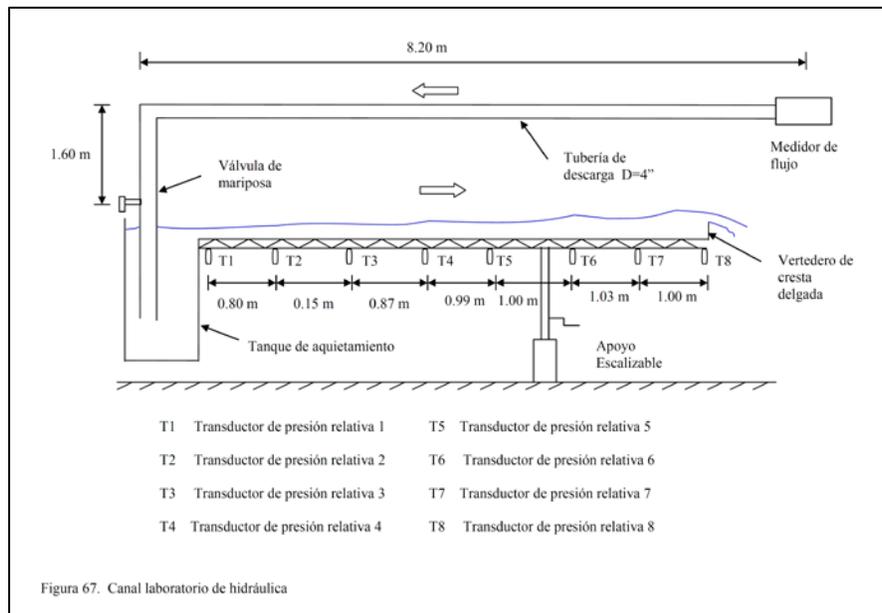


Figura 5. Montaje del primer canal de laboratorio de la ECI.

Fuente: (Arenas Amado, 2002)

2.3 Diagnóstico General del Problema

El análisis de un modelo físico es integral si se incluye un modelo matemático con la finalidad de utilizarlo como una herramienta computacional complementaria para optimizar obras de mejoramiento y recursos (económicos, tiempo y mano de obra) en obras hidráulicas, siempre y cuando se validen los modelos que se utilizarían en el momento de la modelación con mediciones obtenidas en el modelo físico como es el caso de los canales hidráulicos existentes, estableciendo escenarios y realizando comparaciones con las modelaciones en 1D, 2D y 3D.

El modelo físico del nuevo canal de laboratorio con estructura de transición de un dissipador de energía (en adelante canal ECI No. 2) proyecto realizado por Rodríguez Cárdenas y Camargo (2013), se obtuvo una estructura compuesta por un conjunto de elementos los cuales disiparían la energía de un fluido agua de una manera óptima encontrando un caudal límite de funcionamiento con el sistema de alimentación actual, con ayuda de modelos unidimensionales. Con la herramienta computacional CFD, se pretende reproducir perfiles en 1D, 2D y 3D del canal ECI No. 2 sin dissipador de energía, con dissipador de energía y sin rampa, como también con dissipador de energía y rampa, para describir la dinámica del fluido agua en otras dimensiones que no se alcanzaron en el primer estudio.

En cuanto al primer canal de laboratorio (en adelante canal ECI No. 1), según las conclusiones del proyecto realizado por Arenas Amado (2002), los resultados fueron satisfactorios en cuanto a la descripción del flujo unidimensional no permanente en un canal abierto con la utilización de las ecuaciones de Sant – Venant, donde se tuvieron en cuenta suposiciones necesarias para la deducción de las ecuaciones, utilizando técnicas de análisis numérico como es el esquema Lax, método de las características y un esquema alternativo o mixto donde intervienen los anteriores métodos. Para este caso, el uso de CFD se centra en la comparación de resultados y precisiones de modelaciones en 2D versus modelos unidimensionales en escenarios establecidos en dicho documento.

2.4 Clasificación de Flujos

Normalmente, en la ingeniería, la dinámica y cinemática de fluidos con modelos 1D, se estudia la siguiente clasificación de flujo para canales abiertos (Chow, 1994, pág. 6)

Flujo permanente, presentándose:

- Flujo uniforme
- Flujo variado
- Flujo gradualmente variado
- Flujo rápidamente variado

Flujo no permanente, presentándose:

- Flujo uniforme no permanente
- Flujo no permanente (flujo variado no permanente)
- Flujo gradualmente variado no permanente.

- Flujo rápidamente variado no permanente.

Sin embargo, cuando se analizan con modelos 2D y 3D, la dinámica de fluidos, se debe estudiar una clasificación más extensa para su análisis y evaluación; más aún cuando en un problema se presentan sistemas compuestos, como son los de hidráulica de sistemas a presión y sistemas a superficie libre. A continuación, se presenta brevemente dicha clasificación:

2.4.1.1 Flujo Laminar y Flujo Turbulento (efecto de la viscosidad).

El flujo laminar se caracteriza cuando las partículas se mueven suavemente, modelando un flujo por “capas” (sin ocurrencias considerables de mezcla del fluido). El flujo turbulento se caracteriza cuando el movimiento de las partículas del fluido es caótico, modelando un flujo “enredado” (ocurrencia significativa de mezclado de fluido) (Bakker, 2012).

Para caracterizar este tipo de flujos, se tiene en cuenta los siguientes rangos con respecto al número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho * U * L}{\mu}$$

Ecuación 1

Re = Numero de Reynolds

U = Velocidad a flujo libre (velocidad media) [m/s]

L = Longitud característica [m]

μ = Viscosidad cinemática [m²/s]

En sistemas a presión (L = diámetro) (Cengel & Cimbala, 2006, pág. 324):

- Flujo laminar para $Re < 2000$
- Flujo en transición para $2000 < Re < 4000$
- Flujo turbulento para $Re > 4000$

En canales abiertos (L= Radio hidráulico) (Dingman, 2009, pág. 136) y (Chow, 1994, págs. 8-10):

- Flujo laminar para $Re < 500$
- Flujo en transición para $500 < Re < 2000$
- Flujo turbulento para $Re > 2000$

Análisis de la capa límite ($L =$ Longitud del canal) (Cengel & Cimbala, 2006, págs. 513,514), (Schlichting & Gersten, 2006, págs. 31 - 33) y (Schlichting H. , 1979, pág. 473):

Para una placa plana lisa con un flujo libre sin perturbaciones:

- Flujo laminar con $Re_{crit} = 10^5$
- Flujo en transición $3.5 \cdot 10^5 < Re_x < 3 \cdot 10^6$
- Flujo turbulento para $Re_x > 3 \cdot 10^6$

Para una placa plana afectada por factores como la rugosidad de la superficie, las perturbaciones de flujo libre, el ruido acústico, el hecho que el flujo no es estacionario, las vibraciones y la curvatura de la superficie sólida:

- Flujo laminar con $Re_{crit} < 5 \cdot 10^5$
- Flujo turbulento para $Re_x > 5 \cdot 10^5$

Realmente el Re_{crit} lo determina la intensidad de turbulencia, en una placa plana se han logrado Re_{crit} de $3 \cdot 10^4$, $5 \cdot 10^5$, 10^6 , $3 \cdot 10^6$. Es decir, que la anterior información se debe tener como referencia, mas no como criterio de análisis puntual para un problema en general.

2.4.1.2 Flujo subcrítico, crítico y supercrítico (efecto de la gravedad).

Según (Chow, 1994, pág. 13) el Efecto de la gravedad sobre el estado del flujo se presenta por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación está dada por el número de Froude, definido como:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

Ecuación 2

Donde V es la velocidad media del flujo en [m/s], g es la aceleración de la gravedad en [m/s²] y L es una longitud característica en [m] o profundidad hidráulica para canales abiertos. Para clasificar el flujo según el número de Froude, se tienen:

- Si $Fr < 1$; entonces se tiene un flujo Subcrítico.
- Si $Fr = 1$; entonces se tiene un flujo crítico.
- Si $Fr > 1$; entonces se tiene un flujo supercrítico (según aumente la velocidad se clasifica como rápido, ultrarrápido y torrencial).

2.4.1.3 Flujo permanente y flujo no permanente.

Las propiedades de un flujo permanente en cualquier punto dado en el espacio son constantes en el tiempo. Mientras las propiedades de flujo no permanente en cualquier punto dado en el espacio cambian con el tiempo (Bakker, 2012).

2.4.1.4 Newtoniano y no-newtoniano.

En el presente estudio se concentra en los fluidos newtonianos, como el agua y aire, que (Cengel & Cimbala, 2006) los definen como los “fluidos para los que el esfuerzo de corte es linealmente proporcional a la razón de deformación por corte”.

2.4.1.5 Flujo monofásico y multifásico.

El flujo monofásico se refiere a flujos de fluidos sin cambio de fase (ya sea líquido o de gas). Un flujo multifásico significa se presentan múltiples fases en el campo de flujo (por ejemplo, líquido-gas, líquido-sólido, gas-sólido) (Bakker, 2012).

2.4.1.6 Configuraciones del flujo.

Flujo externo, El fluido fluye sobre un objeto en un dominio no confinado. Los efectos viscosos son importantes sólo en las proximidades del objeto. Lejos del objeto, el flujo es esencialmente no viscoso. Ejemplos: flujos sobre aviones, proyectiles, vehículos de tierra, canales abiertos. Flujo interno. El flujo de fluido está confinado por paredes, tabiques y otros límites. Los efectos viscosos extienden a través de todo el dominio. Ejemplos: flujos en tuberías, conductos, difusores, cerramientos, boquillas.

2.5 Ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos

En esta sección se presentan los modelos utilizados que describen el flujo de fluidos en 1D, 2D y 3D en cada escenario. Para el modelo en 2D y 3D se profundiza en los principios básicos de la conservación de la masa y cantidad de movimiento, dirigiendo la temática a las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluido como también las condiciones iniciales y de frontera.

2.5.1 Modelación 1D

2.5.1.1 Flujo Permanente.

Los métodos que se utilizaron en el desarrollo del presente estudio, para flujo permanente, es el método de cuarto orden de Runge-Kutta, que se utilizó en un lenguaje Visual Basic de Excel; para más información ver (Chaudhry, 2007, págs. 120 - 171) & (US Army Corps of Engineers, 2010).

2.5.1.2 Flujo no permanente.

El tránsito en flujo no permanente se basa en la solución de las leyes físicas que gobiernan el flujo de agua en una corriente, las cuales son las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento unidimensional, llamadas las ecuaciones de Saint-Venant. HEC-RAS resuelve estas ecuaciones usando el esquema de diferencias finitas de forma implícita, teniendo en cuenta las ecuaciones derivadas por Barkau (US Army Corps of Engineers, 2010).

2.5.2 Modelación 2D y 3D.

Según (Versteeg & Malalasekera, 2007) hay 3 corrientes en técnicas de solución numérica: diferencias finitas, elementos finitos, métodos espectrales. El presente estudio se concentrara en el método de volúmenes finitos, que según (Chung, 2010, pág. 11): no es más que el producto del método de diferencias finitas y elementos finitos. Este método es utilizado por diferentes softwares para dar solución a CFD, por ejemplo: CFX de ANSYS, FLUENT de ANSYS, PHOENICS, FLOW-3D, OpenFOAM y STAR-CD.

Como se menciona anteriormente, se utilizó el Software ANSYS FLUENT. Según (ANSYS, 2013) describe la dinámica de fluidos de la siguiente manera:

CFD es la ciencia de predicción del flujo de fluidos y transferencia de masa y energía, reacciones químicas y fenómenos relacionados. Para predecir estos fenómenos, CFD resuelve ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento, energía, etc.

Los solucionadores ANSYS CFD se basan en el método de volumen finito, el dominio está discretizado en un conjunto finito de volúmenes de control. La ecuación general de conservación de la masa (transporte), cantidad de movimiento, energía, especies, etc., se resuelven en este conjunto de volúmenes de control (ver

Figura 6).

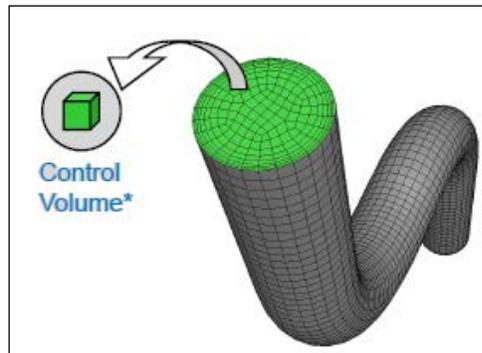


Figura 6. Volumen de control en un dominio.

Fuente: (ANSYS, 2013)

Las ecuaciones diferenciales parciales son discretizadas dentro de un sistema de ecuaciones algebraicas. Todas las ecuaciones algebraicas luego son resueltas numéricamente para ser interpretadas en un campo de solución.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_C} \rho \phi dV_C + \oint_A \rho \phi \vec{V} \cdot dA = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_{V_C} S_\phi dV_C$$

Ecuación 3

Dónde:

$\rho =$ densidad

$\vec{V} =$ vector velocidad ($u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$)

$\Gamma_\phi =$ Coeficiente de difusión para ϕ

$$\nabla_{\phi} = \text{Gradiente de } \phi = \left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)\hat{i} + \left(\frac{\partial\phi}{\partial y}\right)\hat{j} + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)\hat{k}$$

S_{ϕ} = fuente de ϕ por unidad de volumen

A = área de la superficie cerrada (superficie de control)

V_C = Volumen de control

En la *Ecuación 3*, la propiedad ϕ tiene un equivalente según la ecuación a deducir:

Continuidad = 1

Momentum x = u

Momentum y = v

Momentum z = w

Energía = h

En palabras la *Ecuación 3* significa: A mano izquierda, el primer término es la “taza de incremento de ϕ al interior del volumen de control”, el segundo término es la “taza neta decreciente de ϕ debido a la convección a través de las fronteras del volumen de control”. A mano derecha, el primer término es la “taza neta de incremento de ϕ debido a la difusión a través de las fronteras del volumen de control”, el segundo término es la “taza neta de creación ϕ al interior del volumen de control”.

Una descripción detallada de estas ecuaciones está fuera de los objetivos de este estudio; consulte a Versteeg & Malalasekera, (2007) para más detalles.

Las ecuaciones de conservación de energía “calor” en el presente estudio no se resolverán, ya que según (Cengel & Cimbala, 2006, pág. 428) “*para un flujo incompresible, aproximadamente isotérmico (los cambios locales en temperatura son pequeños o inexistentes); esto elimina la necesidad de una ecuación diferencial de conservación de energía*”.

Como se comentó anteriormente, se resolvió las ecuaciones de Navier - Stokes para un flujo incompresible, permanente y no permanente. Lo anterior para validar las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos del problema planteado en el presente estudio, básicamente serán el análisis y evaluación de flujos internos y externos multifase (agua y aire).

Por esta razón la **Ecuación 3** se reduce en las ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas, que se describirán a continuación.

2.5.2.1 Ecuaciones de continuidad y de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas.

Para Cengel & Cimbala (2006, pág. 430) La ecuación de continuidad y la ecuación de Navier-Stokes (ecuación de cantidad de movimiento para flujo laminar y no permanente) se expanden en coordenadas cartesianas (x, y, z) y (u, v, w):

Ecuación de continuidad de flujo incompresible:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Ecuación de momentum de flujo incompresible:

Componente x de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + g_x$$

Componente y de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + g_y$$

Componente z de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] + g_z$$

Para las ecuaciones de cantidad de movimiento, el primer término de la izquierda corresponde a la aceleración local (impulso o variación de la cantidad de movimiento en el tiempo), el segundo término a la aceleración convectiva (inercia, responsable de romper la amortiguación viscosa). Los

términos a la derecha se refieren a la segunda ley de Newton del movimiento, donde el primer término se refiere a la fuerza por unidad de masa de la presión, el segundo a las fuerzas viscosas que determinan la relación entre las fuerzas de fricción por unidad de área de la frontera debido a la viscosidad molecular y el gradiente de velocidad local normal a la frontera y el tercer término es la fuerza gravitacional.

2.5.2.2 Ecuaciones de turbulencia.

Versteeg & Malalasekera (2007, pág. 49,50, 62 - 64) examinan las consecuencias de las fluctuaciones turbulentas para las ecuaciones de flujo medio para un flujo incompresible con viscosidad constante. Estas suposiciones simplifican considerablemente el álgebra involucrada sin desvirtuar los mensajes principales. Se resume las reglas que gobiernan los promedios temporales de las propiedades fluctuantes $\varphi = \Phi + \varphi'$, $\psi = \Psi + \psi'$ y su suma, derivadas e integrales:

$$\begin{aligned}\overline{\varphi'} &= \overline{\psi'} = 0 \\ \overline{\Phi} &= \Phi \\ \frac{\partial \overline{\varphi}}{\partial s} &= \frac{\partial \Phi}{\partial s} \\ \overline{\int \varphi ds} &= \int \Phi ds \\ \overline{\varphi + \psi} &= \Phi + \Psi \\ \overline{\varphi\psi} &= \Phi\Psi + \overline{\varphi'\psi'} \\ \overline{\varphi\Psi} &= \Phi\Psi \\ \overline{\varphi'\Psi} &= 0\end{aligned}$$

Ecuación 4

Estas relaciones pueden verificarse fácilmente mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones observando que la operación de promedio en el tiempo es en sí misma una integración. Por lo tanto, el orden del tiempo de promediado y suma, la integración o diferenciación adicional se puede intercambiar o conmutar, por lo que se llama la propiedad conmutativa:

Promedio o media del tiempo: la media Φ de la propiedad de un flujo es definido como:

$$\Phi = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi(t) dt$$

Promedio en el tiempo de las fluctuaciones φ' es por definición cero:

$$\overline{\varphi'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \varphi'(t) dt \equiv 0$$

A partir de ahora no anotaremos explícitamente la dependencia temporal de φ y φ' , por lo que escribimos $\varphi = \Phi + \varphi'$. La descripción más compacta de las principales características del componente fluctuante de una variable de flujo turbulento es en términos de sus estadísticas.

Dado que div y grad son diferenciaciones, las reglas anteriores pueden extenderse a una cantidad vectorial fluctuante ($a = A + a'$) y sus combinaciones con un escalar fluctuante $\varphi = \Phi + \varphi'$:

$$\overline{\text{div } a} = \text{div } A; \overline{\text{div } (\varphi a)} = \text{div } (\overline{\varphi a}) = \text{div } (\Phi A) + \text{div } (\overline{\varphi' a'}); \overline{\text{div grad } \varphi} = \text{div grad } \Phi$$

Ecuación 5

Considerando la continuidad instantánea y las ecuaciones de Navier-Stokes en un sistema de coordenadas cartesianas, de manera que el vector de velocidad “u” tiene componente “x” “u”, componente “y” “v” y la componente “z” “w”:

$$\text{div } u = 0$$

Ecuación 6

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div } (uu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \text{div } (\text{grad } (u))$$

Ecuación 7

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div } (vu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \text{div } (\text{grad } (v))$$

Ecuación 8

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(wu) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \text{div}(\text{grad}(w))$$

Ecuación 9

Este sistema de ecuaciones gobierna cada flujo turbulento, pero investigamos los efectos de las fluctuaciones en el flujo medio usando la descomposición de Reynolds en las anteriores ecuaciones y reemplazamos las variables de flujo “u” (de ahí también u, v, w) y “p” por la suma de un componente medio y fluctuante así:

$$\begin{aligned} u &= U + u' \\ u &= U + u' \\ v &= V + v' \\ w &= W + w' \\ p &= P + p' \end{aligned}$$

Entonces se toma el promedio en el tiempo, aplicando las reglas indicadas en **Ecuación 4** y **Ecuación 5**. Teniendo en cuenta la **Ecuación 6** de continuidad, observemos primero que $\overline{\text{div } u} = \text{div } U$. Esto produce la ecuación de continuidad para el flujo medio:

$$\text{div } U = 0$$

Un proceso similar se lleva a cabo ahora en la ecuación de cantidad del movimiento en “x” de la **Ecuación 7**. Los promedios en el tiempo de los términos individuales en esta ecuación se pueden escribir así:

$$\frac{\overline{\partial u}}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial t}$$

$$\text{div}(\overline{uu}) = \text{div}(UU) + \text{div}(\overline{u'u'})$$

$$-\frac{\overline{1 \partial p}}{\rho \partial x} = -\frac{1 \partial p}{\rho \partial x}$$

$$\overline{\nu \text{div}(\text{grad}(u))} = \nu \text{div}(\text{grad}(U))$$

La sustitución de estos resultados da las ecuaciones de cantidad de movimiento en “x” promedio en el tiempo:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(UU) + \text{div}(\overline{u'u'}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{grad}(U))$$

Ecuación 10

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \text{div}(VU) + \text{div}(\overline{v'u'}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \text{div}(\text{grad}(V))$$

Ecuación 11

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div}(WU) + \text{div}(\overline{w'u'}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \text{div}(\text{grad}(W))$$

Ecuación 12

Es importante notar que los términos (I), (II), (IV) y (V) de la ***Ecuación 10*** a ***Ecuación 12*** también aparecen en las ecuaciones instantáneas ***Ecuación 7*** a ***Ecuación 9***, pero el proceso de promediar en el tiempo se introdujo nuevos términos (III) resultantes en las ecuaciones de cantidad de movimiento promediadas en el tiempo. Los términos implican productos de velocidades fluctuantes y están asociados con la transferencia de cantidad de movimiento convectivo debido a remolinos turbulentos. Es habitual colocar estos términos en el lado derecho de la ***Ecuación 7*** a ***Ecuación 9*** para reflejar su papel como tensiones turbulentas adicionales sobre las componentes de velocidad media U, V y W.

Según Cengel & Cimbala (2006, pág. 840) cuando se usa un modelo de turbulencia, la ecuación de Navier-Stokes se reemplaza por lo que se llama ecuación de Navier-Stokes de Número de Reynolds Promedio (NSRP, RANS por sus siglas en inglés), que se presentan a continuación modificado con la ayuda del manual de usuario de FLUENT en “ANSYS Help” para flujo no permanente en la media, turbulento e incompresible:

Ecuación de NS de flujo no permanente (sin expandir en coordenadas cartesianas):

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}\vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \nabla^2 \vec{V} + g$$

Ecuación 13

Ecuación de NSRP de flujo no permanente:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}\vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \nabla^2 \vec{V} + \vec{V} \cdot (\tau_{ij,turbulento}) + \rho g$$

Ecuación 14

Al comparar la ***Ecuación 13*** y la ***Ecuación 14***, hay un término adicional en el lado derecho de la que justifica las fluctuaciones turbulentas. $\tau_{ij,turbulento}$ es un tensor conocido como tensor de esfuerzo específico de Reynolds. Denominado así debido a que actúa de modo similar al tensor de esfuerzo viscoso τ_{ij} . En coordenadas cartesianas, $\tau_{ij,turbulento}$ es:

$$\tau_{ij,turbulento} = \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix}$$

Donde la barra superior indica el promedio en tiempo del producto de dos componentes de velocidad fluctuantes y los apóstrofes denotan componentes de velocidad fluctuantes. Puesto que el esfuerzo de Reynolds es simétrico, se introducen al problema seis incógnitas más. Estas nuevas incógnitas se modelan de varias maneras mediante modelos de turbulencia.

En (Versteeg & Malalasekera, 2007, pág. 62) las ecuaciones NSRP para flujo incompresible y no permanente son:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(UU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div}(\text{grad}(U)) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\overline{\rho u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{\rho u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right]$$

Ecuación 15

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(VU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \text{div}(\text{grad}(V)) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\overline{\rho u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{\rho v'^2})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right]$$

Ecuación 16

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div}(WU) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \text{div}(\text{grad}(W)) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\overline{\rho u'w'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{\rho v'w'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right]$$

Ecuación 17

Los términos adicionales de esfuerzos se han escrito en forma extendida para aclarar su estructura. Estos son el resultado de seis tensiones adicionales, tres esfuerzos normales:

$$\tau_{xx} = -\overline{\rho u'^2}; \tau_{yy} = -\overline{\rho v'^2}; \tau_{zz} = -\overline{\rho w'^2}$$

Ecuación 18

Y tres esfuerzos cortantes:

$$\tau_{xy} = -\overline{\rho u'v'}; \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\overline{\rho u'w'}; \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\overline{\rho v'w'}$$

Ecuación 19

El enfoque de promedio de Reynolds para la modelación de turbulencia requiere que se modelen correctamente los esfuerzos de Reynolds en la *Ecuación 15*, *Ecuación 16* y *Ecuación 17*. Un método común emplea la hipótesis de Boussinesq para relacionar los esfuerzos de Reynolds a los gradientes de velocidad media (ANSYS, Inc., 2013):

$$\tau_{ij,turbulento} = -\overline{u'_i u'_j} = \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

Ecuación 20

Donde:

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) = \text{Energía cinética turbulenta por unidad de masa}$$

“El primer término de la derecha es análogo a la ecuación de la tasa de deformación de elementos del fluido, excepto para la aparición de la viscosidad turbulenta o remolinos “Eddy” μ_t (dimensiones Pa s). También hay una viscosidad turbulenta cinemática o de remolinos denotado por $\nu_t = \mu_t / \rho$, con dimensiones m²/s. El segundo término del lado derecho es δ_{ij} , el delta de Kronecker ($\delta_{ij} = 1$ si $i = j$ y $\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$). Esta contribución asegura que la ecuación da el resultado correcto para el Reynolds normales” (Versteeg & Malalasekera, 2007, pág. 67).

La ecuación de NSRP de flujo no estacionario es:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}\vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \nabla^2 \vec{V} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu_T \left(\frac{\partial U_I}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_I} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right] + g$$

Ecuación 21

O también:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\vec{V}\vec{V}) = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_T) \left(\frac{\partial U_I}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_I} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{2}{3} k \delta_{ij} + g$$

Ecuación 22

“Por lo tanto, si los detalles específicos de la turbulencia no son importantes podemos interpretar el propio fluido como un pseudo-fluido con un aumento de la viscosidad (viscosidad efectiva, $\nu_{\text{eff}} = \nu + \nu_T$) que se aproxima más o menos los procesos de mezcla turbulenta a la difusión de cantidad de movimiento y otras propiedades de flujo. Esto significa que los modelos de difusión de convección, donde $-\overline{u'_i u'_j}$ es el transporte de \vec{V} en la **Ecuación 21**. Independientemente del enfoque utilizado para determinar ν_T , hay varias limitaciones con la aproximación de Boussinesq. Entre otros, a la aproximación de Boussinesq se asume que los remolinos se comportan como moléculas, que la turbulencia es isotrópica y que no existe equilibrio local entre esfuerzo y

deformación. Como consecuencia de estas suposiciones, las predicciones de los flujos simples pueden fallar, por ejemplo, en los flujos de canal, donde las mediciones obtenidas muestran que $-\overline{u'^2} \neq -\overline{v'^2} \neq -\overline{w'^2}$. Por lo tanto, los modelos que se basan en la aproximación de Boussinesq se limitan a la predicción de los flujos isotrópicos en equilibrio local. A pesar de las deficiencias de la aproximación de Boussinesq es una de las piedras angulares en varios modelos de turbulencia. Las razones para esto son el costo de utilizar modelos de turbulencia más elaborados y problemas con la obtención de cierres para momentos más elevados” (Andersson, y otros, 2012).

2.5.2.3 Ventajas y desventajas de los modelos de turbulencia.

A continuación, se presenta un cuadro donde se enlistan los modelos de turbulencia presentes en ANSYS FLUENT con ventajas y deficiencias o limitaciones a la hora de utilizarlos. Aunque se realizó una revisión del manual de usuario ANSYS Help y se realizó tutoriales presentes en la web, se creyó pertinente presentar un cuadro comparativo encontrado en el libro de (Andersson, y otros, 2012, pág. 100).

Tabla 1. Ventajas y desventajas generales para diferentes clases de modelos de turbulencia.

Modelo de turbulencia	Ventajas	Deficiencias / limitaciones
Modelos de dos ecuaciones, modelos del grupo k-ε, RNG, de realización, k-ω y SST.	Modelos completos en el sentido de que las escalas de velocidad y la duración de la turbulencia se predicen con ecuaciones de transporte. Buenos resultados para muchas aplicaciones de ingeniería. Especialmente bueno para el análisis de tendencias. Robusta, económica y fácil de aplicar.	Limitado a un supuesto de viscosidad de remolino. Viscosidad turbulenta se supone que es isotrópico. Convección y difusión de los esfuerzos de corte se descuidan.
Standard k-ε	El modelo más ampliamente utilizado y validado.	No es bueno para los chorros redondos y los flujos relacionados con curvatura significativa, torbellinos, la aceleración brusca, separación y regiones con número de Re bajo.
RNG k-ε	Modificación del modelo k-ε estándar da mejores simulaciones de torbellinos de las corrientes de flujo y separación.	No es tan estable como el modelo k-ε estándar. No es adecuado para los chorros redondos.
Realizable k-ε	Modificación del modelo k-ε estándar da mejores simulaciones de flujos con torbellinos y de separación baja. También puede manejar chorros redondos.	No es tan estable como el modelo k-ε estándar.

Modelo de turbulencia	Ventajas	Deficiencias / limitaciones
Modelo k- ω	Funciona bien para número de Re bajo. No necesita funciones de pared. Funciona bien con gradientes de presión y flujo adversos de separación.	Necesita de una malla fina cerca de la pared, con el primer punto de la malla en $y^+ < 5$.
Modelo SST	Utiliza k- ϵ en la corriente libre y k- ω en la región de la pared delimitada. Funciona bien con gradientes de presión y flujo adversos de separación. Muchos autores recomiendan que el modelo SST debe sustituir el modelo k- ϵ como la primera opción.	Necesidades de malla fina cerca de la pared. Sobre predice. Turbulencia en regiones con grandes deformaciones normales, por ejemplo, regiones de estancamiento y regiones con fuerte aceleración, pero es mejor que el k- ϵ .
Modelos de esfuerzo Reynolds, (RSM)	Aplicable para flujos complejos en el que los modelos de viscosidad turbulenta fallan. Tiene en cuenta la anisotropía. Buen desempeño durante muchos flujos complejos, por ejemplo, torbellinos, flujos con separación y chorros planos.	Computacionalmente costoso con 11 ecuaciones de transporte. Varios términos en las ecuaciones de transporte deben estar cerradas. Pobre rendimiento de algunos flujos debido a los cierres introducidos en el modelo.
Simulación de grandes remolinos (LES)	Aplicable a flujos complejos. Proporciona información acerca de las estructuras de los flujos turbulentos. Da una gran cantidad de información que no se puede obtener de otra manera.	Alto costo computacional. Gran cantidad de datos que deben ser almacenados y post procesado. Es difícil encontrar condiciones de frontera adecuadas para resolver para un flujo en el tiempo.
DNS (modelo no incorporado en FLUENT)	No se introducen modelos de turbulencia. Útil para números Re bajos, especialmente para los flujos gaseosos. Útil para desarrollar y validar modelos de turbulencia.	Costo computacional extremo en simulaciones de flujo en ingeniería. Necesita gran cantidad de datos.

Fuente. (Andersson, y otros, 2012, pág. 100).

En (ANSYS, Inc., 2013), para la modelación de la turbulencia en 2D y 3D ofrece una serie de modelos que se presentan a continuación, de forma creciente en cuanto al costo computación por iteración:

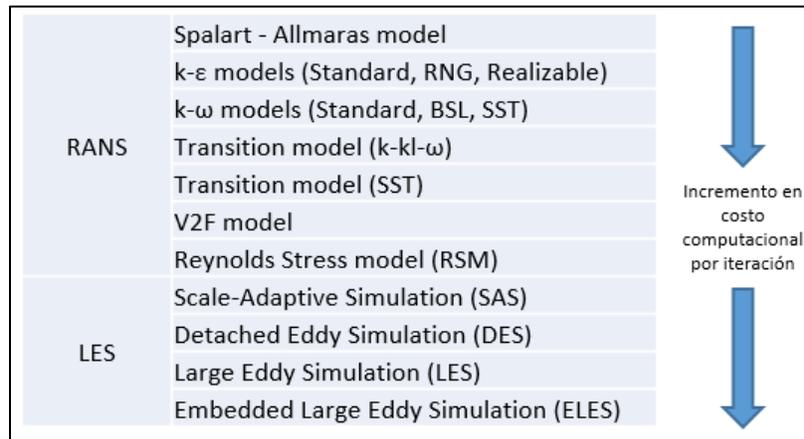


Figura 7. Modelos de turbulencia disponibles en ANSYS FLUENT.

Fuente: Adaptado de (ANSYS, 2013)

Como se observa en la Figura 7, para realizar una estimación del flujo turbulento con la aplicación de CFD para tener en cuenta los efectos de la turbulencia en el flujo medio, ANSYS FLUENT contiene dos grupos de modelos (Hirsch, 2007, págs. 86, 87):

- Large Eddy Simulation o simulación de grandes remolinos o (LES) por sus siglas en inglés, que calcula directamente las fluctuaciones turbulentas en el espacio y tiempo, pero sólo por encima de una cierta escala de longitud. Por debajo de esa escala, llamada la sub escala, la turbulencia es modelada por las leyes semi-empíricas.
- Modelos de Navier-Stokes de número de Reynolds promedio (RANS), hace caso omiso de las fluctuaciones turbulentas y su objetivo es calcular un promedio de sólo el flujo turbulento. Esta es actualmente la aproximación que más se aplica en la práctica CFD. La jerarquía entre estos tres niveles de modelado de la turbulencia se resume en la Figura 8, que muestra el espectro de energía turbulenta en función del número de onda k , y los límites de la rango de aplicación de modelos LES y RAN. Recuerde que el número de onda se define como $k = 2\pi / \lambda$, donde λ es la longitud de onda.

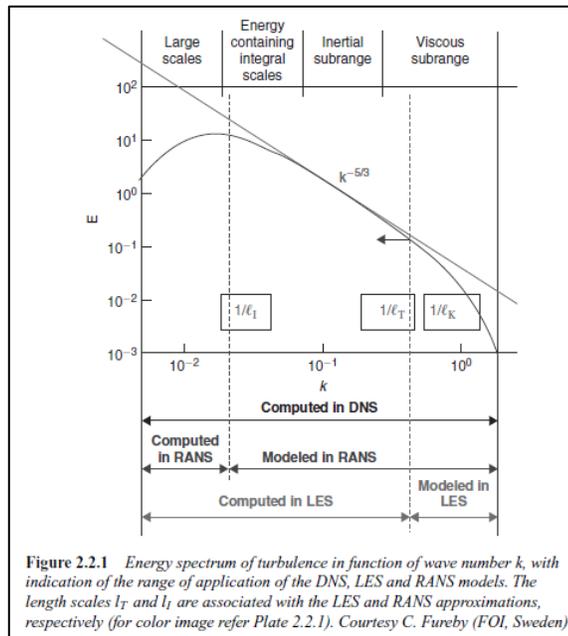


Figura 8. Espectro de energía de turbulencia en función del número de la onda k , con indicación del rango de aplicación de los modelos DNS, LES y RANS.

Fuente: (Hirsch, 2007, pág. 88)

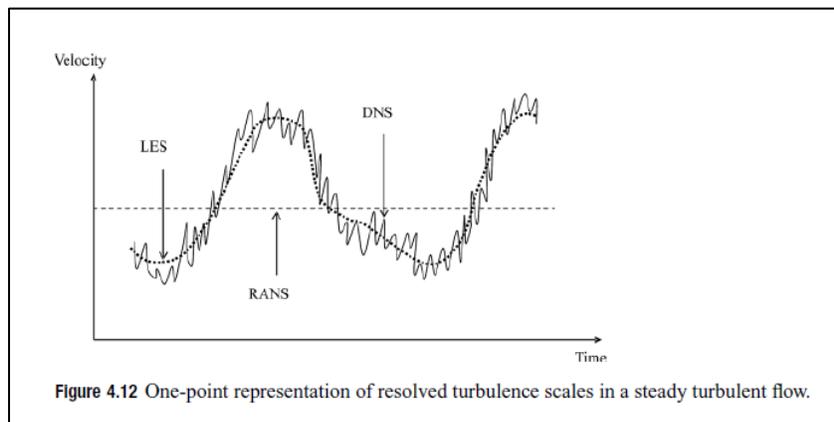


Figura 9. Representación de un punto para resolver escalas de turbulencia en un flujo turbulento constante.

Fuente: (Andersson, y otros, 2012, pág. 84)

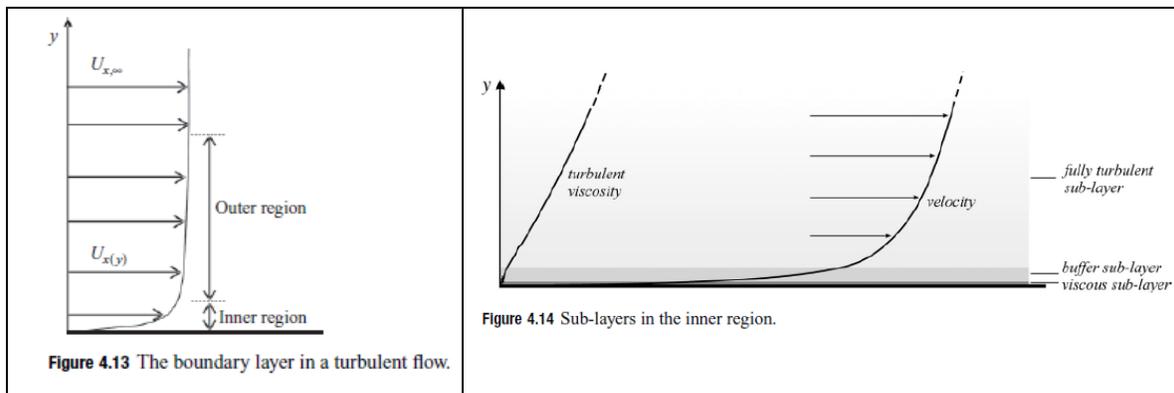


Figura 10. Capa límite de un flujo turbulento y subcapas en la región interna.

Fuente: (Andersson, y otros, 2012, pág. 102)

Para el presente estudio, se utilizó el modelo de turbulencia “Baseline (BSL) $k-\omega$ ” basado en el modelo estándar $k-\omega$ para modelar en flujo permanente el canal ECI No. 2 y el modelo de turbulencia “ $k-\varepsilon$ Realizable” basado en el modelo estándar $k-\varepsilon$ para modelar en flujo permanente y no permanente el canal ECI No. 1, los cuales están incorporado en ANSYS FLUENT que se describen a continuación.

2.5.3 Modelo de turbulencia Baseline (BSL) $k-\omega$.

La siguiente descripción del modelo baseline (BSL) $k-\omega$ fue tomada del manual de usuario de ANSYS FLUENT (ANSYS, Inc., 2013):

El modelo estándar $k-\omega$ de ANSYS FLUENT se basa en el modelo de Wilcox $k-\omega$, que incorpora las modificaciones de los efectos de números Reynolds bajo, compresión, esfuerzos cortantes y el flujo de difusión. El modelo estándar $k-\omega$ es un modelo empírico basado en ecuaciones del modelo de transporte de la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación específica (ω), que también puede ser considerado como la relación de k y ε (tasa de disipación de la energía cinética turbulenta por unidad de masa).

El principal problema con el modelo estándar de Wilcox ($k-\omega$) es su fuerte sensibilidad a las condiciones de flujo libre. El modelo baseline (BSL) $k-\omega$ fue desarrollado por Menter para mezclar con eficacia la formulación sólida y precisa del modelo $k-\omega$ en la zona cercana a la pared con la independencia de la corriente libre del modelo $k-\varepsilon$ en la zona lejana a la pared.

Para lograr esto, el modelo $k-\varepsilon$ se convierte en una formulación $k-\omega$. El modelo BSL $k-\omega$ es similar al modelo estándar $k-\omega$ pero incluye las siguientes mejoras:

- El modelo $k-\omega$ estándar y el modelo transformado $k-\varepsilon$ se multiplican por una función de mezcla y se añaden los dos modelos juntos. La función de mezcla está diseñada para ser uno en la región próxima a la pared, que activa el modelo estándar $k-\omega$ y cero fuera de la superficie, que activa el modelo transformado $k-\varepsilon$.
- El modelo BSL incorpora un término de la derivada de difusión cruzada (damped cross-diffusion derivative) en ecuación de $k-\omega$
- Las constantes de modelado son diferentes.

2.5.3.1 Ecuaciones de transporte para el modelo Baseline (BSL) $k-\omega$.

El Modelo (BSL) $k-\omega$ tiene una forma similar a la $k-\omega$ estándar:

Para k

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k$$

Y para ω

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega$$

En estas ecuaciones, el término G_k representa la producción de energía cinética de la turbulencia, y se define de la misma manera que en el modelo estándar $k-\omega$. G_ω representa la generación de ω , calculado como se describe en la siguiente sección. Γ_k y Γ_ω representan la difusividad efectiva de k y ω , respectivamente, que se calculan como se describe en la siguiente sección. Y_k y Y_ω representan la disipación de k y ω debido a la turbulencia, calculado como se describe en la sección de modelación de la disipación de la turbulencia.

D_ω representa el término de difusión cruzada, calculado como se describe en la siguiente sección. S_k y S_ω son términos de fuente que puede definir el usuario.

2.5.3.2 Modelado de la difusividad efectiva.

Los difusividad efectiva para el modelo BSL están dadas por:

$$\Gamma_k = \mu \frac{\mu_t}{\sigma_k}$$

$$\Gamma_\omega = \mu \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}$$

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega}$$

μ_t es la viscosidad turbulenta, donde α^* es un coeficiente que se tratara en la sección de la corrección del número de Reynolds bajo (Low-Reynolds Number Correction). Por otro lado, σ_k y σ_ω son los números de Prandtl turbulento para k y ω , respectivamente.

$$\sigma_k = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{k,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{k,2}}}$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{\frac{F_1}{\sigma_{\omega,1}} + \frac{(1-F_1)}{\sigma_{\omega,2}}}$$

$$\sigma_{k,1} = 2, \sigma_{\omega,1} = 2, \sigma_{k,2} = 1, \sigma_{\omega,2} = 1.168$$

La función de mezcla F_1 está dada por

$$F_1 = \tanh(\Phi_1^4)$$

$$\Phi_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y}, \frac{500\mu}{\rho y^2 \omega} \right), \frac{4\rho k}{\sigma_{\omega,2} D_\omega^* y^2} \right]$$

$$D_\omega^* = \max \left[2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega,2}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right]$$

Donde y es la distancia a la siguiente superficie y D_{ω}^* es la parte positiva de la expresión de difusión cruzada (ver la sección sobre la modificación de la ecuación de difusión cruzada).

2.5.3.3 Corrección del número de Reynolds bajo (*Low-Reynolds Number Correction*).

El coeficiente α^* amortigua la viscosidad turbulenta provocando una corrección de número de Reynolds bajo. Viene dada por:

$$\alpha^* = \alpha_{\infty}^* \left(\frac{\alpha_0^* + Re_t/R_k}{1 + Re_t/R_k} \right)$$

Donde

$$\begin{aligned} Re_t &= \frac{\rho k}{\mu \omega} \\ R_k &= 6 \\ \alpha_0^* &= \frac{\beta_i}{3} \\ \beta_i &= 0.072 \\ \alpha_{\infty}^* &= 1 \end{aligned}$$

Para número de Reynolds Altos, $\alpha^* = \alpha_{\infty}^* = 1$.

2.5.3.4 Modelado de la producción de la turbulencia.

La producción de k y ω se definen a continuación:

Producción de k : El término G_k representa la producción de energía cinética turbulenta, y se define de la misma manera que en el estándar - modelo. Desde la ecuación exacta para el transporte de k , este término puede ser definido como:

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

Para evaluar G_k en una manera consistente con la hipótesis de Boussinesq, quedaría

$$G_k = \mu_t S^2$$

Donde S es el módulo de la media de la rata de tensor esfuerzo (mean rate-of-strain tensor), definida en el mismo camino como el modelo k - ε , así,

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

Producción de w : El termino G_ω representa la producción de ω y es determinado por:

$$G_\omega = \frac{\alpha\alpha^*}{\nu_t} G_k$$

$$\alpha = \frac{\alpha_\infty}{\alpha^*} \left(\frac{\alpha_0 + Re_t/R_\omega}{1 + Re_t/R_\omega} \right)$$

$$\alpha_0 = \frac{1}{9}$$

$$R_\omega = 2.95$$

Donde α^* y Re_t fueron determinados en la sección llamada corrección del número de Reynolds bajo. El término α_∞ es determinado por

$$\alpha_\infty = F_1\alpha_{\infty,1} + (1 - F_1)\alpha_{\infty,2}$$

Donde

$$\alpha_{\infty,1} = \frac{\beta_{i,1}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,1}\sqrt{\beta_\infty^*}}$$

$$\alpha_{\infty,2} = \frac{\beta_{i,2}}{\beta_\infty^*} - \frac{\kappa^2}{\sigma_{\omega,2}\sqrt{\beta_\infty^*}}$$

Donde κ es 0.41

2.5.3.5 Modelación de la disipación de la turbulencia.

La disipación de k y ω se definen a continuación:

Disipación de k : El término de Y_k representa la disipación de la energía cinética turbulenta, y es definida en una manera similar como el modelo k - ω estándar. La diferencia es en el camino del término f_{β^*} donde es evaluado. En el modelo k - ω f_{β^*} es definido como una función por partes. Por el lado del modelo BSL k - ω , f_{β^*} es una constante igual a 1. Entonces,

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega$$

$$\beta^* = \beta_i^* [1 + \zeta^* F(M_t)]$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{4/15 + (Re_t/R_\beta)^4}{1 + (Re_t/R_\beta)^4} \right)$$

$$\zeta^* = 1.5$$

$$R_\beta = 8$$

$$\beta_\infty^* = 0.09$$

Disipación de ω : El término de Y_ω representa la disipación de ω , y es definida de manera similar como en el modelo estándar de k - ω . La diferencia está en el camino a los términos β_i y f_β son evaluados. En el modelo estándar de k - ω , β_i es definido como una constante igual a 0.072 y f_β es definido por una ecuación. Para el modelo BSL k - ω , f_β es una constante igual a 1. Entonces:

$$Y_\omega = \rho \beta \omega^2$$

$$\beta = \beta_i \left[1 - \frac{\beta_i^*}{\beta_i} \zeta^* F(M_t) \right]$$

$$\beta_i^* = \beta_\infty^* \left(\frac{4/15 + (Re_t/R_\beta)^4}{1 + (Re_t/R_\beta)^4} \right)$$

$$\zeta^* = 1.5$$

$$R_\beta = 8$$

$$\beta_\infty^* = 0.09$$

$F(M_t)$ es la función de compresibilidad determinado por

$$F(M_t) = \begin{cases} 0 & M_t \leq M_{t0} \\ M_t^2 - M_{t0}^2 & M_t > M_{t0} \end{cases}$$

Donde

$$\begin{aligned} M_t^2 &\equiv \frac{2k}{a^2} \\ M_{t0} &= 0.25 \\ a &= \sqrt{\gamma RT} \end{aligned}$$

Observe que, en los números de Reynolds altos la forma del modelo $k-\omega$, $\beta^*_i = \beta^*_\infty$. En forma incompresible $\beta^* = \beta^*_i$. En lugar de tener un valor constante, β_i es determinado por

$$\beta_i = F_1\beta_{i,1} + (1 - F_1)\beta_{i,2}$$

Observe que la constante de 0.072 todavía se utiliza para β_i en la corrección del número de Reynolds bajos para BSL para definir α^*_{ω} .

2.5.3.6 Corrección de curvatura

Un inconveniente de los modelos de viscosidad de remolinos es que estos modelos son insensibles para agilizar la curvatura y la rotación del sistema, los cuales juegan un papel significativo en muchos flujos turbulentos de interés práctico. Una modificación del término de producción de turbulencia está disponible para sensibilizar los siguientes modelos estándar de viscosidad de remolino a los efectos de la curvatura de la línea de corriente y la rotación del sistema, entre ellos El Modelo (BSL) $k-\omega$. La función empírica sugerida por Spalart y Shur para explicar los efectos de la curvatura las líneas de corriente y efectos del sistema de rotación se define por:

$$f_{rotación} = (1 + C_{r1}) \frac{2r^*}{1 + r^*} [1 - C_{r3} \tan^{-1}(C_{r2}\tilde{r})] - C_{r1}$$

Se utiliza como multiplicador del término de producción y se ha limitado en ANSYS Fluent de la siguiente manera:

$$P_k \rightarrow P_k \cdot f_r$$

Con

$$f_r = \max\{0, 1 + C_{scale}(\tilde{f}_r - 1)\}$$

$$\tilde{f}_r = \max\{\min(f_{rotación}, 1.25), 0\}$$

$$r^* = \frac{S}{\Omega}$$

$$\tilde{r} = 2\Omega_{ik}S_{jk} \left[\frac{DS_{ij}}{Dt} + (\varepsilon_{imn}S_{jn} + \varepsilon_{jmn}S_{in})\Omega_m^{Rot} \right] \frac{1}{\tilde{D}}$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + 2\varepsilon_{mji}\Omega_m^{Rot}$$

$$S^2 = 2S_{ij}S_{ij}$$

$$\Omega^2 = 2\Omega_{ij}\Omega_{ij}$$

$$\tilde{D} = \Omega D^3$$

$$D^2 = \max(S^2, 0.09\omega^2)$$

$\frac{DS_{ij}}{Dt}$ = componentes de la derivada Lagrangiana del tensor de la velocidad de deformación. Se

utiliza la convención de la suma de Einstein.

$$C_{r1} = 1; C_{r2} = 2; C_{r3} = 1; C_{scale} = 1$$

Para más información de este tema remítase al manual de ayuda “Help” de ANSYS.

2.5.3.7 Limitadores de producción.

Se utilizó la formulación basada en el trabajo de Kato y Launder, quienes observaron que el nivel excesivo de producción de energía cinética de turbulencia es causado por el nivel muy alto de

la tasa de deformación de cortantes S en las regiones de estancamiento. Como el campo de flujo cerca de un punto de estancamiento es casi irrotacional, con una tasa de vorticidad Ω muy pequeña, la forma alternativa del término de producción propuesta por Kato-Launder se escribe como:

$$G_k = \mu_t S \Omega$$

Donde Ω es la magnitud de la tasa de vorticidad:

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$$

Donde el tensor de vorticidad Ω_{ij} se calcula como:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

En un flujo cortante simple, S y Ω son iguales y $G_k = \mu_t S \Omega$ se recupera.

2.5.3.8 Modificación de la difusión cruzada.

El modelo BSL k - ω es basada sobre los modelos k - ω y el modelo k - ϵ . La mezcla de esos dos modelos, el modelo estándar k - ϵ ha sido transformado dentro de las ecuaciones basadas en k y ω , donde conduce a la introducción del término de difusión cruzada (cross-diffusion) $D\omega$, el cual es definido como:

$$D\omega = 2(1 - F_1)\rho \frac{1}{\omega\sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

Las constantes del modelo son:

$$\sigma_{k,1} = 2, \sigma_{\omega,1} = 2, \sigma_{k,2} = 1, \sigma_{\omega,2} = 1.168, \beta_{i,1} = 0.075, \beta_{i,1} = 0.0828$$

$$\alpha_{\infty}^* = 1, \alpha_{\infty} = 0.52, \alpha_0 = \frac{1}{9}, \beta_{\infty}^* = 0.09, R_{\beta} = 8, R_k = 6, R_{\omega} = 2.95, \zeta^* = 1.5, M_{t0} = 0.25$$

2.5.3.9 Amortiguación de la turbulencia (*Turbulence Damping*).

En los flujos de superficie libre, hay un alto gradiente de velocidad en la interfaz entre dos fluidos resultando la generación de alta turbulencia en ambas fases. Por lo tanto, se requiere amortiguación turbulencia en la zona interfacial para modelar este tipo de flujos correctamente. El siguiente término se añade como una fuente a la ecuación ω .

$$S_i = A_i \Delta n \beta \rho_i \left(\frac{B \mu_i}{\beta \rho_i \Delta n^2} \right)^2$$

A_i = densidad de área interfacial para la fase de i

Δn = Altura normal de la celda para la interfase

β = Coeficiente de cierre del modelo k

– ω del término de destrucción, que es igual a 0,075

B = Factor de amortiguamiento

μ_i = Viscosidad de la fase i

ρ_i = Densidad de la fase i

La densidad de área interfacial para la fase i es calculada como,

$$A_i = 2.0 \alpha_i |\nabla \alpha_i|$$

α_i = Fase i de fracción de volumen

$|\nabla \alpha_i|$ = Magnitud de gradiente de fracción de volumen

El tamaño de la grilla es Δn calculado internamente usando información de la grilla. Se puede especificar un factor de amortiguamiento B ; el valor por defecto es 10.

2.5.3.10 Condición de frontera en la pared.

Las condiciones de frontera de la pared de la ecuación k en los modelos (k - ω) son tratados de la misma manera cuando se trata la ecuación k utilizando tratamientos mejorados de la pared (Enhanced Wall Treatment) con los modelos (k - ϵ). Esto significa que todas las condiciones de contorno para mallas en función de la pared corresponderán al enfoque de la función de la pared, mientras que, para las mallas finas, las condiciones de contorno apropiadas para un número de Reynolds bajo (Low-Reynolds) serán aplicadas.

En ANSYS Fluent el valor de ω en la pared se especifica como:

$$\omega_w = \frac{\rho(u^*)^2}{\mu} \omega^+$$

Soluciones analíticas se pueden dar tanto para la subcapa laminar:

$$\omega^+ = \frac{6}{\beta_i (y^+)^2}$$

Y en la región logarítmica:

$$\omega^+ = \frac{1}{\sqrt{\beta_\infty^*}} \frac{du_{turb}^+}{dy^+}$$

2.5.4 Modelo de turbulencia k - ε Realizable.

La siguiente descripción del modelo k - ε Realizable fue tomada del manual de usuario de ANSYS FLUENT (ANSYS, Inc., 2013):

El modelo Realizable k - ε difiere del modelo k - ε estándar en dos aspectos importantes:

- El modelo Realizable k - ε contiene una formulación alternativa para la viscosidad turbulenta.
- Una modificación en la ecuación de transporte para la velocidad de disipación ε , se ha derivado desde una ecuación exacta para el transporte de la vorticidad fluctuación de medios cuadrados.

El término “realizable” significa que el modelo satisface ciertas limitaciones matemáticas sobre los esfuerzos normales, de conformidad con la física de los flujos turbulentos.

Para entender las matemáticas detrás del modelo k - ε realizable, considere la combinación de la relación de Boussinesq y la definición de viscosidad de remolino para obtener la siguiente expresión para los esfuerzos normales de Reynolds en un flujo medio incompresible deformado:

$$\overline{u^2} = \frac{2}{3}k - 2v_t \frac{\partial U}{\partial x}$$

Utilizando la anterior ecuación para $v_t \equiv \mu_t/\rho$, se obtiene el resultado de que el esfuerzo normal, que por definición es una cantidad positiva, se vuelve negativa, es decir, "no realizable", cuando la deformación es lo suficientemente grande como para satisfacer:

$$\frac{k}{\varepsilon} \frac{\partial U}{\partial x} > \frac{1}{3C_\mu} \approx 3.7$$

De forma similar, también se puede demostrar que la desigualdad de Schwarz para esfuerzos cortantes ($\overline{u_\alpha u_\beta^2} \leq \overline{u_\alpha^2 u_\beta^2}$ no se puede sumar sobre α y β) puede ser infringida cuando la tasa de deformación media es grande. La forma más sencilla de asegurar la realizabilidad (positividad de los esfuerzos normales y desigualdad de Schwarz para esfuerzos cortantes) es hacer C_μ variable la sensibilidad al flujo medio (deformación media) y la turbulencia (k , ε). La noción de variable C_μ es sugerida por muchos modeladores, incluyendo Reynolds y está bien fundamentada por la evidencia experimental. Por ejemplo, C_μ se encuentra que es alrededor de 0,09 en la capa logarítmica de las capas límite en equilibrio y 0,05 en un fuerte flujo cortante homogéneo.

Tanto el modelo realizable como el modelo $k - \varepsilon$ RNG han demostrado mejoras sustanciales con respecto al modelo $k - \varepsilon$ estándar, donde las características de flujo incluyen una fuerte curva de curvatura, vórtices y rotación. Dado que el modelo es relativamente nuevo, no está claro exactamente en qué instancias el modelo realizable supera sistemáticamente el modelo RNG. Sin embargo, los estudios iniciales han demostrado que el modelo realizable proporciona el mejor rendimiento de todas las versiones del modelo para varias validaciones de flujos y flujos separados con funciones de flujo secundario complejas.

Una de las debilidades del modelo $k - \varepsilon$ estándar o de otros modelos tradicionales radica en la ecuación que modela para la tasa de disipación (ε). La conocida anomalía de chorro redondo (nombrada en base en el hallazgo de que la tasa de dispersión en los chorros planares se predice razonablemente bien, pero la predicción del índice de dispersión para los chorros eje simétricos es

inesperadamente pobre) se considera que se debe principalmente a la ecuación que modela la disipación.

El modelo $k - \varepsilon$ realizable propuesto por Shih tenía por objeto abordar estas deficiencias de los modelos tradicionales adoptando lo siguiente:

- Una nueva fórmula de viscosidad de remolinos que implica una variable C_μ originalmente propuesta por Reynolds.
- Un nuevo modelo de ecuación para la disipación (ε) basada en la ecuación dinámica de la fluctuación de la vorticidad media-cuadrada.

Una limitación del modelo realizable es que produce viscosidades turbulentas no físicas en situaciones en las que el dominio computacional contiene tanto zonas de fluido giratorias como estacionarias (por ejemplo, marcos de referencia múltiples, mallas deslizantes giratorias). Esto se debe al hecho de que el modelo $k - \varepsilon$ realizable incluye los efectos de la rotación media en la definición de la viscosidad turbulenta. Este efecto de la rotación adicional ha sido probado en sistemas de marco de referencia en movimiento individuales y mostraron un comportamiento superior con respecto a modelo $k - \varepsilon$ estándar. Sin embargo, debido a la naturaleza de esta modificación, su aplicación a sistemas de referencias múltiples debe tomarse con cierta precaución.

2.5.4.1 Ecuaciones de transporte para el modelo $k-\varepsilon$ Realizable.

El Modelo (BSL) $k-\omega$ tiene una forma similar a la $k-\omega$ estándar:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \mathbf{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon \mathbf{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{n}{\eta + 5} \right]; \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}; \quad S = \sqrt{2S_{ij} \cdot S_{ij}}$$

Dónde:

G_k : generación de turbulencia energía cinética debido a los gradientes de velocidad media

G_b : generación de turbulencia energía cinética debido a la flotabilidad

Y_M : representa la contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible a la tasa global de disipación.

C_2 y $C_{1\varepsilon}$: son constantes.

σ_k y σ_ε : son los números de Prandtl turbulento para k y ε , respectivamente.

S_k y S_ε : son términos definidos por el usuario “user-defined source”.

Una de las características destacables es que el término de producción en la ecuación de ε no implica la producción de k ; es decir, no contiene el mismo término G_k que los otros modelos $k - \varepsilon$. Se cree que la presente forma representa mejor la transferencia de energía espectral. Otra característica deseable es que el término de destrucción no tiene ninguna singularidad; Es decir, su denominador nunca desaparece, aunque k se desvanezca o se haga menor que cero. Esta característica se contrasta con los modelos tradicionales, que tienen una singularidad debido al denominador.

Este modelo ha sido ampliamente validado para una amplia gama de flujos, incluyendo flujos de corte homogéneos en rotación, flujos libres incluyendo chorros y capas de mezcla, flujos en canales, capas límite y flujos separados. Para todos estos casos, el rendimiento del modelo se ha encontrado que es sustancialmente mejor que el del modelo estándar. Especialmente destacable es el hecho de que el modelo realizable resuelve la anomalía de chorro redondo; es decir, predice el índice de dispersión para los chorros eje simétricos, así como el de los chorros planares.

2.5.4.2 Modelación de la viscosidad turbulenta.

La viscosidad turbulenta (o de remolinos), μ_t , se calcula combinando k y ε :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

La diferencia entre el modelo Realizable $k - \varepsilon$ y del modelo k y ε estándar y el modelo RNG $k - \varepsilon$ es que C_μ ya no es una constante. Es calculado con la siguiente expresión:

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}}$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k$$

$$\Omega_{ij} = \bar{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

Donde $\bar{\Omega}_{ij}$ es el promedio del tensor relación de rotación observado de en un marco de referencia que se mueve con la velocidad angular ω_k . Las constantes del modelo A_0 y A_s son determinadas por:

$$A_0 = 4.04, A_s = \sqrt{6}\cos\phi$$

$$\phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}(\sqrt{6}W, W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)$$

Se puede ver que C_μ es una función de la deformación media y las tasas de rotación, la velocidad angular de la rotación del sistema y los campos de turbulencia (k y ε). En la ecuación de la viscosidad turbulenta se puede demostrar que recupera el valor estándar de 0,09 para una subcapa inercial en una capa límite de equilibrio.

Las constantes del modelo C_2 , σ_k , y σ_ε se han establecido para asegurar que el modelo funcione bien para ciertos flujos canónicos. Las constantes del modelo son:

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1, \text{ y } \sigma_\varepsilon = 1.2$$

2.5.5 (y+) “Insensitive”, Tratamiento cercano a la pared para modelos basados en la ecuación ω (omega)

A diferencia de los modelos basados con la ecuación estándar ε , la ecuación ω se puede integrar a través de la subcapa viscosa sin la necesidad de un enfoque de dos capas. Esta característica se puede utilizar para un tratamiento de la pared (y+)-insensible mediante la mezcla de la formulación

de la subcapa viscosa y la formulación de la capa logarítmica en base a (y^+). Esta formulación esta por defecto para todos los modelos basados en la ecuación ω . La Figura 11 ilustra estas subdivisiones de la zona próxima a la pared, trazada en coordenadas semi-log.

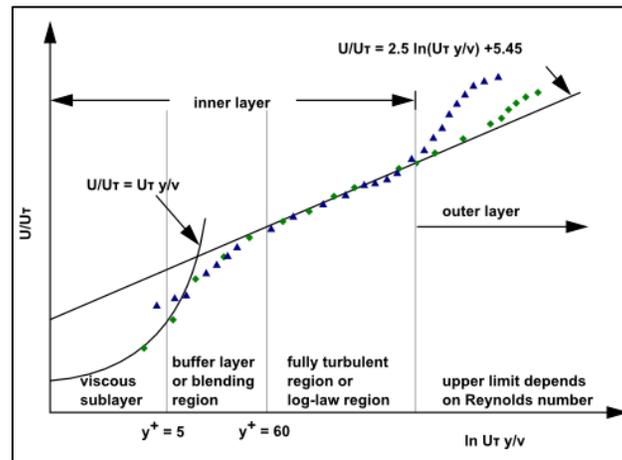


Figura 11. Las subdivisiones de la zona próxima a la pared
Fuente. (ANSYS, 2013)

En la Figura 11, el factor $y^+ = \rho u_\tau y / \mu$ donde u_τ es la velocidad de corte, definida como $\sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$.

2.5.6 Tratamientos cercanos a la pared para flujos turbulentos limitados por la pared

Tradicionalmente, hay dos enfoques para el modelado de la zona próxima a la pared. En un enfoque, la región interior afectada por la viscosidad (subcapa viscosa y la capa buffer) no se resuelve. En lugar de ello, se utilizan fórmulas semi-empíricas llamadas "*funciones de pared*" (function Wall) para reducir la viscosidad de la región afectados entre la pared y la región totalmente turbulenta. El uso de funciones de pared evita la necesidad de modificar los modelos de turbulencia para tener en cuenta la presencia de la pared.

En otro enfoque, los modelos de turbulencia se modifican para permitir que la región afectada por la viscosidad se resuelva con una malla para todo el camino a la pared, incluyendo la subcapa

viscosa. Para los propósitos de discusión, esto se denomina el enfoque "*modelado cercano de la pared*" (near – Wall model). Estos dos enfoques se representan esquemáticamente en la **Figura 12**.

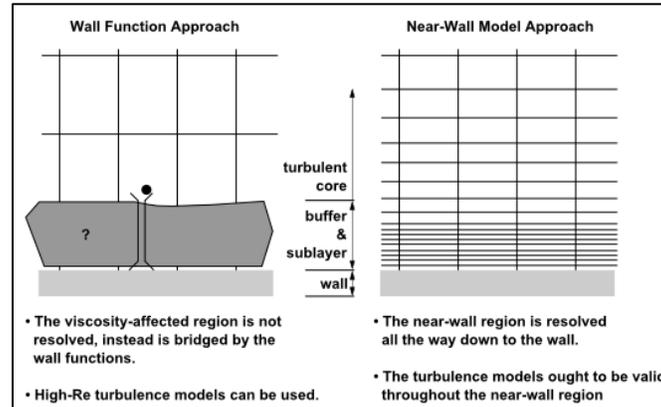


Figura 12. Tratamiento cercano a la pared en ANSYS FLUENT.

Fuente. (ANSYS, 2013)

El principal defecto de todas las funciones de pared (con excepción de la función de la pared escalable) es que los resultados numéricos se deterioran cuando se refina la malla en la dirección normal de la pared. Los valores (y^+) inferiores a 15 darán como resultado errores en esfuerzos cortantes y la transferencia de calor en la pared no acotados. Si bien este fue el estándar industrial, hace algunos años, ANSYS Fluent ofrece formulaciones de pared más avanzadas, que permiten una mejora en la malla consistente sin un deterioro de los resultados. Tales formulaciones (y^+) son independientes del valor por defecto para todos los modelos de turbulencia basados en ecuación ω . Un tratamiento de la pared de (y^+)-Insensible es la opción por defecto para el modelo Spalart-Allmaras y le permite ejecutar este modelo independiente de la resolución (y^+) próxima a la pared.

Los resultados numéricos de alta calidad para la capa límite de la pared solamente se obtendrá si la resolución global de la capa límite es suficiente. Este requisito es en realidad más importante que lograr ciertos valores y^+ . El número mínimo de celdas para cubrir una capa límite con precisión es de 10 a 20 celdas.

También hay que señalar que una mejora de la resolución de la capa límite a menudo se puede lograr con aumento moderado de esfuerzo numérico, ya que sólo requiere un refinamiento de la malla en la dirección de pared normal. El consiguiente aumento de la precisión es generalmente bien digno

de los costes informáticos adicionales. Para mallas no estructuradas, se recomienda que se generen capas de prisma cerca de la pared con 10-20 o más capas para una predicción precisa de las capas límite pared.

El espesor de la capa de prisma debe estar diseñado para garantizar son alrededor de 15 o más nodos cubran la capa límite. Esto se puede comprobar después de que se obtuvo una solución, al ver la viscosidad turbulenta, que tiene un máximo en el medio de la capa límite este máximo da una indicación del espesor de la capa límite (el doble de la ubicación de la máxima da la borde de la capa límite). Es esencial que la capa de prisma es más gruesa que la capa límite de lo contrario existe el peligro de que la capa de prisma limita el crecimiento de la capa límite.

Recomendaciones:

- Para la ecuación ϵ , utilice Menter-Lechner (ML-E) o el tratamiento mejorado en la pared (Enhanced Wall Treatment) (EWT-E).
- Si las funciones de pared se ven favorecidos con la ecuación ϵ , utilice las funciones de pared escalable.
- Para los modelos basados en ecuación ω , utilice el método de tratamiento de la pared predeterminado y+ “insensitive”.
- Para el modelo Spalart - Allmaras, utilice el tratamiento de la pared predeterminado y+ “insensitive”.

Las funciones de la pared son un conjunto de fórmulas y funciones semi-empíricas que, en efecto, son un "puente" o "vínculo" de las variables de solución a las celdas cercanas a la pared y las cantidades correspondientes en la pared. Las funciones de pared comprenden:

- Ley de la pared de la velocidad media y la temperatura (u otros escalares)
- Fórmulas para las cantidades turbulentas cercanas a la pared.

Dependiendo de la elección del modelo turbulento, ANSYS FLUENT ofrece de cuatro a cinco opciones enfocados a la función pared:

- Standard Wall Functions.
- Scalable Wall Functions.
- Non-Equilibrium Wall Functions.
- Enhanced Wall Functions (as a part of EWT).
- User-Defined Wall Functions.

2.5.6.1 Ley de la pared modificada por rugosidad.

En el manual de usuario ANSYS, Inc., proporciona una explicación de estos tratamientos:

Los experimentos en tubos y canales rugosos indican que la distribución de velocidad media cerca de paredes rugosas, cuando se representa en la usual escala semi-logarítmica, tiene la misma pendiente ($1 / \kappa$), pero un diferente interceptor (constante adicional B en la ley - log). Por lo tanto, la ley de la pared para la velocidad media modificada para rugosa tiene la forma

$$\frac{u_p u^*}{\tau_w / \rho} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(E \frac{\rho u^* y_p}{\mu} \right) - \Delta B$$

Donde

$$u^* = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$$

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln f_r$$

Donde f_r es una función de rugosidad que cuantifica el cambio de la intersección debido a los efectos de rugosidad.

ΔB depende, en general, en el tipo y tamaño de la rugosidad (arena uniforme, remaches, hebras, cordones, malla de alambre, etc.). No hay función de la rugosidad universal, válida para todo tipo de rugosidad. Para una rugosidad de grano de arena y tipos similares de elementos de rugosidad uniforme, sin embargo, se ha encontrado ΔB está bien correlacionada con la altura de la rugosidad adimensional.

$$K_s^+ = \frac{\rho K_s u^*}{\mu}$$

Donde K_s es la altura de rugosidad física y

$$u^* = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$$

Análisis de datos experimentales muestran que la función de la rugosidad no es una simple función de K_s^+ , pero toma diferentes formas dependiendo en el valor de K_s^+ . Esto ha sido observado que hay tres distintos regímenes:

- Hidráulicamente liso ($K_s^+ \leq 2.25$)
- Transicional ($2.25 < K_s^+ \leq 90$)
- Completamente rugoso ($K_s^+ > 90$)

De acuerdo con los datos, los efectos de rugosidad son insignificantes en el régimen hidrodinámico suave, pero se vuelven cada vez más importante en el régimen de transición, y la plena eficacia en el régimen plenamente rugosa.

En ANSYS FLUENT, todo el régimen de rugosidad se subdivide en los tres regímenes, y las fórmulas propuestas por Cebeci y Bradshaw basado en datos de Nikuradse, se adoptó ΔB para calcular para cada régimen.

Para el régimen hidrodinámicamente suave ($K_s^+ \leq 2.25$)

$$\Delta B = 0$$

Para el régimen transitorio ($2.25 < K_s^+ \leq 90$)

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln \left[\frac{K_s^+ - 2.25}{87.75} + C_s K_s^+ \right] * \sin\{0.4258(\ln K_s^+ - 0.811)\}$$

Donde C_s es una constante de rugosidad y depende en el tipo de rugosidad.

En el régimen completamente rugoso ($K_s^+ > 90$)

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} (1 + C_s K_s^+)$$

La ley modificada de la pared, en la Ecuación 6 a 98, se utiliza entonces para evaluar el esfuerzo de corte en la pared y otras funciones de pared para la temperatura media y cantidades turbulentas.

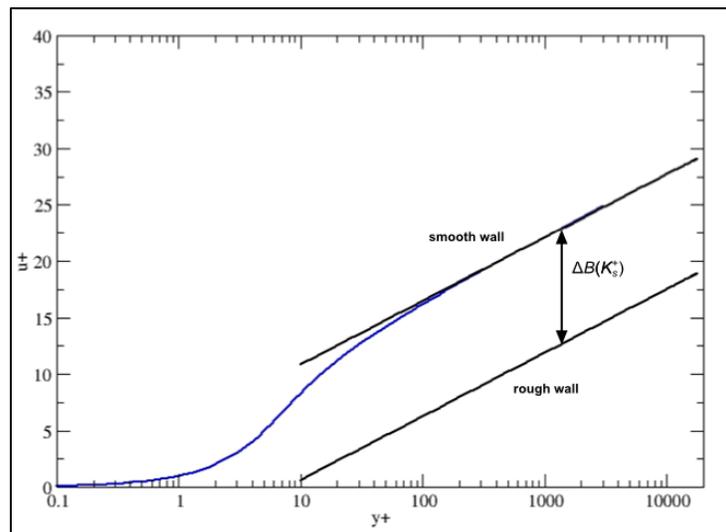


Figura 13. Movimiento descendente del perfil logarítmico de velocidad.

Fuente. (ANSYS, 2013).

Este cambio hacia abajo conduce a una singularidad para grandes alturas de rugosidad y valores bajos de y^+ . Dependiendo del modelo de turbulencia y tratamiento cerca de la pared, dos enfoques diferentes se utilizan en ANSYS Fluent con el fin de evitar este problema:

Reduciendo la altura de rugosidad a medida que y^+ decrece. La primera aproximación consiste en redefinir la altura de la rugosidad basada en el refinamiento de la malla:

$$K_s^+ = \min(K_s^+, y^+)$$

2.5.7 Mallado

Bakker (2012) describe la importancia del mallado en la modelación con ANSYS FLUENT que se resume a continuación:

La malla designa las celdas o elementos en los que se resuelve el flujo, es una representación discreta de la geometría del problema y tiene celdas agrupadas en zonas de frontera donde se aplican las B.C.

La malla tiene un impacto significativo en el cambio de la convergencia (o incluso la falta de convergencia), en la precisión de la solución y en el tiempo requerido de la CPU.

La importancia de la calidad de la malla para obtener buenas soluciones depende de la densidad de la malla, relaciones de longitud de la celda / volumen adyacente, sesgo, Tetraedros versus hexagonal, malla en donde se desarrolla la capa límite, refinamiento de la malla a través de la adaptación.

La geometría es el punto de partida para todos los problemas. Esta describe la forma del problema a analizar, donde puede consistir en volúmenes, caras (superficies), bordes (curvas) y vértices (puntos). Se pueden crear utilizando el mismo software pre-procesador que se utiliza para crear la malla, o creados con otros programas (por ejemplo, CAD).

Las formas típicas de las celdas o elementos de la malla son variadas. La elección depende del problema y de las capacidades del solucionador (*solver*). A continuación, se presenta diferentes tipos de celdas:

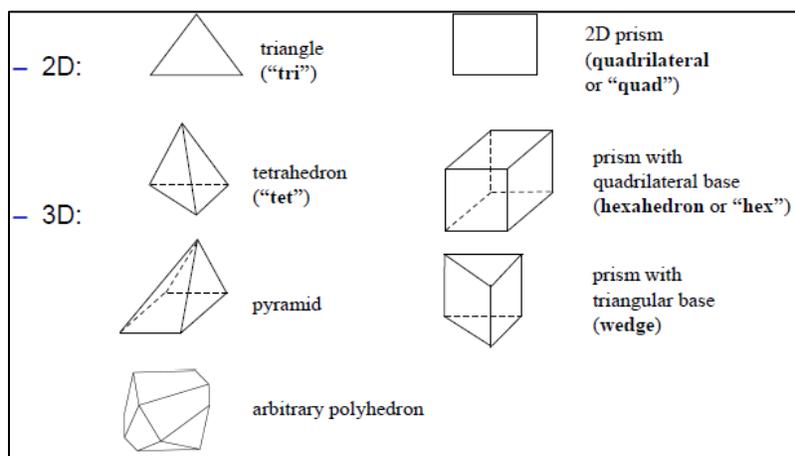


Figura 14. Tipos de celdas para el mallado de la geometría en ANSYS FLUENT.

Fuente. (Bakker, 2012)

A continuación, se presenta la terminología empleada en el proceso de mallado:

Cell = volumen de control en el dominio que se divide

Node = puntos de la grilla.

Cell center = centro de la celda.

Edge = límite de una cara.

Face = límite de una celda.

Zone

= agrupación de *nodes*, *faces* y *cells*:

– Zona fronteriza a la pared.

– Zona de celdas del fluido.

Domain = (Dominio) grupo de *node*, *face* y *cell* zones.

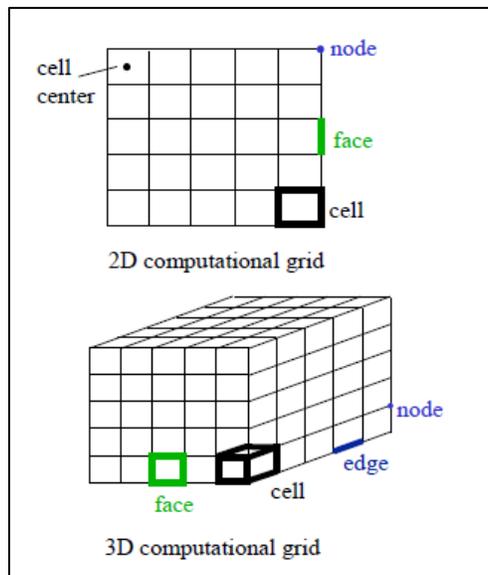


Figura 15. Grilla computacional en 2D y 3D.

Fuente. (Bakker, 2012)

Al utilizar las herramientas que ofrece ANSYS para el mallado del dominio, en el proceso, se pueden generar diferentes tipos de grillas, los cuales son la estructurada, no estructurada, multibloque, híbrida. La grilla estructurada es la mejor en cuanto a la reducción del costo computacional.

En el presente estudio se utilizó una malla no estructurada por la complejidad de la geometría, sin embargo, se tuvo en cuenta las directrices que determina (ANSYS, Inc., 2013) para mantener una malla con la mejor calidad empleando las medidas de calidad de sesgo (Skewness), suavidad (Smoothness) del cambio de tamaño y relación de aspecto (aspect ratio). Además, ANSYS FLUENT posee una herramienta para mejorar el refinamiento de la malla en zonas donde se necesite mejor detalle en los cálculos como son los gradientes de velocidad, capa límite, interfaces agua – aire, serie de primeras celdas cercanas a la pared ($y+$ o y^*) para que los tratamientos cercanos a la pared sean activados.

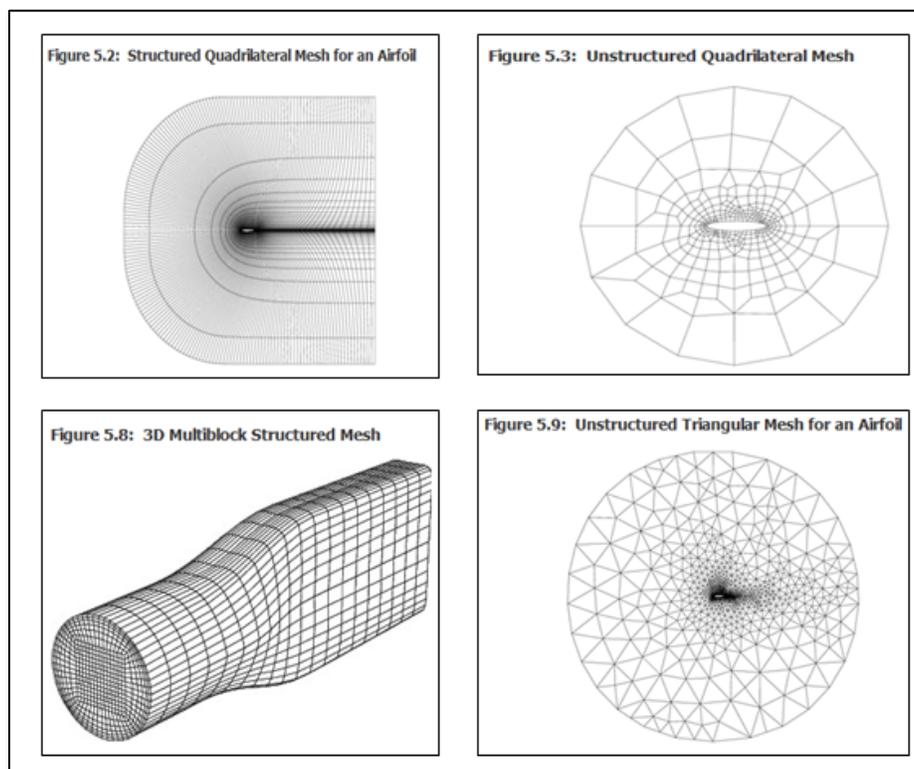


Figura 16. Ejemplos de la topología de mallas que acepta ANSYS FLUENT.

Fuente. (ANSYS, 2013).

2.5.8 Discretización

ANSYS FLUENT utiliza una técnica basada en el control de volumen para convertir una ecuación de transporte escalar en general a una ecuación algebraica que puede resolverse numéricamente. Esta técnica de volumen de control consiste en la integración de la ecuación de transporte de cada volumen de control, obteniéndose una ecuación discreta que expresa la ley de conservación en una base del volumen de control.

La discretización de las ecuaciones de gobierno se puede ilustrar más fácilmente considerando la ecuación de transporte de conservación no permanente de una cantidad escalar ϕ de la Ecuación 3. Esta ecuación se aplica a cada volumen de control, o celda, en el dominio computacional. La celda de dos dimensiones, triangular se muestra en la Figura 17, es un ejemplo de un volumen control como tal.

La discretización de la Ecuación 3 en una celda dada es:

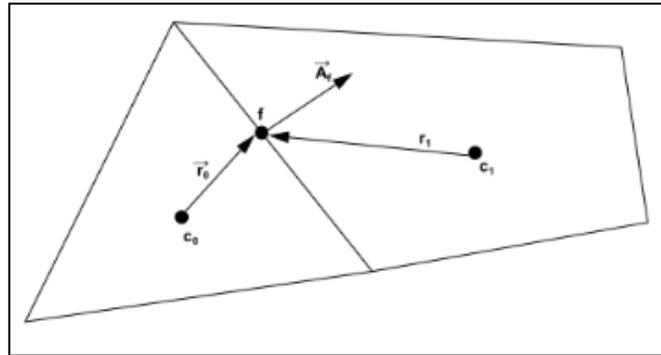


Figura 17. Volumen de control utilizado para ilustrar la discretización de un escalar en la ecuación de transporte.

Fuente. (ANSYS, 2013).

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V_C + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{V}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_{\phi} \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V_C$$

Ecuación 23

Donde

N_{faces} = numero de caras que encierra una la celda

$\phi_f =$ valor de ϕ por convección a través de la cara

$\vec{A}_f =$ valor de la cara f , $|A| = |A_x \hat{i} + A_y \hat{j}|$ en 2D

$\nabla_{\phi_f} =$ gradiente de ϕ para la cara f

$V_C =$ volumen de la celda

La ecuación de transporte escalar discretizado (Ecuación 23) contiene la variable escalar desconocida ϕ en el centro de la celda, así como los valores desconocidos en celdas adyacentes circundante. Esta ecuación, en general, es no lineal con respecto a estas variables. Una forma linealizada de la Ecuación 23 se puede escribir como:

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b$$

Donde el suscrito nb se refiere a las celdas adyacentes, y a_p y a_{nb} son los coeficientes linealizados de ϕ y ϕ_{nb} . Para un mejor entendimiento, remítase al capítulo 5 de (Bakker, 2012).

2.5.8.1 Discretización espacial (Spatial Discretization).

De forma predeterminada, ANSYS Fluent almacena valores discretos de escalar en los centros de las celdas (ver Figura 17). Sin embargo, se requieren valores faciales de los términos de convección en la Ecuación 23 y deben ser interpolados a partir de los valores del centro de la celda. Esto se logra usando un esquema Upwind (*contra el viento*).

Upwinding significa que el valor nominal se deriva a partir de cantidades de las celdas aguas arriba, o "en contra del viento" con respecto a la dirección de la velocidad normal en la Ecuación 23. ANSYS Fluent le permite elegir entre varios esquemas de Upwind: first-order upwind (tiene problemas de difusión numérica, bueno para inicialización de una corrida para luego pasar a esquema de segundo orden), second-order upwind (recomendado por (ANSYS, Inc., 2013), optimiza el cálculo sin necesidad de refinar la malla del dominio, aunque tiene bajos problemas de difusión numérica), power law (utilizado para problemas de difusión física), y QUICK (para mallas estructuradas).

2.5.8.2 Discretización espacial en 2D y 3D para flujo permanente.

Los métodos de discretización espacial disponible en ANSYS FLUENT para flujo permanente son:

- Momentum: first-order upwind, second-order upwind, Third-Order MUSCL Scheme.
- Volume fraction: first-order upwind, second-order upwind, Modified HRIC Scheme.
- Turbulent kinetic Energy: first-order upwind, second-order upwind, Third-Order MUSCL Scheme.
- Turbulent dissipation Rate: first-order upwind, second-order upwind, Third-Order MUSCL Scheme.

2.5.8.3 Discretización espacial en 2D y 3D para flujo no permanente:

Los métodos de discretización espacial disponible en ANSYS FLUENT para flujo no permanente son:

- Momentum: first-order upwind, second-order upwind, Third-Order MUSCL Scheme.
- Volume fraction: Modified HRIC Scheme.
- Turbulent kinetic Energy: first-order upwind, second-order upwind, Third-Order MUSCL Scheme.
- Turbulent dissipation Rate: first-order upwind, second-order upwind, Third-Order MUSCL Scheme.

Los gradientes son necesarios no sólo para la construcción de los valores de un escalar en las caras de celdas, sino también para el cálculo de términos de difusión secundarios y derivados de velocidad.

2.5.8.4 Discretización Temporal (Temporal Discretization).

Para las simulaciones en transitorio, las ecuaciones que gobiernan deben ser discretizadas tanto en espacio como el tiempo. La discretización espacial para las ecuaciones dependiente del tiempo es idéntico a las de estado permanente. La discretización temporal involucra la integración de cada período en las ecuaciones diferenciales sobre un paso de tiempo Δt . Una expresión genérica por el momento por la que la evolución de una variable ϕ es dada por:

$$\frac{\partial \phi}{\Delta t} = F(\phi)$$

Donde la función F incluye cualquier discretización espacial. Si la derivada del tiempo es discretizado al usar *backward differences* (diferencias hacia atrás), la aproximación de la discretización temporal de primer orden es dada por:

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = F(\phi)$$

y la discretización de segundo orden es determinada por

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = F(\phi)$$

Dónde:

$\phi =$ una cantidad escalar

$n + 1 =$ valor para el proximo nivel de tiempo, $t + \Delta t$

$n =$ valor para los actuales niveles de tiempo, t

$n - 1 =$ valor para los previos niveles de tiempo, $t + \Delta t$

Una vez que la derivada en el tiempo se ha discretizado, sigue siendo una opción para la evaluación de $F(x)$: en particular, los valores de nivel de tiempo de Φ deben utilizarse en la evaluación. Para evaluar Φ ANSYS FLUENT ofrece los siguientes métodos de integración:

- **Implicit Time Integration:** Esta ecuación implícita puede resolverse de forma iterativa en cada nivel antes de pasar al siguiente paso de tiempo. La ventaja del esquema totalmente implícito es que es incondicionalmente estable con respecto al tamaño de paso de tiempo.
- **Bounded Second Order Implicit Time Integration:** Sólo es aplicable a los esquemas de discretización de fracción de volumen implícito de múltiples fases, y no a los esquemas de fracción de volumen explícito.

- Explicit Time Integration (solo para configuraciones basadas en la densidad).

Para el presente estudio se utilizó, por su estabilidad en el proceso de cálculo, el método integración *Implicit Time Integration*.

2.5.8.5 Evaluación de gradientes y Derivadas (*Evaluation of Gradients and Derivatives*).

Los gradientes son necesarios no sólo para la construcción de los valores de un escalar en las caras de celdas, sino también para el cálculo de términos secundarios de difusión y derivadas de la velocidad.

El gradiente $\nabla\phi$ de una variable ϕ dada, se utiliza para discretizar los términos de convección y difusión en las ecuaciones de conservación de flujo. Los gradientes se calculan en ANSYS FLUENT de acuerdo con los métodos Green-Gauss Cell-Based, Green-Gauss Node-Based y Least Squares Cell-Based.

Least Squares Cell-Based: utilizada en mallas irregulares no estructuradas (sesgadas y distorsionadas), la exactitud del método de gradiente por mínimos cuadrados es comparable a la del gradiente basado en nodos (y ambos son mucho más superior en comparación con el gradiente basado en celdas). Sin embargo, es menos costoso para calcular el gradiente por mínimos cuadrados que el gradiente basado en nodos. Por lo tanto, ha sido seleccionado como el método del gradiente por defecto en el programa de solución ANSYS Fluent.

Para el presente estudio se seleccionó el método Least Squares Cell-Based, por sus características de exactitud en los cálculos.

2.5.8.6 Solucionadores basados en la presión (*Pressure-Based Solver*).

A continuación, se abordan prácticas especiales relacionadas con la discretización de las ecuaciones de cantidad de movimiento y de continuidad y de su solución por medio del solucionador basado en la presión.

Estas prácticas especiales son los más fáciles de describir, considerando las ecuaciones de continuidad y momentum en estado estacionario, en forma integral se tiene:

$$\oint \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0$$

Ecuación 24

$$\oint \rho \vec{V} \vec{V} \cdot \vec{A} = - \oint p I \cdot d\vec{A} + \oint \bar{\tau} \cdot d\vec{A} + \int_{V_c} \vec{F} dV_c$$

Ecuación 25

Donde I es la matriz identidad, $\bar{\tau}$ es el esfuerzo tensor, y \vec{F} es el vector fuerza.

2.5.8.7 Discretización de la ecuación del Momentum.

Los esquemas de discretización que se abordaron anteriormente se utilizan también para discretizar las ecuaciones de cantidad de movimiento. Por ejemplo, la ecuación de momentum en x se puede conseguir mediante el establecimiento de $\phi = u$:

$$apu = \sum_{nb} a_{nb} u_{nb} + \sum p_f A \cdot \hat{i} + S$$

Ecuación 26

ANSYS FLUENT utiliza un esquema co-ubicado, en el que la presión y la velocidad se almacenan en los centros de las celdas. Sin embargo, la *Ecuación 26* requiere el valor de la presión en la cara entre las celdas $c0$ y $c1$, que se muestra en la Figura 17. Por lo tanto, se requiere un esquema de interpolación para calcular los valores nominales de la presión de los valores de la celda. ANSYS FLUENT ofrece los siguientes esquemas para interpolar la presión en las caras. Linear, Standard, Second Order, Body Force Weighted.

Body Force Weighted es un esquema que calcula la presión de la cara suponiendo que el gradiente normal de la diferencia entre la presión y las fuerzas de cuerpo es constante. Esto funciona

bien si las fuerzas del cuerpo se conocen a priori en las ecuaciones de cantidad de movimiento. Cuando un caso contiene un medio poroso, el esquema *Body Force Weighted* se aplica sólo para las caras no porosas, donde el esquema tiene en cuenta la discontinuidad de las fuerzas de cuerpo explícitas (por ejemplo, la gravedad, remolino, Coriolis) y la discontinuidad de presión gradientes de flujos con densidades que cambian rápidamente (por ejemplo, la convección natural, VOF). Todas las caras porosas interiores y exteriores son tratadas con un régimen especial que preserva la continuidad de la velocidad normal a través de las caras de una celda a pesar de la discontinuidad de la resistencia.

Para el presente estudio se eligió el esquema *Body Force Weighted*, ya que, para las modelaciones, se tuvo en cuenta la fuerza de cuerpo gravedad, se asumirá que las paredes solidas no tienen porosidad y se utilizó el esquema VOF que se explica más adelante.

2.5.8.8 Discretización de la ecuación de continuidad.

La *Ecuación 24* puede ser integrada en el volumen de control en la Figura 17 para producir la siguiente ecuación discreta:

$$\sum_f^{N_{\text{caras}}} J_f A_f = 0$$

Ecuación 27

Donde J_f es el flujo masico de la cara f , ρV_n .

Con el fin de seguir adelante, es necesario relacionar los valores faciales de la velocidad, \vec{V}_n , para el almacenamiento de los valores de velocidad en los centros de las celdas.

La interpolación lineal de las velocidades centradas en la cara de las celdas resulta un cuadrículado no físico de la presión. ANSYS Fluido utiliza un procedimiento similar al descrito por Rhie y Chow para prevenir cuadrículado. El valor de la velocidad en la cara no se promedia linealmente; en cambio, con el promedio ponderado del momentum, se utiliza factores de

ponderación basados en el coeficiente de ap a partir de la Ecuación 26, donde se lleva a cabo. Usando este procedimiento, el flujo en la cara, J_f , puede ser escrito como:

$$J_f = \rho_f \frac{a_{p,c_0} V_{n,c_0} + a_{p,c_1} V_{n,c_1}}{a_{p,c_0} + a_{p,c_1}} + df \left((p_{c_0} + (\nabla p)_{c_0} \cdot \vec{r}_0) - (p_{c_1} + (\nabla p)_{c_1} \cdot \vec{r}_1) \right)$$

$$J_f = \hat{J}_f + df (p_{c_0} - p_{c_1})$$

Ecuación 28

Donde p_{c_0} , p_{c_1} y V_{n,c_0} , V_{n,c_1} son la presión y la velocidad normal, respectivamente, dentro de las dos celdas a cada lado de la cara, y \hat{J}_f contiene la influencia de las velocidades en estas celdas. El término df es una función de $\bar{a}p$, la media de los coeficientes de la ecuación momentum ap para las celdas a cada lado de cara f .

2.5.8.9 Acoplamiento Presión-Velocidad (Pressure-Velocity Coupling).

El acoplamiento presión-velocidad se logra mediante el uso de la Ecuación 28 para obtener una condición adicional para la presión por el reformateo de la ecuación de continuidad Ecuación 27. El solucionador basado en la presión le permite resolver el problema de flujo en cualquier forma segregada o acoplada. ANSYS FLUENT ofrece la opción de elegir entre cinco algoritmos de acoplamiento presión-velocidad (s = utiliza el algoritmo segregado basado en la presión, a = utiliza el solucionador acoplado basado en la presión, $p-c$ = basado en el enfoque predictor-corrector): SIMPLE (s, p-c), SIMPLEC (s, p-c), PISO (s, p-c), Coupled (a), Fractional Step (s, p-c).

SIMPLE s, p-c: necesita un factor bajo-relajación (under-relaxation) para la presión. Para el presente estudio se eligió el algoritmo SIMPLE.

2.5.8.10 Algoritmo iterativo para estado permanente (Steady-State Iterative Algorithm).

Al realizar un cálculo en estado permanente, las ecuaciones que rigen para el solucionador basado en la presión no se incluyen los términos que dependen del tiempo de la Ecuación 3. La anterior teoría de discretización y esquemas seleccionados, es igual para flujo permanente y no permanente.

El factor bajo-relajación de las ecuaciones, también conocidos como la relajación implícita, se utiliza en el solucionador basado en la presión para estabilizar el comportamiento de convergencia de las iteraciones no lineales exteriores mediante la introducción de cantidades selectivos de ϕ en el sistema de ecuaciones discretizados. Esto es equivalente al paso de tiempo específico de la ubicación:

$$\frac{a_p \phi}{\alpha} = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b + \frac{1 - \alpha}{\alpha} a_p \phi_{old}$$

Ecuación 29

El número de Courant CFL es un parámetro en el algoritmo de solución acoplada a base de presión y puede ser escrita en términos de α :

$$\frac{1 - \alpha}{\alpha} = \frac{1}{CFL}$$

$$CFL = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

2.5.9 Modelo VOF

Según (ANSYS, Inc., 2013), el modelo de VOF puede modelar dos o más fluidos inmiscibles por la solución de un único conjunto de ecuaciones de movimiento y el seguimiento de la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio. Las aplicaciones típicas incluyen la predicción de ruptura por chorro, el movimiento de grandes burbujas en un líquido, el movimiento del líquido después de una rotura de presas, y el seguimiento permanente o transitorio de cualquier interfaz líquido-gas, es decir, es un modelo multi-fase. Este modelo permite realizar cálculos en flujo permanente y no permanente. Las limitaciones del modelo VOF concernientes al presente estudio son:

- Debe utilizar el programa de solución basado en la presión. El modelo VOF no está disponible con el programa de solución basada en la densidad.

- Todos los volúmenes de control deben llenarse con ya sea una sola fase fluida o una combinación de fases. El modelo VOF no permite regiones vacías en donde está presente ningún fluido de cualquier tipo.
- Sólo una de las fases se puede definir como un gas ideal compresible. No hay limitación en el uso de líquidos compresibles utilizando funciones definidas por el usuario.
- Flujo de sentido de la corriente periódica (ya sea la tasa de flujo de masa especificado o caída de presión especificada) no se pueden modelar cuando se utiliza el modelo VOF.
- La formulación implícita de tiempo de paso a paso de segundo orden no se puede utilizar con el esquema explícito VOF.

La formulación VOF se basa en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no son penetrantes. Para cada fase adicional que se agrega a su modelo, una variable se introduce: la fracción de volumen de la fase en la celda computacional. En cada volumen de control, las fracciones en volumen de todas las fases suman la unidad. Los campos para todas las variables y propiedades son compartidos por las fases y representan valores de volumen promediado, siempre y cuando la fracción de volumen de cada una de las fases se conoce en cada ubicación. Por lo tanto, las variables y propiedades en cualquier celda dada son ya sea puramente representativa de una de las fases, o el representante de una mezcla de las fases, dependiendo de los valores de fracción de volumen. En otras palabras, si la fracción de volumen del líquido en la celda se denota como q^{th} , a continuación, las tres condiciones siguientes son posibles:

$\alpha_q = 0$: *La celda está vacía (para q^{th} fluido)*

$\alpha_q = 1$: *La celda está llena (para q^{th} fluido)*

$0 < \alpha_q < 1$: *La celda contiene la interfaz entre el q^{th} fluido y uno o más fluidos)*

Basado en el valor local α_q , las propiedades y variables apropiadas serán asignadas para cada volumen de control dentro del dominio.

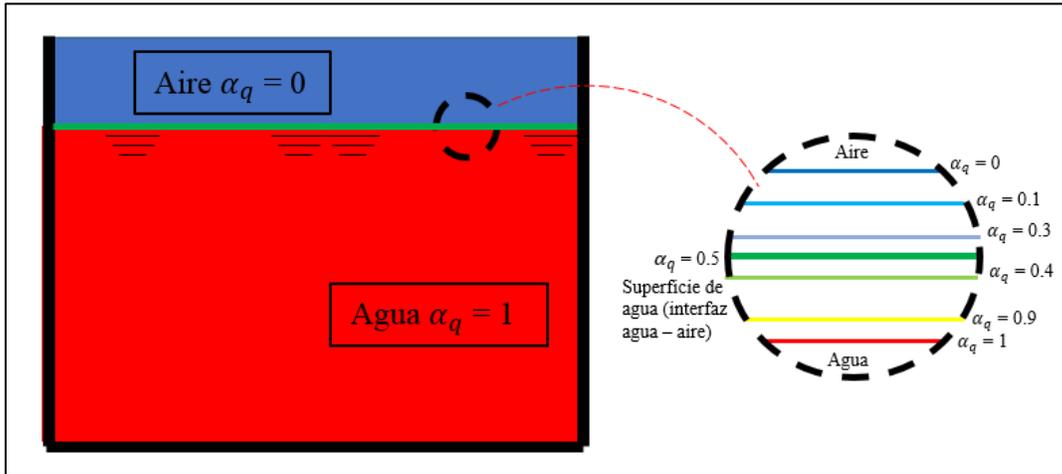


Figura 18. Distribución de la fracción de volumen en una sección transversal de un canal.

Fuente. (ANSYS, 2013).

2.5.9.1 Ecuación de Fracción Volumen.

El seguimiento de la interfaz (s) entre las fases, se lleva a cabo por la solución de una ecuación de continuidad para la fracción de volumen de uno (o más) de las fases. Para la fase q^{th} , esta ecuación tiene la forma siguiente:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{V}_q) \right] = S_{q_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq})$$

Ecuación 30

Donde \dot{m}_{qp} es la transferencia de masa de la fase q a la fase p y \dot{m}_{pq} es la transferencia de masa de la fase p a la fase q. Por defecto, el término fuente en la parte derecha de la Ecuación 30, S_{q_q} es cero, pero puede especificar una constante o una fuente de masa definida por el usuario para cada fase.

La ecuación de fracción de volumen no se resolverá en la fase primaria; la fracción de volumen de fase primaria se calcula en base a la siguiente restricción:

$$\sum_{q=1}^n a_q = 1$$

La ecuación de fracción de volumen se puede resolver, ya sea a través de discretización tiempo implícito o explícito (para revisar las ecuaciones remítase a (ANSYS, Inc., 2013)):

2.5.9.2 Esquemas implícitos.

Para la discretización espacial ofrecen los esquemas de First Order Upwind, Second Order Upwind, Compressive, HRIC Modificado, BGM (disponible sólo para el programa de solución de estado permanente) o QUICK. En este orden, el costo computacional es mayor.

2.5.9.3 Esquemas explícitos.

Disponibles cuando la modelación son dependientes del tiempo. Los esquemas de discretización espacial de fracción de volumen son:

- First Order Upwind (solamente para modelo Multifase Euleriano)
- Geo-Reconstruir (modelo VOF y Multifase Euleriano con Multi-Fluid VOF habilitado)
- CICSAM (modelo VOF y Multifase Euleriano con Multi-Fluid VOF habilitado)
- Compressive
- HRIC Modificado
- QUICK
- Donor-Aceptor

Nota: Mientras que los esquemas HRIC, Compressive y CICSAM modificados son menos costoso computacionalmente que el esquema Geo-Reconstruir, la interfaz entre las fases no será tan fuerte como la que predice con el esquema de reconstrucción geométrica. El esquema de interpolación reconstrucción geométrica se suele utilizar cuando usted está interesado en el momento exacto del comportamiento transitorio de la solución VOF.

Para el presente estudio para la modelación de flujo permanente lo esquemas First Order Upwind, Second Orden Upwind, HRIC Modificado como estrategia para un mejor modelado. Para la modelación de flujo permanente se utilizó el esquema HRIC Modificado, al tener características.

2.5.9.4 Ecuación de la cantidad de movimiento.

Una sola ecuación de cantidad de movimiento se resuelve en todo el dominio, y el campo de velocidad resultante se comparte entre las fases. La ecuación de cantidad de movimiento, se muestra a continuación, es dependiente de la fracción de volumen de todas las fases a través de las propiedades ρ y μ .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{V}) + \nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla\vec{V} + \nabla\vec{V}^T)] + \rho\vec{g} + \vec{F}$$

Nota: Una limitación de los campos aproximación compartida es que en los casos en los que existen grandes diferencias de velocidad entre las fases, la exactitud de las velocidades calculadas cerca de la interfaz puede ser afectada adversamente.

2.5.9.5 Ecuaciones escalares adicionales.

Dependiendo de su definición del problema, ecuaciones escalares adicionales pueden estar involucrados en la solución. En el caso de las cantidades de turbulencia, se resuelve un único conjunto de ecuaciones de transporte, y las variables de turbulencia (por ejemplo, k y ε o el esfuerzo de Reynolds) son compartidos por las fases de todo el campo.

2.5.9.6 Modelación dependiente del tiempo (flujo no permanente).

Para los cálculos VOF dependientes del tiempo, la Ecuación 30 se resuelve utilizando un esquema de avance en el tiempo explícito. ANSYS FLUENT refina automáticamente el paso de tiempo para la integración de la ecuación de fracción de volumen, pero puede influir en este cálculo el paso de tiempo mediante la modificación del número de Courant. Se puede optar por actualizar la fracción de volumen una vez para cada paso de tiempo, o una vez para cada iteración dentro de cada intervalo de tiempo.

Cuando ANSYS FLUENT realiza un cálculo VOF dependiente del tiempo, el paso de tiempo utilizado para el cálculo de la fracción de volumen no será el mismo que el paso de tiempo utilizado

para el resto de las ecuaciones de transporte. ANSYS FLUENT refinará el paso de tiempo para VOF de forma automática, en base a su entrada para el número máximo permitido de Courant cerca de la superficie libre. El número de Courant es un número adimensional que compara el paso de tiempo en un cálculo para el tiempo característico de tránsito de un elemento de fluido a través de un volumen de control.

El tiempo de tránsito típico para un elemento de fluido a través del volumen de control representa el tiempo tomado por el líquido para vaciar fuera de la celda. Este tiempo de tránsito se toma como el más pequeño tal vez en la región cerca de la interfaz de fluido. Un paso tiempo, para su uso en los cálculos VOF, se calcula sobre la base de este tiempo característico, y el número máximo permitido Courant. Por ejemplo, si el número máximo permitido Courant es de 0.25 (por defecto), el cálculo del paso del sub-tiempo tendrá un valor máximo equivalente a una cuarta parte del tiempo de tránsito mínimo para cualquier celda cerca de la interfaz.

En FLUENT, el tamaño del paso tiempo para los cálculos VOF se puede calcular mediante las siguientes opciones:

Basado en la velocidad: El paso de sub-tiempo se estima por el tamaño de la celda y la velocidad del fluido normal a la interfaz:

$$\Delta t_v = C \frac{\Delta x}{V_{fluid}}$$

Ecuación 31

Donde, C es el número de Courant, V_{fluid} es la velocidad del fluido, y Δx es el tamaño de la celda.

Basado en el flujo (Flux) (predeterminado): Este es el método por defecto para el cálculo de tamaño de paso de sub-tiempo. Para esta opción, se estima que el sub paso de tiempo basado en el volumen de la celda y la suma de los flujos salientes en las celdas:

$$\Delta t_v = C \frac{V_{cell}}{\sum_{cell} U_f}$$

Ecuación 32

Donde, C es el número de Courant, V_{cell} es el volumen, y U_f son los flujos salientes.

Basado en el Flujo promedió: El tamaño del sub paso de tiempo se calcula el promedio de los cálculos del método *basado en el flujo* de las celdas adyacentes.

Híbrido: El tamaño de paso del sub-tiempo se estima por la contribución apropiada de los anteriores métodos.

Nota: El método de cálculo basado en el flujo es el más conservador para la estimación de sub-tiempo, mientras que el cálculo basado en la velocidad es el más agresivo. Los Métodos basados en los flujos e híbrido se sitúan entre la mayoría de los casos.

Métodos agresivos de cálculo de paso del sub-tiempo generalmente ahorran tiempo durante la reconstrucción de la interfaz. Sin embargo, el método agresivo puede conducir a un mayor número de iteraciones debido a errores transitorios de mayor tamaño están introduciendo, integrando los pasos del sub-tiempo para la reconstrucción de la interfaz.

Para el presente estudio se utilizó el método basado en el flujo.

2.5.10 Modelación con VOF para flujos en canales abiertos.

ANSYS FLUENT puede modelar los efectos del flujo de canal abierto (por ejemplo, ríos, presas y estructuras de superficie-perforación en el flujo sin límites) mediante la formulación VOF y la condición de frontera de canal abierto. Estos flujos implican la existencia de una superficie libre entre el fluido que fluye y el líquido por encima de ella (en general, la atmósfera). En tales casos, el comportamiento de la propagación de la onda y la superficie libre se convierte en importante. El Flujo se rige generalmente por las fuerzas de la gravedad y la inercia. Esta función es sobre todo aplicable a las aplicaciones marinas y el análisis de los flujos a través de los sistemas de drenaje.

Los flujos en canal abierto se caracterizan por el número de Froude adimensional, que se define como la razón de la fuerza de inercia y la fuerza hidrostática.

Las condiciones de frontera que se utilizaron para la modelación de flujos en canales abiertos son:

- Pressure inlet: presión en la entrada como condición aguas arriba. La presión total p_0 en la entrada puede ser determinada por:

$$p_0 = \frac{1}{2}\rho V^2 + (\rho - \rho_0)|\vec{g}|(\hat{g} \cdot (\vec{b} - \vec{a}))$$

Donde \vec{b} y \vec{a} es la posición del vector del centroide de la cara de la celda y varios puntos sobre la superficie libre asumiendo que es horizontal y normal a la dirección de la gravedad. El vector gravedad es \vec{g} . La magnitud gravedad es $|\vec{g}|$, el vector unitario de gravedad \hat{g} , la velocidad magnitud es V , ρ es la densidad de la mezcla en la celda y ρ_0 es la densidad de referencia.

A partir de esto, la presión dinámica q es

$$q = \frac{\rho}{2}V^2$$

Y la presión estática p_s es

$$p_s = (\rho - \rho_0)|\vec{g}|(\hat{g} \cdot (\vec{b} - \vec{a}))$$

Que puede ser ampliado aún más a

$$p_s = (\rho - \rho_0)|\vec{g}|((\hat{g} \cdot \vec{b}) + y_{local})$$

Donde la distancia desde la superficie libre a la posición de referencia, y local, es

$$y_{local} = -(\vec{a} \cdot \hat{g})$$

- Mass flow rate: el flujo másico como condición aguas arriba, para cada fase asociado con el flujo en canal abierto es definido:

$$\dot{m}_{fase} = \rho_{fase}(Area_{fase})(Velocidad)$$

- Volume Fraction Specification: En los flujos de canal abierto, ANSYS Fluido internamente calcula la fracción de volumen basado en los parámetros de entrada especificados en el cuadro de diálogo de condiciones de frontera, por lo tanto, esta opción se ha desactivado.
 - Para flujos de entrada subcrítico ($Fr < 1$), ANSYS Fluent reconstruye los valores de fracción de volumen en el límite mediante el uso de los valores de las celdas adyacentes.
 - Para flujos de entrada supercríticos ($Fr > 1$), el valor de la fracción de volumen en el límite se puede calcular utilizando la altura fija de la superficie libre desde el fondo del canal.

- Pressure Outlet: la presión de salida como condición de frontera aguas abajo. La determinación de la presión estática depende del método de indicación de presión. Usando el nivel de la superficie libre, la presión estática es dictada por la ecuación de la presión estática y la ecuación de la altura local, de lo contrario se debe especificar la presión estática como la presión manométrica. Para flujos de salida subcrítico ($Fr < 1$), si sólo hay dos fases, entonces la presión se traslada desde el perfil de presión especificada sobre el límite, de lo contrario la presión se toma de la celda vecina. Para flujos supercríticos ($Fr > 1$), la presión siempre se toma de la celda vecina.

- Backflow Volume Fraction Specification: Especificación de la fracción de volumen de flujos en reversa. ANSYS Fluent calcula internamente los valores de fracción de volumen en el límite de salida mediante el uso de los valores de las celdas adyacentes, por lo tanto, esta opción está desactivada.
 - Determining the Free Surface Level: Determinación del nivel de la superficie libre. Para el límite indicado, se deberán especificar el valor Nivel de superficie libre. Este parámetro está disponible para todos los límites pertinentes, incluyendo la presión de salida, entrada de flujo de masa, y la entrada de presión. El Nivel de superficie libre, está representado por la ecuación de la altura local $y_{local} = -(\vec{a} \cdot \hat{g})$. Donde \vec{a} es el vector de posición de cualquier punto de la superficie libre y \hat{g} es el vector unitario en la dirección de la fuerza de la gravedad. Aquí asumimos una superficie libre horizontal que es normal a la dirección de la gravedad. Simplemente se puede calcular el nivel de la superficie libre en dos pasos:

- Determinar el valor absoluto de la altura de la superficie libre al origen en la dirección de la gravedad.
- Aplicar el signo correcto en función de si el nivel de la superficie libre está por encima o por debajo del origen.

Si el nivel de la superficie libre del líquido se encuentra por encima del origen, entonces el nivel de la superficie libre es positivo (ver la Figura 19). Del mismo modo, si el nivel de la superficie libre del líquido se encuentra por debajo del origen, entonces el nivel de la superficie libre es negativo.

- Determining the Bottom Level: Determinación del nivel del fondo. Para el límite indicado, se deberán especificar el valor de nivel de fondo. Este parámetro está disponible para todos los límites pertinentes, incluyendo la presión de salida, entrada de flujo de masa, y la entrada de presión:

$$y_{fondo} = -(\vec{b} \cdot \hat{g})$$

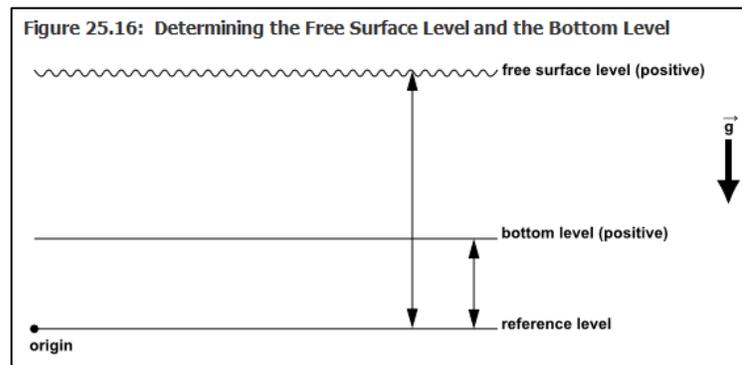


Figura 19. Determinación del nivel de superficie libre y el nivel del fondo del canal.

Fuente. (ANSYS, 2013).

- Specifying the Total Height: Especificación de la altura total. La altura total, junto con la velocidad, se utiliza como una opción para describir el flujo. La altura total se da como:

$$y_{total} = y_{local} + \frac{V^2}{2g}$$

Donde V es la magnitud de la velocidad y g es la magnitud de la gravedad.

- **Determining the Velocity Magnitude:** La determinación de la magnitud de la velocidad. Para fronteras de presión de entrada, se requiere para la magnitud de la velocidad de entrada para el cálculo de la presión dinámica que se utiliza en el cálculo de la presión total. Nota: La magnitud de la velocidad proporcionada no se aplica a la frontera.
- **Choosing the Pressure Specification Method:** La elección del procedimiento de especificaciones de la presión. Para un límite de salida de presión, la presión de salida se puede especificar en una de tres maneras:
 - Prescribiendo el nivel de la superficie libre, tal como un perfil de presión hidrostática (disponible para el flujo de dos fases solamente).
 - Especificando la presión constante.
 - Especificando la presión de la celda adyacentes.
- **Choosing the Density Interpolation Method:** Elección del método de interpolación de la densidad. Para los problemas relacionados con el flujo subcrítico, existen las siguientes opciones para el método de interpolación Densidad:

Desde la celda adyacente es la opción por defecto, donde la densidad de la mezcla utilizada en el perfil hidrostática se interpola usando la fracción de volumen calculado a partir de la celda vecina.

Desde el nivel de la superficie libre, donde la densidad de la mezcla utilizada en el perfil hidrostática se interpola a partir de la fracción de volumen calculado a partir del nivel de la superficie libre.

- **Limitaciones.** La siguiente lista resume algunos problemas y limitaciones asociados con la condición de contorno canal abierto.

- La conservación de la integral de Bernoulli no facilita la conservación de la velocidad de flujo de masa de límite de presión. En el caso de una malla más gruesa, no puede haber una diferencia significativa en la tasa de flujo de masa de la tasa real de flujo de masa. Para mallas más finas, la tasa de flujo de masa se acerca más al valor real. Por lo tanto, para los problemas que tienen caudal másico constante, la condición de contorno de flujo de masa es una mejor opción. Límite de presión debe seleccionarse cuando la fricción constante y no oscilante es el objetivo principal.
- Especificar el límite superior como la toma de la presión a veces puede conducir a una solución divergente. Esto puede ser debido a la singularidad de esquina en el límite de presión en la región de aire o debido a la incapacidad de especificar la dirección del flujo local correctamente si el aire entra a través de la parte superior a nivel local.
- Sólo la fase más pesada debe seleccionarse como la fase secundaria.

2.5.10.1 Condiciones de frontera utilizadas.

ANSYS FLUENT ofrece una serie de condiciones de frontera. Sin embargo, para modelar VOF en un canal abierto para este estudio se utilizó las siguientes condiciones de frontera (B.C: boundary conditions en inglés).

Para las modelación en flujo permanente se tuvieron en cuenta las condiciones de frontera Wall, symmetry, mass flow inlet, pressure inlet, velocity inlet y pressure outlet que se presentan en la Figura 20, Figura 21 y Figura 22, que se describen a continuación:

- Wall (pared): Se asigna una condición de no deslizamiento (no slip), todos los flujos perpendiculares a la pared son igual a cero. Para flujo turbulento se especifica la altura de rugosidad de 0.008 para materiales lisos (vidrio, PVC, aluminio) y una constante que por defecto es 0.5 para rugosidades uniformes según las modificaciones de Cebeci y Bradshaw (ANSYS, Inc., 2013) a la ley de la pared, en la que tres regímenes se establecen: Condiciones hidráulicamente suaves $k^+ \leq 2.25$, condiciones totalmente rugoso con $k^+ > 90$ y un régimen transitorio entre $2.25 \leq k^+ \leq 90$.

- **Symmetry (Simetría):** Condiciones de frontera de simetría se utilizan cuando la geometría física de interés y el patrón esperado de la solución de flujo, tienen simetría de espejo. Aún no se define ninguna condición de frontera en los límites de simetría, pero se debe tener cuidado para definir correctamente sus localidades limítrofes de simetría. Una forma de saber si se puede utilizar “*symmetry*” es realizar una corrida con el dominio completo y observar que existan efectos anormales (por ejemplo, el efecto Coanda). En general se debe tener en cuenta que al imponer esta B.C se establece velocidad en dirección normal cero al plano de simetría y gradientes en dirección normal cero de todas las variables en el plano de simetría. Por lo tanto, el modelo de simetría se elige debido a que se ahorra un 50% de costo computacional al tener una malla con menos celdas que calcular.
- **Mass flow inlet (flujo másico a la entrada):** Se especifica el flujo másico de la fase agua y aire, propiedades de turbulencia (energía cinética turbulenta “Turbulent Kinetic Energy: k ”), tasa de disipación de turbulencia (Turbulent Dissipation Rate: ϵ), intensidad turbulenta, escala de la longitud de mezcla, diámetro hidráulico, viscosidad turbulenta) y en el caso de modelación con multi-fase (modelo VOF) se define altura del fondo del canal y altura de lámina de agua con el método de interpolación de la densidad.
- **Pressure inlet (presión a la entrada):** Se especifican componentes de la velocidad o velocidad absoluta, propiedades de turbulencia (energía cinética turbulenta (Turbulent Kinetic Energy: k), tasa de disipación de turbulencia (Turbulent Dissipation Rate: ϵ), intensidad turbulenta, escala de la longitud de mezcla, diámetro hidráulico, viscosidad turbulenta) y en el caso de modelación con multi-fase (modelo VOF) se define altura del fondo del canal y altura de lámina de agua con el método de interpolación de la densidad.
- **Velocity inlet (velocidad a la entrada):** se especifica las componentes de la velocidad o velocidad absoluta, propiedades de turbulencia (energía cinética turbulenta (Turbulent Kinetic Energy: k), tasa de disipación de turbulencia (Turbulent Dissipation Rate: ϵ), intensidad turbulenta, escala de la longitud de mezcla, diámetro hidráulico, relación de la viscosidad turbulenta) y método de interpolación de la densidad. Además, se define la fracción de volumen de la fase que se quiera que entre por esa zona (por lo general se especifica 1 para la fase agua, de esa manera se especifica que solo entrara agua y no aire).

- Pressure outlet (presión a la salida): Presión manométrica igual a cero (0) simulando presión atmosférica a la salida y en la parte superior del dominio (canal) simulando que el aire corre libremente. Propiedades de turbulencia (energía cinética turbulenta (Turbulent Kinetic Energy: k), tasa de disipación de turbulencia (Turbulent Dissipation Rate: ϵ), intensidad turbulenta, escala de la longitud de mezcla, diámetro hidráulico, viscosidad turbulenta) en el evento de que exista flujos inversos (backflow) o aspiración.

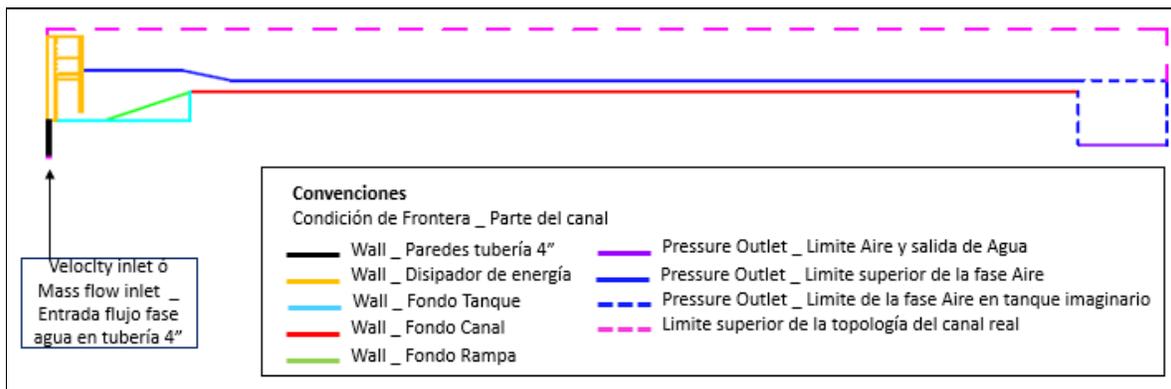


Figura 20. Condiciones de frontera para modelos 2D en flujo permanente, con y sin dissipador de energía para el canal ECI No. 2.

Fuente. *Este estudio*.

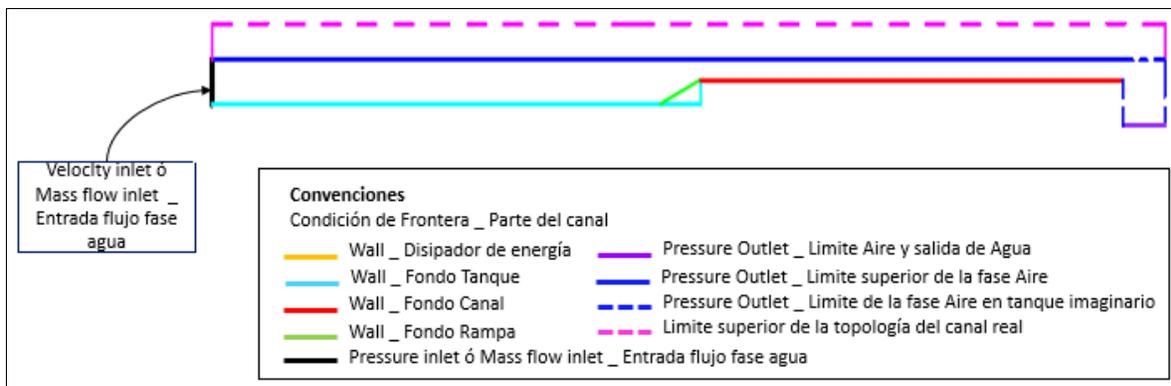


Figura 21. Condiciones de frontera para modelos 2D en flujo permanente, con y sin rampa, con entrada larga para el canal ECI No. 2.

Fuente. *Este estudio*.

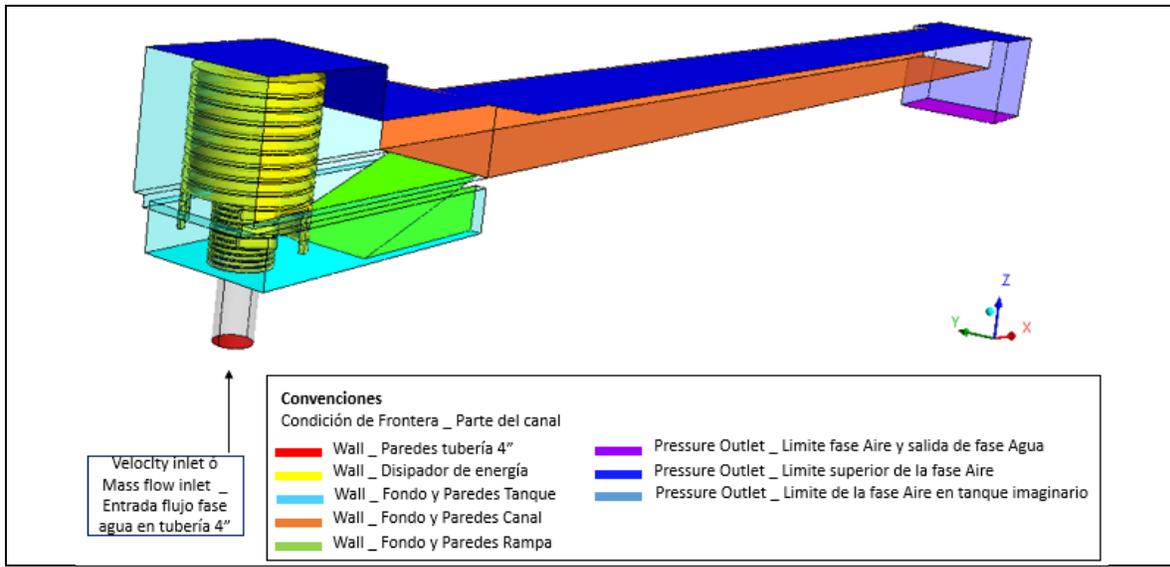


Figura 22. Condiciones de frontera para modelos 3D en flujo permanente, con y sin disipador de energía, con y sin rampa para el canal ECI No. 2.

Fuente. *Este estudio*.

Para las modelaciones en flujo no permanente se tuvieron en cuenta las condiciones de frontera wall, mass flow inlet y pressure outlet que se presentan en la Figura 23:

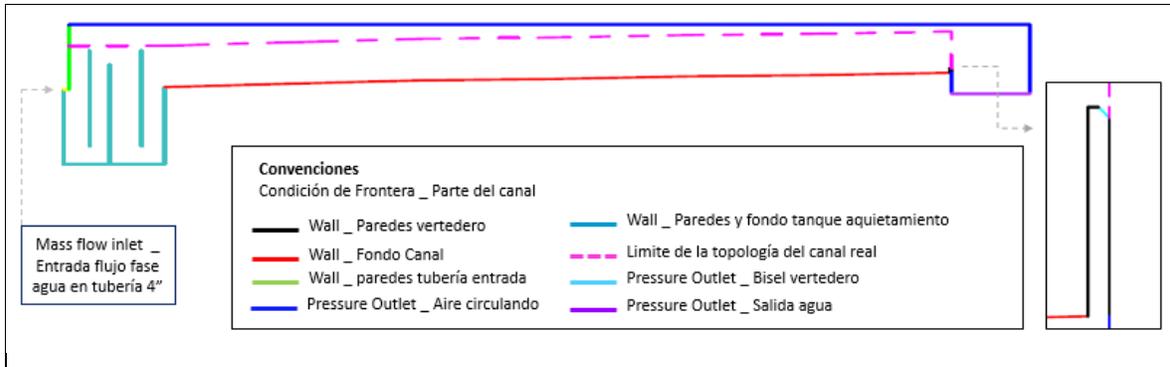


Figura 23. Condiciones de frontera para modelos 2D en flujo no permanente para el canal ECI No. 1.

2.5.10.2 Consideraciones de las propiedades de la turbulencia a la entrada del dominio.

Según lo anterior, en el presente estudio se tomó la condición de frontera a la entrada con respecto a la turbulencia la propiedad llamada intensidad de la turbulencia para el análisis de las modelaciones. Condición de frontera a la entrada se emplea para modelar desde la entrada real de agua al canal, es decir, por la tubería de 4" que se encuentra en su parte inferior. Aquí, se asume que la intensidad de la turbulencia en el núcleo de un flujo en el ducto, es completamente desarrollado, donde según ANSYS Inc. (2013) puede estimarse a partir de la siguiente fórmula derivada de una correlación empírica para flujos en tubería:

$$I \equiv \frac{u'}{u_{media}} = 0.16 * (Re_{Dh})^{-1/8}$$

Ecuación 33.

Donde Re_{Dh} es el número de Reynolds con longitud característica $L =$ Diámetro hidráulico. Además, esta ecuación también es válida para condición de frontera para especificar la intensidad turbulenta en dominios donde la entrada de agua al canal comienza a partir de una lámina de agua con una altura específica, cambiando el diámetro hidráulico en la ***Ecuación 3*** el radio hidráulico inicial.

2.5.10.3 Evaluación de la turbulencia a la entrada del canal rectangular.

Una parte de las modelaciones comparativas de modelos 2D y 3D versus modelos 1D se evaluó considerando un flujo uniforme en regiones con desarrollo del flujo laminar, desarrollo del flujo turbulento y completamente desarrollado como condición ideal a la entrada del canal rectangular y a lo largo de este (ver Figura 24), siguiendo los criterios establecidos por Chow (1994, págs. 189, 190) “para el análisis de la inestabilidad del flujo uniforme”, los cuales se mencionan a continuación:

- El flujo que entra al canal es laminar y con una distribución de velocidades uniforme.
- No existe ninguna restricción a la entrada que cause una perturbación abrupta en la superficie del agua y en la distribución de velocidades.
- La profundidad de flujo es indefinidamente grande, de tal manera que puede considerarse constante a medida que el agua entra al canal.

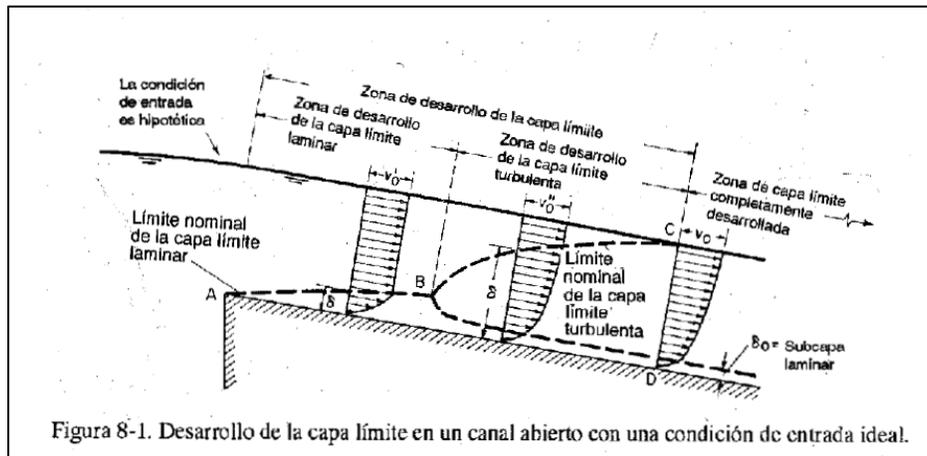


Figura 24. Condiciones ideales del flujo a la entrada de un canal abierto.

Fuente. (Chow, 1994, pág. 190).

2.6 Revisión de la literatura

Se realizó una revisión del estado del arte con respecto a la utilización de CFD para solucionar problemas de la ingeniería en varios conocimientos:

Chung (2010) realiza una revisión histórica del desarrollo de la dinámica de fluidos computacional argumentando que este tema inicia en los años 50 con la llegada de los computadores, luego en 1910, en el Royal Society of London, Richardson presenta una revista científica sobre las primeras soluciones de métodos de diferencias finitas para el análisis de esfuerzos en la construcción de una represa, en 1956 se publicó en la Aeronautical Science Journal por Turner, Clough, Martin y Topp sobre aplicaciones en el análisis de esfuerzos en aviones.

La CFD también ha jugado un papel importante en la solución de problemas ambientales, por ejemplo:

En el desarrollo de CFD se han realizado técnicas que podrían también ser aplicadas en problemas ambientales para la solución de transferencia de materia y energía en ríos, océanos, atmósfera y medios porosos tales como suelos y rocas, por ejemplo, Freeze and Harlan, 1969; King and Norton, 1978; Fischer et al., 1979 (...) Derek Ingham and Lin Ma (Capítulo 2) en la simulación de flujos en la aplicación de procesos fluviales. Aquí todas las ecuaciones derivan de las bien conocidas ecuaciones de Navier–Stokes en 3D (Batchelor, 1967), donde típicamente son

simplificadas para aplicaciones ambientales para promedios en el tiempo, cediendo el paso a las ecuaciones de Reynolds Averaged Navier–Stokes, y/o en espacio, para la producción de modelos 1D o 2D (Bates, Lane, & Ferguson, 2005, págs. 2 - 5).

Como se puede observar, CFD tiene un valor muy importante en la solución de problemas de la ingeniería, que para el presente estudio se aplicó en la evaluación de estructuras hidráulicas, tema concerniente a los recursos hidráulicos y medio ambiente. Con respecto a estructuras hidráulicas se encontró los siguientes casos de estudio que se tuvieron en cuenta para el presente estudio:

Ramamurthy, Junying, & Diep (2005) realizaron modelaciones en 2D con ANSYS FLUENT de flujos agua y aire para flujos agua y aire en un canal a superficie libre utilizando el modelo VOF para estimar la altura de la lámina y la napa de agua que se forma en la descarga después del canal rectangular. La malla utilizada fue estructurada. El modelo de turbulencia usado es el modelo $k - \epsilon$. Realizaron comparaciones entre resultados realizados en anteriores estudios y ecuaciones teóricas para perfiles de lámina de agua para un flujo supercrítico y flujo subcrítico, como también la distribución perfiles verticales de los componentes de velocidad U y V, de la cabeza de presión y velocidad para cinco caudales, encontrando excelentes resultados entre los datos medidos, teóricos y modelados. Más tarde Ramamurthy, Junying, & Diep (2006) realizaron modelaciones comparativas en 2D de igual manera que el anterior, pero con sección trapezoidal, encontrando resultados satisfactorios entre los datos medidos y modelados.

Hargreaves, H. P., & N. G., (2007) realizaron modelaciones en 2D y 3D con ANSYS FLUENT de flujos agua y aire en un canal a superficie libre con un vertedero de cresta ancha, utilizando el modelo VOF para estimar la altura de la lámina y la napa de agua que se forma en la descarga después del vertedero, con flujo no permanente para llegar a una solución estable. La malla utilizada fue del tipo estructurada “non-conformal”. Los modelos de turbulencia usados son el modelo $k - \epsilon$ estándar, $k - \epsilon$ Re-Normalised Group (RNG) y Reynolds Stress Model (RSM). Realizaron comparaciones entre resultados realizados en anteriores estudios para perfiles de lámina de agua, como también la distribución perfiles verticales de la componente de velocidad U y de la cabeza de presión para siete caudales, encontrando resultados aceptables entre los datos medidos y modelados.

M. Salih, M. Sami, & Oner, (2008) realizaron modelaciones en 2D con ANSYS CFX de flujos agua y aire en un canal a superficie libre con vertederos de cresta ancha y triangular, utilizando el modelo VOF para estimar la altura de la lámina y la napa de agua que se forma en la descarga después del vertedero. La malla utilizada fue del tipo estructurada para el dominio con vertedero de cresta ancha y no estructurada para el triangular. Los modelos de turbulencia usados son el modelo $k - \epsilon$ estándar y el modelo $k - \omega$ estándar. Realizaron comparaciones entre mediciones con un sistema de medición de velocimetría de imágenes de partículas para perfiles de lámina de agua, como también la distribución de perfiles verticales de la componente de velocidad U y la magnitud para 2 caudales, encontrando resultados aceptables entre los datos medidos y modelados con el modelo $k - \omega$ estándar.

Qu, Ramamurthy, Tadayon, & Chen (2009) realizaron modelaciones en 2D de flujos agua y aire en un canal a superficie libre con un vertedero de cresta delgada, utilizando el modelo VOF para estimar la altura de la lámina y la napa de agua que se forma en la descarga después del vertedero, con flujo no permanente para llegar a una solución estable. El modelo de turbulencia usado es el modelo $k - \epsilon$. Realizaron comparaciones entre resultados realizados en anteriores estudios y ecuaciones teóricas para perfiles de lámina de agua, como también la distribución de perfiles verticales de la componente de velocidad U, ángulo de velocidad y la cabeza de presión para un caudal, encontrando excelentes resultados entre los datos medidos y modelados. Se utilizó un computador personal con 800 MHz CPU y 256 MB de RAM para calcular 19456 celdas para un tiempo computacional de 10 horas.

Stoesser, Ruether, & Boe Olsen (2010) realizaron modelaciones en 3D con el software Hydro3D-GT de un flujo agua en un canal rectangular meandrónico a superficie libre, no se utilizó el modelo VOF para estimar la altura de la lámina, es decir, se asume que la altura de la lámina es uniforme en todo el recorrido. La malla utilizada fue estructurada. Los modelos de turbulencia usados son el modelo Large Eddy Simulation method (LES) con flujo no permanente para llegar a una solución estable para un caudal sin variación en el tiempo y modelos RANS como es el modelo $k - \epsilon$ y el modelo $k - \omega$ en flujo permanente. Realizaron comparaciones entre resultados de mediciones realizadas con un anemómetro hot-film para el campo de velocidades primaria y secundaria, como también la distribución de perfiles verticales de velocidades y líneas de corriente transversales, distribución de esfuerzos cortantes en el fondo y paredes del canal, encontrando resultados que proporcionan pruebas claras de que el código RANS es capaz de predecir las velocidades primaria

promediada en el tiempo con buena concordancia con la independencia del modelo de turbulencia utilizado, LES se encontró que era ligeramente superior a RANS en el cálculo de las velocidades secundarias promediadas en el tiempo, El modelo RANS predice en promedio 20% más alto los esfuerzos cortantes en el fondo cerca de la orilla interior en el vértice de la curva y parece sobreestimar en el medio del canal, mientras que no captura picos cerca de las paredes laterales, sin embargo en la pared lateral se predicen de manera similar en RANS y LES. El código está paralelizado utilizando la librería OpenMP, y se ejecuta en un solo nodo de 16 procesadores de un clúster de IBM con 1,9 GHz de 16 procesadores PowerPC para una malla de 5.600.000 de celdas.

Liscia, Angulo, de Dios, & del Blanco (2010) realizaron modelaciones en 3D con el software FLOW-3D de flujos agua y aire en un canal a superficie libre con un vertedero de alivio, utilizando el modelo VOF para estimar la altura de la lámina, con flujo permanente y condición de frontera symmetry. La malla utilizada fue estructurada ortogonal. El modelo de turbulencia usado es el modelo $k - \epsilon$ Re-Normalised Group (RNG). Realizaron comparaciones entre resultados de mediciones realizadas con un velocímetro acústico Doppler (ADV Nortek Vectrino) a una frecuencia de 10 Hz de muestreo para el campo de velocidades y un limnógrafo para perfiles de lámina de agua, como también la distribución de perfiles verticales de la componente de velocidad U, encontrando resultados aceptables entre los datos medidos y modelados. El software del hardware utilizado fue Windows XP 64-bits, Procesador Intel® Core i7 (4 procesadores de 2.67 GHz) y 8 GB de memoria RAM, con tiempos de cálculo de 19.6 horas para 598164 celdas con Puesta en régimen con mallas gruesas, 53.5 horas para 4470932 celdas con refinamiento de la malla con cálculo en 1° orden de la advección cantidad de movimiento y 92.4 horas para 4470932 celdas con aumento de la precisión de cálculo a 3° orden de la advección cantidad de movimiento.

Rahimzadeh, Maghsoodi, Sarkardeh, & Tavakkol (2012) realizaron modelaciones en 3D con ANSYS FLUENT de flujos agua y aire en un canal a superficie libre con un vertedero triangular con cresta circular y diferentes ángulos de expansión, utilizando el modelo VOF para estimar la altura de la lámina y la napa de agua que se forma en la descarga después del vertedero. La malla utilizada fue del tipo estructurada. Los modelos de turbulencia usados son el modelo $k - \epsilon$ estándar de Launder y Spalding 1972, modelo $k - \epsilon$ Re-Normalised Group (RNG), modelo $k - \epsilon$ realizable, modelo $k - \epsilon$ estándar de Wilcox 1998, el modelo Shear - Stress transport SST $k - \omega$ y el modelo Reynolds Stress Model (RSM). Realizaron comparaciones entre resultados realizados en anteriores estudios para

perfiles de lámina de agua, como también la distribución de perfiles verticales de la velocidad U y la cabeza de presión para un caudal, encontrando resultados suficientemente aproximados entre los datos medidos y modelados con todos los modelos excepto para el modelo $k - \epsilon$ estándar y el modelo $k - \omega$ estándar; además, el modelo Reynolds Stress Model (RSM) tubo la mejor aproximación de los modelos de turbulencia con los datos experimentales.

Usman Ghani & Sabahat (2013) realizaron modelaciones en 3D con ANSYS FLUENT de un flujo agua en un canal a superficie libre con un fondo con dos materiales liso y rugoso, no se utilizó el modelo VOF para estimar la altura de la lámina, es decir, se asume que la altura de la lámina es uniforme en todo el recorrido. La malla utilizada fue del tipo estructurada. Los modelos de turbulencia usados son el modelo $k - \epsilon$, modelo $k - \epsilon$ Re-Normalised Group (RNG), y el modelo Reynolds Stress Model (RSM). Realizaron comparaciones entre resultados realizados en anteriores estudios con un velocímetro Doppler acústico (ADV) para la distribución de la velocidad primaria y secundaria en una sección transversal, encontrando resultados no satisfactorios entre los datos medidos y modelados con los modelos $k - \epsilon$ y el modelo $k - \epsilon$ Re-Normalised Group (RNG), excepto el modelo Reynolds Stress Model (RSM) tubo la mejor aproximación de los modelos de turbulencia con los datos experimentales.

Ramazza (2008) realizó modelaciones en 2D con el software ANSYS FLUENT de flujos agua y aire en un canal a superficie libre con formación de un resalto hidráulico ondulado, utilizando el modelo VOF para estimar la altura de la lámina, con flujo no permanente. La malla utilizada fue estructurada ortogonal. El modelo de turbulencia usado es el modelo $k - \epsilon$ standard. Realizó comparaciones entre resultados de mediciones de anteriores estudios para perfiles de lámina de agua, como también la distribución de velocidad U , cabeza de presión, campos de vorticidad, energía cinética turbulenta, para un caudal, encontrando resultados aceptables entre los datos medidos y modelados. Se utilizó un CPU estándar de 3GHz, con tiempos de cálculo desde un día a varias semanas según el incremento del refinamiento de la malla para estudios de sensibilidad de la malla con respecto a la superficie libre.

Axelsson & Knutsson (2011) realizaron modelaciones en 3D con el software ANSYS FLUENT de flujos agua y aire en un canal a superficie libre a escala de cinco escenarios de un sistema de aliviadero del proyecto hidroeléctrico de Shibuya, utilizando el modelo VOF para estimar la altura de

la lámina, con flujo no permanente y con un dominio con condición de frontera “symmetry” para cinco casos y uno completo. La malla utilizada fue tipo híbrida. El modelo de turbulencia usado es el modelo $k - \epsilon$ standard. Realizó comparaciones entre resultados de mediciones para perfiles de lámina de agua, como también la distribución de velocidad y cabeza de presión, encontrando resultados con gran incertidumbre con errores en varias secciones de análisis entre los datos medidos y modelados; además, al utilizar la condición de frontera “symmetry” fue un error ya que el plano de simetría a lo largo del centro longitudinal de los canales evita eficazmente cualquier posible formación de ondas transversales o patrón de onda serpenteante, esto aunado a una calidad pobre de la malla y el modelo físico a escala también tenía errores de construcción.

En resumen, según los 11 estudios encontrados, 6 utilizan ANSYS FLUENT, 8 utilizan el modelo VOF para modelar la superficie libre de agua, 9 utilizan el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ standard con un nivel aceptable de estimación en su mayoría y se obtienen mejores resultados en 5 estudios con RMS y 2 con LES. Un estudio considera un error utilizar la condición de frontera “symmetry” en modelaciones 3D para canales a superficie libre. En cuanto a costo computacional se considera que para 5.600.000 celdas para modelos $k - \epsilon$, $k - w$ y LES se necesita un clúster de 16 procesadores. Para modelaciones con el modelo $k - \epsilon$ RNG se necesita el procesador Intel® Core i7 (4 procesadores de 2.67 GHz) y 8 GB de memoria RAM para lograr tiempos de cálculo de 0.82 días para 598.164 celdas con mallas gruesas, 2.23 días para 4.470.932 celdas con cálculo en 1° orden de la advección cantidad de movimiento y 3.85 días para 4.470.932 celdas con aumento de la precisión de cálculo a 3° orden de la advección cantidad de movimiento.

3 Metodología

En el presente capítulo se describe la metodología que se empleó en la modelación de los dos canales de laboratorio para flujo permanente y no permanente, teniendo en cuenta el plan de trabajo sugerido por ANSYS FLUENT (2013), como también manuales de buenas prácticas de la Comunidad de Investigación Europea sobre Flujo, Turbulencia y Combustión (ERCOFTAC) por Casey & Wintergerste (2000), los libros sobre verificación y validación en computación científica por L. Oberkampf & J. Roy (2009) y verificación y validación de modelos 3D de flujos a superficie libre de la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles (ASCE) por Y. Wang, J. Roche, Schmalz, & et al (2009). En la Figura 25 se presenta un mapa conceptual general de las actividades y productos de verificación y validación para las modelaciones en 1D, 2D y 3D en flujo permanente y no permanente.

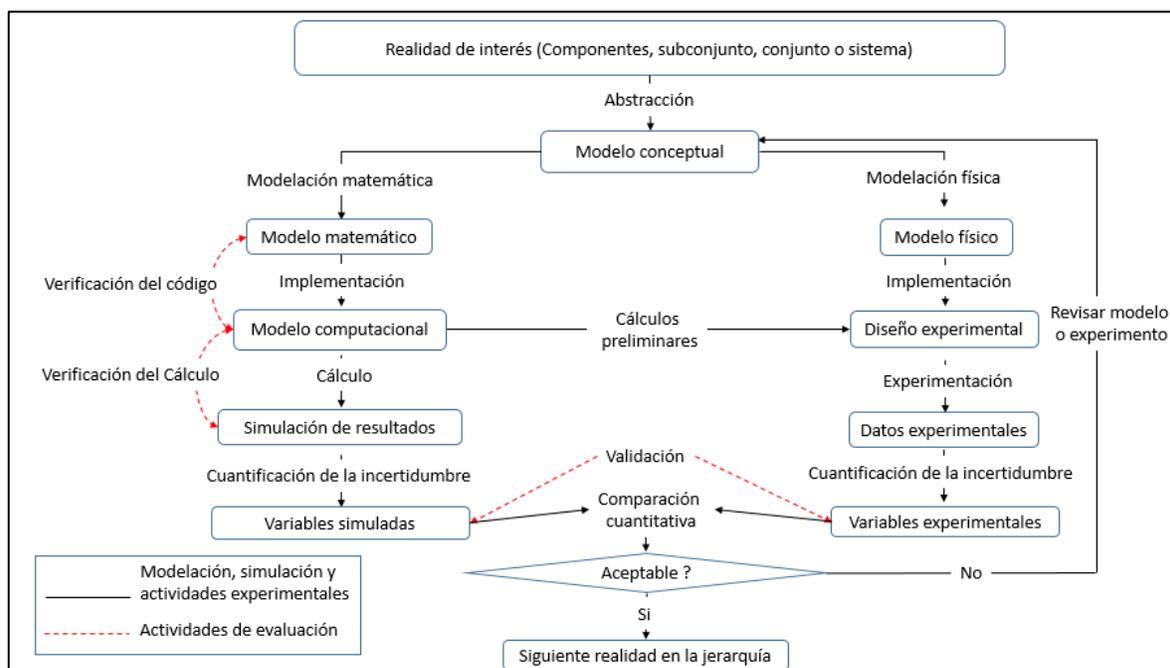


Figura 25. Actividades y productos generales de verificación y validación para modelaciones en 1D, 2D y 3D.

Fuente. Adaptado de (Hargreaves, H. P., & N. G., 2007, pág. 30).

3.1 Metodología para la modelación en flujo permanente

A continuación, se presenta el plan de trabajo que se siguió para cumplir con las modelaciones en 1D, 2D y 3D en flujo permanente del canal ECI No.2, que más adelante se describirán:

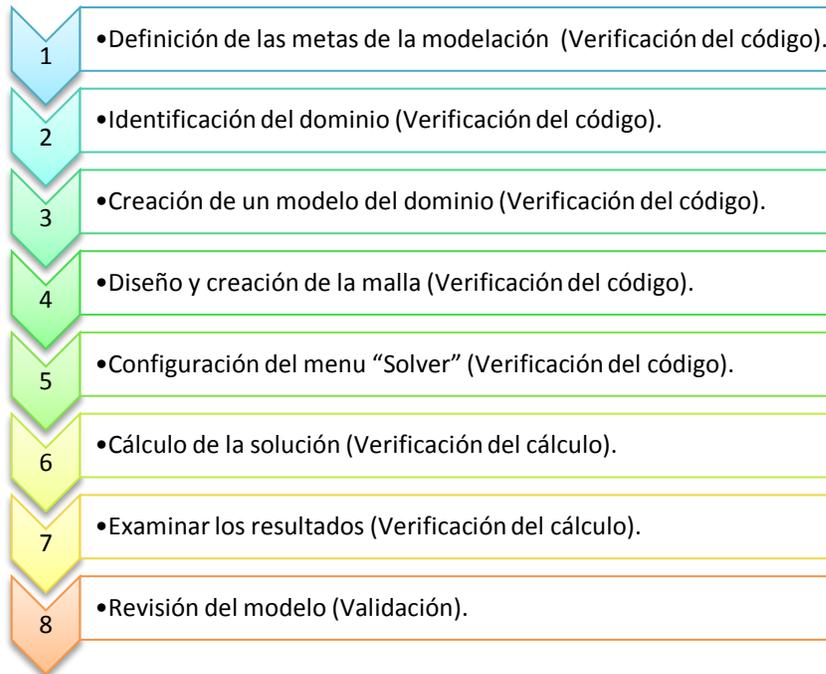


Figura 26. Plan de trabajo para modelaciones.

Fuente. Adaptado de (ANSYS, 2013).

3.1.1 Definición de las metas de la modelación.

Los resultados y variables de interés que se buscaron son:

- Modelar la superficie libre de agua en el canal de laboratorio ECI No. 2.
- Analizar la disipación de energía mecánica en el sistema del canal de laboratorio ECI No. 2.
- Analizar la simetría del flujo agua en el sistema del canal de laboratorio ECI No. 2 con respecto a:
 - Distribución de flujos primarios (U) y secundarios (VW)
 - Distribución del coeficiente de fricción sobre el fondo del canal rectangular.
 - Líneas de corriente de agua modeladas desde la entrada de la tubería de 4".

- Analizar la distribución de la velocidad y presión estática del flujo agua en el sistema del canal de laboratorio ECI No. 2.

Las opciones de modelación y simplificaciones que se tuvieron en cuenta fueron:

- Para las modelaciones en 1D se tomó en cuenta solo el tramo del canal donde el flujo agua está a superficie libre, es decir, desde una sección inmediatamente después del dissipador de energía. Además, se hicieron modelaciones extras para perfiles ideales con una entrada larga al canal rectangular como se explica más adelante.
- Para las modelaciones en 2D se realizó simplificaciones en el dominio por unidad de ancho. Ya que las partes del dissipador de energía no se extienden completamente en dirección transversal se realizó una expansión de sus partes hasta alcanzar el ancho del canal, incluyendo orificios. Además, se hicieron modelaciones extras para perfiles ideales con una entrada larga al canal rectangular como se explica más adelante. La condición inicial de la fase agua fue establecer el tanque completamente lleno.

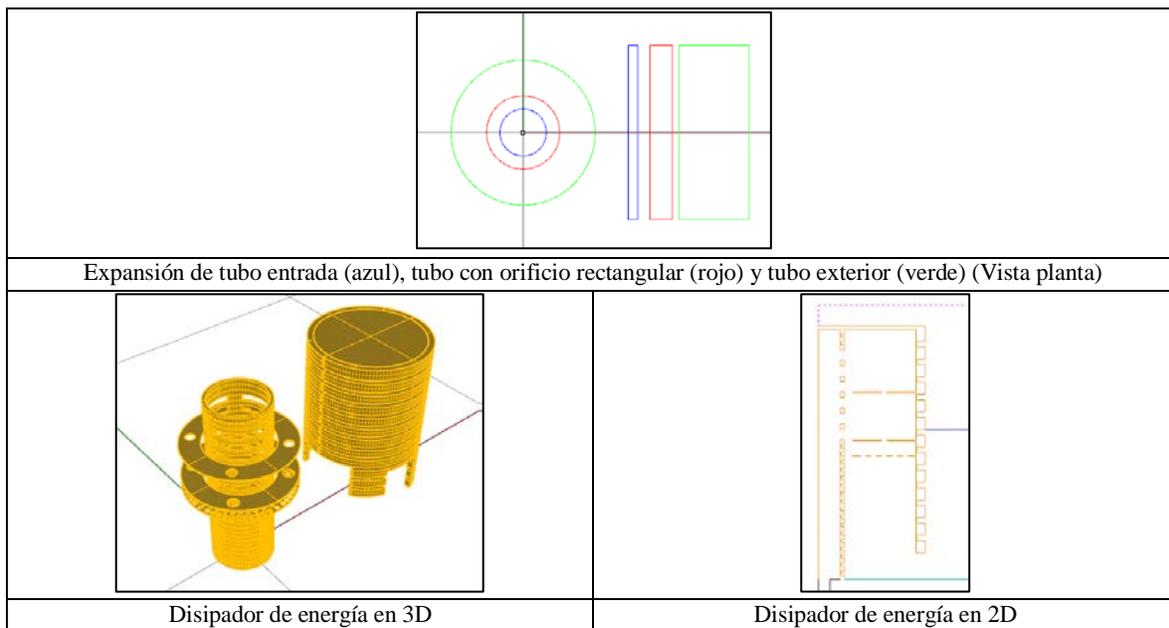


Figura 27. Simplificación del dissipador de energía del canal ECI No. 2 en 2D.

Fuente. *Este estudio.*

- Para las modelaciones en 3D como primera opción de simplificación fue modelar sobre la mitad del dominio con la condición de frontera de simetría “symmetry” para optimizar el costo computacional y la segunda opción con el dominio completo, con el modelo multifase VOF con agua y aire con las dos opciones, escogiendo la segunda por los antecedentes encontrados con la primera opción en la revisión de la literatura; Sin embargo, la simetría del flujo se tuvo en cuenta como análisis. La condición inicial de la fase agua fue establecer el tanque completamente lleno.

Modelo físico a utilizar: Como se comentó anteriormente, el modelo físico que se necesitó para el análisis y validación de las modelaciones es el canal de laboratorio ECI No. 2 el cual conduce agua en su interior teniendo en cuenta la superficie libre generada por diferentes caudales.

Grado de precisión que se requiere: este punto tiene que ver con la comparación cuantitativa o validación entre las mediciones y las modelaciones realizadas de la altura de la lámina de agua en flujo permanente, estableciendo como criterio un intervalo de confianza un error del 4% de los datos medidos, donde los resultados de las modelaciones deberán estar dentro de este rango para su aceptación. Aunque las guías de modelación consultadas aconsejan un error del 1%, la incertidumbre por errores de medición se da por los instrumentos con que se contó para realizar las mediciones de la altura de la lámina el cual es un flexómetro para regiones de difícil acceso, una aguja de medición con empotramiento inapropiado y un medidor de flujo digital en la tubería de alimentación de todo el laboratorio de hidráulica. Además, según el personal del laboratorio de hidráulica, las bombas de alimentación han presentado continuos daños y reparaciones lo que aumenta la incertidumbre de las mediciones que se realizaron en este estudio.

Herramienta CFD: Como se observa en la revisión de la literatura, ANSYS FLUENT es una de las herramientas de modelación de la dinámica de fluidos computacional más utilizadas y verificadas en proyectos de modelación en 2D y 3D de estructuras hidráulicas, en consecuencia, se determinó que este instrumento computacional es el más adecuado para el desarrollo del presente estudio.

3.1.2 Identificación del dominio.

El dominio descrito de forma general a modelar comprende parte del sistema del canal de laboratorio ECI No. 2 donde se incluyó 20 cm del tubo de alimentación de 4”, tanque, dissipador de energía, canal rectangular y un tanque imaginario para la descarga. Sin embargo, para realizar análisis

comparativos se propone en primera instancia escenarios de modelación en cuanto a topología, dimensión y caudal. A partir de la fase de validación de resultados de modelación con lo medido en el modelo físico del canal ECI No. 2 se eligió los escenarios que fueron parte del análisis comparativo. A continuación se presenta los caudales utilizados teniendo en cuenta la Figura 3 para las mediciones y modelaciones, como también la descripción de las topologías propuestas con su correspondiente código y esquema. Posteriormente, se presenta la lista de los escenarios propuestos antes de la validación para las modelaciones del canal ECI No. 2.

Tabla 2. Caudales utilizados para el canal ECI No. 2.

Caudal (l/s)	Código
7.36	Q1
17.00	Q2
18.21	Q3
19.89	Q4

Fuente. *Este estudio.*

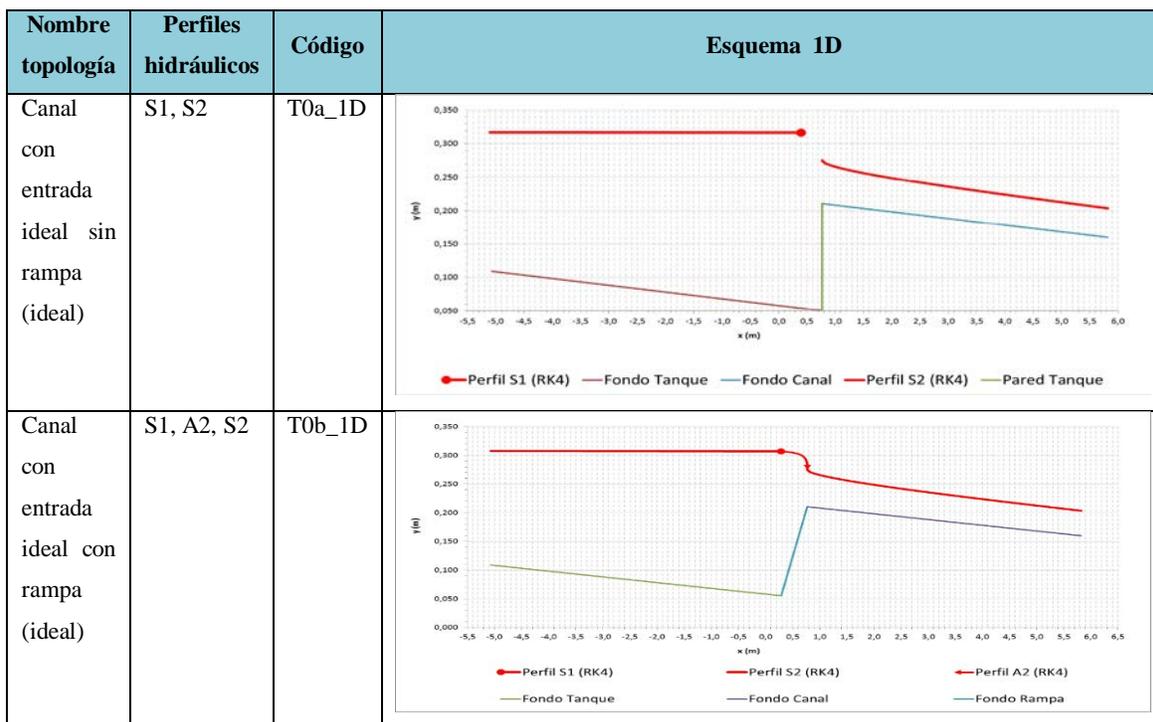


Figura 28. Topologías ideales propuestas antes de la validación del modelo del canal ECI No. 2 en 1D.

Fuente. *Este estudio.*

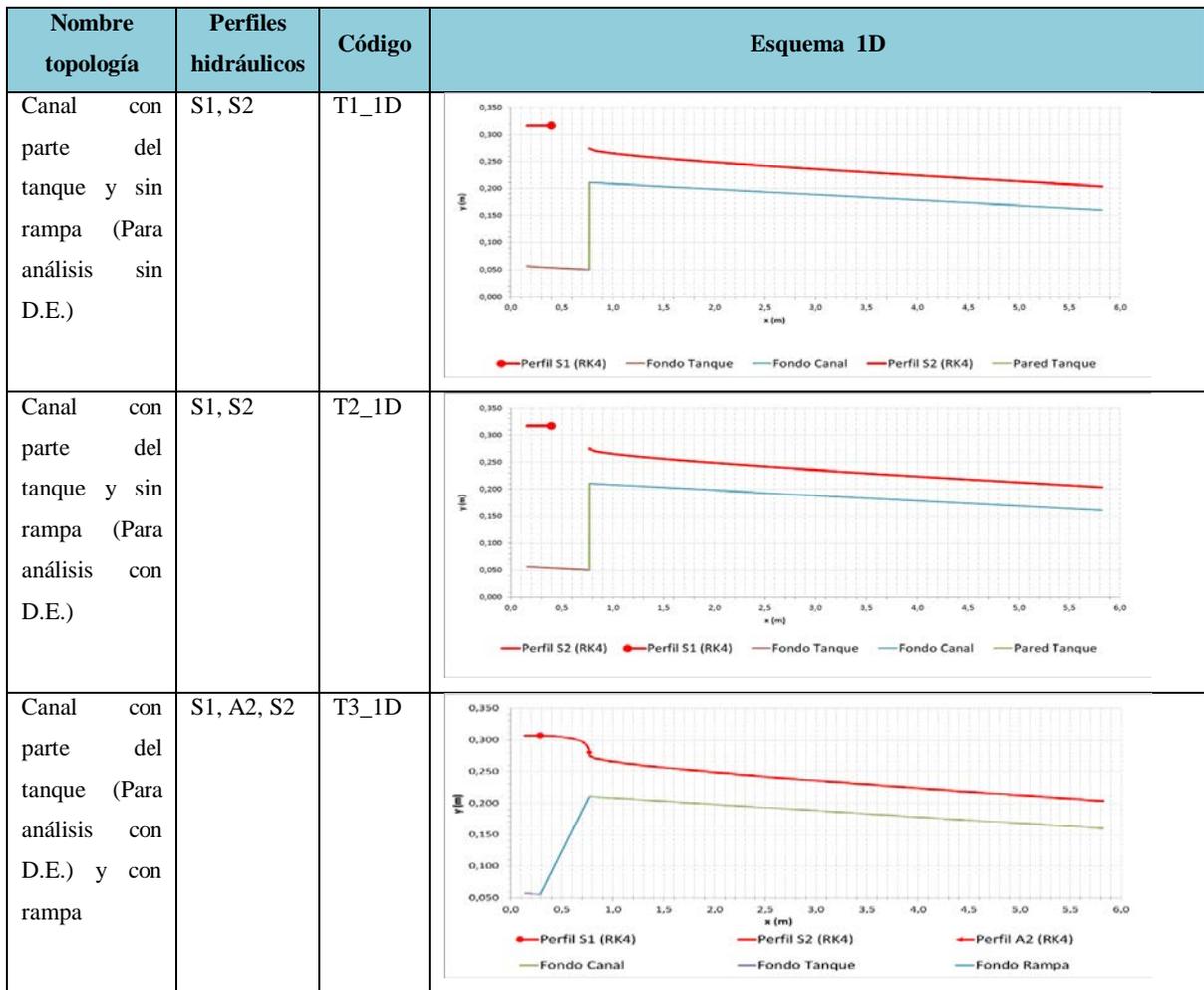


Figura 29. Topologías reales propuestas antes de la validación del modelo del canal ECI No. 2 en 1D.

Fuente. *Este estudio*.

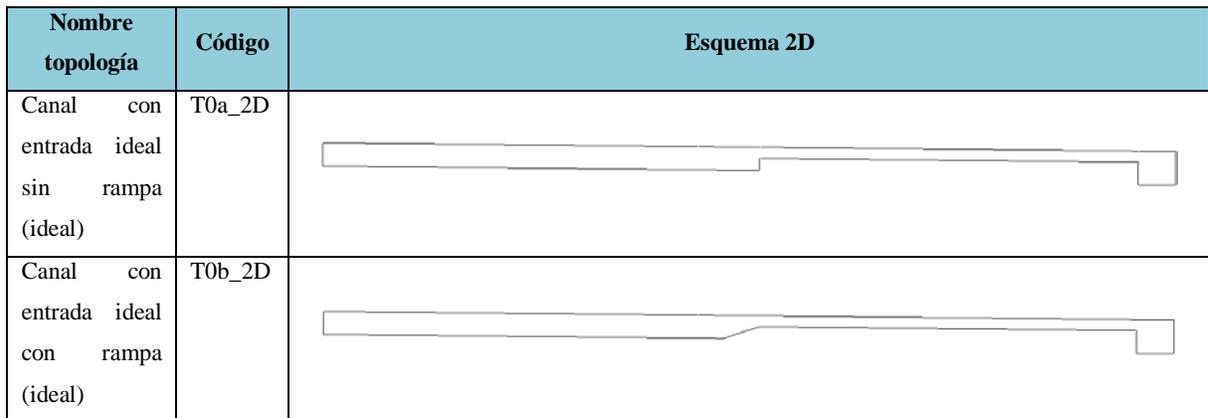


Figura 30. Topologías ideales utilizadas del canal ECI No. 2 en 2D.

Fuente. *Este estudio*.

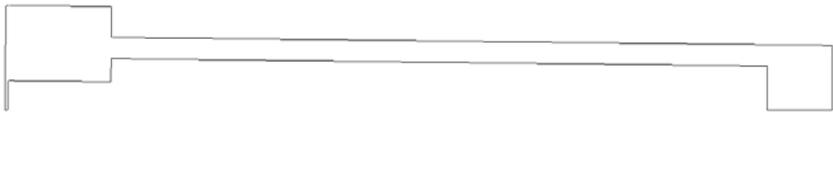
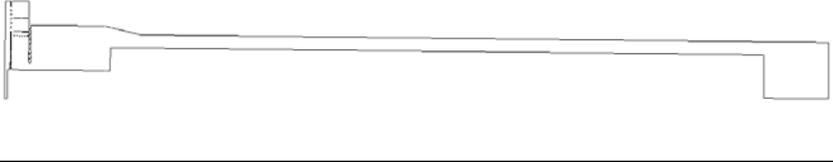
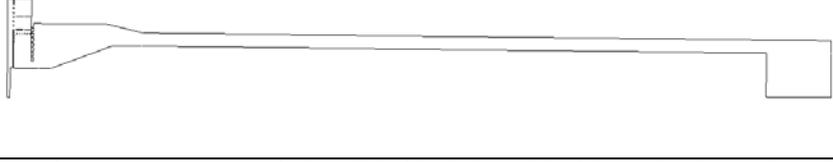
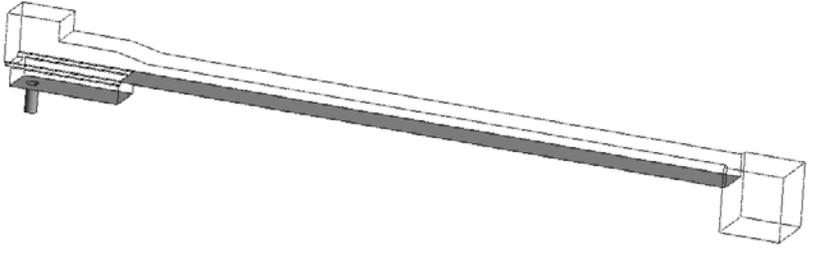
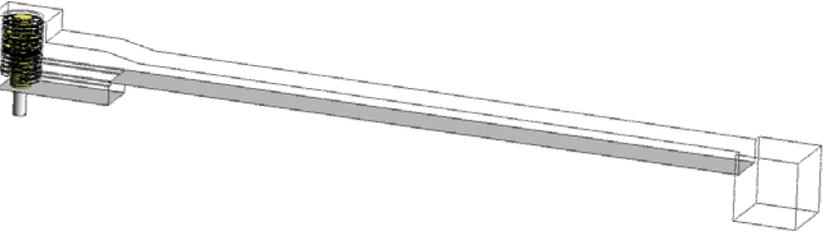
Nombre topología	Código	Esquema 2D
Canal sin disipador de energía y sin rampa (Con entrada simplificada)	T1_2D	
Canal con disipador de energía simplificado y sin rampa	T2_2D	
Canal con disipador de energía simplificado y con rampa	T3_2D	

Figura 31. Topologías reales propuestas antes de la validación del modelo del canal ECI No. 2 en 2D.

Fuente. *Este estudio.*

Nombre topología	Código	Esquema 3D
Canal sin disipador de energía y sin rampa	T1_3D	
Canal con disipador de energía y sin rampa	T2_3D	

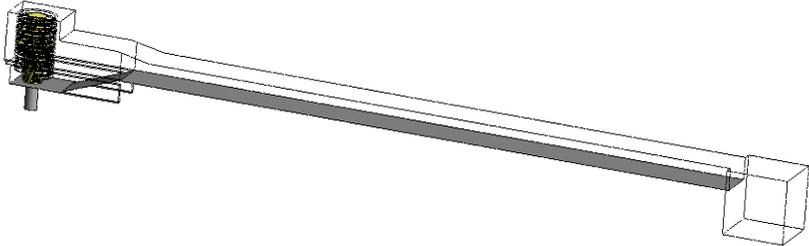
Nombre topología	Código	Esquema 3D
Canal con disipador de energía y con rampa	T3_3D	

Figura 32. Topologías reales propuestas antes de la validación del modelo del canal ECI No. 2 en 3D.

Fuente. *Este estudio*.

Tabla 3. Escenarios propuestos antes de la validación para modelaciones del canal ECI No. 2.

Topología	Caudal	Pendiente canal	Código Escenario	Escenario No.
T0a_1D	Q1	1%	T0a_1D_Q1	1
	Q2	1%	T0a_1D_Q2	2
	Q3	1%	T0a_1D_Q3	3
	Q4	1%	T0a_1D_Q4	4
T0b_1D	Q1	1%	T0b_1D_Q1	5
	Q2	1%	T0b_1D_Q2	6
	Q3	1%	T0b_1D_Q3	7
	Q4	1%	T0b_1D_Q4	8
T1_1D	Q1	1%	T1_1D_Q1	9
	Q2	1%	T1_1D_Q2	10
	Q3	1%	T1_1D_Q3	11
	Q4	1%	T1_1D_Q4	12
T2_1D	Q1	1%	T2_1D_Q1	13
	Q2	1%	T2_1D_Q2	14
	Q3	1%	T2_1D_Q3	15
	Q4	1%	T2_1D_Q4	16
T3_1D	Q1	1%	T3_1D_Q1	17
	Q2	1%	T3_1D_Q2	18
	Q3	1%	T3_1D_Q3	19
	Q4	1%	T3_1D_Q4	20
T0a_2D	Q1	1%	T0a_2D_Q1	21
	Q2	1%	T0a_2D_Q2	22
	Q3	1%	T0a_2D_Q3	23

Topología	Caudal	Pendiente canal	Código Escenario	Escenario No.
	Q4	1%	T0a_2D_Q4	24
T0b_2D	Q1	1%	T0b_2D_Q1	25
	Q2	1%	T0b_2D_Q2	26
	Q3	1%	T0b_2D_Q3	27
	Q4	1%	T0b_2D_Q4	28
T1_2D	Q1	1%	T1_2D_Q1	29
	Q2	1%	T1_2D_Q2	30
	Q3	1%	T1_2D_Q3	31
	Q4	1%	T1_2D_Q4	32
T2_2D	Q1	1%	T2_2D_Q1	33
	Q2	1%	T2_2D_Q2	34
	Q3	1%	T2_2D_Q3	35
	Q4	1%	T2_2D_Q4	36
T3_2D	Q1	1%	T3_2D_Q1	37
	Q2	1%	T3_2D_Q2	38
	Q3	1%	T3_2D_Q3	39
	Q4	1%	T3_2D_Q4	40
T1_3D	Q1	1%	T1_3D_Q1	41
	Q2	1%	T1_3D_Q2	42
	Q3	1%	T1_3D_Q3	43
	Q4	1%	T1_3D_Q4	44
T2_3D	Q1	1%	T2_3D_Q1	45
	Q2	1%	T2_3D_Q2	46
	Q3	1%	T2_3D_Q3	47
	Q4	1%	T2_3D_Q4	48
T3_3D	Q1	1%	T3_3D_Q1	49
	Q2	1%	T3_3D_Q2	50
	Q3	1%	T3_3D_Q3	51
	Q4	1%	T3_3D_Q4	52

Fuente. *Este estudio.*

3.1.3 Creación de un modelo del dominio.

Para crear el modelo del dominio a partir de las mediciones de la geometría del modelo físico, se empleó la herramienta CAD Rhinoceros (Rhinoceros 5.0, 2016). Se simplificó el modelo con el objetivo de no complicar el mallado removiendo partes como tornillos, juntas entre vidrios y acrílicos, sujetadores del dissipador de energía y el carril de aluminio de la parte superior del canal para transportar la aguja de medición. También se simplificó la rugosidad del material de las partes del canal como un solo material liso con una altura de 0.00008 m.

3.1.4 Diseño y creación de la malla.

Para diseñar y crear la malla del dominio en 2D y 3D se utilizó las herramientas de la plataforma de ANSYS como los generadores de malla Mesh-Workbench para 2D y ICEM CFD para 3D. Para dominios 2D se utilizó mallado con celdas cuadradas no estructurada en la región del dissipador de energía y estructurada en otras regiones. Para dominios 3D se utilizó el mallado tipo híbrido con el método Delaunay con celdas tetraedro en los límites y hexagonal en el núcleo del dominio. Este mallado para 2D y 3D se escogió por la complejidad de la geometría en la región del dissipador de energía y alrededores al tener espacios y regiones de gran variabilidad.

El dominio contiene regiones con gradientes de velocidad y de presión al contener coronas o pantallas con orificios en el dissipador de energía, un escalón al iniciar el canal rectangular, un tanque lleno que funciona parcialmente de aquietamiento los cuales provocan flujos con recirculación y a la vez desaceleración del agua, por ende, la malla debe resolver las características geométricas de interés y capturar gradientes. Aunque se tuvo en cuenta estas singularidades, existió la opción de utilizar el método de adaptación en el mallado o refinamiento en FLUENT para aumentar la calidad en tales regiones, sin embargo, el mallado disminuía su calidad al contener celdas de tipo hexaedro, sacrificando los perfiles de velocidad.

El Costo computacional se refiere a la rapidez que se necesita obtener los resultados. Como se observa en la revisión de la literatura, el tiempo en que se obtiene un resultado varía según la maquina computacional (hardware), modelos utilizados y dimensión del dominio. Para el proceso de cálculo del presente estudio se utilizó un computador personal con procesador Intel® Core™ i7 – 4700HQ CPU @ 2.40GHz - 2.39GHz, 4 núcleos y 8 procesadores lógicos, 16 GB de memoria RAM y tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 760M, esperando una efectividad en cálculos aproximadamente

de 0.7 días para 1.400.000 celdas a 1.2 días para 2.400.000 celdas en 3D como condición crítica, teniendo como referencia el estudio de Liscia & Et al (2010).

En el diseño de la malla se tuvo en cuenta la altura de la primera celda que comprenda un $y+$ entre 1 – 10 para regiones con recirculación con gradientes de presión y velocidad, como también $y+$ entre 30 y 500 para regiones donde el flujo turbulento este en desarrollo.

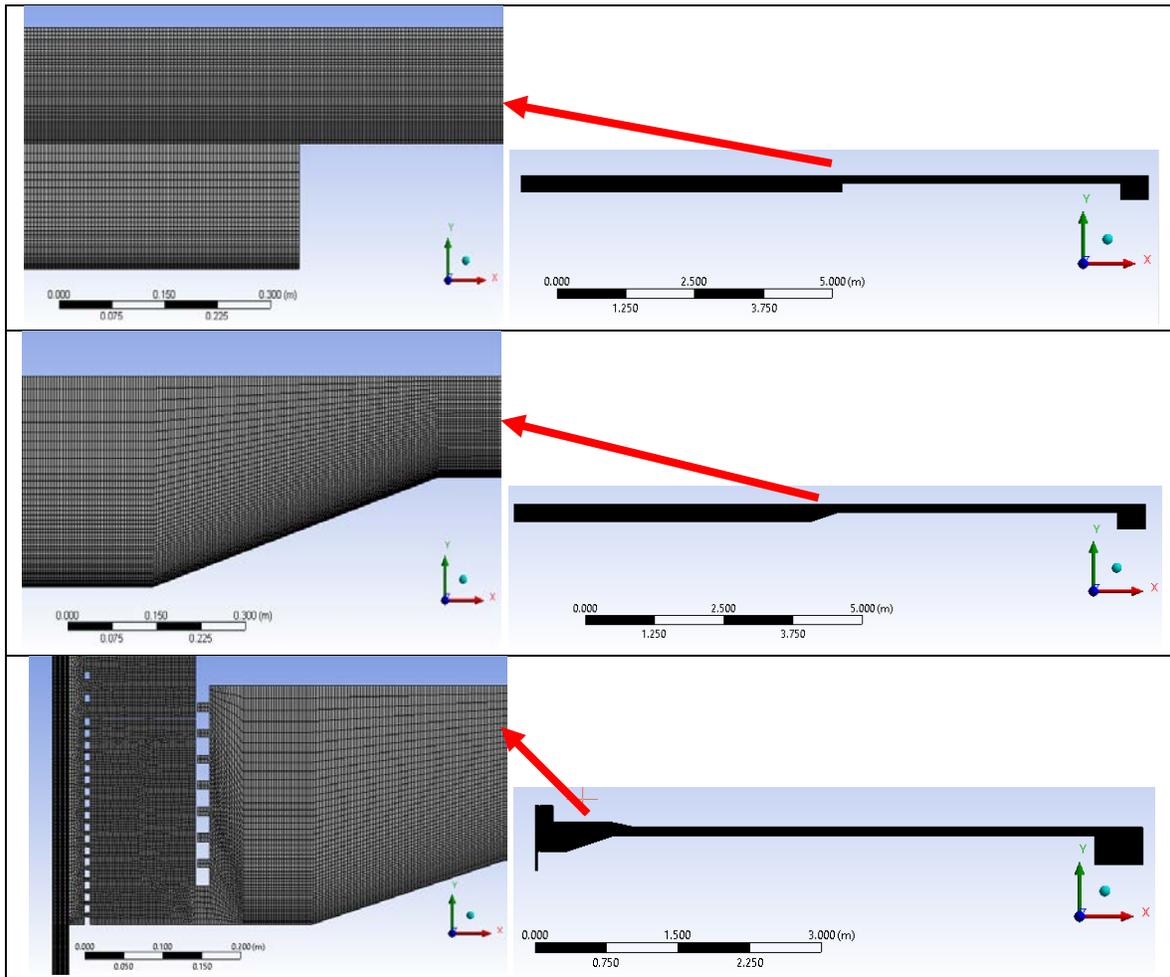


Figura 33. Ejemplo malla estructurada e hibrida utilizada para modelaciones en 2D.

Fuente. (ANSYS, 2013).

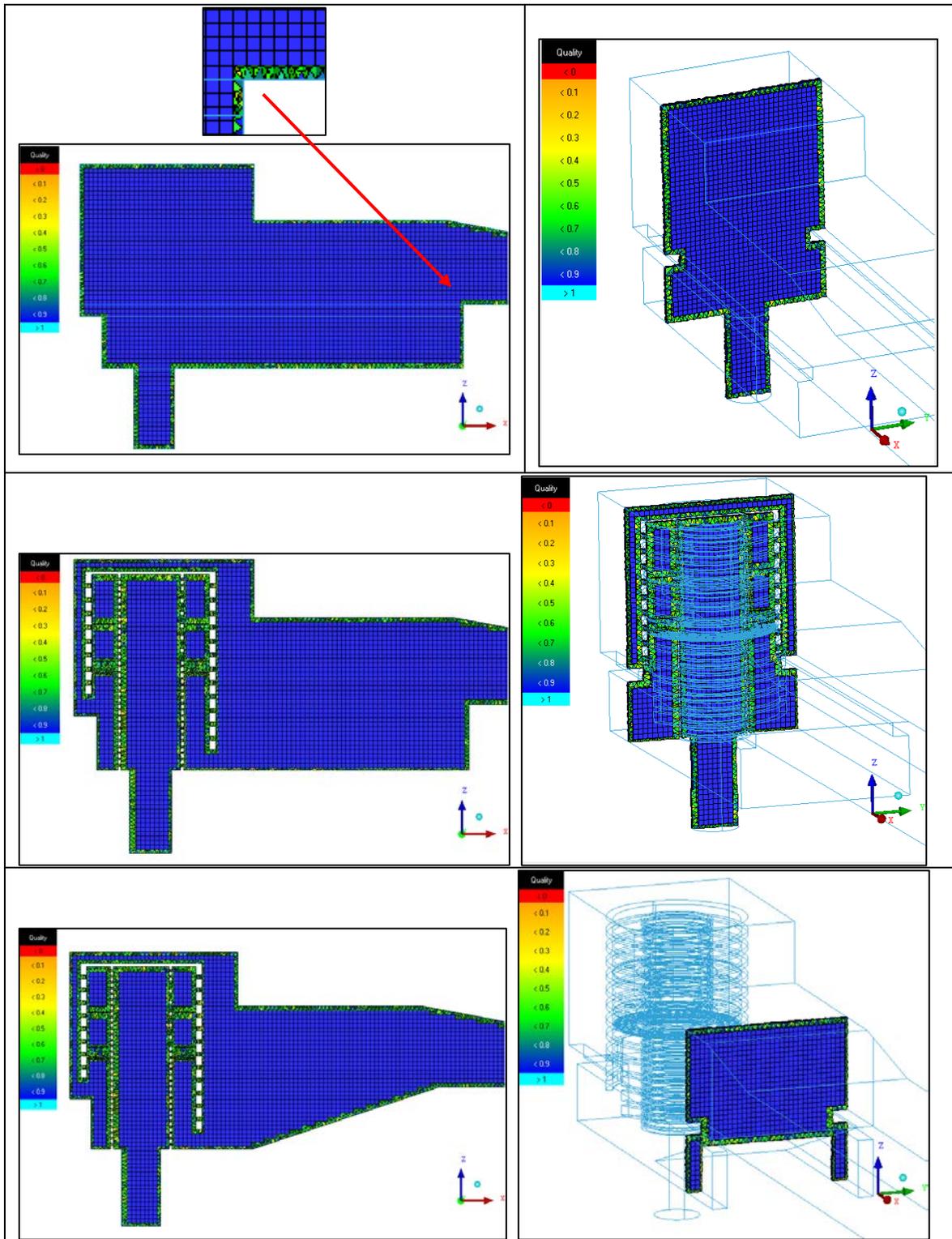


Figura 34. Ejemplo malla hibrida utilizada para modelaciones en 3D.

Fuente. (ANSYS, 2013).

3.1.5 Configuración del menú “Solver”.

Se presenta a continuación una descripción de la configuración utilizada en la solución de las modelaciones en 2D y 3D, sin embargo, cada modelo contiene singularidades que se presentara más adelante:

Tabla 4. Configuración general en ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración general	
Mesh (malla)	
escala	N.A
Solver (solucionador)	
Tipo	Pressure-Based (basado en la presión)
Tiempo	Steady
Espacio en 2D	Planar
Gravity (Gravedad)	
Aceleración de la gravedad m/s ²	9.81
Dirección	Vertical hacia abajo (-)
X (m/s ²)	0
Y (m/s ²)	-9.81

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 5. Configuración general en ANSYS FLUENT en 3D.

Configuración general	
Mesh (malla)	
escala	N.A
Solver (solucionador)	
Tipo	Pressure-Based (basado en la presión)
Tiempo	Steady
Formulación de la velocidad	Absoluto
Gravity (Gravedad)	
Aceleración de la gravedad m/s ²	9.81
Dirección	Vertical hacia abajo (-)
X (m/s ²)	0
Y (m/s ²)	0
Z (m/s ²)	-9.81

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 6. Configuración de modelos en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración modelos	
Model Multiphase (Modelo Multifase)	
Modelo	Volume of fluid (Volumen de fluido)
Número de fases eulerianos	2
VOF sub- Models	
Open channel flow	Activo (Si el flujo comienza desde una altura de lámina de agua específica, para flujo agua desde tubería es inactivo)
Parámetros de la fracción de volumen	

Configuración modelos	
Formulación	Implicit (Implicita)
Volume fraction Cutoff (Fracción de volumen de corte)	1e-06 – 1e-08
Interfase Modeling (Modelación de la Interfase)	Sharp/ Dispersed (Agudo/Disperso)
Body force formulation	
Implicit body force (fuerza de cuerpo implícita)	Activo
Model Viscous (Modelo Viscoso) - “modelación de la turbulencia”	
Modelo	BSL k – omega
Constantes del modelo	Valores utilizados por defecto.
k-omega Options	
Low-Re Corrections	Inactivo
Turbulence Damping	Inactivo
Options	
Curvature Correction (corrección de la curvatura)	Activo
Production de Kato – Launder (Producción de Kato – Launder)	Activo
Limiter Production (Limitador de Producción)	Activo

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 7. Configuración de materiales en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de materiales	
Materiales	
Phase-1 (fase 1)	Aire
Phase-2 (fase 2)	Agua

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 8. Configuración en las celdas de las zonas en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración en las celdas de las zonas	
Phase	
Phase (Fase)	Mixer (mezclado)
Type (Tipo)	Fluid (Fluid)
Operating conditions (condiciones de operación)	
Operating Pressure – presión de operación (Pascal)	101325 (Presión atmosférica)
Localización presión de referencia	X (m) = 0; Y (m) = 0 (punto de referencia de presión para evaluar otro punto de presión (se utiliza para el coeficiente de presión cp) (No se tuvo en cuenta para análisis).
Parámetros variable densidad	
Densidad de operación específica	Activo
Densidad de operación (kg/m ³)	1.225 (perteneciente a la fase aire)

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 9. Configuración en las condiciones de frontera en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de las condiciones de frontera	
Nombre Zona	Entrada fase agua
Condición de frontera	
Opción 1 (Según escenario)	Velocity - Inlet
Opción 2 (Según escenario)	Mass flow - Inlet
Opción 3 (Según escenario)	Pressure - inlet
Opción 1 (Solo para 3D)	
Momentum	Velocity - Inlet
Método de especificación de la velocidad (m/s)	Magnitud, Normal hacia a la frontera
Campo de referencia	Absoluto
Magnitud velocidad (m/s)	Según escenario
Supersonic/Pressure manometric initial (Pascal)	0
Turbulencia:	
Método de especificación	Intensidad de la turbulencia- Diámetro hidráulico
Intensidad de la turbulencia (%)	Según escenario
Diámetro hidráulico (m)	Según escenario
Fracción de volumen	1 (solo pasa agua)
Opción 2 (Solo para 2D)	
Momentum	Mass flow - Inlet
Campo de referencia	Absoluto
Método de especificación de la dirección	Normal a la frontera
Turbulencia:	
Método de especificación	Intensidad de la turbulencia- Diámetro hidráulico
Intensidad de la turbulencia (%)	Según escenario
Diámetro hidráulico (m)	Según escenario
Multifase (opcional)	
Open channel flow	Activo
Fase secundaria de entrada	Agua
Nivel de la superficie libre (m)	Coordenada vertical según escenario (canal con entrada larga)
Nivel del fondo (m)	Coordenada vertical según escenario (canal con entrada larga)
Método de interpolación de densidad	Desde celdas adyacentes
Caudal másico agua (kg/s)	Según escenario (canal con entrada larga)
Caudal másico agua (kg/s)	0 (sin corrientes de aire)
Opción 3 (Solo para 2D)	
Momentum	Pressure - Inlet
Campo de referencia	Absoluto
Método de especificación de la dirección	Normal a la frontera
Supersonic/Pressure manometric initial (Pascal)	0
Turbulencia:	
Método de especificación	Intensidad de la turbulencia- Diámetro hidráulico
Intensidad de la turbulencia (%)	Según escenario
Diámetro hidráulico (m)	Según escenario

Configuración de las condiciones de frontera	
Multifase	
Open channel flow	Activo
Fase secundaria de entrada	Agua
Método de especificación del flujo	Nivel de la superficie libre y velocidad
Nivel de la superficie libre (m)	Coordenada vertical según escenario (canal con entrada larga)
Magnitud velocidad (m/s)	Según escenario (canal con entrada larga)
Nivel del fondo (m)	Coordenada vertical según escenario (canal con entrada larga)
Método de interpolación de densidad	Desde celdas adyacentes
Nombre Zona	Fondo canal, fondo tanque, paredes disipador de energía y fondo rampa
Condición de frontera	
Opción	Wall
Momentum	
Movimiento del fondo	fondo estacionario
Rugosidad del fondo:	
Condición de cortantes	No Slip (Sin deslizamiento)
Altura de la rugosidad (m)	0.0000795
Constante de rugosidad	0.5
Nombre Zona	Aire circundante, Salida fase agua
Condición de frontera	
Opción	Pressure Outlet
Momentum	
Presión manométrica (Pascal)	0
Método de especificación de la dirección del contraflujo	Normal a la frontera
Opciones iniciales de la Turbulencia:	
Método de especificación	Intensidad de la turbulencia del contraflujo - Tasa de viscosidad del contraflujo
Intensidad de la turbulencia del contraflujo (%)	5 (caso de turbulencia Medio: Caudal en dispositivos no tan complejos como tubos con grandes flujos de ventilación, etc., o los flujos de baja velocidad (bajo número de Reynolds). Típicamente, la intensidad de la turbulencia es de entre 1% y 5%)
Tasa de viscosidad del contraflujo	1 (en las fronteras de corriente libre de la mayoría de los flujos externos $1 - 10 \mu_t/\mu$)
Fracción de volumen del contraflujo	0 (solo se devuelve aire)

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 10. Configuración de los métodos de solución en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de los métodos de solución	
Acoplamiento de la presión - velocidad	
Esquema	SIMPLE
Discretización espacial	
Gradientes	Least squares cell based
Presión	Body force weighed
Momentum	First order upwind
Fracción de volumen	Modified HRIC
Energía cinética turbulenta	First order upwind

Configuración de los métodos de solución	
Tasa de disipación específica	First order upwind

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 11. Configuración de los controles de solución en ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración de los controles de solución	
Factores bajo relajación	
Presión	0.1
Densidad	0.1
Fuerzas de cuerpo	0.1
Momentum	0.1
Fracción de volumen	0.1
Energía cinética turbulenta	0.1
Tasa de disipación específica	0.1
Viscosidad turbulenta	0.1

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 12. Configuración de los controles de solución en ANSYS FLUENT en 3D.

Configuración de los controles de solución	
Factores bajo relajación	
Presión	0.4
Densidad	0.4
Fuerzas de cuerpo	0.4
Momentum	0.4
Fracción de volumen	0.4
Energía cinética turbulenta	0.4
Tasa de disipación específica	0.4
Viscosidad turbulenta	0.4

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 13. Configuración de los monitores de residuales en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de los controles de solución			
Ecuaciones			
Residual	Monitoreo	Chequear convergencia	Criterio absoluto
Continuidad	Activo	Activo	1e-05
Componente velocidad x	Activo	Activo	1e-05
Componente velocidad y	Activo	Activo	1e-05
Componente velocidad z (solo para 3D)	Activo	Activo	1e-05
Energía cinética turbulenta	Activo	Activo	1e-05
Tasa de disipación específica	Activo	Activo	1e-05
Fracción de volumen fase agua	Activo	Activo	1e-05
Valores de referencia	Escala (Logarítmica)		
Criterio de convergencia	Absoluto		

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 14. Configuración de superficies de monitoreo con ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de las superficie de monitoreo	
Nombre superficie de monitoreo	q_agua_outlet_kg_s
Significado	Caudal másico de la fase agua a la salida (kg/s)
Tipo de reporte	Integral
Variable de campo	Función de campo personalizada
Función (2D)	Phase-2_agua-vof* Phase-2_agua-density*Vy (Vy: Componente velocidad en y)
Función (3D)	Phase-2_agua-vof* Phase-2_agua-density*Vz (Vz: Componente velocidad en z)
Superficie de monitoreo aplicado	Pressure_outlet_salida_agua
Nombre superficie de monitoreo	presion-estatica_mh2o
Significado	Presión estática en una sección (mH2O)
Tipo de reporte	Facet Maximum (Valor máximo de la cara de la celda)
Variable de campo	Función de campo personalizada
Función	Phase-2_agua-vof* p / 9792.34 (p: presión estática; peso específico agua : 9792.34 kg/m ³)
Superficie de monitoreo aplicado (2D)	Line-x#_canal (x#:posición en x)
Superficie de monitoreo aplicado (3D)	Plane-x#_canal (x#:posición en x)
Ubicación línea de monitoreo (superficie) Opción 1	Antes de la entrada al canal rectangular, cuando la lámina de agua es horizontal en el tanque.
Ubicación línea de monitoreo (superficie) Opción 2	En el flujo uniforme formado en el canal rectangular en cercanía de la descarga.

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 15. Configuración de la inicialización de la solución con ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de la inicialización de la solución	
Método de solución	Inicialización estándar
Calcular desde	Entrada de agua
Campo de referencia	Relativa a las celdas de la zona
Valores iniciales	El programa llama o calcula desde condiciones de frontera
Gauge presurre (pascal)	0 (El programa llama el valor desde condiciones de frontera)
Velocidad en x	El programa calcula por inclinación del dominio con el valor de la magnitud velocidad desde condiciones de frontera.
Velocidad en y	El programa calcula por inclinación del dominio con el valor de la magnitud velocidad desde condiciones de frontera.
Velocidad en z	El programa calcula por inclinación del dominio con el valor de la magnitud velocidad desde condiciones de frontera.
Fracción de volumen agua	0 (Inicial en todo el dominio)
Patch (parche)	Se colocó una región de agua simulando el tanque inicialmente lleno.

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 16. Configuración de actividades en los cálculos con ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de actividades en los cálculos	
Auto guardado cada (iteraciones)	5000

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 17. Configuración del arranque de cálculos con ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de arranque de cálculos	
Número de iteraciones	Según escenario
Intervalos de reporte	10
Intervalos de actualización del perfil	10
Archivos de datos de cantidades (parámetros para exportar a post procesamiento de ANSYS al no tenerlas por defecto)	Static pressure, pressure coefficient, dynamic pressure, absolute pressure, total pressure, relative total pressure, cell Reynolds number, turbulent intensity, turbulent dissipation rate (epsilon), production of k, turbulent viscosity, effective viscosity, turbulent viscosity ratio, wall Yplus, turbulent Reynolds number (Re_y), Skin friction coefficient, boundary cell distance, boundary normal distance, strain rate, dX-Velocity/dx, dY-Velocity/dx, dZ-Velocity/dx, dX-Velocity/dy, dY-Velocity/dy, dZ-Velocity/dy, dX-Velocity/dz, dY-Velocity/dz, dZ-Velocity/dz, dp-Dx, dp-Dy & dp-dZ.

Fuente. *Este estudio.*

3.1.6 Calcular la solución (verificación) y examinar los resultados (validación).

“La verificación es el procedimiento para garantizar que el programa resuelve las ecuaciones correctamente y la validación es el procedimiento para probar el grado en que el modelo representa con precisión la realidad” (Casey & Wintergerste, 2000, pág. 10). Para la verificación de la solución en las modelaciones en 1D, 2D y 3D, hasta alcanzar la convergencia, se utilizó:

- En las modelaciones en 1D, se verificó el traslapé del perfil de lámina de agua medida con el modelado.
- En las modelaciones en 2D y 3D, se monitoreó de los residuales de las ecuaciones de continuidad, componentes de velocidad (x, y, z), energía cinética turbulenta (k), tasa de disipación de energía específica (ω) y la fracción de volumen (VOF), hasta donde los cambios en las variables de la solución de una iteración a la siguiente son insignificantes, con un criterio de convergencia en un rango de 1×10^{-3} a 1×10^{-5} .
- En las modelaciones en 2D y 3D, se monitoreó el caudal másico de la fase agua en la salida de agua hasta alcanzar valores constantes en cada iteración y cercano al valor inyectado.
- En las modelaciones en 2D y 3D, se monitoreó la presión estática constante en las superficies localizadas hasta alcanzar valores constantes en cada iteración y cercano al valor medido.

Para validar las modelaciones en 1D, 2D y 3D se realizó la comparación de las mediciones realizadas en el canal ECI No. 2 de la altura de la lámina de agua en el eje central con las modelaciones

para caudales de 7.36 l/s, 17.00 l/s y 18.21 l/s. Con el caudal de 19.89 l/s no fue posible tomar datos ya que el sistema de bombeo solo alimento el canal hasta 18.21 l/s por causas desconocidas.

3.1.6.1 Verificación y validación del modelo en 1D

Los perfiles de lámina de agua calculados con el modelo en 1D de Runge Kutta de cuarto orden se compararon con los perfiles medidos de la lámina de agua en el eje central solo después del dissipador de energía. En la Figura 37 a Figura 39 se presenta los resultados de la comparación para la topología 3 y caudales Q1, Q2 y Q3.

3.1.6.2 Verificación y validación del modelo en 2D

Los perfiles de lámina de agua calculados con el modelo ANSYS FLUENT en 2D se comparó con los perfiles medidos de la lámina de agua en el eje central del tanque, canal y tomando algunos niveles en el dissipador de energía. En la Figura 40 a Figura 42 se presenta los resultados de la comparación para la topología 3 y caudales Q1, Q2 y Q3.

3.1.6.3 Verificación y validación del modelo en 3D

Los perfiles de lámina de agua calculados con el modelo ANSYS FLUENT en 3D se compararon con los perfiles medidos de la lámina de agua en el eje central del dissipador de energía, tanque y canal. En la Figura 43 a Figura 45 se presenta los resultados de la comparación para la topología 3 y caudales Q1, Q2 y Q3.

Tabla 18. Costo computacional de modelaciones en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Escenario	Celdas (#)	Costo computacional (horas)	Iteraciones (#)
T3_2D_Q1	97581	3	60000
T3_2D_Q2	95197	3	60000
T3_2D_Q3	95197	3	60000
T3_3D_Q1	2010867	19.5	7000
T3_3D_Q2	2119792	16	7000
T3_3D_Q3	1656580	16	7000

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 19. Verificación de modelaciones en 1D, 2D y 3D.

Escenario	Cantidad de interes	Medido	Error de medicion 4%		Modelado	Dentro del intervalo de confianza?	Error relativo (%)
			-4.00%	4.00%			
T3_1D_Q1	Caudal volumetrico (l/s)	7.360	7.066	7.654	7.360	Si	0.0%
	P. estática línea x0.29m (mh2o)	0.207	0.198	0.215	0.206	Si	0.2%
	Altura lámina en x0.29m (m)				0.206	Si	0.2%
	P. estática línea x5.0m (mh2o)	0.025	0.024	0.025	0.022	No	9.9%
	Altura lámina en x5.0m (m)				0.022	No	9.9%
T3_1D_Q2	Caudal volumetrico (l/s)	17.000	16.320	17.680	17.000	Si	0.0%
	P. estática línea x0.29m (mh2o)	0.251	0.241	0.261	0.242	Si	3.5%
	Altura lámina en x0.29m (m)				0.242	Si	3.5%
	P. estática línea x5.0m (mh2o)	0.042	0.041	0.044	0.040	No	6.7%
	Altura lámina en x5.0m (m)				0.040	No	6.7%
T3_1D_Q3	Caudal volumetrico (l/s)	18.210	17.482	18.938	18.210	Si	0.0%
	P. estática línea x0.29m (mh2o)	0.310	0.298	0.322	0.246	No	20.7%
	Altura lámina en x0.29m (m)				0.246	No	20.7%
	P. estática línea x5.0m (mh2o)	0.041	0.040	0.043	0.042	Si	0.4%
	Altura lámina en x5.0m (m)				0.042	Si	0.4%
T3_2D_Q1	Caudal másico/ancho canal (kg/s)	19.436	18.659	20.213	19.422	Si	0.1%
	P. estática línea x0.29m (mh2o)	0.207	0.198	0.215	0.202	Si	2.0%
	Altura lámina en x0.29m (m)				0.205	Si	0.6%
	P. estática línea x5.0m (mh2o)	0.025	0.024	0.025	0.022	No	11.4%
	Altura lámina en x5.0m (m)				0.022	No	9.0%
T3_2D_Q2	Caudal másico/ancho canal (kg/s)	44.890	43.094	46.686	44.930	Si	0.1%
	P. estática línea x0.29m (mh2o)	0.251	0.241	0.261	0.241	Si	3.9%
	Altura lámina en x0.29m (m)				0.229	No	8.7%
	P. estática línea x5.0m (mh2o)	0.042	0.041	0.044	0.039	No	7.8%
	Altura lámina en x5.0m (m)				0.040	No	6.0%
T3_2D_Q3	Caudal másico/ancho canal (kg/s)	48.090	46.166	50.014	47.664	Si	0.9%
	P. estática línea x0.29m (mh2o)	0.310	0.298	0.322	0.245	No	21.0%
	Altura lámina en x0.29m (m)				0.233	No	24.8%
	P. estática línea x5.0m (mh2o)	0.041	0.040	0.043	0.041	Si	0.5%
	Altura lámina en x5.0m (m)				0.042	Si	1.0%
T3_3D_Q1	Caudal másico (kg/s)	7.346	7.052	7.640	7.565	Si	3.0%
	P. estática línea x0.29m (mh2o)	0.207	0.198	0.215	-	-	-
	Altura lámina en x0.29m (m)				0.202	Si	2.3%
	P. estática línea x5.0m (mh2o)	0.025	0.024	0.025	0.023	No	6.1%
	Altura lámina en x5.0m (m)				0.023	No	5.4%
T3_3D_Q2	Caudal másico (kg/s)	16.970	16.291	17.649	17.077	Si	0.6%
	P. estática línea x0.29m (mh2o)	0.251	0.241	0.261	-	-	-
	Altura lámina en x0.29m (m)				0.249	Si	0.6%
	P. estática línea x5.0m (mh2o)	0.042	0.041	0.044	0.040	No	4.7%
	Altura lámina en x5.0m (m)				0.041	Si	3.5%
T3_3D_Q3	Caudal másico (kg/s)	18.177	17.450	18.904	18.444	Si	1.5%
	P. estática línea x0.29m (mh2o)	0.256	0.245	0.266	-	-	-
	Altura lámina en x0.29m (m)				0.250	Si	2.3%
	P. estática línea x5.0m (mh2o)	0.041	0.040	0.043	0.043	Si	2.7%
	Altura lámina en x5.0m (m)				0.043	Si	3.8%

Fuente. Este estudio.

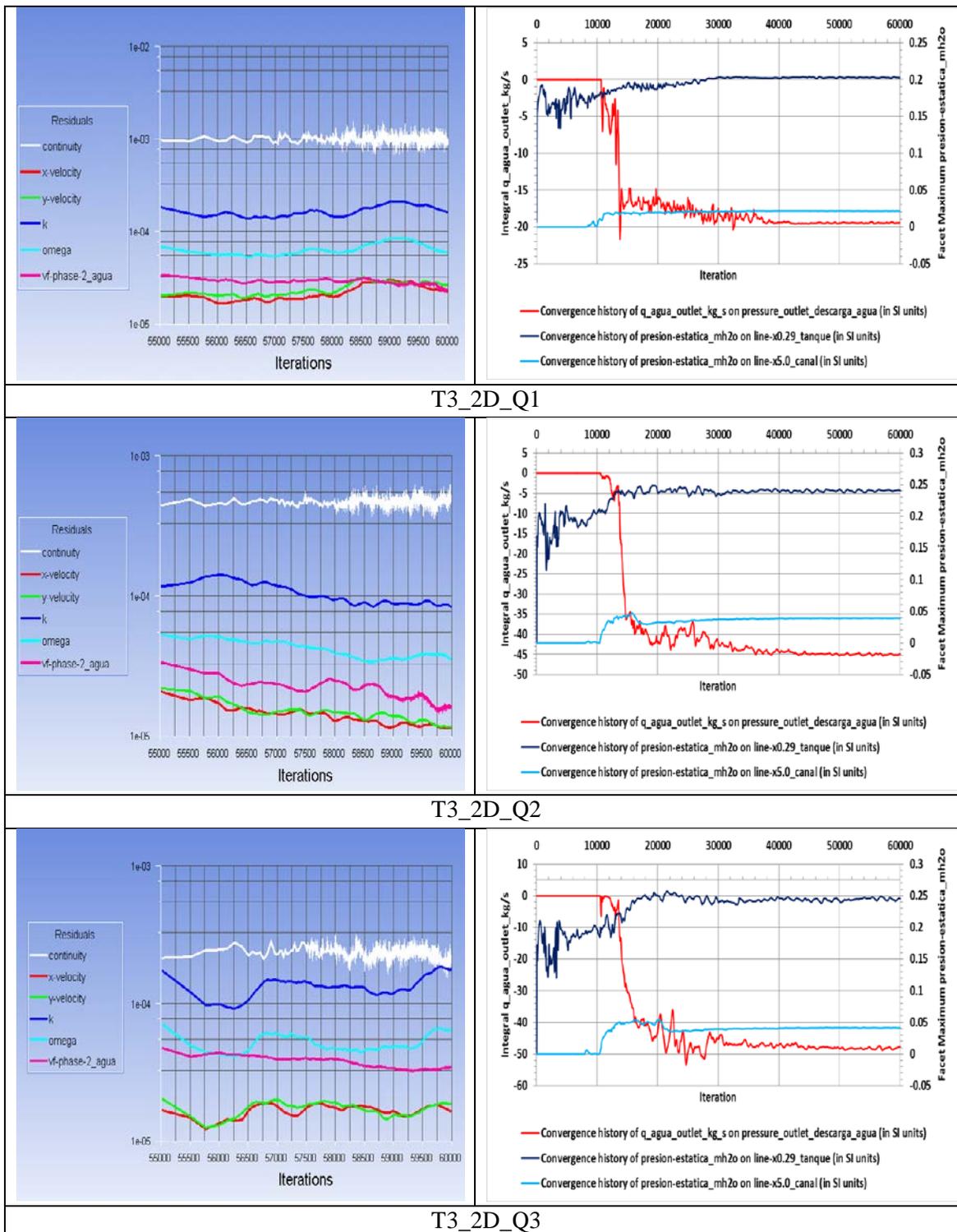


Figura 35. Perfiles de monitoreo de residuales (derecha) y perfiles de monitoreo de las cantidades de interés (izquierda).

Fuente. *Este estudio.*

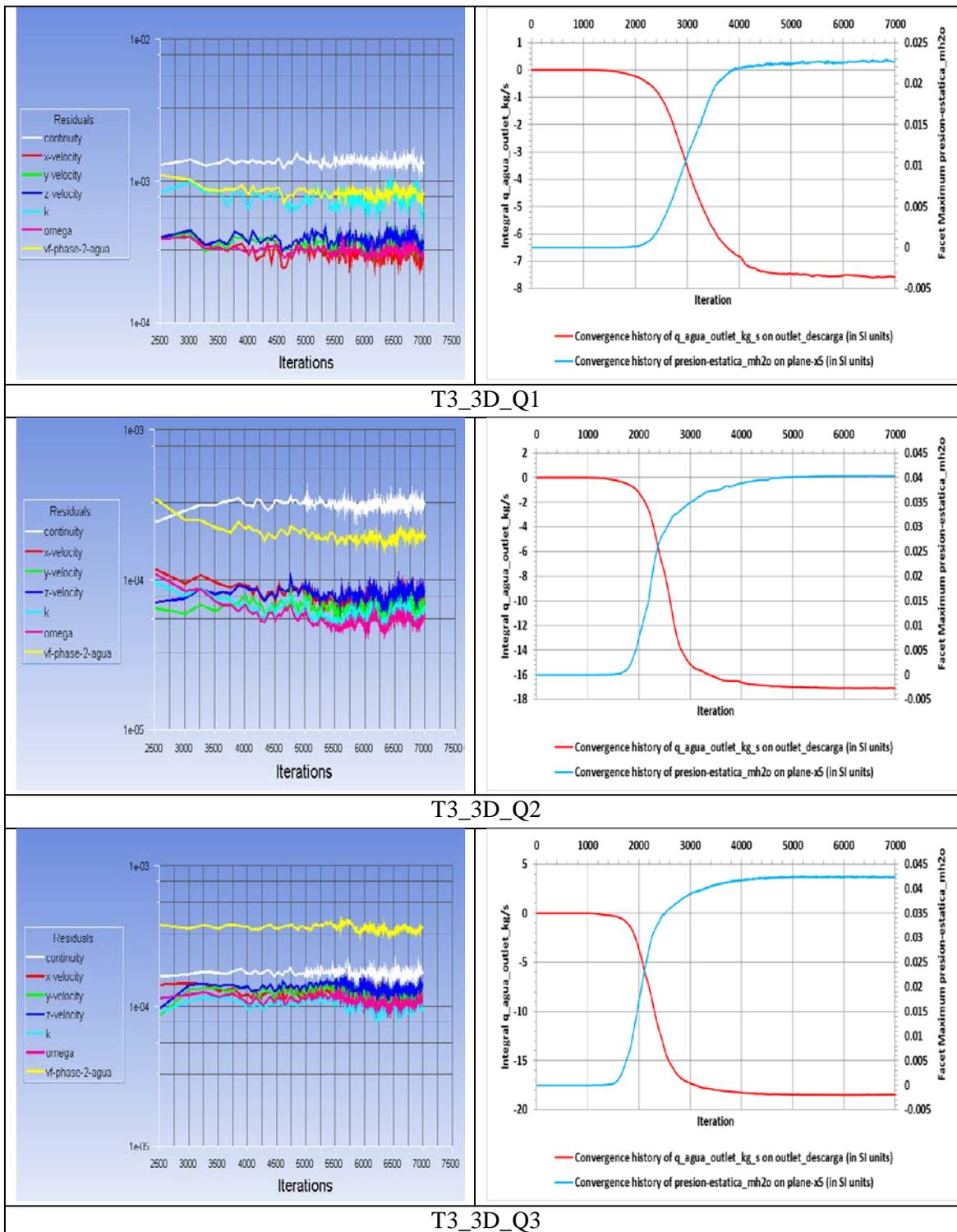


Figura 36. Perfiles de monitoreo de residuales (derecha) y perfiles de monitoreo de las cantidades de interés (izquierda).

Fuente. *Este estudio.*

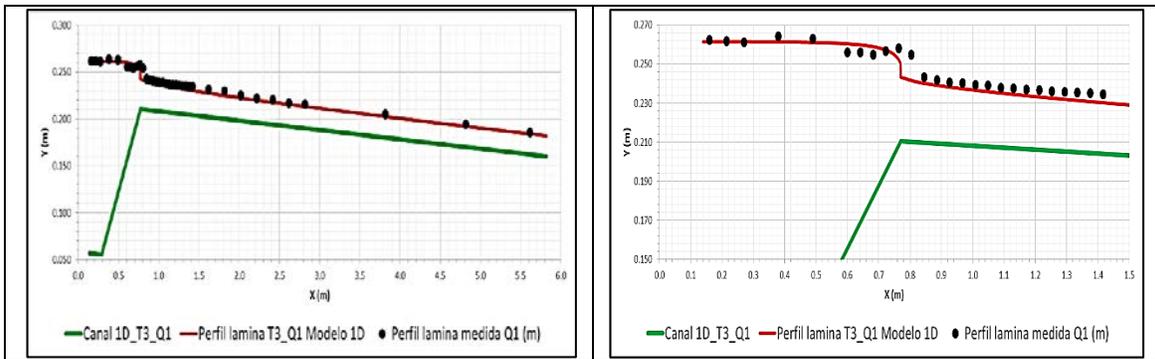


Figura 37. Perfil lámina de agua medido vs 1D, T3_1D_Q1 (En el eje central).

Fuente. *Este estudio.*

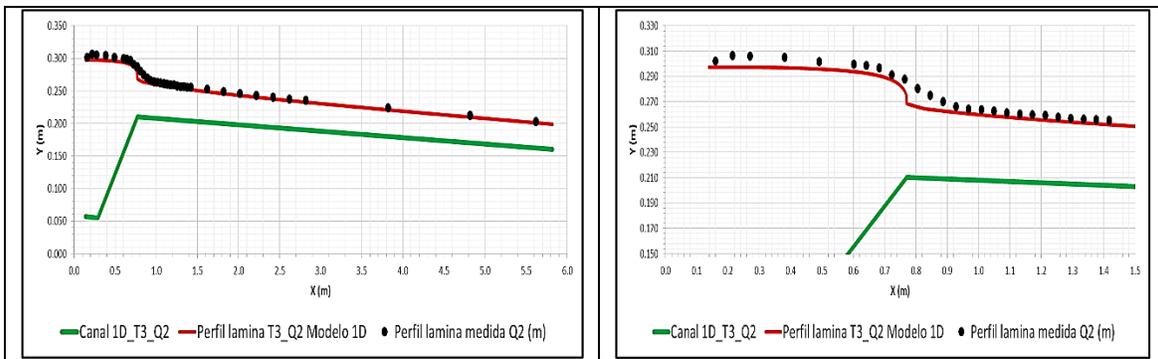


Figura 38. Perfil lámina de agua medido vs 1D, T3_1D_Q2 (En el eje central).

Fuente. *Este estudio.*

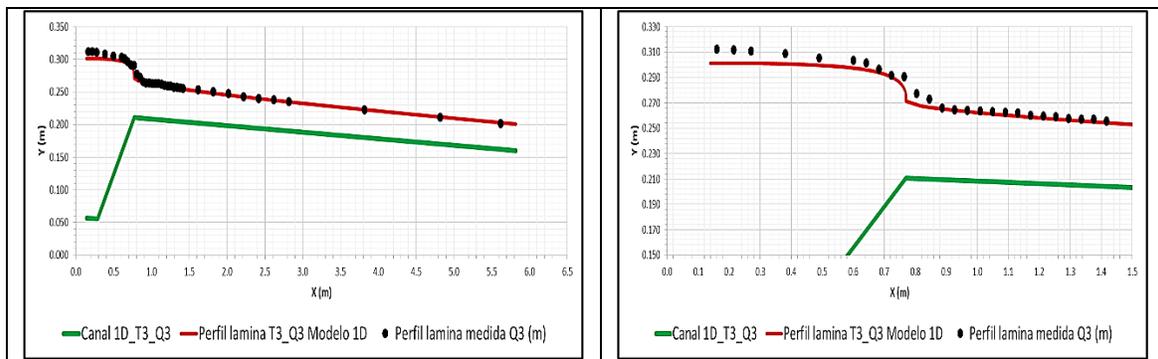


Figura 39. Perfil lámina de agua medido vs 1D, T3_1D_Q3 (En el eje central).

Fuente. *Este estudio.*

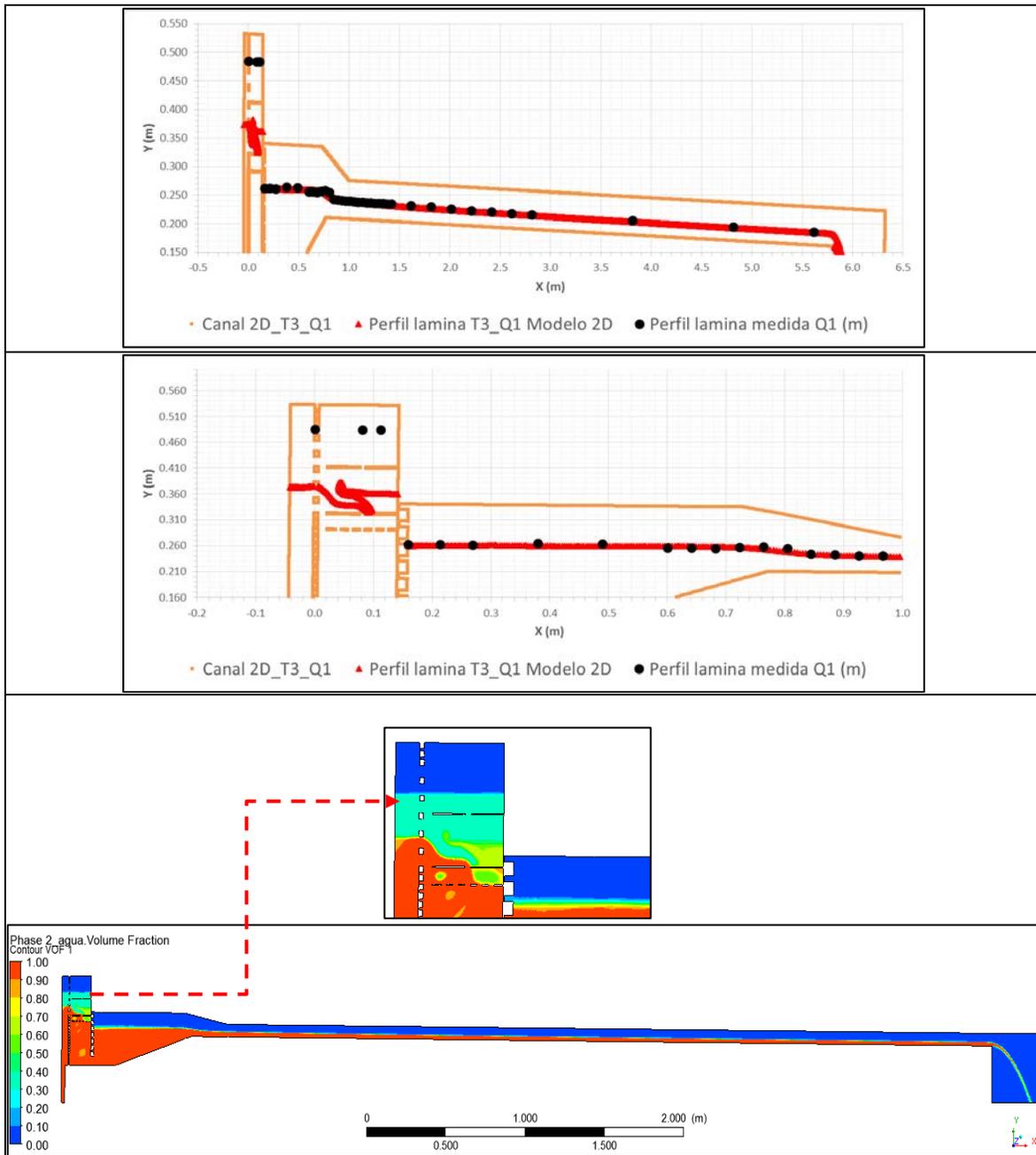


Figura 40. Perfil lámina de agua Medido vs 2D, T3_2D_Q1 (En el eje central).

Fuente. Este estudio.

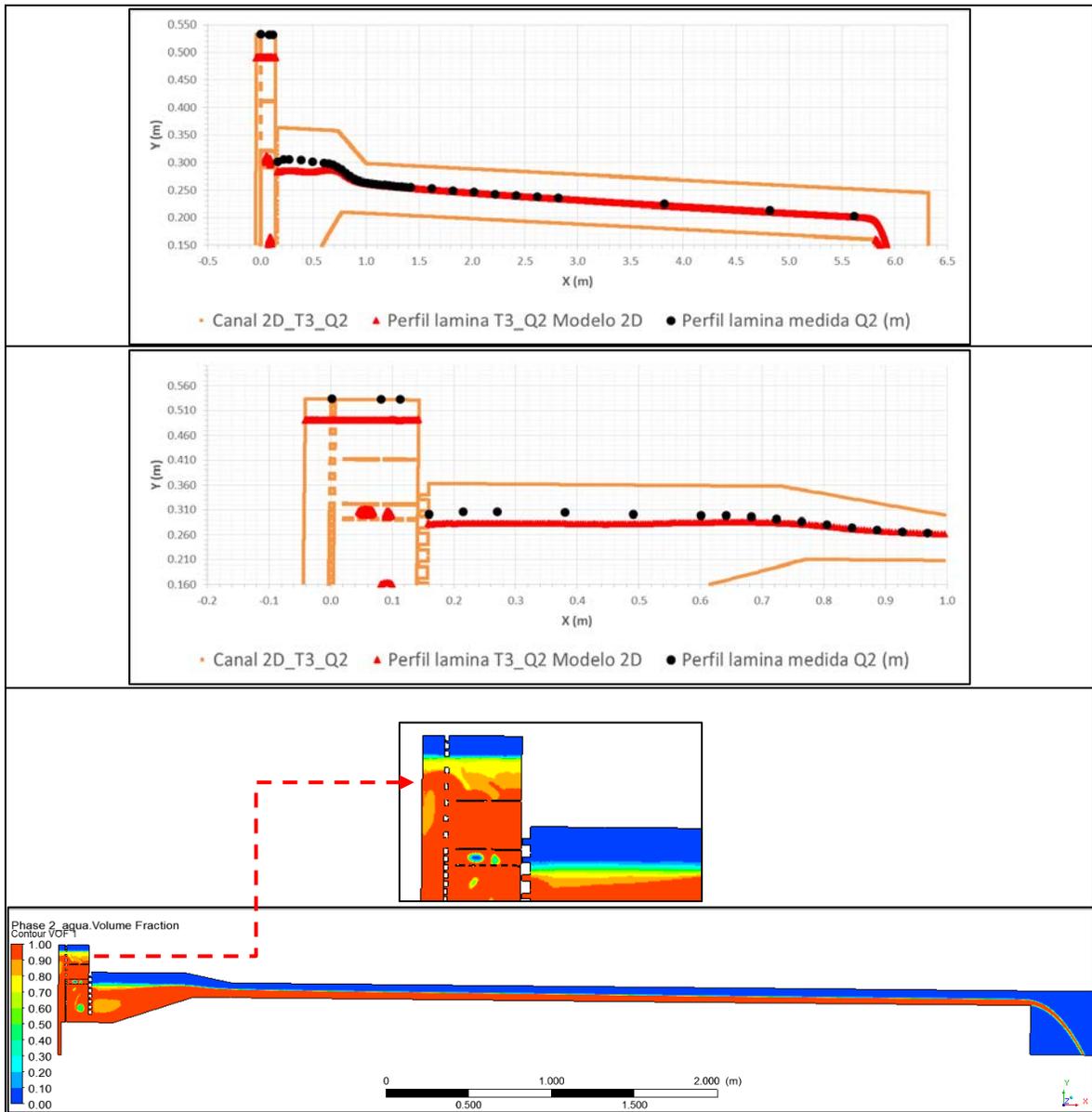


Figura 41. Perfil lámina de agua Medido vs 2D, T3_2D_Q2 (En el eje central).

Fuente. *Este estudio.*

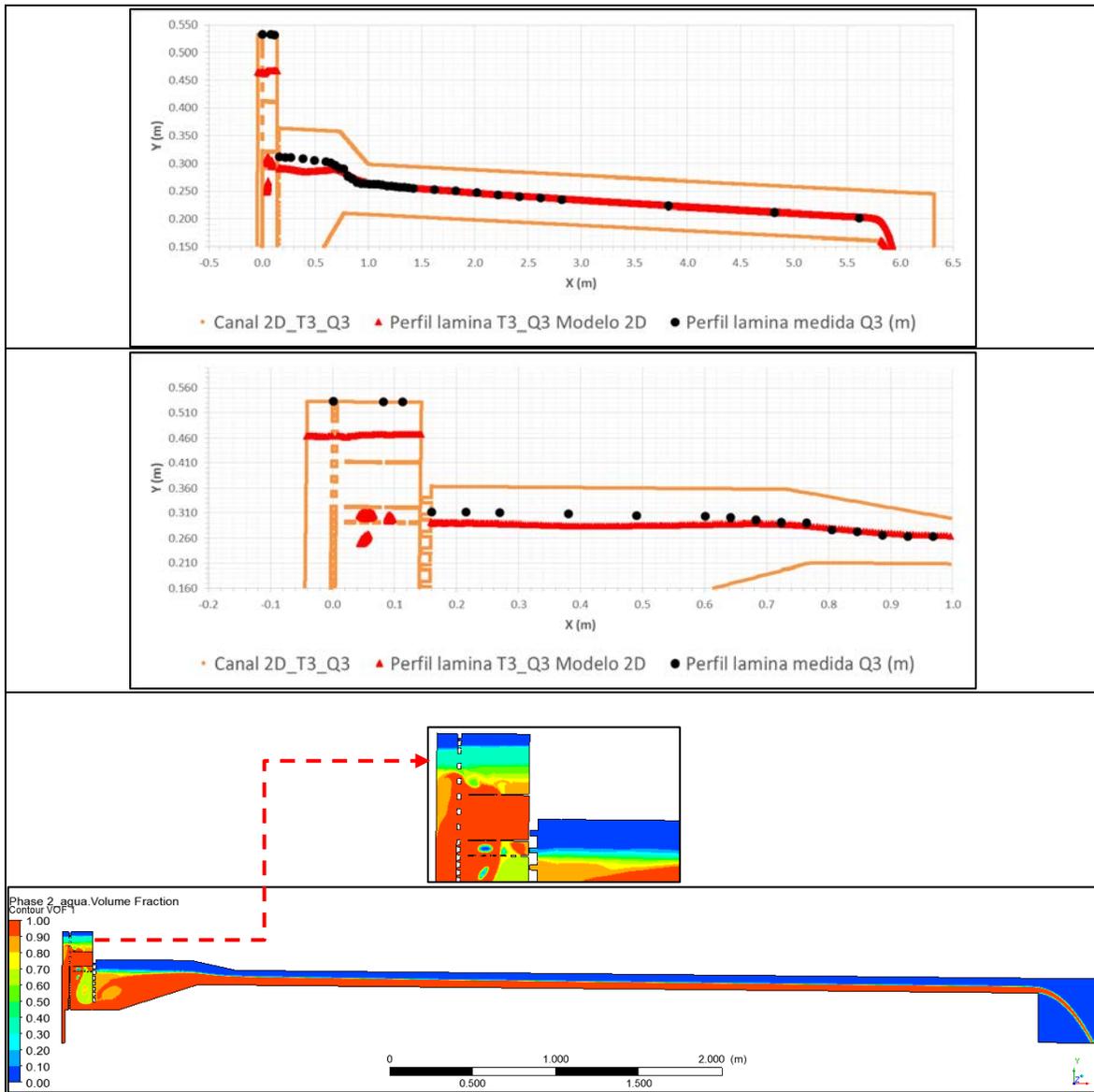


Figura 42. Perfil lámina de agua Medido vs 2D, T3_2D_Q3 (En el eje central).

Fuente. *Este estudio.*

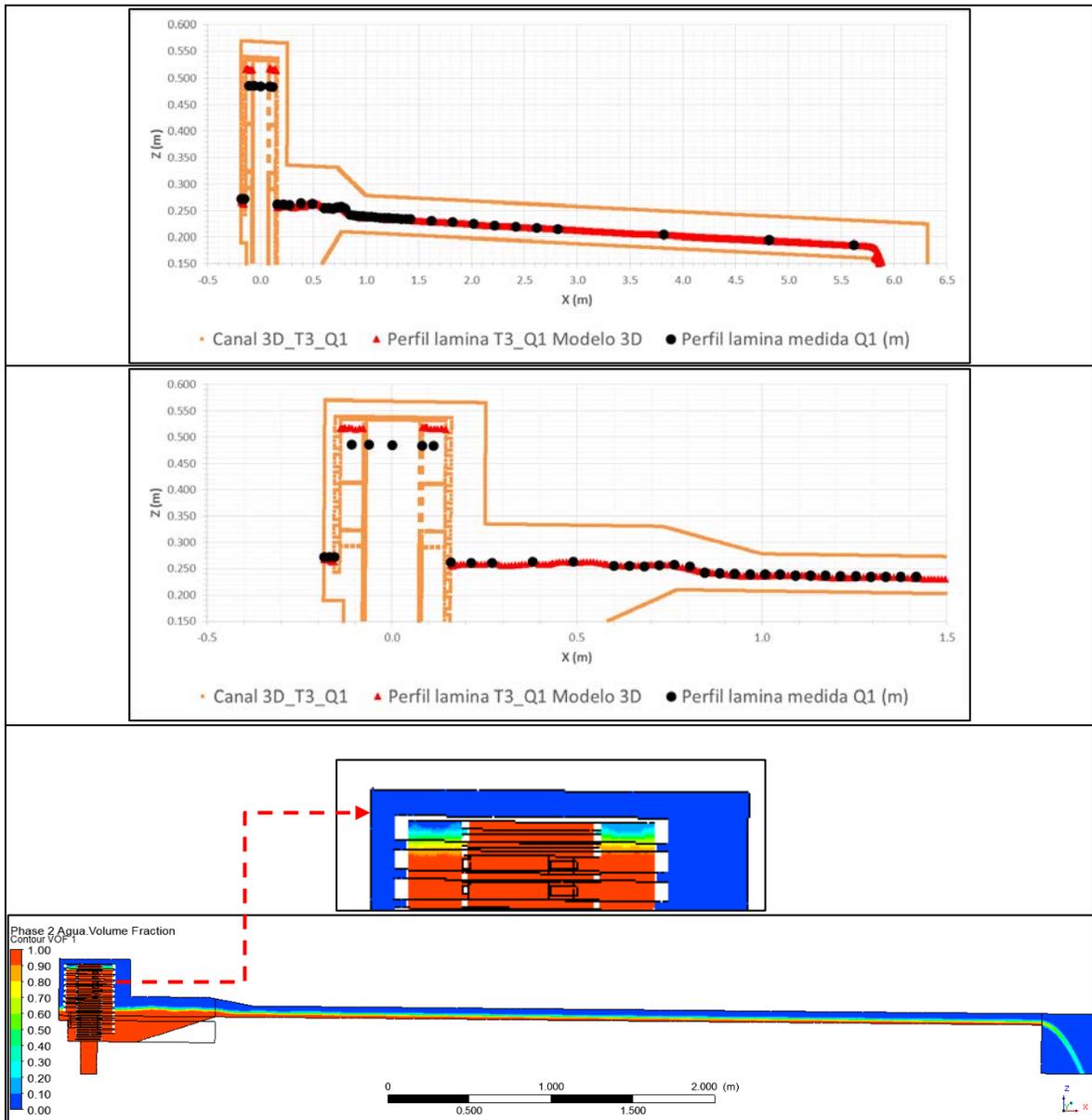


Figura 43. Perfil lámina de agua Medido vs 3D, T3_3D_Q1 (En el eje central).

Fuente. *Este estudio.*

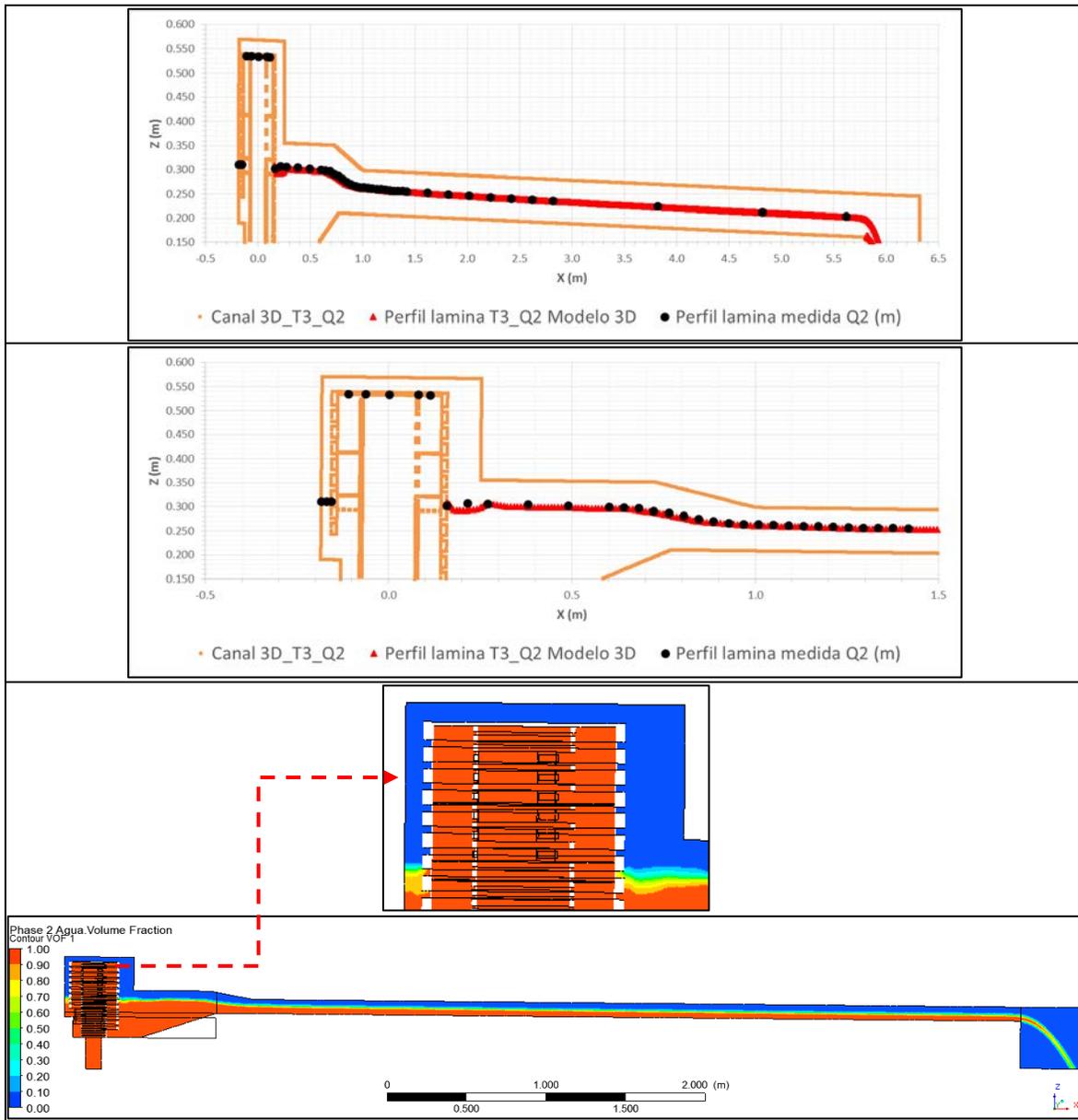


Figura 44. Perfil lámina de agua Medido vs 3D, T3_3D_Q2 (En el eje central).

Fuente. *Este estudio.*

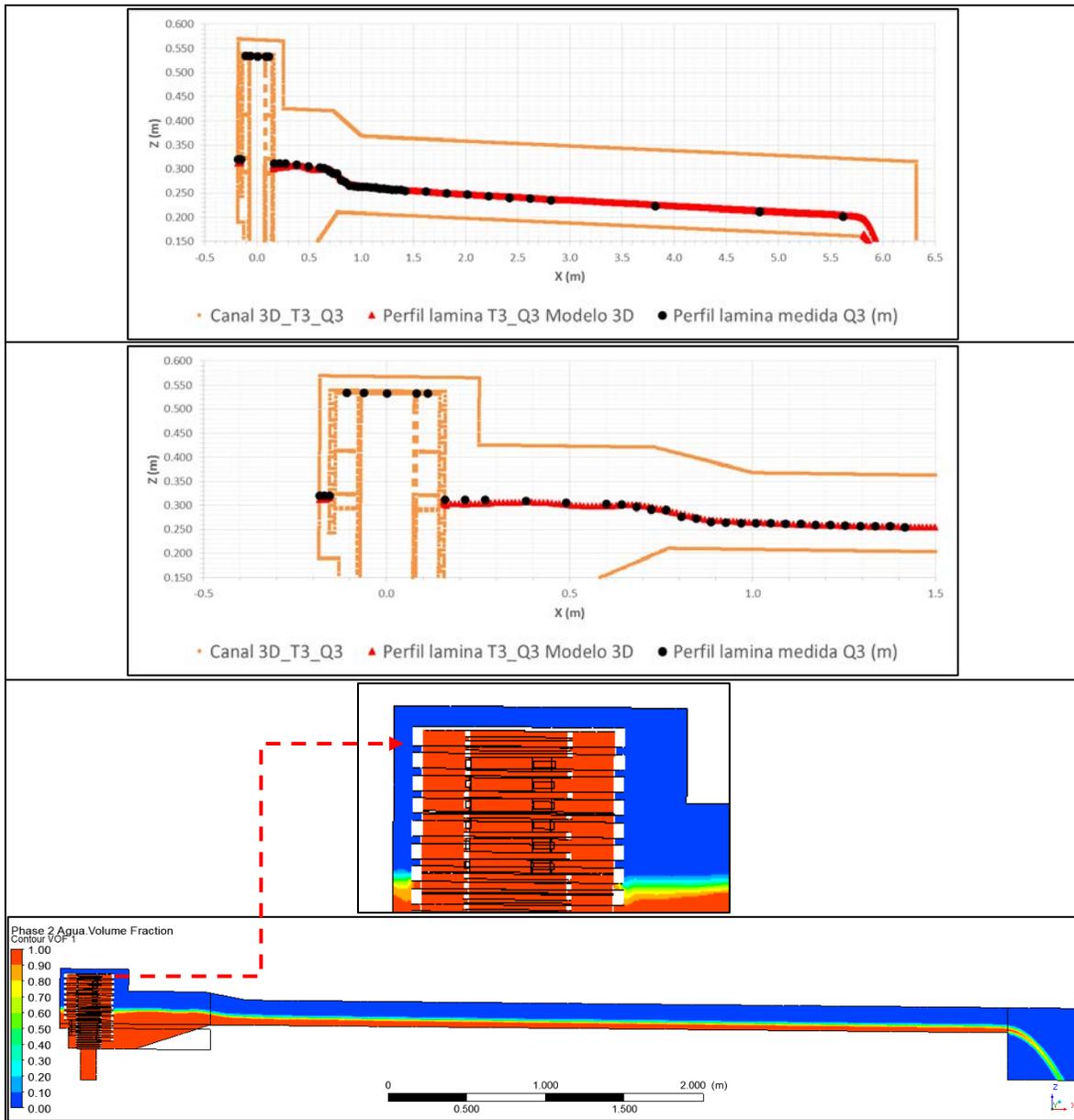


Figura 45. Perfil lámina de agua Medido vs 3D, T3_3D_Q3 (En el eje central).

Fuente. *Este estudio.*

3.1.7 Revisión del modelo (análisis de la validación).

Como se apreció en la validación del modelo en 1D, el perfil de la lámina de agua se ajustó con el perfil medido a excepción de la altura crítica que inicia en el borde inicial del canal. Con respecto a la validación del modelo en 2D, se evidencia que el perfil se ajusta en el tanque y canal solo con el caudal Q1 con características muy tranquilas a excepción del dissipador de energía, sin embargo para Q2 y Q3 los perfiles solo se ajusta en el canal, indicando que la influencia de las secciones variables de la geometría en el dissipador y tanque juegan un papel importante en el equilibrio hidrodinámico de un fluido y que las simplificaciones de la geometría propuesta no es suficiente para demostrar la presencia de flujos 3D, donde los modelos en 3D fueron más acertados en el ajuste del perfil de la lámina de agua. A continuación, se presenta un resumen del anteriormente descrito donde el color verde representa la aceptación completa o con alguna restricción de la modelación:

Tabla 20. Evaluación del perfil de lámina de agua medida vs modelada.

Escenario	Lámina de agua en el Dissipador de energía	Lámina de agua en el Tanque	Lámina de agua en el Canal rectangular
T3_1D_Q1	N.A.	Se ajusta al perfil medido	Hay incertidumbre en el perfil medido. Existe un desplazamiento longitudinal de la altura crítica.
T3_1D_Q2	N.A.	Se ajusta al perfil medido	No se ajusta al perfil medido.
T3_1D_Q3	N.A.	No se ajusta al perfil medido.	Se ajusta al perfil medido aguas abajo del canal rectangular. Existe un desplazamiento longitudinal de la altura crítica.
T3_2D_Q1	No se ajusta al perfil medido	Se ajusta al perfil medido	Hay incertidumbre en el perfil medido
T3_2D_Q2	No se ajusta al perfil medido	No se ajusta al perfil medido	Hay incertidumbre en el perfil medido
T3_2D_Q3	No se ajusta al perfil medido	No se ajusta al perfil medido	Se ajusta al perfil medido
T3_3D_Q1	Hay incertidumbre por difusión numérica al perfil medido.	Se ajusta al perfil medido	Hay incertidumbre en el perfil medido
T3_3D_Q2	Se ajusta al perfil medido	Se ajusta al perfil medido	Se ajusta al perfil medido
T3_3D_Q3	Se ajusta al perfil medido	Se ajusta al perfil medido	Se ajusta al perfil medido

Nota: N.A.= No aplica.

Fuente. *Este estudio.*

Las posibles razones de las variaciones de alturas de lámina de agua medida versus modeladas son:

- En el momento de la medición, el flujo al interior del dissipador de energía y el que salía del mismo, tenía un comportamiento fluctuante sin que el medidor de flujo lo registrara, lo cual no era posible tener una medición instantánea con el flexómetro y la aguja de medición de la altura de lámina.
- En el canal se realizó pruebas de otro proyecto antes de las mediciones del presente estudio, donde se ensambló un vertedero en el que se utilizó silicona líquida para su fijación, lo que pudo ocasionar variación en la rugosidad aguas abajo del canal donde fue localizado aun siendo desmantelado.
- Para el caudal 7.36 l/s, el nivel de agua fluctuó y contenía burbujas en el interior del dissipador de energía, podría explicar la dispersión numérica y el comportamiento aguas abajo del canal rectangular en los modelos 2D y 3D.
- Para caudales 17 l/s y 18.42 l/s, el dissipador de energía se encuentra presurizado, por lo que se toma nivel de agua a tope del nivel superior.
- El modelo de turbulencia k-ε puede que aun influya en el perfil de flujo ya que asume un flujo isotrópico y no un anisotrópico lo cual puede sobre estimar la producción de energía turbulenta, aunque tenga submodelos que lo amortigüe.

Encontrando un nivel aceptable entre lo medido y lo modelado en cuanto la altura de la lámina de agua en 3D, se asume una buena estimación teniendo en cuenta errores de medición que pudieron presentarse en el modelo físico y la baja calidad de la malla en lugares del dominio que influye en el modelo matemático como en su elección. Por lo anterior, se considera posible realizar un análisis de resultados arrojados por las modelaciones de los escenarios que se presenta a continuación en 3D (Parte 1). Los modelos en 1D y 2D al tener perfiles característicos sin perturbaciones en una sección transversal uniforme y no tener en cuenta flujos tridimensionales, se utilizaron como base comparativa con los modelos 3D. Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta a continuación los escenarios definitivos utilizados para las modelaciones comparativas y su correspondiente análisis.

Tabla 21. Escenarios utilizados para modelaciones del canal ECI No. 2.

Topología	Caudal	Pendiente canal	Código Escenario	Escenario No.
T0a_1D	Q1	1%	T0a_1D_Q1	1
	Q2	1%	T0a_1D_Q2	2
	Q3	1%	T0a_1D_Q3	3
	Q4	1%	T0a_1D_Q4	4
T0b_1D	Q1	1%	T0b_1D_Q1	5
	Q2	1%	T0b_1D_Q2	6
	Q3	1%	T0b_1D_Q3	7
	Q4	1%	T0b_1D_Q4	8
T1_1D	Q1	1%	T1_1D_Q1	9
	Q2	1%	T1_1D_Q2	10
	Q3	1%	T1_1D_Q3	11
	Q4	1%	T1_1D_Q4	12
T2_1D	Q1	1%	T2_1D_Q1	13
	Q2	1%	T2_1D_Q2	14
	Q3	1%	T2_1D_Q3	15
	Q4	1%	T2_1D_Q4	16
T3_1D	Q1	1%	T3_1D_Q1	17
	Q2	1%	T3_1D_Q2	18
	Q3	1%	T3_1D_Q3	19
	Q4	1%	T3_1D_Q4	20
T0a_2D	Q1	1%	T0a_2D_Q1	21
	Q2	1%	T0a_2D_Q2	22
	Q3	1%	T0a_2D_Q3	23
	Q4	1%	T0a_2D_Q4	24
T0b_2D	Q1	1%	T0b_2D_Q1	25
	Q2	1%	T0b_2D_Q2	26
	Q3	1%	T0b_2D_Q3	27
	Q4	1%	T0b_2D_Q4	28
T1_3D	Q1	1%	T1_3D_Q1	29
	Q2	1%	T1_3D_Q2	30
	Q3	1%	T1_3D_Q3	31
	Q4	1%	T1_3D_Q4	32
T2_3D	Q1	1%	T2_3D_Q1	33
	Q2	1%	T2_3D_Q2	34
	Q3	1%	T2_3D_Q3	35
	Q4	1%	T2_3D_Q4	36
T3_3D	Q1	1%	T3_3D_Q1	37
	Q2	1%	T3_3D_Q2	38
	Q3	1%	T3_3D_Q3	39
	Q4	1%	T3_3D_Q4	40

3.2 Metodología para la modelación en flujo no permanente

El plan de trabajo que se siguió es igual al presentado en la Figura 26 para cumplir con las modelaciones en 2D en flujo permanente y no permanente del canal ECI No.1, actividades que se describen a continuación.

3.2.1 Definición de las metas de la modelación.

Los resultados y variables de interés que se buscaron son:

- Modelar la altura de la lámina de agua en flujo permanente.
- Modelar la altura de la lámina de agua en flujo no permanente.
- Analizar la distribución de la presión dinámica y presión estática del flujo agua en el sistema del canal de laboratorio ECI No. 1.

Las opciones de modelación y simplificaciones que se tuvieron en cuenta fueron:

- Para las modelaciones comparativas se tomó en cuenta los resultados de las modelaciones de los ejemplos 5.4.1 y 5.4.2 con el método de las características, como también datos de medición de caudal y altura de lámina de agua, del trabajo de grado de Arenas Amado (2002, págs. 120 - 131).
- Para las modelaciones en 2D se realizó simplificaciones en el dominio por unidad de ancho. Ya que la tubería de alimentación del canal no se extiende completamente en dirección transversal, se realizó una expansión hasta alcanzar el ancho del canal. Además, se hicieron modelaciones extras iniciales en flujo permanente para el caudal mínimo y máximo del hidrograma de entrada para realizar una revisión preliminar de las alturas de lámina de agua mínimas y máximas con respecto a los limnigramas medidos en cada transductor. La condición inicial de la fase agua para las modelaciones en flujo no permanente fue establecer el nivel de agua en flujo permanente en el tanque de aquietamiento y canal rectangular para el caudal mínimo de hidrograma de entrada.

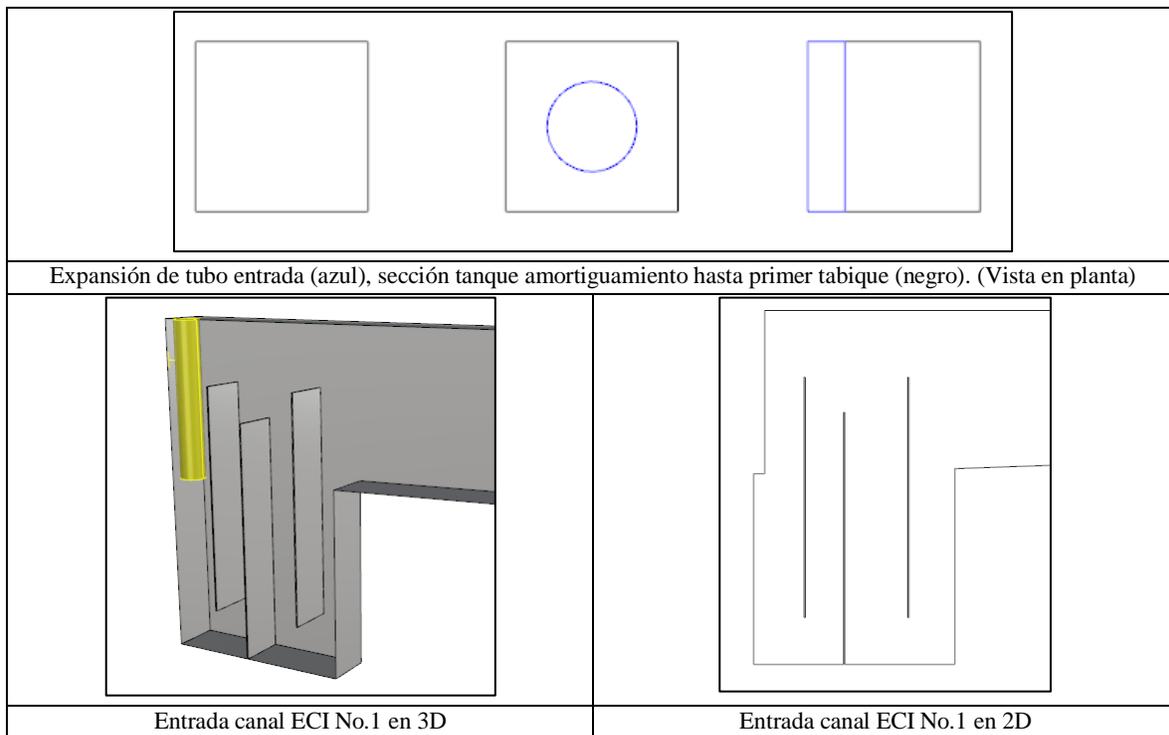


Figura 46. Simplificación del canal ECI No. 1 en 2D.

Fuente. *Este estudio*.

Modelo físico a utilizar: Como se comentó anteriormente, el modelo físico que se necesitó para el análisis y validación de las modelaciones es el canal de laboratorio ECI No. 1 el cual conduce agua en su interior teniendo en cuenta la superficie libre generada por diferentes caudales (hidrograma).

Grado de precisión que se requiere: este punto tiene que ver con la comparación cuantitativa o validación entre las mediciones y las modelaciones realizadas de la altura de la lámina de agua en flujo permanente y no permanente, estableciendo como criterio un intervalo de confianza un error del 4% de los datos medidos, donde los resultados de las modelaciones deberán estar dentro de este rango para su aceptación. Aunque las guías de modelación consultadas aconsejan un error del 1%, la incertidumbre por errores se da por dos aspectos que se tuvieron en cuenta que es la precisión de los transductores de presión manométrica con un rango de 0 a 1psi de + o -0.25% que generan una señal análoga de 4-20mA proporcional al rango de medición y por la localización del medidor de flujo en la tubería de alimentación de agua con una longitud de 9.8 m aproximadamente al canal, utilizados en el estudio de referencia.

Herramienta CFD: Como se observa en la revisión de la literatura, ANSYS FLUENT es una de las herramientas de modelación de la dinámica de fluidos computacional más utilizadas y verificadas en proyectos de modelación en 2D y 3D de estructuras hidráulicas, en consecuencia, se determinó que este instrumento computacional es el más adecuado para el desarrollo del presente estudio.

3.2.2 Identificación del dominio.

El dominio descrito de forma general a modelar comprende parte del sistema del canal de laboratorio ECI No. 1 donde parte de la sección final de la tubería de entrada o alimentación de 4”, tanque de amortiguamiento con tabiques, canal rectangular y un tanque imaginario para la descarga.

Para realizar el análisis comparativo para verificar y validar el modelo ANSYS 2D en flujo no permanente, se propone en primera instancia un escenario de modelación en cuanto a caudal en flujo permanente para un caudal mínimo (inicial) y máximo (pico). El segundo escenario de modelación es en flujo no permanente donde se incluye un hidrograma de entrada para la fase agua por medio de una función definida por el usuario (udf, por sus siglas en inglés) llamada “hidrograma.c”, donde se programa en lenguaje C con ecuaciones polinómicas que calculan el caudal para diferentes rangos de tiempo. A partir de la fase de validación de resultados de modelación con lo medido en el modelo físico del canal ECI No. 1 en flujo permanente se realizó la parte del análisis comparativo en flujo no permanente. A continuación, se presenta los caudales utilizados teniendo en cuenta la Figura 47 de mediciones de caudal para las modelaciones, como también la descripción de la topología propuesta. Posteriormente, se presenta la lista de los escenarios propuestos antes de la validación para las modelaciones del canal ECI No. 1.

Tabla 22. Caudales utilizados para modelaciones en flujo permanente en el canal ECI No.1.

Caudal volumétrico Q (m ³ /s)	Flujo másico q (kg/s)	Código
0.0021	10.91	Qmín.
0.0188	97.74	Qmáx

Fuente. *Este estudio.*

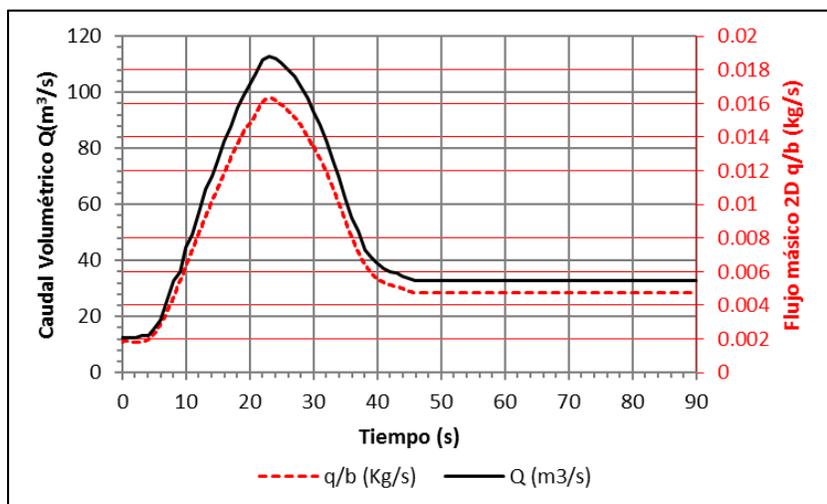


Figura 47. Hidrograma de entrada para modelaciones en flujo no permanente del canal ECI No.1 en 2D.
Fuente. *Este estudio*.

Tabla 23. Ecuaciones para hidrograma de entrada para modelaciones en flujo no permanente.

Rango de tiempo	Ecuación
t0 - t20	$q_{0-20} = -0.0000197236754 \cdot t^6 + 0.0012688478392 \cdot t^5 - 0.0308093510735 \cdot t^4 + 0.3298175263335 \cdot t^3 - 1.1286530243815 \cdot t^2 + 1.1232699633401 \cdot t + 10.8738511456904$ $R^2 = 0.9992332554056$
t20 - t30	$q_{20-30} = 0.000802971 \cdot t^6 - 0.121906678 \cdot t^5 + 7.677561057 \cdot t^4 - 256.687506818 \cdot t^3 + 4803.604694863 \cdot t^2 - 47690.776339653 \cdot t + 196264.002619207$ $R^2 = 0.999431616$
t30 - t47	$q_{30-47} = 0.0000370940732 \cdot t^6 - 0.0084339228121 \cdot t^5 + 0.7921875904564 \cdot t^4 - 39.3299056614952 \cdot t^3 + 1088.2934384165600 \cdot t^2 - 15918.0693935899000 \cdot t + 96296.8768915139000$ $R^2 = 0.999557428514$
t47 - t90	$q_{47-90} = 28.5942708333333$

Fuente. *Este estudio*. t: Tiempo (s), q: Flujo másico por unidad de ancho en 2D (kg/s)

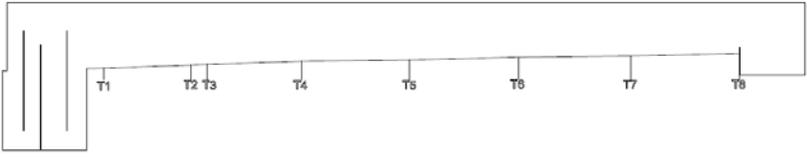
Nombre topología	Código	Esquema 2D
Canal con tanque de quietamiento y tabiques	CTT_2D	

Figura 48. Topología propuesta antes de la validación del modelo del canal ECI No. 1 en 2D. T#: Transductor.

Fuente. *Este estudio*.

Tabla 24. Longitudes y pendientes del fondo del canal entre transductores del canal ECI No. 1.

Transductor			Longitud (m)	Pendiente So			
1	a	2	0.8	-0.033	m/m	-1.8901	grados
2	a	3	0.15	-0.034	m/m	-1.9473	grados
3	a	4	0.87	-0.034	m/m	-1.9473	grados
4	a	5	0.99	-0.013	m/m	-0.7448	grados
5	a	6	1	-0.023	m/m	-1.3176	grados
6	a	7	1.03	-0.012	m/m	-0.6875	grados
7	a	8	1	-0.023	m/m	-1.3176	grados

Fuente. Adaptado de (Arenas Amado, 2002, pág. 120).

Tabla 25. Escenarios propuestos antes de la validación para modelaciones del canal ECI No. 1.

Topología	Caudal	Pendiente canal	Código Escenario	Escenario No.
CTT_2D	Qmín.	Adversa (Variable)	CTT_2D_Qmín.	1
	Qmáx.	Adversa (Variable)	CTT_2D_Qmáx.	2

Fuente. *Este estudio*.

3.2.3 Creación de un modelo del dominio.

Para crear el modelo del dominio a partir de las mediciones de la geometría del modelo físico, se empleó la herramienta CAD Rhinoceros (Rhinoceros 5.0, 2016). Se simplificó el modelo con el objetivo de no complicar el mallado removiendo partes como tornillos, juntas entre vidrios y acrílicos, y el carril de aluminio de la parte superior del canal para transportar la aguja de medición. También se simplificó la rugosidad del material de las partes del canal como un solo material liso con un n de Manning promedio de 0.0087 equivalente a una rugosidad desde la ecuación de Strickler $k_s = (n/0.0122)^6 / 1000 = (0.0087/0.0122)^6 / 1000 = 0.00013m$.

3.2.4 Diseño y creación de la malla.

Para diseñar y crear la malla del dominio en 2D se utilizó las herramientas de la plataforma de ANSYS como es el generador de malla Mesh-Workbench para 2D. Para dominios 2D se utilizó un mallado fino con celdas cuadradas estructuradas de tamaño 0.00025m a 0.0007m (en gran parte del dominio) como configuración global, utilizada para modelaciones en flujo no permanente según la revisión de la literatura, aunque también se la utilizó para las modelaciones en flujo permanente.

El dominio contiene regiones con gradientes de velocidad y de presión al contener tabiques en el tanque de quietamiento, un escalón al iniciar el canal rectangular, un tanque lleno que funciona parcialmente de quietamiento los cuales provocan flujos con recirculación y a la vez desaceleración del agua, por ende, la malla debe resolver las características geométricas de interés y capturar gradientes.

El costo computacional se refiere a la rapidez que se necesita obtener los resultados. Como se observa en la revisión de la literatura, el tiempo en que se obtiene un resultado que varía según la maquina computacional (hardware), modelos utilizados y dimensión del dominio. Para el proceso de cálculo del presente estudio se utilizó un computador personal con procesador Intel® Core™ i7 – 4700HQ CPU @ 2.40GHz - 2.39GHz, 4 núcleos y 8 procesadores lógicos, 16 GB de memoria RAM y tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE GTX 760M, esperando una efectividad en cálculos aproximadamente de 2 horas para flujo permanente y una semana para flujo permanente, teniendo como referencia el estudio de Ramazza (2008).

En el diseño de la malla se tuvo en cuenta la altura de la primera celda que comprenda un y^+ entre 1 – 10 para regiones con recirculación con gradientes de presión y velocidad, como también y^+ entre 30 y 500 para regiones donde el flujo turbulento este en desarrollo.

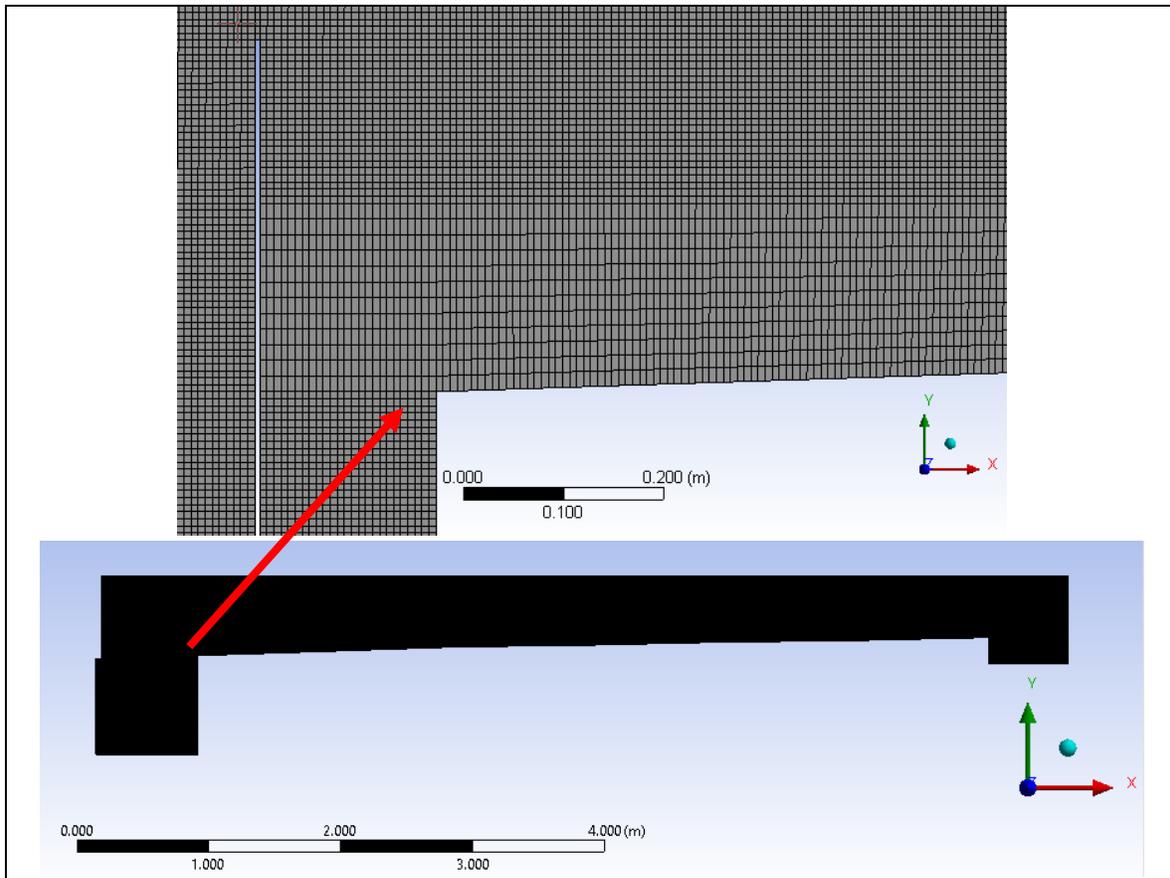


Figura 49. Ejemplo malla estructurada utilizada para modelaciones en 2D.

Fuente. (ANSYS, 2013).

3.2.5 Configuración del menú “Solver”.

Se presenta a continuación una descripción de la configuración utilizada en la solución de las modelaciones en 2D, sin embargo, cada modelo contiene singularidades que se presentara más adelante:

Tabla 26. Configuración general en ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración general	
Mesh (malla)	
escala	N.A
Solver (solucionador)	
Tipo	Pressure-Based (basado en la presión)
Tiempo	
Opción 1	Steady
Opción 2	Unsteady
Espacio en 2D	Planar

Configuración general	
Gravity (Gravedad)	
Aceleración de la gravedad m/s ²	9.81
Dirección	Vertical hacia abajo (-)
X (m/s ²)	0
Y (m/s ²)	-9.81

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 27. Configuración de modelos en ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración modelos	
Model Multiphase (Modelo Multifase)	
Modelo	Volume of fluid (Volumen de fluido)
Número de fases eulerianos	2
VOF sub- Models	
Open channel flow	Inactivo (Si el flujo comienza desde una altura de lámina de agua específica, para flujo agua desde tubería es inactivo)
Parámetros de la fracción de volumen para flujo permanente	
Formulación	Implicit (Implicita para flujo permanente)
Volume fraction Cutoff (Fracción de volumen de corte)	1e-06
Interfase Modeling (Modelación de la Interfase)	Sharp/ Dispersed (Agudo/Disperso)
Body force formulation	
Implicit body force (fuerza de cuerpo implícita)	Activo
Parámetros de la fracción de volumen para flujo no permanente	
Formulación	Explicit (Explicita para flujo no permanente)
Volume fraction Cutoff (Fracción de volumen de corte)	1e-06
Courant Number	0.44
Interfase Modeling (Modelación de la Interfase)	Sharp/ Dispersed (Agudo/Disperso)
Body force formulation	
Implicit body force (fuerza de cuerpo implícita)	Activo
Model Viscous (Modelo Viscoso) - “modelación de la turbulencia”	
Modelo	k – ε Realizable
Constantes del modelo	Valores utilizados por defecto.
Near – Wall treatment (tratamiento del perfil de velocidad cerca a la pared)	
Standard Wall Functions	Activo
Options	
Curvature Correction (corrección de la curvatura)	Activo
Production Limiter (Limitador de Producción)	Inactivo

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 28. Configuración de materiales en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de materiales	
Materiales	
Phase-1 (fase 1)	Aire
Phase-2 (fase 2)	Agua

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 29. Configuración en las celdas de las zonas en ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración en las celdas de las zonas	
Phase	
Phase (Fase)	Mixer (mezclado)
Type (Tipo)	Fluid (Fluid)
Operating conditions (condiciones de operación)	
Operating Pressure – presión de operación (Pascal)	101325 (Presión atmosférica)
Localización presión de referencia	X (m) = 0; Y (m) = 0 (punto de referencia de presión para evaluar otro punto de presión (se utiliza para el coeficiente de presión cp) (No se tuvo en cuenta para análisis).
Parámetros variable densidad	
Densidad de operación específica	Activo
Densidad de operación (kg/m ³)	1.225 (perteneciente a la fase aire)

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 30. Configuración en las condiciones de frontera en ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración de las condiciones de frontera	
Nombre Zona	Entrada fase agua
Condición de frontera	Mass flow - Inlet
Momentum	
Campo de referencia	Absoluto
Método de especificación de la dirección	Normal a la frontera
Turbulencia:	
Método de especificación	Intensidad de la turbulencia- Diámetro hidráulico
Intensidad de la turbulencia (%)	Según escenario
Diámetro hidráulico (m)	0.0422
Multifase (opcional)	
Open channel flow	Inactivo
Flujo másico agua (kg/s)	Según escenario
Flujo másico aire (kg/s)	0 (sin corrientes de aire)
Nombre Zona	
Fondo canal, fondo tanque, paredes dissipador de energía y fondo rampa	
Condición de frontera	
Opción	Wall
Momentum	
Movimiento del fondo	fondo estacionario
Rugosidad del fondo:	
Condición de cortantes	No Slip (Sin deslizamiento)

Configuración de las condiciones de frontera	
Altura de la rugosidad (m)	0.00013
Constante de rugosidad	0.5
Nombre Zona	Aire circundante, Salida fase agua
Condición de frontera	
Opción	Pressure Outlet
Momentum	
Presión manométrica (Pascal)	0
Método de especificación de la dirección del contraflujo	Normal a la frontera
Opciones iniciales de la Turbulencia:	
Método de especificación	Intensidad de la turbulencia del contraflujo - Tasa de viscosidad del contraflujo
Intensidad de la turbulencia del contraflujo (%)	5 (caso de turbulencia Medio: Caudal en dispositivos no tan complejos como tubos con grandes flujos de ventilación, etc., o los flujos de baja velocidad (bajo número de Reynolds). Típicamente, la intensidad de la turbulencia es de entre 1% y 5%)
Tasa de viscosidad del contraflujo	1 (en las fronteras de corriente libre de la mayoría de los flujos externos $1 - 10 \mu/\mu$)
Fracción de volumen del contraflujo	0 (solo se devuelve aire)

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 31. Configuración de los métodos de solución en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de los métodos de solución	
Acoplamiento de la presión - velocidad	
Esquema	SIMPLE
Discretización espacial	
Gradientes	Least squares cell based
Presión	Body force weighed
Momentum	First order upwind
Fracción de volumen	Modified HRIC
Energía cinética turbulenta	First order upwind
Tasa de disipación específica	First order upwind

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 32. Configuración de los controles de solución en ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración de los controles de solución	
Factores bajo relajación	
Presión	0.1
Densidad	0.1
Fuerzas de cuerpo	0.1
Momentum	0.1
Fracción de volumen	0.1
Energía cinética turbulenta	0.1
Tasa de disipación específica	0.1
Viscosidad turbulenta	0.1

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 33. Configuración de los monitores de residuales en ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de los controles de solución			
Ecuaciones			
Residual	Monitoreo	Chequear convergencia	Criterio absoluto
Continuidad	Activo	Activo	1e-05
Componente velocidad x	Activo	Activo	1e-05
Componente velocidad y	Activo	Activo	1e-05
Componente velocidad z (solo para 3D)	Activo	Activo	1e-05
Energía cinética turbulenta	Activo	Activo	1e-05
Tasa de disipación específica	Activo	Activo	1e-05
Fracción de volumen fase agua	Activo	Activo	1e-05
Valores de referencia	Escala (Logarítmica)		
Criterio de convergencia	Absoluto		

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 34. Configuración de superficies de monitoreo con ANSYS FLUENT en 2D y 3D.

Configuración de las superficie de monitoreo	
Nombre superficie de monitoreo	q_agua_inlet_tuberia_kg_s
Significado	flujo másico de la fase agua a la entrada (kg/s)
Tipo de reporte	Integral
Variable de campo	Función de campo personalizada
Función para flujos verticales (2D)	Phase-2_agua-vof* Phase-2_agua-density*Vy (Vy: Componente velocidad en y)
Superficie de monitoreo aplicado _ Nombre	Inlet_Entrada_agua
Nombre superficie de monitoreo	q_agua_outlet_kg_s
Significado	flujo másico de la fase agua a la salida (kg/s)
Tipo de reporte	Integral
Variable de campo	Función de campo personalizada
Función para flujos verticales (2D)	Phase-2_agua-vof* Phase-2_agua-density*Vy (Vy: Componente velocidad en y)
Superficie de monitoreo aplicado _ Nombre	Pressure_outlet_salida_agua
Nombre superficie de monitoreo	q_agua_t#_kg_s
Significado	Localización de transductores.
Tipo de reporte	Integral
Variable de campo	Función de campo personalizada
Función para flujos horizontales (2D)	Phase-2_agua-vof* Phase-2_agua-density*Vx (Vx: Componente velocidad en x)
Superficie de monitoreo aplicado _ Nombre	T1,T2, T4, T5, T6, T7 y T8 (T#:Línea que representa a un transductor)
Nombre superficie de monitoreo	presion-estatica_mh2o
Significado	Presión estática en una sección (mH2O)
Tipo de reporte	Vertex Maximum (Valor máximo del vértice de la celda)
Variable de campo	Función de campo personalizada
Función	Phase-2_agua-vof* p / 9792.34 (p: presión estática; peso específico agua : 9792.34 kg/m ³)
Superficie de monitoreo aplicado (2D)	T1,T2, T4, T5, T6, T7 y T8 (T#:Línea que representa a un transductor)

Configuración de las superficie de monitoreo	
Ubicación línea de monitoreo (line)	Ubicación preestablecida de transductores.

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 35. Configuración de la inicialización de la solución con ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración de la inicialización de la solución	
Método de solución	Inicialización estándar
Calcular desde	Entrada de agua
Campo de referencia	Relativa a las celdas de la zona
Valores iniciales	El programa llama o calcula desde condiciones de frontera
Gauge pressure (pascal)	0 (El programa llama el valor desde condiciones de frontera)
Velocidad en x	El programa calcula por inclinación del dominio con el valor de la magnitud velocidad desde condiciones de frontera.
Velocidad en y	El programa calcula por inclinación del dominio con el valor de la magnitud velocidad desde condiciones de frontera.
Velocidad en z	El programa calcula por inclinación del dominio con el valor de la magnitud velocidad desde condiciones de frontera.
Fracción de volumen agua	0 (Inicial en todo el dominio)
Patch (parche para flujo permanente)	Se colocó una región de agua simulando el tanque y canal inicialmente lleno para escenarios con flujos máxicos inicial $Q_{mín}$ y pico $Q_{máx}$ tomados del hidrograma medido.
Condición inicial del flujo agua (parche para flujo no permanente)	Se realizó una modelación en flujo permanente con un flujo máxico inicial $Q_{mín}$ para un tiempo $t=0s$ del hidrograma de entrada, para luego realizar la modelación en flujo no permanente incluyendo un hidrograma.

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 36. Configuración de actividades en los cálculos con ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración de actividades en los cálculos	
Auto guardado cada (iteraciones para flujo permanente)	5000
Auto guardado cada (pasos de tiempo para flujo no permanente)	1500 - 2500

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 37. Configuración del arranque de cálculos con ANSYS FLUENT en 2D.

Configuración de arranque de cálculos para flujo permanente	
Número de iteraciones	20000
Intervalos de reporte	10
Intervalos de actualización del perfil	10
Configuración de arranque de cálculos para flujo no permanente	
Time	
Time step size (s) (tamaño paso de tiempo)	0.002
Number of time steps (Número de pasos de tiempo)	107006

Configuración de arranque de cálculos para flujo permanente	
Time stepping method	Variable
Variable time step parameters	
Global Courant number	1
Ending time (s)	90
Minimum time step size (s)	0.00008
Maximum time step size (s)	0.002
Minimum step change factor (s)	0.5
Maximum step change factor (s)	1.2
Number of fixed time steps	1
Iteration	
Max iteration per time step (Número máximo de iteraciones)	15
Intervalos de reporte	1
UDF Profile update interval (Intervalos de actualización del perfil UDF)	1

Fuente. *Este estudio.*

3.2.6 Calcular la solución (verificación) y examinar los resultados (validación).

“La verificación es el procedimiento para garantizar que el programa resuelve las ecuaciones correctamente y la validación es el procedimiento para probar el grado en que el modelo representa con precisión la realidad” (Casey & Wintergerste, 2000, pág. 10). Para la verificación de la solución en las modelaciones en 2D, hasta alcanzar la convergencia, se utilizó:

- En las modelaciones en 2D, se monitoreó de los residuales de las ecuaciones de continuidad, componentes de velocidad (x , y), energía cinética turbulenta (k), tasa de disipación de energía turbulenta (ε) y la fracción de volumen (VOF), hasta donde los cambios en las variables de la solución de una iteración a la siguiente son insignificantes, con un criterio de convergencia en un rango de 1×10^{-3} a 1×10^{-5} o mayor.
- En las modelaciones en 2D en flujo permanente, se monitoreó el flujo másico de la fase agua en las secciones (superficies) localizadas en la posición de los transductores, como a la entrada y salida de agua hasta alcanzar valores constantes en cada iteración y cercano al valor inyectado.
- En las modelaciones en 2D en flujo no permanente, se monitoreo el flujo másico de la fase agua en las secciones (superficies) localizadas en la posición de los transductores, como a la entrada y salida de agua hasta el tiempo final de 90s según el hidrograma de entrada.

- En las modelaciones en 2D en flujo permanente, se monitoreó la presión estática constante de la fase agua en las secciones (superficies) localizadas en la posición de los transductores, hasta alcanzar valores constantes en cada iteración y cercano al valor medido.
- En las modelaciones en 2D en flujo no permanente, se monitoreó la presión estática de la fase agua en las secciones (superficies) localizadas en la posición de los transductores, hasta el tiempo final de 90s según el hidrograma de entrada y los limnigramas disponibles en cada transductor.

Para validar las modelaciones en 2D se realizó la comparación de las mediciones realizadas en el canal ECI No. 1 de la altura de la lámina de agua en el eje central realizadas por Arenas Amado (2002) con las modelaciones para caudales de $Q_{\text{mín}}$ (inicial del hidrograma) y $Q_{\text{máx}}$ (pico del hidrograma).

3.2.6.1 Verificación y validación del modelo en 2D

Los datos de niveles agua calculados con el modelo ANSYS FLUENT en 2D flujo permanente se comparó con los datos de niveles de agua medidos en el eje central por los transductores. En la Figura 50 a Figura 54 se presenta los resultados de la comparación para la topología CTT_2D_ $Q_{\text{mín}}$ CTT_2D_ $Q_{\text{máx}}$.

Tabla 38. Costo computacional de modelaciones en ANSYS FLUENT en 2D flujo permanente.

Escenario	Celdas (#)	Costo computacional (horas)	Iteraciones (#)
CTT_2D_ Q_{min}	90386	2	20010
CTT_2D_ Q_{max}	90386	2	30000

Fuente. *Este estudio*. Nota: CTT_2D_ $Q_{\text{mín}}$ fue condición inicial para CTT_2D_ $Q_{\text{máx}}$

Tabla 39. Verificación de modelaciones en 2D flujo permanente.

Escenario	Cantidad de interes	Medido	Error de medicion 4%		Modelado	Dentro del intervalo de confianza?	Error relativo (%)
			-4.00%	4.00%			
CTT_2D_Qmin	Caudal volumetrico en t1 (m ³ /s)	0.002	0.002	0.002	0.002	Si	0.8%
	P. estática línea t1 (mh2o)	0.209	0.200	0.217	0.208	Si	0.5%
	Altura lámina en t1 (m)				0.212	Si	1.7%
	P. estática línea t2 (mh2o)	0.183	0.176	0.190	0.184	Si	0.6%
	Altura lámina en t2 (m)				0.186	Si	1.8%
	P. estática línea t4 (mh2o)	0.149	0.143	0.155	0.149	Si	0.2%
	Altura lámina en t4 (m)				0.151	Si	1.6%
	P. estática línea t5 (mh2o)	0.136	0.131	0.142	0.135	Si	1.1%
	Altura lámina en t5 (m)				0.137	Si	0.7%
	P. estática línea t6 (mh2o)	0.113	0.108	0.117	0.112	Si	0.6%
	Altura lámina en t6 (m)				0.115	Si	2.5%
	P. estática línea t7 (mh2o)	0.100	0.096	0.104	0.100	Si	0.8%
	Altura lámina en t7 (m)				0.103	Si	3.7%
	P. estática línea t8 (mh2o)	0.075	0.072	0.078	0.078	Si	3.6%
Altura lámina en t8 (m)	0.062				No	17.4%	
CTT_2D_Qmax	Caudal volumetrico en t1 (m ³ /s)	0.019	0.018	0.020	0.019	Si	1.1%
	P. estática línea t1 (mh2o)	0.300	0.288	0.312	0.299	Si	0.4%
	Altura lámina en t1 (m)				0.313	No	4.5%
	P. estática línea t2 (mh2o)	0.274	0.263	0.284	0.284	Si	4.0%
	Altura lámina en t2 (m)				0.284	Si	3.9%
	P. estática línea t4 (mh2o)	0.238	0.228	0.247	0.248	No	4.4%
	Altura lámina en t4 (m)				0.251	No	5.5%
	P. estática línea t5 (mh2o)	0.228	0.219	0.237	0.235	Si	3.0%
	Altura lámina en t5 (m)				0.236	Si	3.5%
	P. estática línea t6 (mh2o)	0.202	0.194	0.210	0.209	Si	3.4%
	Altura lámina en t6 (m)				0.210	Si	3.7%
	P. estática línea t7 (mh2o)	0.191	0.183	0.199	0.195	Si	2.1%
	Altura lámina en t7 (m)				0.195	Si	2.3%
	P. estática línea t8 (mh2o)	0.165	0.158	0.171	0.178	No	7.7%
Altura lámina en t8 (m)	0.102				No	38.1%	

Fuente. Este estudio.

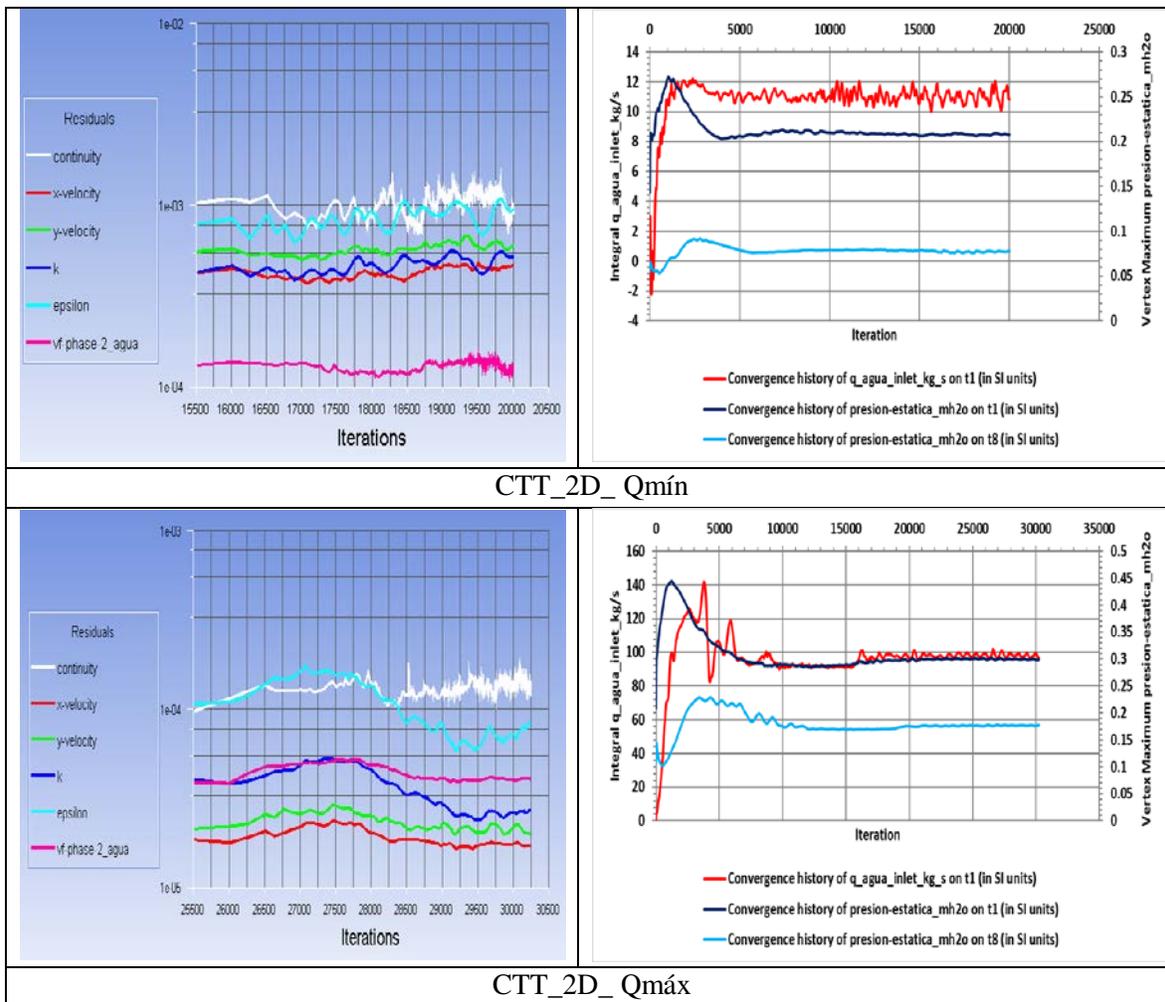


Figura 50. Perfiles de monitoreo de residuales (derecha) y perfiles de monitoreo de las cantidades de interés (izquierda).

Fuente. Este estudio.

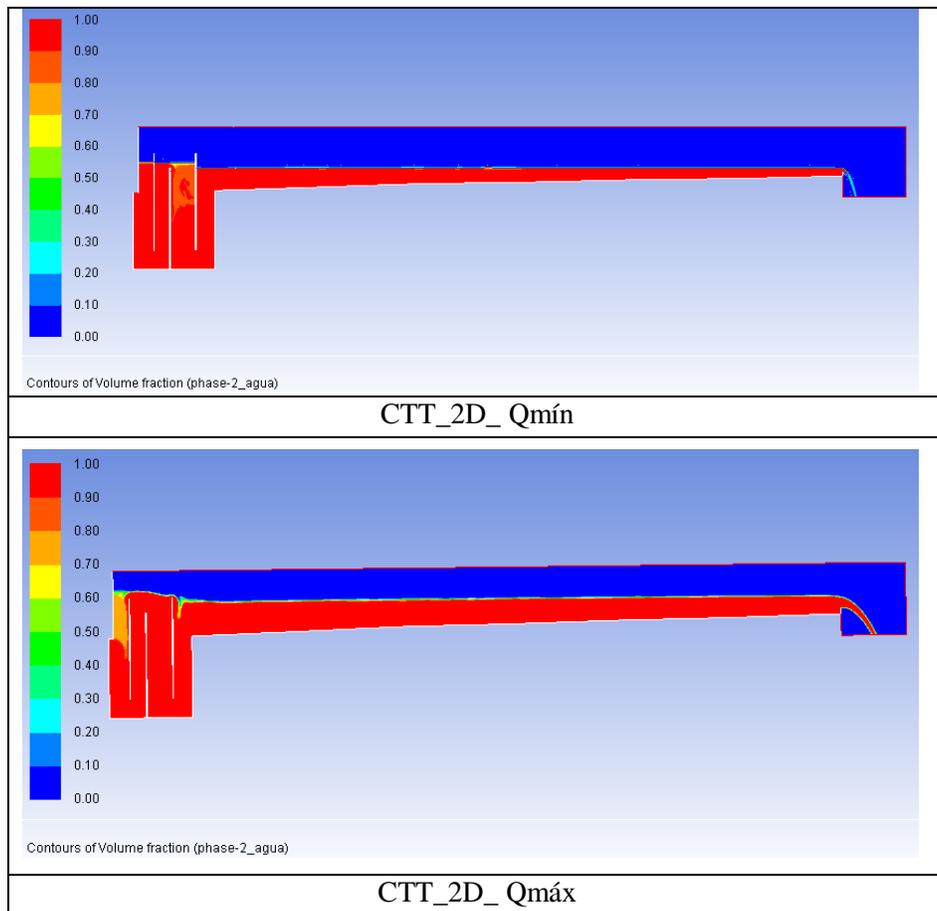


Figura 51. Fracción de volumen de la fase agua para los escenarios CTT_2D_Qmín y CTT_2D_Qmáx.
Fuente. Este estudio.

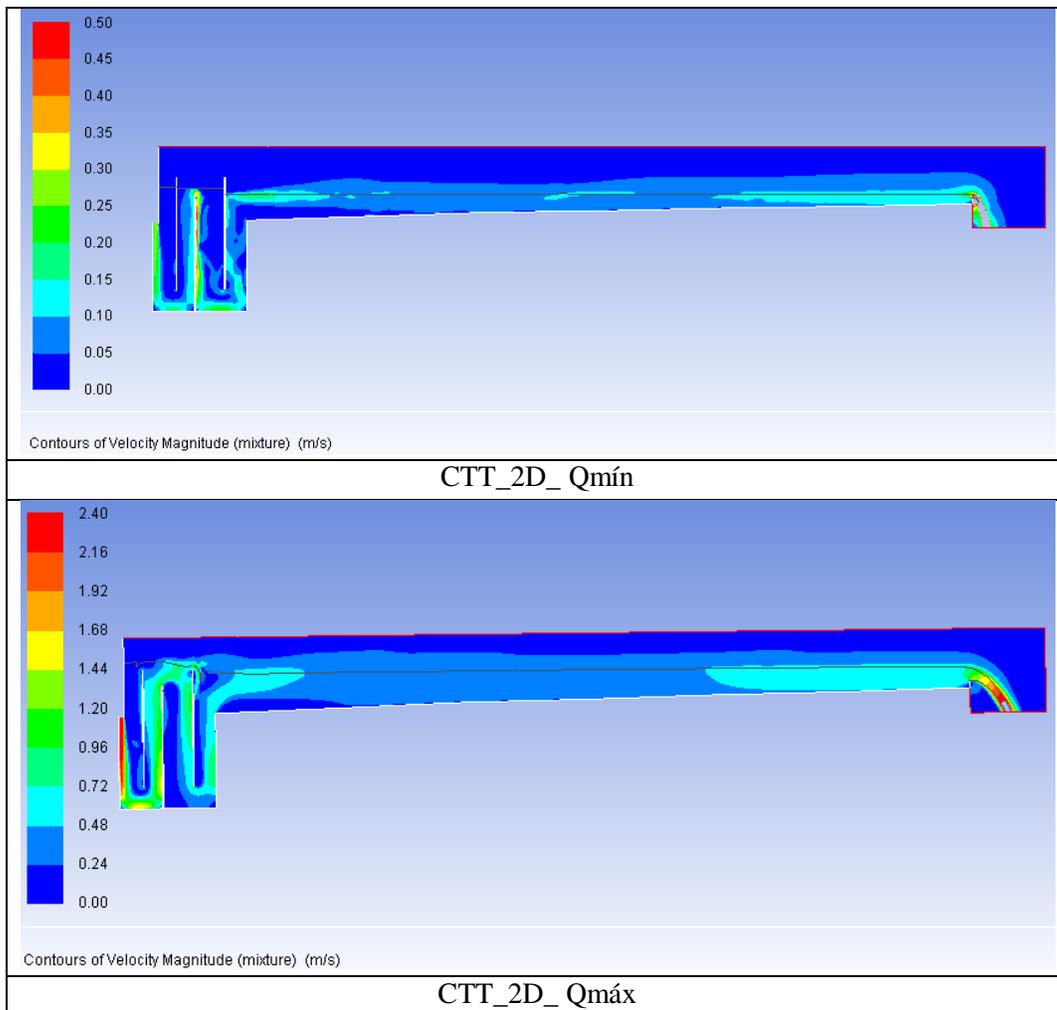


Figura 52. Contornos de magnitud velocidad de la fase agua y aire para los escenarios CTT_2D_ Qmín y CTT_2D_ Qmáx. Línea de color negro: interfase agua – aire.

Fuente. Este estudio.

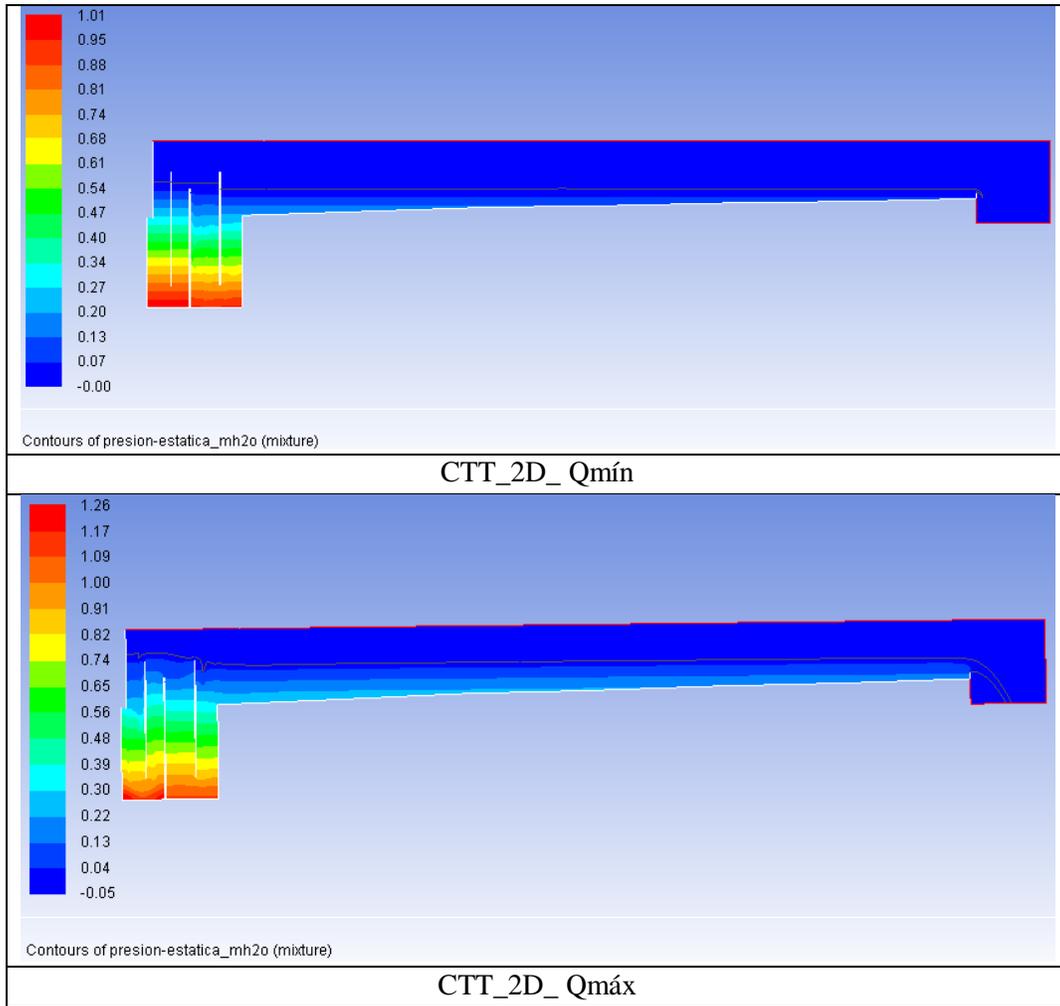


Figura 53. Contornos de presión estática de la fase agua para los escenarios CTT_2D_ Qmín y CTT_2D_ Qmáx.

Fuente. Este estudio.

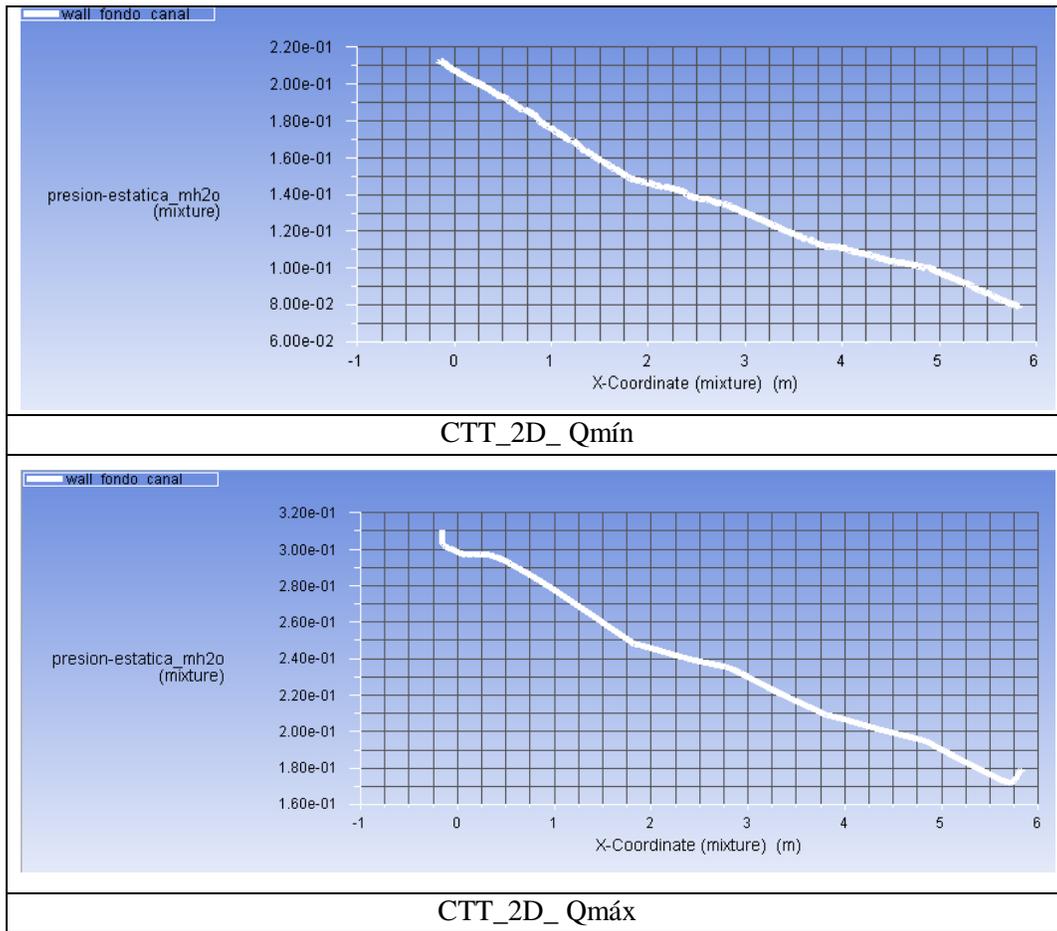


Figura 54. Presión estática en toda la extensión del fondo del canal rectangular para los escenarios CTT_2D_ Qmín y CTT_2D_ Qmáx.

Fuente. Este estudio.

3.2.7 Revisión del modelo (análisis de la validación).

Como se apreció en la validación del modelo en 2D en flujo permanente, el registro de presión inicial medido en los transductores se ajusta con el modelado aún con los niveles de agua a excepción del transductor “t8”; en cuanto al registro de presión pico medido en los transductores, estos se ajustan con el modelado a excepción de las secciones “t4 y t8” incluso con los niveles de agua.

Las posibles razones de las variaciones de registro de presión de agua medida versus modeladas para $Q_{m\acute{a}x}$ (caudal pico) son:

- Para el registro de presión del transductor t4 se observa que el error relativo está a un punto de estar en el rango de confianza, donde puede tratarse de la calidad de la malla necesite aumentar.
- Para el registro de presión del transductor t8 se observa que el error relativo es de 7.7%, donde puede tratarse de que la ubicación de la sección sea un poco más aguas abajo, aunque también se trate de que el modelo de turbulencia k- ϵ influya en el perfil de flujo ya que asume un flujo isotrópico y no un anisotrópico lo cual puede sobre estimar la producción de energía turbulenta, aunque tenga submodelos que lo amortigüe, generando así gradientes de presión excesivos (ver Figura 54).

Encontrando un nivel aceptable entre lo medido y lo modelado en cuanto la altura de la lámina de agua en 2D en flujo permanente, se asume una buena estimación teniendo en cuenta errores de medición que pudieron presentarse en el modelo físico y la baja calidad de la malla en lugares del dominio que influye en el modelo matemático como en su elección. Por lo anterior, se considera posible realizar un análisis de resultados arrojados por las modelaciones del escenario que se presenta a continuación en 2D en flujo no permanente (Parte 2). Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta a continuación el escenario definitivo utilizado para la modelación comparativa y su correspondiente análisis.

Tabla 40. Escenario utilizado para la modelación en flujo no permanente del canal ECI No. 1.

Topología	Caudal	Pendiente canal	Código Escenario	Escenario No.
CTT_2D	Q(t).	Adversa (Variable)	CTT_2D_Q(t).	3

Fuente. *Este estudio.*

4 Memorias de cálculo de las modelaciones en 1D, 2D y 3D.

4.1 Memorias de cálculo de las modelaciones en el canal ECI No. 2.

A continuación, se presenta una relación de carpetas, archivos y descripción de los modelos en 1D, 2D y 3D en flujo permanente del canal ECI No. 2:

Carpeta	Archivos
0_ Datos de medicion en modelo fisico	Tabla de datos medicion en canal 2.xlsx
1_ Validacion modelos (med. vs mod.)	a_ Perfil medido vs Modelo 1D para T3.xlsx b_ Perfil medido vs Modelo 2D para T3.xlsx c_ Perfil medido vs Modelo 3D para T3.xlsx d_ Comparacion resultados_medido vs modelado.xlsx
Subcarpetas:	
1.1_ Resultados modelos 1D	T3_1D_Q1.xlsm T3_1D_Q2.xlsm T3_1D_Q3.xlsm
1.2_ Resultados modelos 2D	Perfil canal T3_2D_Q1.csv Perfil canal T3_2D_Q2.csv Perfil canal T3_2D_Q3.csv Perfil lamina T3_2D_Q1.xy Perfil lamina T3_2D_Q2.xy Perfil lamina T3_2D_Q3.xy
1.3_ Resultados modelos 3D	Perfil canal T3_3D_Q1.csv Perfil canal T3_3D_Q2.csv Perfil canal T3_3D_Q3.csv Perfil lamina T3_3D_Q1.csv Perfil lamina T3_3D_Q2.csv Perfil lamina T3_3D_Q3.csv
2_ Comparacion RK_1D_vs_Fluent_2D	
Subcarpetas:	
Q7.36	T0a_1D_Q1_vs_T0a_2D_Q1.xlsm T0b_1D_Q1_vs_T0b_2D_Q1.xlsm
Q17	T0a_1D_Q2_vs_T0a_2D_Q2.xlsm T0b_1D_Q2_vs_T0b_2D_Q2.xlsm
Q18.21	T0a_1D_Q3_vs_T0a_2D_Q3.xlsm T0b_1D_Q3_vs_T0b_2D_Q3.xlsm
Q19.89	T0a_1D_Q4_vs_T0a_2D_Q4.xlsm T0b_1D_Q4_vs_T0b_2D_Q4.xlsm

Carpeta	Archivos
3_Comparacion_RK_1D_vs_Fluent_3D	
Subcarpetas:	
Q7.36	T1_1D_Q1_vs_T1_3D_Q1.xlsm T2_1D_Q1_vs_T2_3D_Q1.xlsm T3_1D_Q1_vs_T3_3D_Q1.xlsm
Q17	T1_1D_Q2_vs_T1_3D_Q2.xlsm T2_1D_Q2_vs_T2_3D_Q2.xlsm T3_1D_Q2_vs_T3_3D_Q2.xlsm
Q18.21	T1_1D_Q3_vs_T1_3D_Q3.xlsm T2_1D_Q3_vs_T2_3D_Q3.xlsm T3_1D_Q3_vs_T3_3D_Q3.xlsm
Q19.89	T1_1D_Q4_vs_T1_3D_Q4.xlsm T2_1D_Q4_vs_T2_3D_Q4.xlsm T3_1D_Q4_vs_T3_3D_Q4.xlsm
4_Calculos_simplificacion D.E	Calculos simplificaciones D.E.xlsx
5_Modelacion_2D_Ansys_Fluent (Contiene geometría, malla, configuración y resultados-solución en FLUENT, resultados - post procesamiento)	Modelacion_2D_canal2_Q7.36.wbpj T0a_2D_Q1 T0b_2D_Q1 T3_2D_Q1 Modelacion_2D_canal2_Q17.wbpj T0a_2D_Q2 T0b_2D_Q2 T3_2D_Q2 Modelacion_2D_canal2_Q18.21.wbpj T0a_2D_Q3 T0b_2D_Q3 T3_2D_Q3 Modelacion_2D_canal2_Q19.89.wbpj T0a_2D_Q4 T0b_2D_Q4
Subcarpetas:	
Modelacion_2D_canal2_Q7.36_files	Archivos varios de salida de modelaciones en ANSYS
Modelacion_2D_canal2_Q17_files	Archivos varios de salida de modelaciones en ANSYS
Modelacion_2D_canal2_Q18.21_files	Archivos varios de salida de modelaciones en ANSYS
Modelacion_2D_canal2_Q19.89_files	Archivos varios de salida de modelaciones en ANSYS
CAD_.STEP 2D	
Q7.36	1.1_Canal_entrada_larga_sin_rampa_Q7.36.stp 1.2_Canal_entrada_corta_sin_rampa_Q7.36_ok.stp

Carpeta	Archivos
Q17_18.21_20	2.1_Canal_entrada_larga_con_rampa_Q7.36.stp 3.1_Canal_2D_con_D.E._sin_rampa_Q7.36.stp 3.2_Canal_2D_con_D.E._con_rampa_Q7.36.stp 1.1_Canal_entrada_larga_sin_rampa_Q20_Q17_18.stp 1.2_Canal_entrada_corta_sin_rampa_Q20_Q17_18.stp 2.1_Canal_entrada_larga_con_rampa_Q20_Q17_18.stp 4.1_Canal_2D_con_D.E._sin_rampa_Q20_Q17_18.stp 4.2_Canal_2D_con_D.E._con_rampa_Q20_Q17_18.stp
6_Modelacion_3D_Ansys_Fluent (Contiene geometría, malla, configuración y resultados-solución en FLUENT, resultados – post procesamiento)	Modelacion_3D_canal2_Q7.36.wbpj T3_3D_Q1 T3_3D_Q1 T3_3D_Q1 Modelacion_3D_canal2_Q17.wbpj T3_3D_Q2 T3_3D_Q2 T3_3D_Q2 Modelacion_3D_canal2_Q18.21.wbpj T3_3D_Q3 T3_3D_Q3 T3_3D_Q3 Modelacion_3D_canal2_Q19.89.wbpj T3_3D_Q4 T3_3D_Q4 T3_3D_Q4
Subcarpetas: Modelacion_3D_canal2_Q7.36_files Modelacion_3D_canal2_Q17_files Modelacion_3D_canal2_Q18.21_files Modelacion_3D_canal2_Q19.89_files CAD_ STEP 3D	Archivos varios de salida de modelaciones en ANSYS Archivos varios de salida de modelaciones en ANSYS Archivos varios de salida de modelaciones en ANSYS Archivos varios de salida de modelaciones en ANSYS Barra_borrar_final.stp Barra_borrar_final_Q7.36.stp Barra_borrar_final_Q17.stp Barra_borrar_final1.stp Barra2_borrar_para.symmetry_2.stp canal_3D_dominio.3dm Disipador_de_energia_4_5.stp Disipador_de_energia_Tubo_2.stp Rampa.3dm

Carpeta	Archivos
	Rampa_3D.stp

4.2 Memorias de cálculo de las modelaciones en el canal ECI No. 1.

A continuación, se presenta una relación de carpetas, archivos y descripción de los modelos en 2D en flujo no permanente del canal ECI No. 1:

Carpeta	Archivos
0_Calculos iniciales y resultados	a_Calculos_iniciales_canal ECI No. 1_ Flujo P y no P.xlsx b_Graficas monitores_2D_Qmin_FP.xlsx c_Graficas monitores_2D_Qmax_FP.xlsx d_Ecuaciones Hidrograma entrada_FnoP.xlsx e_Comparacion medido vs modelado_FnoP.xlsx f_Limnigramas e Hidrograma_resultados__FnoP.xlsx g_Presion estatica_T8_t=26s__FnoP.xlsx
1_CAD_STEP 2D unsteady	1_Geometria canal ECI No. 1_ Ejemplo 5.4.1_v6.stp
2_UDF	hidrograma.c
3_Modelacion_2D Ansys Fluent (Contiene geometría, malla, configuración y resultados-solución en FLUENT, resultados - post procesamiento)	Modelacion_2D_canal1_flujo_no_permanente_v6.wbpj Modelacion_canal1_flujo_permanente_configuracion Modelacion_canal1_flujo_permanente_Qmin Modelacion_canal1_flujo_permanente_Qmax Modelacion_canal1_flujo_no permanente
Subcarpetas: Modelacion_2D_canal1_flujo_no_permanente_v6_files	Archivos varios de salida de modelaciones en ANSYS

5 Resultados Parte 1. Modelación del canal ECI No. 2 en flujo permanente

5.1 Análisis comparativo de modelos en 1D, 2D y 3D

Teniendo en cuenta que los modelos 1D pueden representar un perfil de lámina de agua ideal (entrada de flujo tranquila al canal con altura crítica “ y_c ” en el borde inicial) y que los modelos 3D pueden dar una representación cercana a la realidad con una buena aproximación en las zonas del dissipador de energía, tanque y canal, se presenta a continuación la modelación comparativa de la altura de lámina de agua, disipación de energía, simetría del flujo, como también perfiles de velocidad y presión estática, para las tres topologías propuestas y cuatro caudales para su respectivo análisis.

5.1.1 Modelación comparativa – altura lámina de agua

Como se comentó anteriormente, para realizar un análisis de inestabilidad de flujo uniforme se debe tener en cuenta, como condición ideal a la entrada del canal rectangular, la existencia de un flujo sin perturbaciones, distribución de velocidades uniformes y la profundidad del agua con considerable altura (Chow, 1994, págs. 189, 190). Sin embargo, se puede tomar en cuenta el perfil de un flujo gradualmente variado como ideal si se toma como un flujo permanente con profundidad que varía de forma gradual en dirección longitudinal del canal, siempre y cuando se considere que las características hidráulicas permanecen constantes y la distribución hidrostática de presiones predomine, esto sumado a que la pérdida de altura en una sección es la misma que para un flujo uniforme, la pendiente del canal es baja, el canal es prismático, la distribución de velocidad en la sección de canal es fija, la conductividad K y el factor de sección Z son funciones exponenciales de la profundidad de flujo, el coeficiente de rugosidad es independiente de la profundidad de flujo y constante a través del tramo del canal bajo consideración (Chow, 1994, pág. 213).

Teniendo en cuenta estas consideraciones teóricas, se propone establecer perfiles compuestos de flujo gradualmente variado como perfiles hidráulicos ideales en 1D y compararlos con modelaciones en 2D con una entrada lo suficientemente larga para establecer un flujo tranquilo y analizar cuáles serían características hidráulicas ideales a la entrada del canal rectangular (prismático uniforme) para lograr un perfil de la lámina de agua ideal antes y después de la sección de entrada del canal, ya que, como se evidencia en la validación del modelo en 2D, el perfil de la lámina de agua no se ajusta cuando el modelo real contiene secciones no uniformes. Estos modelos en 2D con perfiles de lámina de agua ideales sirvieron como base de comparación con los modelos 3D.

Al tener como base dos perfiles hidráulicos ideales, con rampa y sin rampa o escalón, se realizó la modelación comparativa a partir de la sección inmediatamente después del dissipador de energía con los modelos en 3D y sus diferentes escenarios.

A continuación se presenta la comparación de la altura de la lámina de agua de un perfil ideal en 1D y 2D con los perfiles en 3D (ver Figura 55 a Figura 62).

5.1.1.1 Comentarios sobre modelación comparativa – altura lámina de agua

Como era de esperarse, los escenarios con perfiles ideales en 1D y 2D se ajustan traslapándose uno a otro, a excepción del tramo en la entrada al canal rectangular con escalón donde se aprecia que la altura crítica (y_c) se desplaza en dirección del flujo en el eje x, haciéndose evidente cuando el caudal es más grande. Este desplazamiento de (y_c) es evidencia de que existe una recirculación del flujo donde el punto de ataque al inicio del canal rectangular no es garantía de un flujo inicial sin perturbaciones y que la única forma de encontrar un flujo laminar en desarrollo es a partir del punto de reataque de la recirculación.

Este mismo aspecto se aprecia en topologías con escalón y con o sin dissipador de energía, pero con perturbación en el perfil de lámina de agua ubicada en el tanque donde aumenta el oleaje aplicando mayor caudal y aún más con la presencia del chorro ascendente, que al debilitarse cae el flujo por acción de fuerzas de cuerpo (gravedad) sobre la masa de agua embalsada.

En cuanto a las topologías con dissipador de energía y rampa en 3D, se observa que la altura crítica (y_c) se desplaza levemente en dirección del flujo en el eje x, con un perfil de lámina de agua tranquila asemejándose al perfil ideal con rampa, pero con una leve perturbación.

Como se puede apreciar, el análisis de la modelación comparativa de la altura de lámina de agua con los diferentes escenarios tiene una limitación, ya que solo se realizó sobre el eje central del canal, dejando evidente la necesidad de analizar desde otro punto de vista la dinámica del fluido agua. Es por esto que se realizó el siguiente subcapítulo la comparación en cuanto a la variación de la energía mecánica y sus componentes.

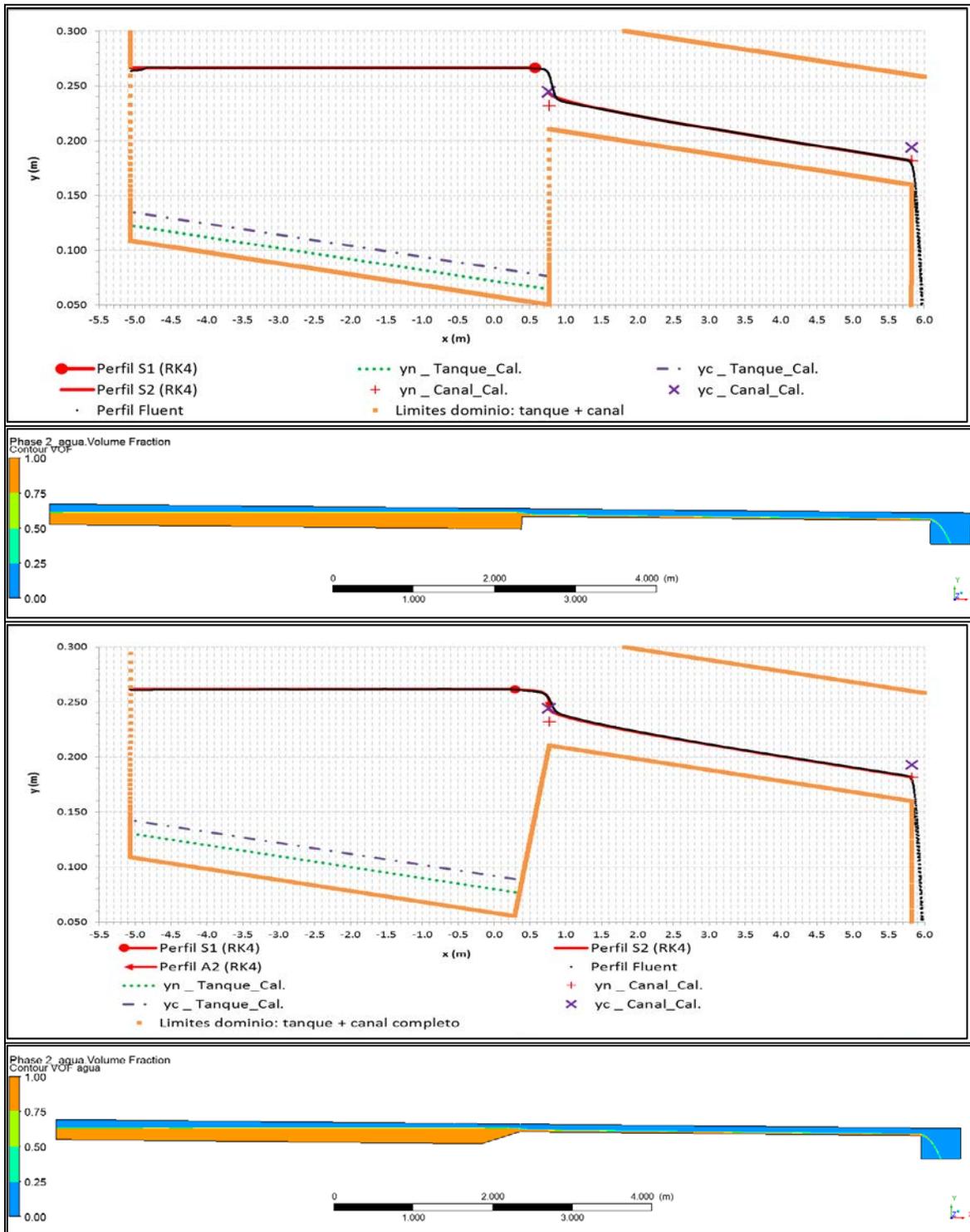


Figura 55. Perfiles de lámina de agua para T0a_1D_Q1 vs T0a_2D_Q1 y T0b_1D_Q1 vs T0b_2D_Q1 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).

Fuente. *Este estudio.*

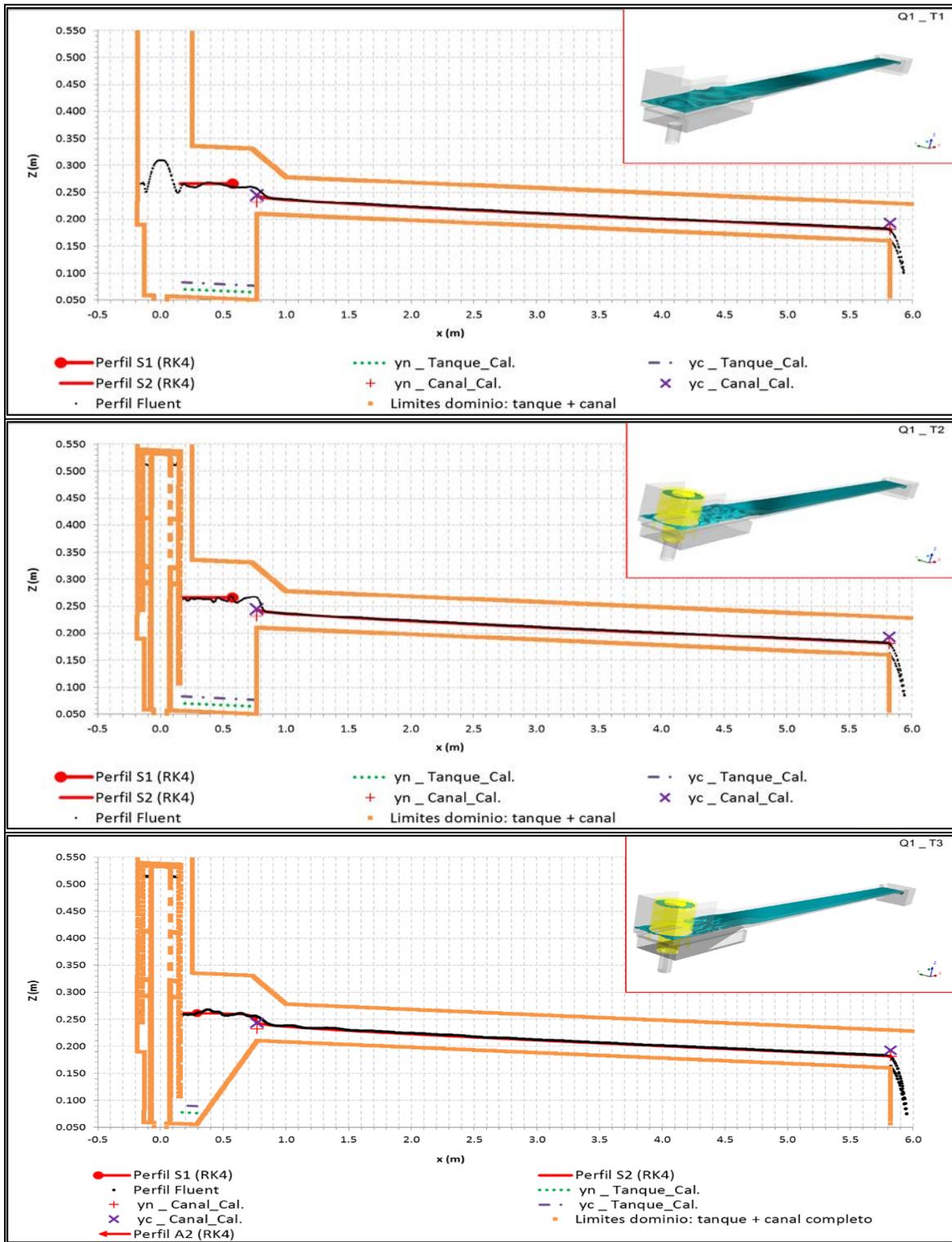


Figura 56. Perfiles de lámina de agua para T1_3D_Q1, T2_3D_Q1 y T3_3D_Q1 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).

Fuente. *Este estudio.*

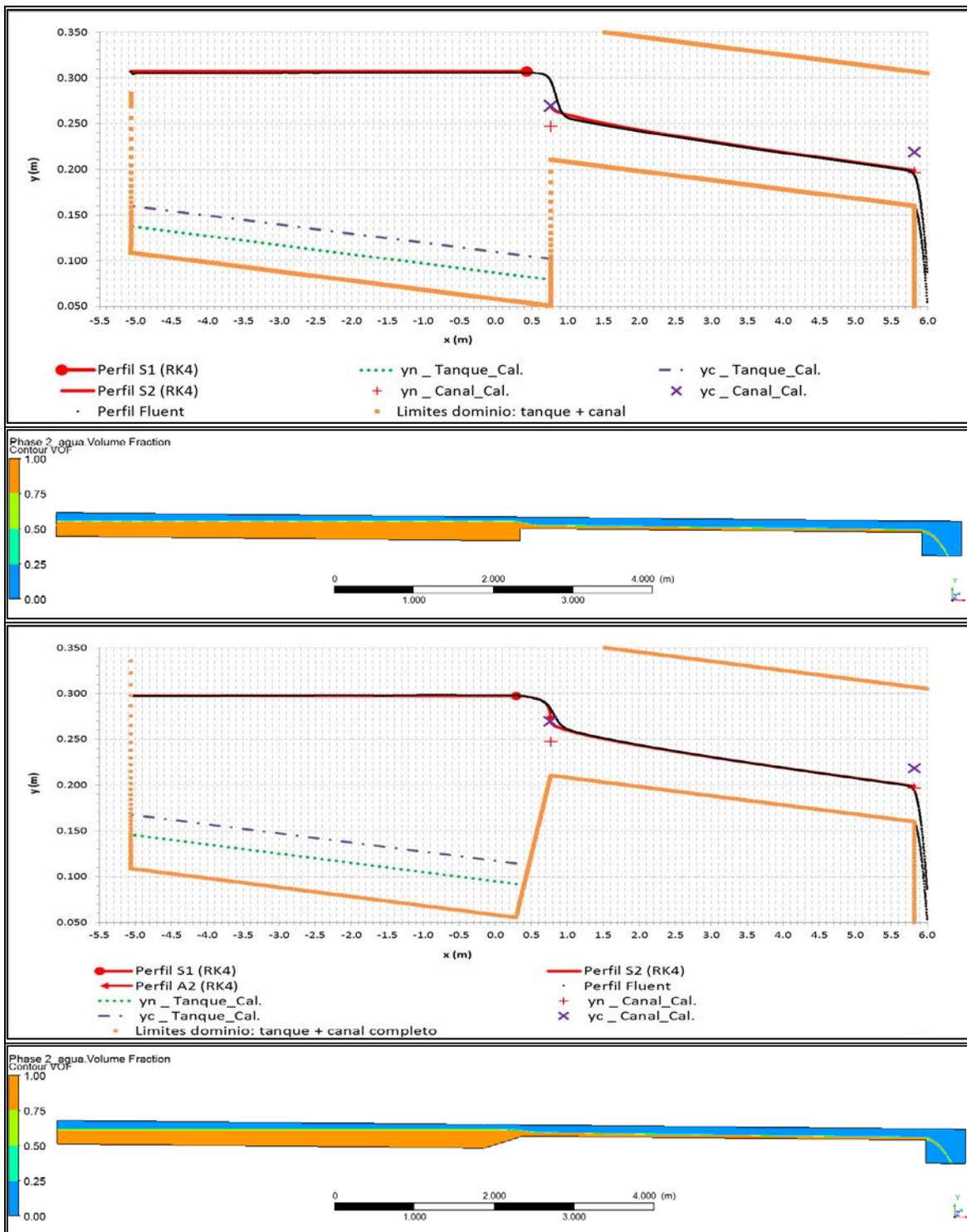


Figura 57. Perfiles de lámina de agua para T0a_1D_Q2 vs T0a_2D_Q2 y T0b_1D_Q2 vs T0b_2D_Q2 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).

Fuente. *Este estudio.*

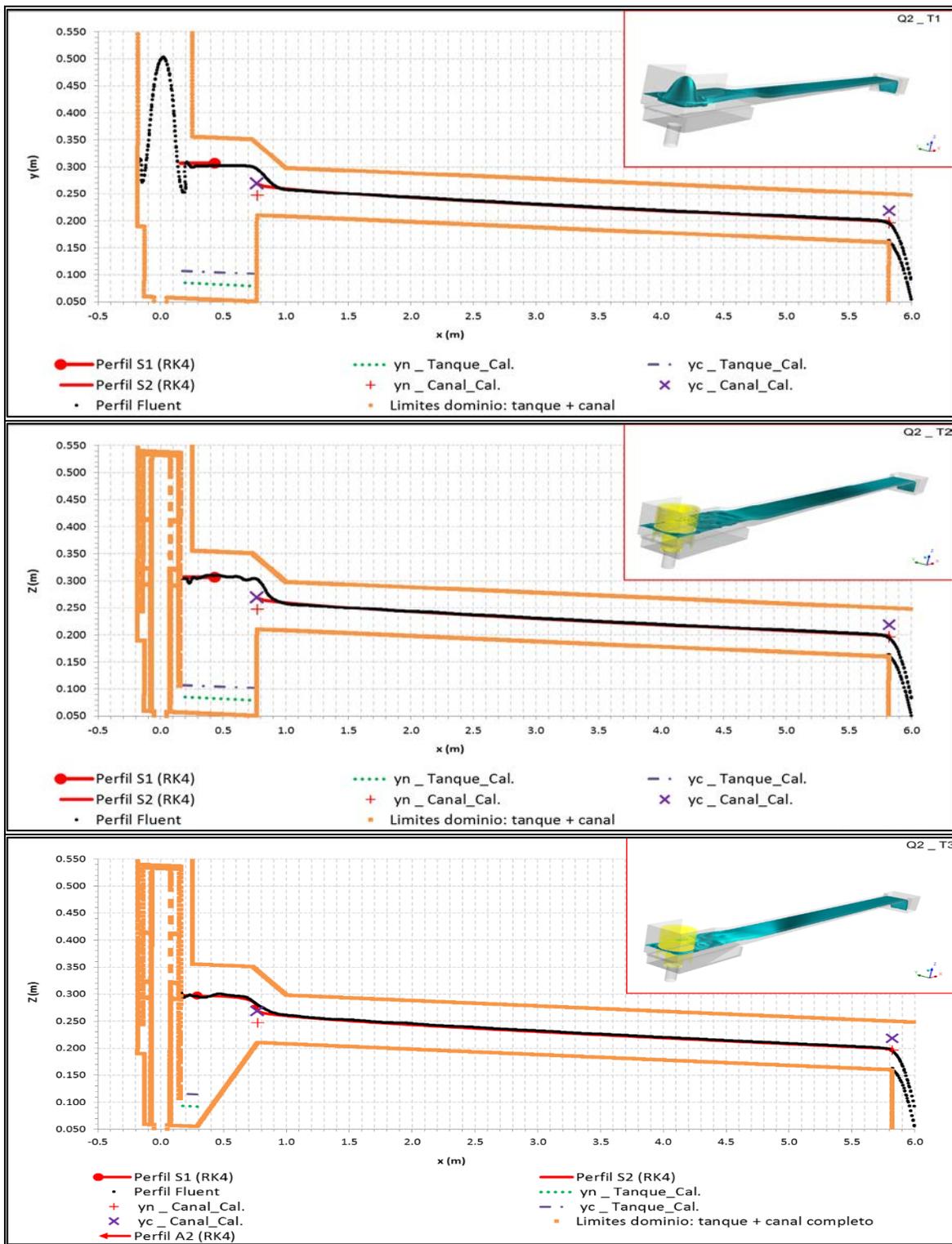


Figura 58. Perfiles de lámina de agua para T1_3D_Q2, T2_3D_Q2 y T3_3D_Q2 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).

Fuente. Este estudio.

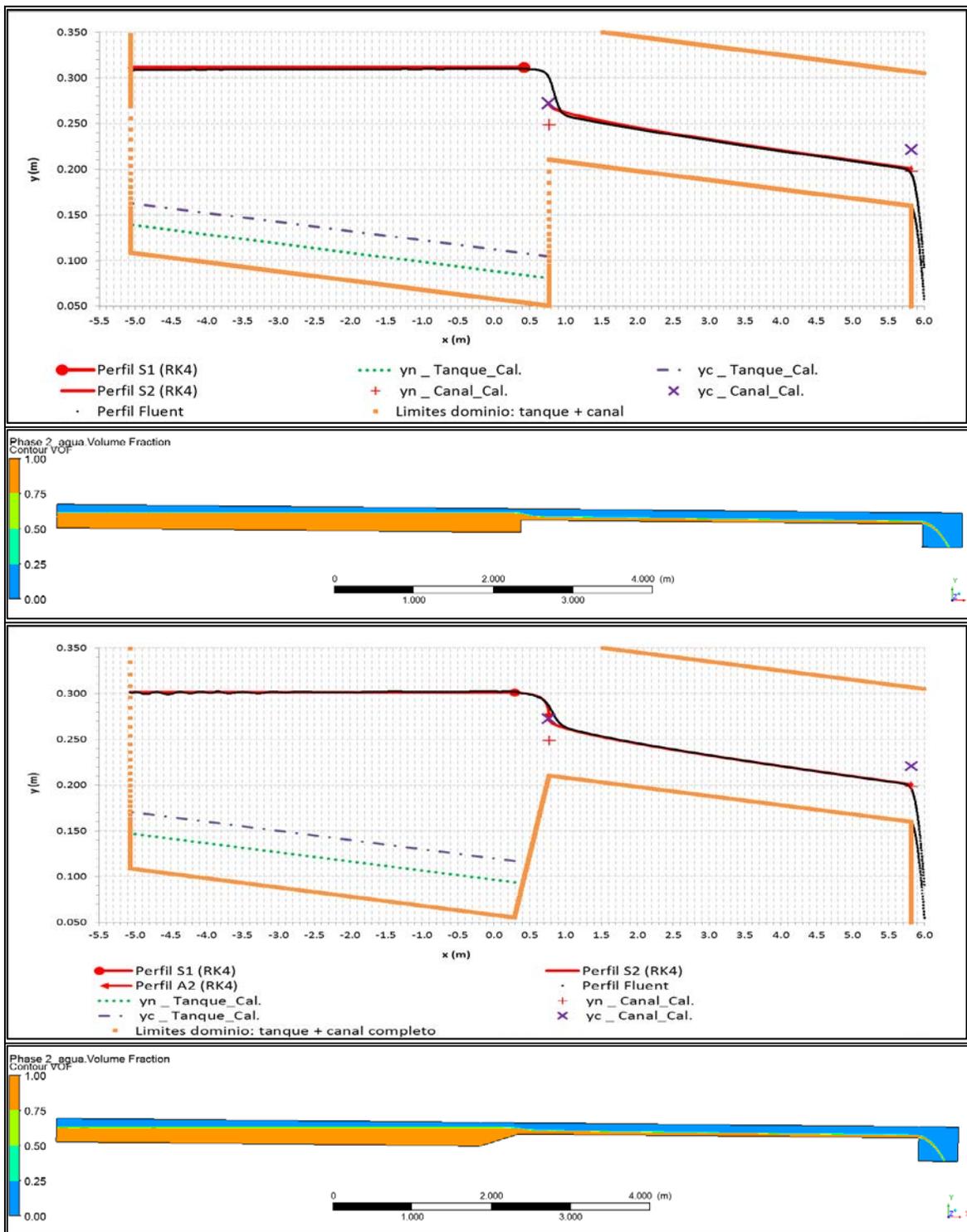


Figura 59. Perfiles de lámina de agua para T0a_1D_Q3 vs T0a_2D_Q3 y T0b_1D_Q3 vs T0b_2D_Q3 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).

Fuente. *Este estudio*.

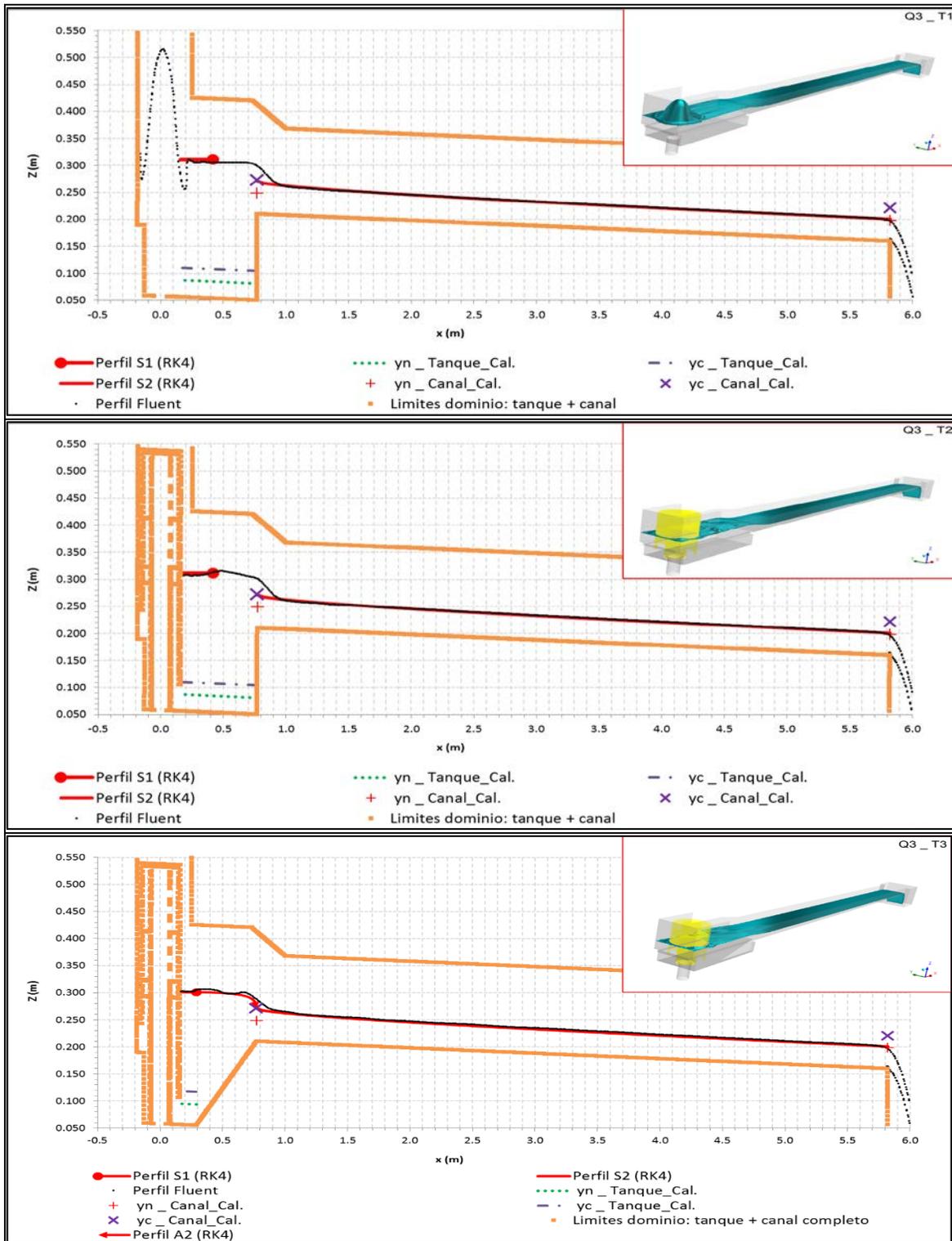


Figura 60. Perfiles de lámina de agua para T1_3D_Q3, T2_3D_Q3 y T3_3D_Q3 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).

Fuente. *Este estudio.*

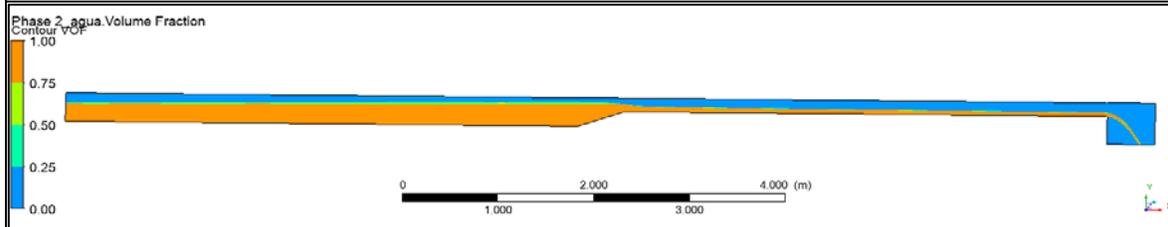
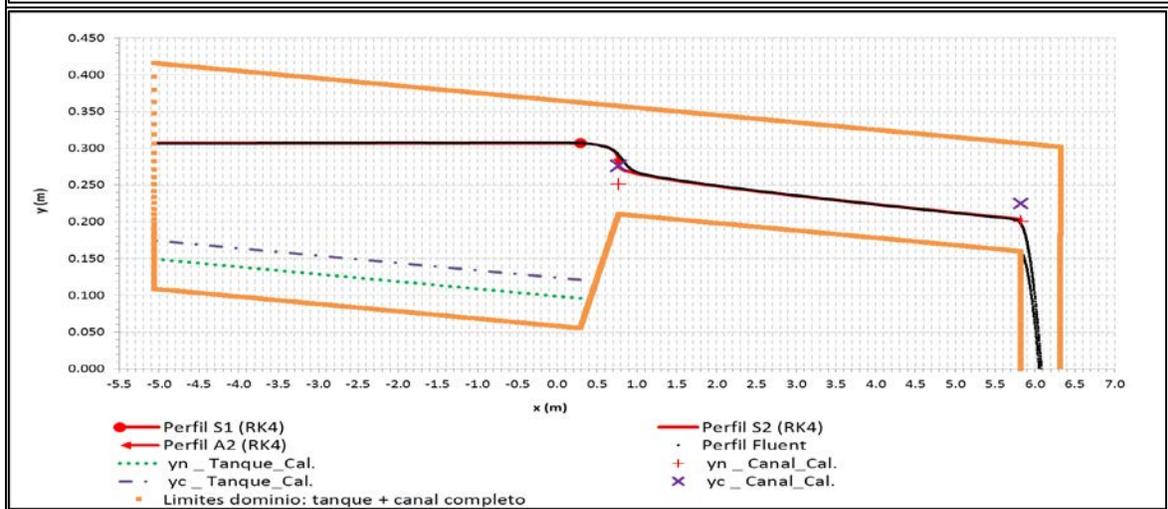
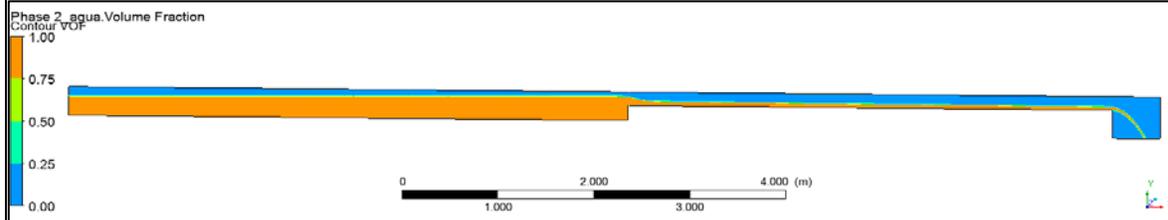
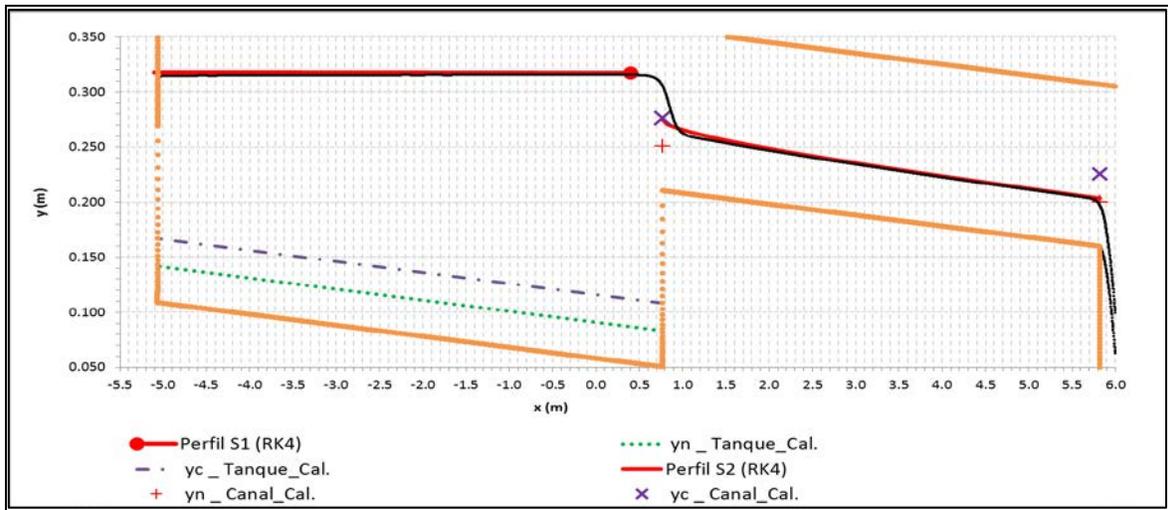


Figura 61. Perfiles de lámina de agua para T0a_1D_Q4 vs T0a_2D_Q4 y T0b_1D_Q4 vs T0b_2D_Q4 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).

Fuente. *Este estudio*.

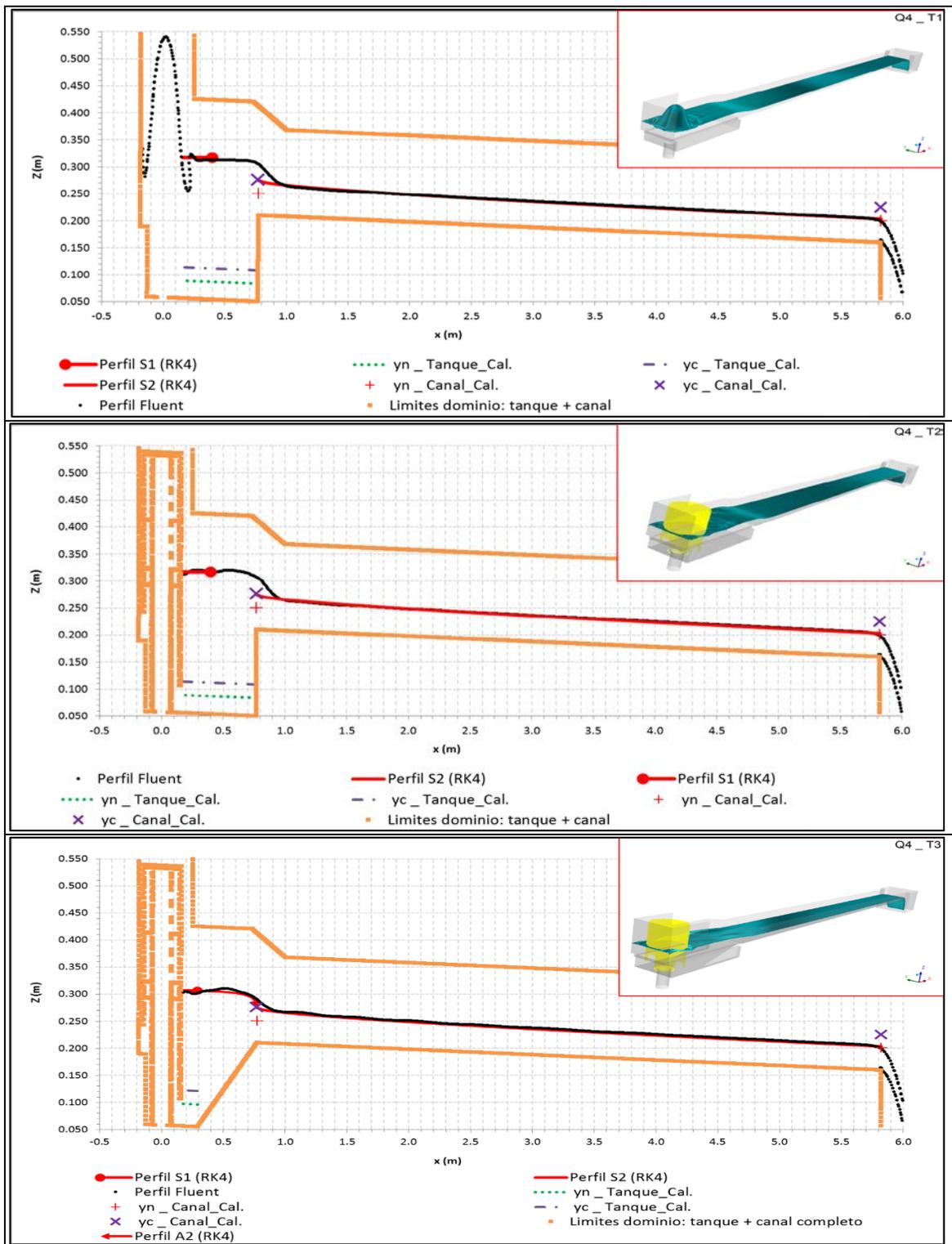


Figura 62. Perfiles de lámina de agua para T1_3D_Q4, T2_3D_Q4 y T3_3D_Q4 (de arriba hacia abajo), (VOF=0.5).

Fuente. Este estudio.

5.1.2 Modelación comparativa – energía mecánica

Para evaluar las pérdidas de energía de un elemento de fluido en el canal ECI No. 2, fue necesario tener en cuenta la teoría de la energía mecánica total y las leyes de la termodinámica en un canal a superficie libre considerando que los elementos del fluido están en movimiento (Dingman, 2009, págs. 159, 158):

La energía mecánica total de un elemento de fluido, h , es la suma de su energía potencial y cinética, expresa generalmente en términos de cabezas o alturas:

$$h = h_g + h_p + h_{EC}$$

Cabeza [L] es la energía [FL] de un elemento de fluido dividido por su peso [F].

Escribiendo la ecuación de conservación de la energía para un elemento de fluido entre dos puntos se tiene (completada con otras referencias):

$$h_2 - h_1 = (h_{g2} - h_{g1}) + (h_{p2} - h_{p1}) + (h_{EC2} - h_{EC1}) + (h_f)$$

Donde:

1,2 : Secciones

h : Energía mecánica total o cabeza total

h_{EP} : Cabeza potencial o piezométrica = $h_p + h_g$

h_p : Cabeza de presión estática

h_g : Cabeza gravitacional (cabeza de elevación o de referencia) = $z - z_0$

z : Elevación desde datum al fondo del canal

z_0 : Datum o nivel de referencia

h_{EC} : Cabeza de energía cinética (o cabeza de velocidad) intermitente

$h_{EC} = \bar{h}_{EC} + h_K$ (Versteeg & Malalasekera, 2007, pág. 72)

\bar{h}_{EC} : Cabeza de energía cinética promedio.

h_K : Cabeza de energía cinética turbulenta.

h_f : Perdida por fricción (Chow, 1994, pág. 262) (esfuerzos cortantes).

En el presente estudio, para el análisis de pérdidas de energía se empleó la perdida por fricción h_f , la cabeza de energía cinética (o cabeza de velocidad) intermitente h_{EC} , la cabeza potencial h_{EP} como la suma de h_p y h_g igual a la coordenada del eje vertical en el fondo del canal en la sección. La suma de estas cabezas es la cabeza total h .

En cuanto al análisis entre escenarios, se analizó la variación de estos parámetros entre secciones de cada topología y caudal teniendo en cuenta siguiente ecuación.

$$h = h_g + h_p + h_{EC} + h_f$$

Ecuación 34

Las secciones transversales de control se establecieron en las siguientes coordenadas, teniendo en cuenta que la coordenada vertical para modelos 2D es el eje (y) y para modelos 3D es el eje (z), donde sus datos corresponden a la coordenada en el fondo del tanque, rampa o canal y el eje (x) corresponde a la coordenada longitudinal en el espacio del dominio.

Tabla 41. Coordenadas válidas para T0a_2D_Q1 y T0b_2D_Q1.

Coordenada	Sección									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.289	0.770	0.930	4.500	5.000
y	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.055	0.210	0.209	0.173	0.168

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 42. Coordenadas válidas para T0a_2D_Q2, T0b_2D_Q2, T0a_2D_Q3 y T0b_2D_Q3.

Coordenada	Sección									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.289	0.770	1.040	4.500	5.000
y	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.055	0.210	0.208	0.173	0.168

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 43. Coordenadas válidas para T0a_2D_Q4 y T0b_2D_Q4.

Coordenada	Sección									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.289	0.770	1.060	4.500	5.000
y	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.055	0.210	0.208	0.173	0.168

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 44. Coordenadas válidas para T1_3D_Q1, T2_3D_Q1 y T3_3D_Q1.

Coordenada	Sección									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.289	0.770	0.930	4.500	5.000
y	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
z	-0.142	0.058	0.317	0.305	0.270	0.055	0.210	0.209	0.173	0.168

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 45. Coordenadas válidas para T2_3D_Q1, T2_3D_Q1, T2_3D_Q1, T3_3D_Q1, T3_3D_Q2 y T3_3D_Q3.

Coordenada	Sección									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.289	0.770	1.040	4.500	5.000
y	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
z	-0.142	0.058	0.317	0.305	0.270	0.055	0.210	0.208	0.173	0.168

Fuente. *Este estudio.*

Tabla 46. Coordenadas válidas para T1_3D_Q4, T2_3D_Q4 y T3_3D_Q4.

Coordenada	Sección									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.289	0.770	1.060	4.500	5.000
y	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
z	-0.142	0.058	0.317	0.305	0.270	0.055	0.210	0.208	0.173	0.168

Fuente. *Este estudio.*

El criterio de la localización se presenta a continuación:

- La sección 1, 2, son válidas solo para modelos 3D y son ubicadas en la tubería de alimentación de 4" para analizar la variación de la energía mecánica en topologías con o sin disipador de energía, ver Figura 64 y Figura 65.

- La sección 3, 4, 5 son válidas solo para modelos 3D y son ubicadas para analizar la variación de la energía mecánica en el dissipador de energía con las secciones 1 y 2, ver Figura 64 y Figura 65.
- La sección 6 es válida para modelos 2D, 3D y es ubicada para analizar la variación de la energía mecánica inmediatamente después del dissipador de energía con topologías sin o con rampa, ver Figura 63, Figura 64 y Figura 65.
- La sección 7 es válida para modelos 2D, 3D y es ubicada para analizar la variación de la energía mecánica en la entrada del canal rectangular, ya que se encuentra en un punto de ataque y también en un tramo donde no se considera hidrostático al presentarse gradientes de presión cero o adverso y sus líneas de nivel no son paralelas a las líneas de corriente como se aprecia en la Figura 63 (b) y (c), analizada con los modelos 2D con perfiles ideales con escalón y rampa, donde “flujos con gradiente de presión la teoría de la capa límite no es válida” (Cengel & Cimbala, 2006, pág. 535), ver también Figura 64 y Figura 65.
- La sección 8 es válida para modelos 2D, 3D y es ubicada para analizar la variación de la energía mecánica donde el flujo se considera estático y uniforme, como también se encuentra en el punto de reataque y la teoría de la capa límite es válida (ver Figura 63 (b) (c) y Figura 64, Figura 65).
- La sección 9 y 10 es válida para modelos 2D, 3D y es ubicada para analizar la variación de la energía mecánica donde “la presión en un canal varía hidrostáticamente en la dirección vertical cuando el flujo en el canal es estable y está totalmente desarrollado” (Cengel & Cimbala, 2006, pág. 679) y donde “un flujo en un canal se llama flujo uniforme si la profundidad del flujo (y la velocidad promedio de flujo ya que $Volumen = Área * Velocidad =$ en flujo estacionario) permanece constante” (Cengel & Cimbala, 2006, pág. 691), asumiendo que el flujo es turbulento completamente desarrollado y que la velocidad máxima es aproximadamente igual a la velocidad media (ver Figura 63 (d)(e) y Figura 64, Figura 65.).

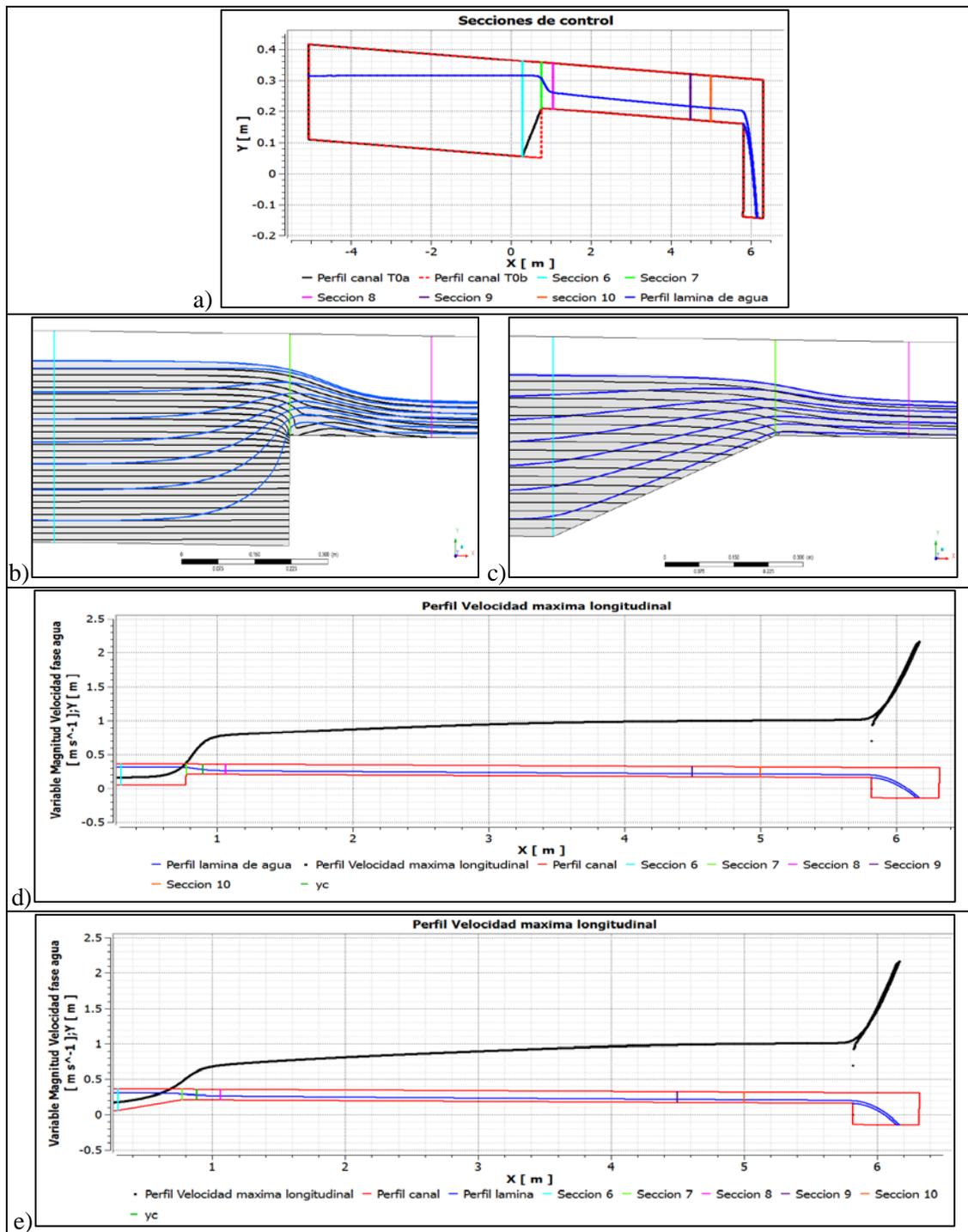


Figura 63. Ejemplo de la ubicación de las secciones verticales de control para el análisis de escenarios en 2D y 3D. (En a) y b): Línea negra = curva de nivel de presión estática. Líneas azules = líneas de corriente en dirección al flujo).

Fuente. *Este estudio*.

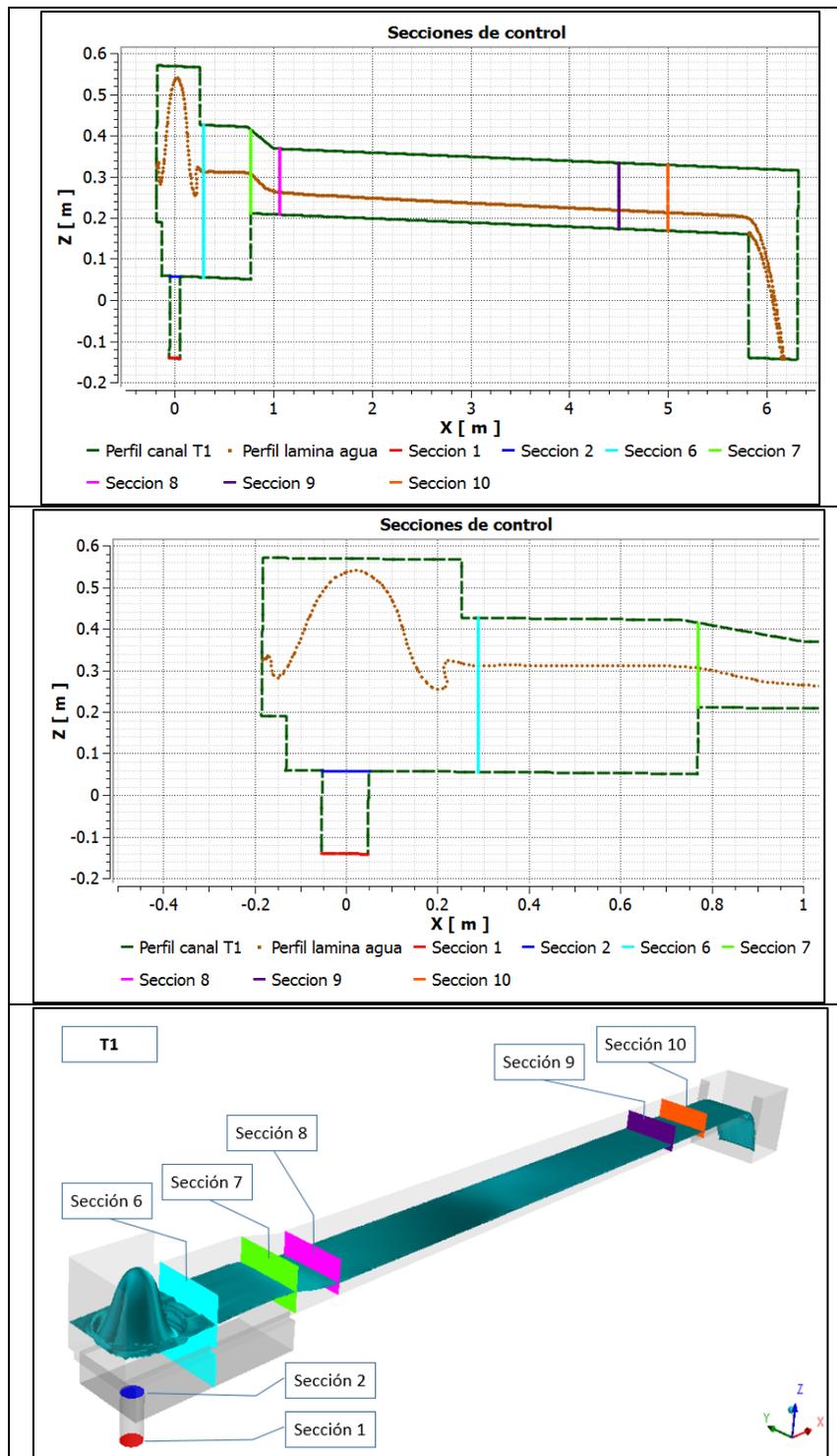


Figura 64. Ejemplo de la ubicación de las secciones de control para el análisis de escenarios con topología T1 en 3D.

Fuente. *Este estudio*.

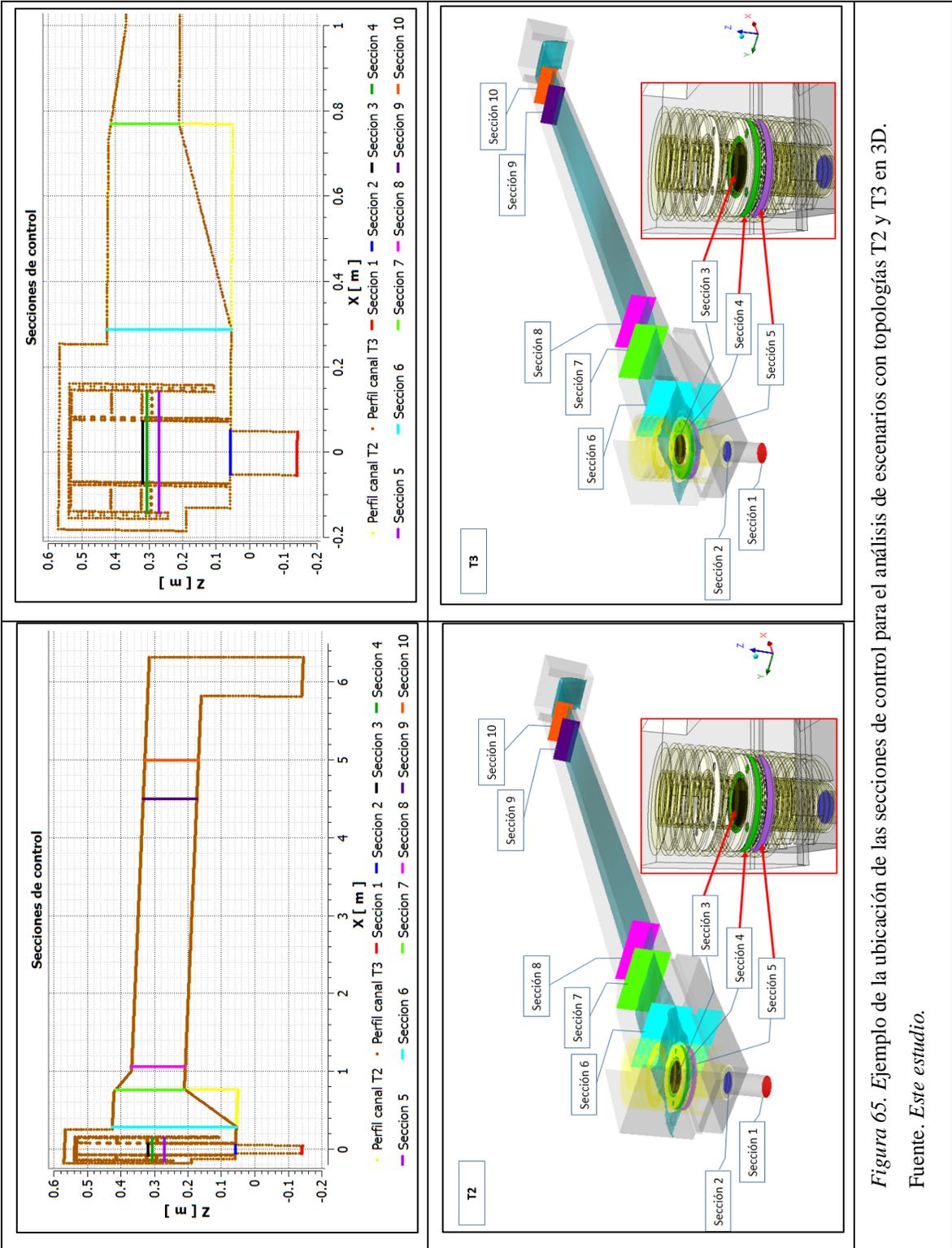


Figura 65. Ejemplo de la ubicación de las secciones de control para el análisis de escenarios con topologías T2 y T3 en 3D.
 Fuente. *Este estudio*.

5.1.2.1 Comentarios sobre la modelación comparativa – energía mecánica

Se analizó los resultados de las modelaciones en las secciones de control propuestas, graficados en la Figura 66, Figura 67 y Figura 68 encontrando las siguientes observaciones:

- En los resultados de h_{EP} se observa que en las secciones 1 y 2, a mayor caudal esta cabeza aumenta en las topologías T2 y T3 con referencia a T1 encontrando un resultado adverso con la presencia de la estructura del disipador de energía en estas secciones. Entre las secciones 3 y 4 en las topologías T2 y T3 responden al mismo comportamiento, pero en la sección 5 estas topologías presentan una variación en los caudales Q3 y Q4 donde T3 presenta una caída de h_{EP} tal que el valor es negativo característico de presiones por debajo de la presión atmosférica presentándose fenómenos de cavitación. Después de la sección 5, en la sección 6 h_{EP} vuelve a tener valores por encima de cero donde se traslapa con las demás topologías hasta la sección 10 incluso con los perfiles ideales sin tener evidencia de disipación de energía con respecto a T1, pero si entre T2 y T3. (Ver graficas de la columna 1 de la Figura 66)
- En los resultados de h_{EC} se observa que los valores en las secciones de control se traslapan en las secciones de las topologías propuestas a excepción de la sección 4 de T2 donde a mayor caudal el valor de h_{EC} disminuye, como también en la sección 6 de T1 el valor de h_{EC} disminuye levemente a mayor caudal. Con este parámetro no se evidencia disipación de energía con respecto a T1, pero si entre T2 y T3. Ver graficas de la columna 2 de la Figura 66.
- En los resultados de h total se observa que en las secciones 1 y 2, a mayor caudal esta cabeza aumenta en las topologías T2 y T3 con referencia a T1 encontrando un resultado adverso con la presencia de la estructura del disipador de energía en estas secciones. Entre las secciones 3 y 4 en las topologías T2 y T3 responden al mismo comportamiento, pero en la sección 5 estas topologías presentan una variación en los caudales Q3 y Q4 donde T3 presenta una caída de h_{EP} tal que el valor es cercano a cero característico de zonas muertas. Después de la sección 5, en la sección 6 el valor de h total vuelve a tener valores por encima de cero donde se traslapa con las demás topologías hasta la sección 10 incluso con los perfiles ideales. Con este parámetro no se evidencia disipación de energía con respecto a T1, pero si entre T2 y T3. Ver graficas de la columna 1 de la Figura 67.

- En los resultados de h_f las pérdidas de energía por fricción entre secciones propuestas para los caudales Q1 y Q2 no se diferencian en T2 y T3, pero si en T1 en la sección 6 aunque no es comparable con las demás topologías ya que se calculó las perdidas entre la sección 3 y 6. Con respecto a h_f en los caudales Q3 y Q4 la topología T3 presenta mayores pérdidas en T2 entre las secciones 4 y 5, pero entre las secciones 5 y 6 se presenta un comportamiento contrario. Los comportamientos por debajo de cero son producto de lo analizado en las observaciones anteriores. Para las secciones de 6 a 7 los resultados de h_f se traslapan. Con este parámetro no se evidencia disipación de energía con respecto a T1, pero si entre T2 y T3. Ver graficas de la columna 2 de la Figura 67.
- Finalmente, En los resultados de h_k se observan perdidas de energía de T2 y T3 con respecto a T1 en todos los caudales. Para valores de h_k en las secciones 1 y 2 se traslapan en todos los caudales y topologías que se incluyeron estas secciones. Para valores de h_k en las secciones 3, 4 y 5 se traslapan en todos los caudales y topologías que se incluyeron estas secciones, con una leve disminución en T2 en la sección 3. Entre la sección 6 y 8 de T1 el parámetro h_k está por encima de todas las topologías a excepción de la sección 7 donde T2 está por encima de las demás. esta diferencia corresponde al caos o desequilibrio del flujo en esta sección. Con respecto a T3 en todos los caudales, los valores de h_k en la sección 6 se traslapa levemente con T2, pero muy por encima de las topologías con perfiles ideales T0a y T0b, pero cuando pasa a la sección 7 donde comienza el canal rectangular, este se traslapa favorablemente con T0a hasta la sección 10, donde T1 y T2 solo logran tener un comportamiento similar a partir de la sección 9. En la topología T3 en todos los caudales se observa la incidencia favorable de la inclusión de la rampa en el sistema, optimizando no solo la disipación de la energía del flujo, sino también en disminuir espacio y recursos en las instalaciones del laboratorio de hidráulica comparándolo con la geometría de la topología T0b. Ver la Figura 68.

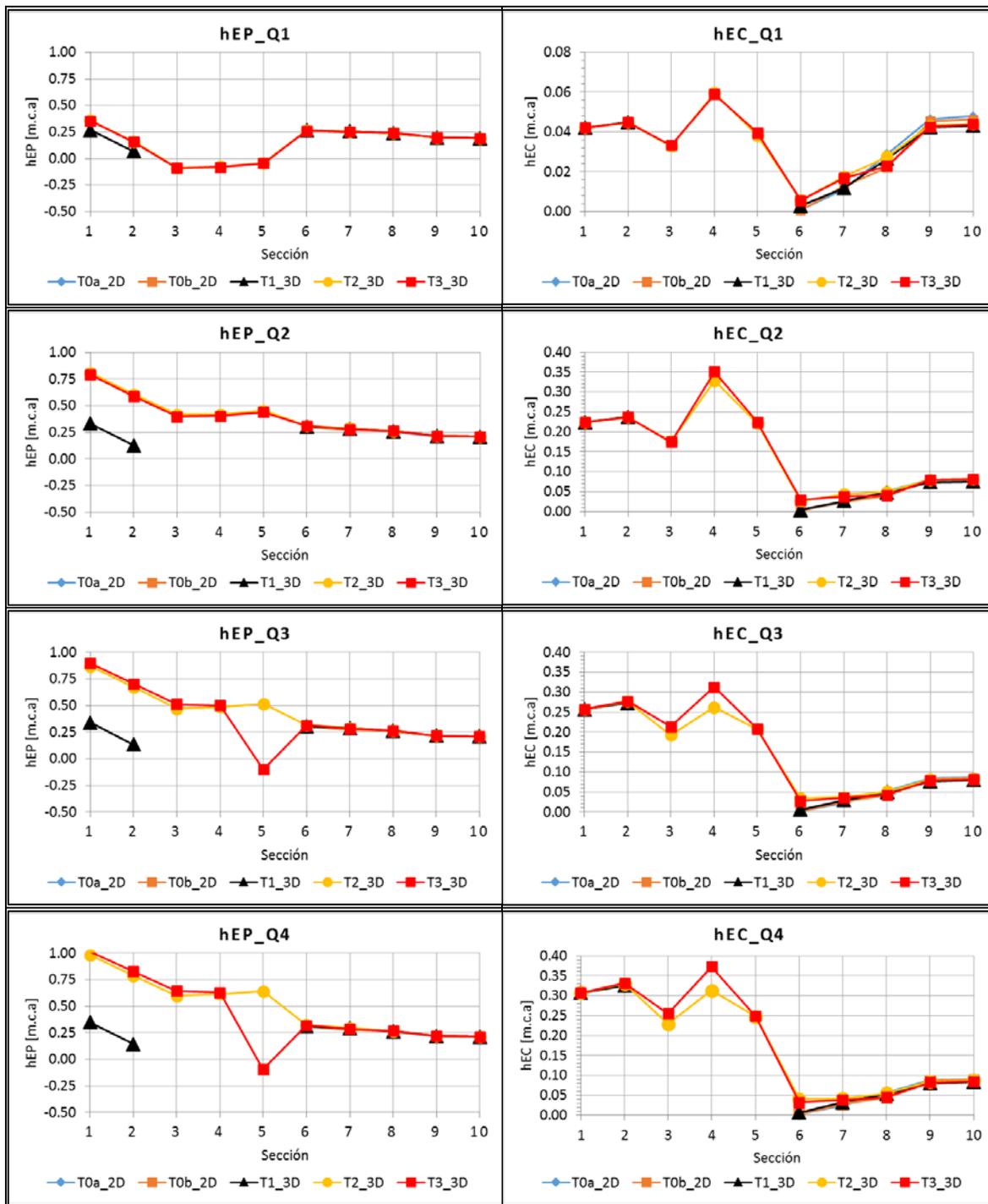


Figura 66. Valores de la cabeza de energía potencial h_{EP} (m.c.a) y la cabeza de energía cinética promedio h_{EC} (m.c.a). T#: Topología.

Fuente. *Este estudio*.

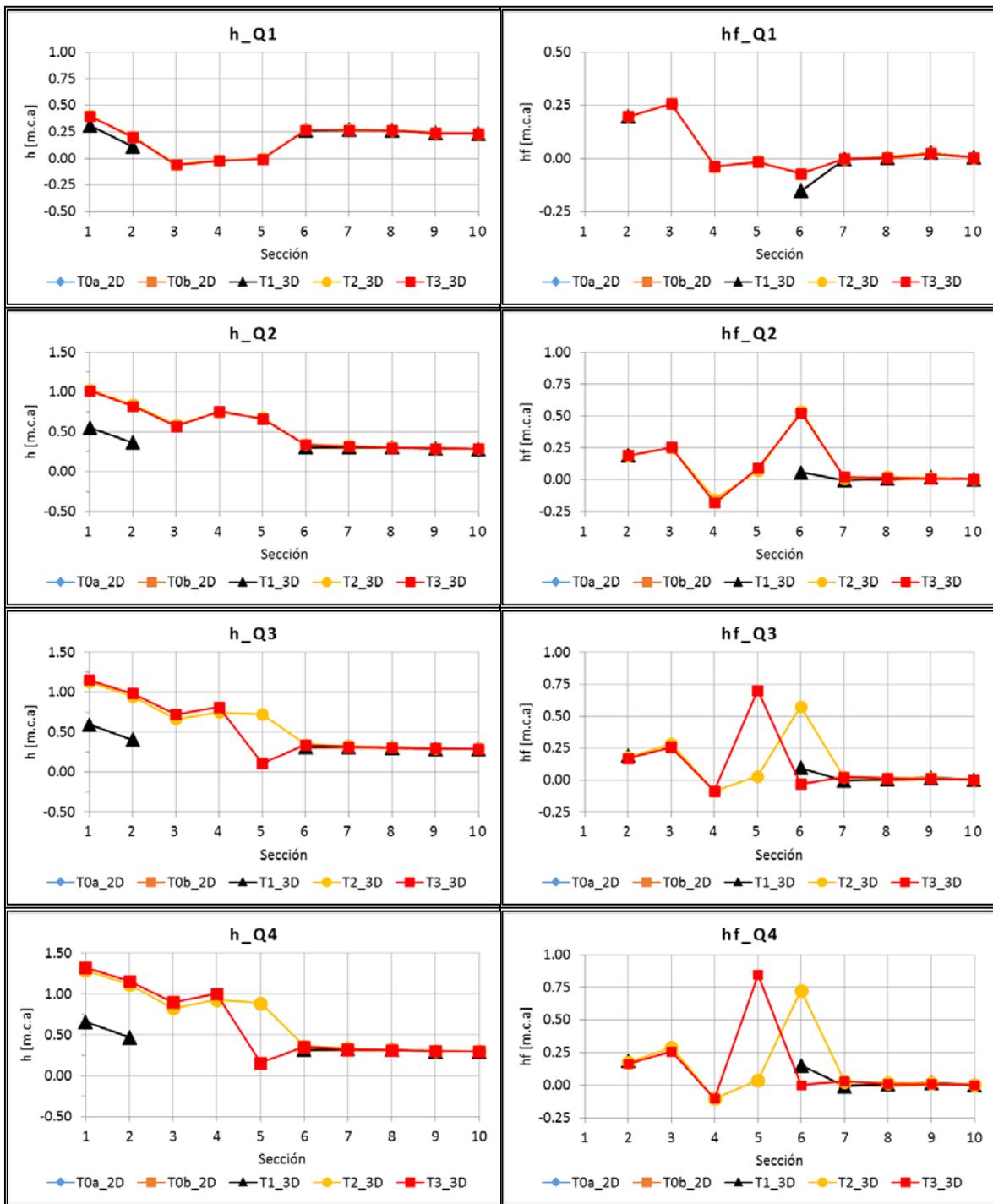


Figura 67. Valores de la cabeza energía total h (m.c.a) y la pérdida por fricción h_f (m.c.a). T#: Topología.
Fuente. *Este estudio*.

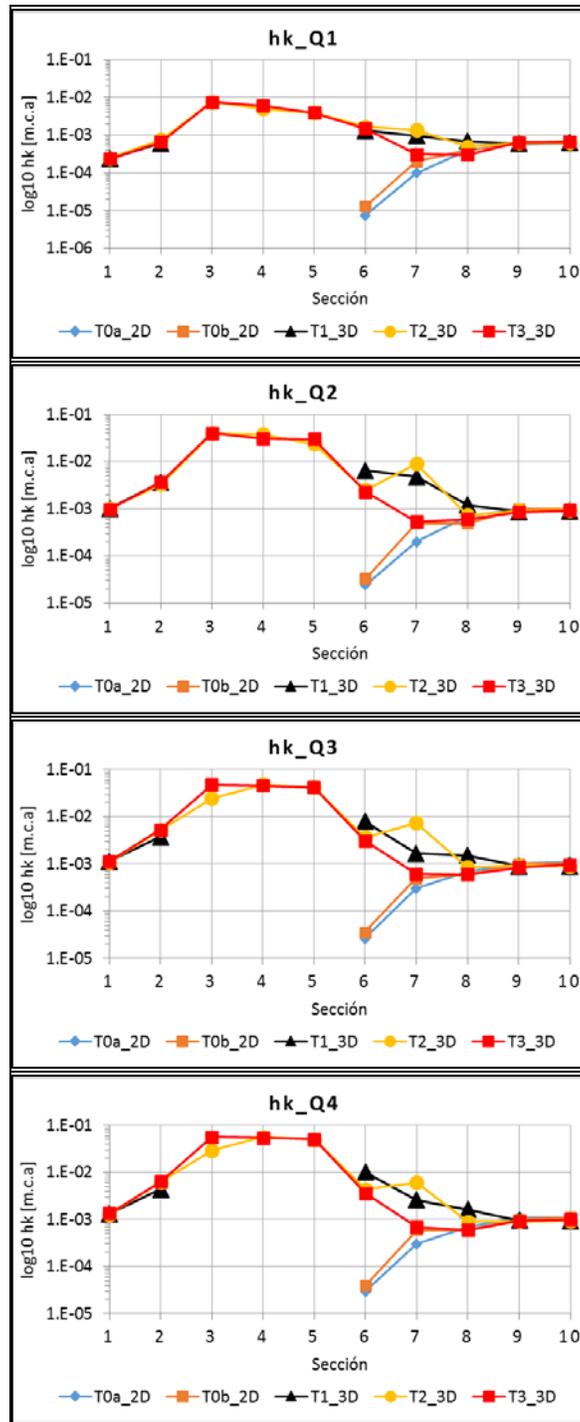


Figura 68. Valores de la cabeza de energía cinética turbulenta h_k (m.c.a). T#: Topología.
Fuente. *Este estudio*.

5.1.3 Modelación comparativa – simetría del flujo

Teniendo en cuenta los resultados del anterior subcapítulo, donde la topología T3 disipa la energía turbulenta de T1 en los 4 caudales, incluso llegando a compararse con datos de la topología ideal T0b, el presente análisis se centra en comparar resultados entre T1 y T3 en cuanto a la simetría del flujo el cual es un tema importante en la decisión de modelar en 3D un dominio completo o solo con la mitad de este utilizando la condición de frontera “Symmetry” en ANSYS FLUENT como herramienta de optimización de tiempo computacional. Para abordar este punto se analizó tres aspectos que son:

- Distribución de flujos primarios (U) y secundarios (VW) en las secciones de control propuestas (con post-procesamiento con el software Matlab).
- Coeficiente de fricción sobre el fondo del canal rectangular (con post-procesamiento de ANSYS).
- Líneas de corriente de agua desde la entrada de la tubería de 4”. (con post-procesamiento de ANSYS).

5.1.3.1 Comentarios sobre la modelación comparativa – simetría del flujo

Se analizó los resultados de las modelaciones en las secciones de control propuestas, graficados de la Figura 69 a la Figura 86, encontrando las siguientes observaciones:

Análisis de la distribución de flujos primarios y secundarios correspondientes a la topología 1:

- En la sección 6 para Q1 T1 se presentan flujos primarios máximos distribuidos a margen derecha e izquierda del tanque por encima de las barras laterales; además, se observan velocidades con signo negativo que representan que el flujo va en contra la dirección del flujo principal en x, como también $U=0$ m/s que representa zonas muertas; sin embargo, esta velocidad igualmente se presenta en cercanía a las paredes y fondo del tanque por la condición de frontera de no deslizamiento.

También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales creando estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131) formadas por la geometría del canal por incidencia de paredes, fondo, barras laterales y flujos dominantes desarrollados aguas arriba de la sección desde el dissipador de energía. Según

el eje central del canal representado por $y = 0$ m el flujo tiende a ser eje simétrico por algunas células sin desarrollarse. Ver la Figura 69.

- En la sección 6 para Q2 T1 se presentan flujos primarios máximos distribuidos a margen derecha e izquierda del tanque por encima de las barras laterales; además, se observan velocidades $U = 0$ m/s o cercanas a este valor que representa zonas muertas o desaceleración, en $y = 0$ m sobre la superficie libre; sin embargo, esta velocidad igualmente se presenta en cercanía a las paredes y fondo del tanque por la condición de frontera de no deslizamiento.

También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales creando estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131) desarrolladas por la geometría del canal por incidencia de paredes, fondo, barras laterales y flujos dominantes formados aguas arriba de la sección desde el dissipador de energía. Según el eje central del canal representado por $y = 0$ m el flujo tiende a ser eje simétrico por algunas células sin desarrollarse. Ver la Figura 69.

- En la sección 6 para Q3 T1 se presentan flujos primarios máximos distribuidos a margen derecha e izquierda del tanque por encima de las barras laterales; además, se observan velocidades $U = 0$ m/s o cercanas a este valor que representa zonas muertas o desaceleración, en $y = 0$ m sobre la superficie libre; sin embargo, esta velocidad igualmente se presenta en cercanía a las paredes y fondo del tanque por la condición de frontera de no deslizamiento.

También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales creando estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131) desarrolladas por la geometría del canal por incidencia de paredes, fondo, barras laterales y flujos dominantes formados aguas arriba de la sección desde el dissipador de energía. Según el eje central del canal representado por $y = 0$ m el flujo es eje simétrico. Ver la Figura 69.

- En la sección 6 para Q4 T1 se presentan flujos primarios máximos distribuidos a margen derecha e izquierda del tanque por encima de las barras laterales; además, se observan velocidades $U = 0$ m/s o cercanas a este valor que representa zonas muertas o desaceleración, en $y = 0$ m sobre la

superficie libre; sin embargo, esta velocidad igualmente se presenta en cercanía a las paredes y fondo del tanque por la condición de frontera de no deslizamiento.

También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales creando estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131) desarrolladas por la geometría del canal por incidencia de paredes, fondo, barras laterales y flujos dominantes formados aguas arriba de la sección desde el dissipador de energía. Según el eje central del canal representado por $y = 0\text{m}$ el flujo es eje simétrico. Ver la Figura 69.

- En la sección 7 donde inicia el canal rectangular y punto de ataque, para T1 y los cuatro caudales se presentan flujos primarios máximos distribuidos a margen derecha e izquierda por incidencia de las barras laterales del tanque; además, se observan velocidades $U = 0\text{ m/s}$ en cercanía a las paredes y fondo del canal por la condición de frontera de no deslizamiento.

También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales creando estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131) desarrolladas por la geometría del canal por incidencia de paredes, fondo, barras laterales y flujos dominantes formados aguas arriba de la sección desde el tanque. Según el eje central del canal representado por $y = 0\text{m}$ el flujo es eje simétrico. Ver la Figura 70.

- En la sección 8 donde se encuentra el punto de reataque en el canal rectangular, para T1 y los cuatro caudales se presentan flujos primarios máximos distribuidos eje simétricamente a excepción de una leve variación en $Q1$; además, se observan velocidades $U = 0\text{ m/s}$ en cercanía a las paredes y fondo del canal por la condición de frontera de no deslizamiento. También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales sin estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131). Según el eje central del canal representado por $y = 0\text{m}$ el flujo es eje simétrico. Ver la Figura 71.
- En la sección 10 donde se encuentra un flujo uniforme en el canal rectangular, para T1 y los cuatro caudales se presentan flujos primarios máximos distribuidos eje simétricamente a excepción de una leve variación en $Q1$; además, se observan velocidades $U = 0\text{ m/s}$ en cercanía a las paredes y fondo del canal por la condición de frontera de no deslizamiento. También se

observan flujos secundarios verticales descendentes desapareciendo los ascendentes y transversales sin estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131) con velocidades cercanas a $VW = 0\text{m}$ en comparación a las demás secciones, pero el flujo primario U aumento. Según el eje central del canal representado por $y = 0\text{m}$ el flujo es eje simétrico. Ver la Figura 72.

Análisis de la distribución de flujos primarios y secundarios correspondientes a la topología 3:

- En la sección 6 para Q1 T3 se presentan flujos primarios máximos distribuidos a margen derecha e izquierda del tanque por debajo de las barras laterales en cercanías de las paredes laterales y el fondo; además, se observan velocidades $U = 0\text{ m/s}$ que representa zonas muertas; sin embargo, esta velocidad también se presenta en cercanía a las paredes y fondo del tanque por la condición de frontera de no deslizamiento.

También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales creando estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131) formadas por la geometría del canal por incidencia de paredes, fondo, barras laterales y flujos dominantes desarrollados aguas arriba de la sección desde el dissipador de energía. Según el eje central del canal representado por $y = 0\text{ m}$ el flujo no es eje simétrico por la célula a margen izquierda del tanque sesgada a la derecha con mayor diámetro. Ver la Figura 73.

- En la sección 6 para Q2 T3 se presentan flujos primarios máximos distribuidos a margen derecha e izquierda del tanque por debajo de las barras laterales en cercanías de las paredes laterales y el fondo; además, se observan velocidades con signo negativo que representa que el flujo viaja en sentido contrario al flujo principal en el eje x positivo y $U = 0\text{ m/s}$ o cercanas a este valor que representa zonas muertas o desaceleración respectivamente, en $y = 0\text{m}$ sobre la superficie libre y en las células; sin embargo, esta velocidad también se presenta en cercanía a las paredes y fondo del tanque por la condición de frontera de no deslizamiento.

También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales creando estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131) desarrolladas por la geometría del canal por incidencia de paredes, fondo, barras laterales

y flujos dominantes formados aguas arriba de la sección desde el dissipador de energía. Según el eje central del canal representado por $y = 0\text{m}$ el flujo tiende a ser eje simétrico por algunas células sin desarrollarse. Ver la Figura 73.

- En la sección 6 para Q3 T3 y para Q4 T3 se presentan flujos primarios máximos distribuidos a margen derecha e izquierda del tanque por debajo de las barras laterales en cercanías de las paredes laterales y el fondo; además, se observan velocidades con signo negativo que representa que el flujo viaja en sentido contrario al flujo principal en el eje x positivo y $U = 0\text{ m/s}$ o cercanas a este valor que representa zonas muertas o desaceleración respectivamente, en $y = 0\text{m}$ sobre la superficie libre y en las células; sin embargo, esta velocidad también se presenta en cercanía a las paredes y fondo del tanque por la condición de frontera de no deslizamiento.

También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales creando estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131) formadas por la geometría del canal por incidencia de paredes, fondo, barras laterales y flujos dominantes desarrollados aguas arriba de la sección desde el dissipador de energía. Según el eje central del canal representado por $y = 0\text{ m}$ el flujo no es eje simétrico por células a margen derecha del tanque que se encuentran sesgadas a la izquierda con mayor diámetro. Ver la Figura 73.

- En la sección 7 donde inicia el canal rectangular y punto de ataque, para T3 y los cuatro caudales se presentan flujos primarios máximos distribuidos de forma sesgada hacia la margen derecha; además, se observan velocidades $U = 0\text{ m/s}$ en cercanía a las paredes y fondo del canal por la condición de frontera de no deslizamiento. También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales creando estructuras vorticales de gran escala “células” (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 123 - 131) de diferentes diámetros desarrolladas por la geometría del canal por incidencia de paredes, fondo, barras laterales y flujos dominantes formados aguas arriba de la sección desde el tanque. Según el eje central del canal representado por $y = 0\text{m}$ el flujo tiende a ser eje simétrico por el sesgo del flujo primario y flujos secundarios con células cuasi desarrolladas. Ver la Figura 74.

- En la sección 8 donde se encuentra el punto de reataque en el canal rectangular, para T3 y los cuatro caudales se presentan flujos primarios máximos distribuidos eje simétricamente a excepción de una leve variación en Q1; además, se observan velocidades $U= 0$ m/s en cercanía a las paredes y fondo del canal por la condición de frontera de no deslizamiento.

También se observan flujos secundarios verticales ascendentes, descendentes y transversales con estructuras vorticales de gran escala “células” bien definidas a excepción de Q1 donde no se desarrollaron. Según el eje central del canal representado por $y = 0$ m el flujo es eje simétrico. Ver la Figura 75.

- En la sección 10 donde se encuentra un flujo uniforme en el canal rectangular, para T1 y los cuatro caudales se presentan flujos primarios máximos distribuidos eje simétricamente a excepción de una leve variación en Q1; además, se observan velocidades $U= 0$ m/s en cercanía a las paredes y fondo del canal por la condición de frontera de no deslizamiento.

También se observan flujos secundarios verticales descendentes desapareciendo los ascendentes y transversales sin estructuras vorticales de gran escala “células” con velocidades cercanas a $VW= 0$ m en comparación a las demás secciones aguas arriba, pero el flujo primario U aumento. Según el eje central del canal representado por $y = 0$ m el flujo es eje simétrico. Ver la Figura 76.

En síntesis, desde el análisis de la distribución de flujos primarios y secundarios, para la topología T1 según los resultados de las modelaciones, el flujo es claramente eje simétrico para los caudales Q3 y Q4 de la sección 6 a la 10, que para Q1 y Q2 es claro desde la sección 7 a la 10. Para la topología T3 la eje-simetría del flujo es clara para los 4 caudales desde la sección 8 a la 10 y con poca claridad o nula en la sección 6 y 7. Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que la decisión de modelar el dominio completo fue acertada, ya que la simetría del flujo varía según la topología, el caudal inyectado y la sección en la que se analizó.

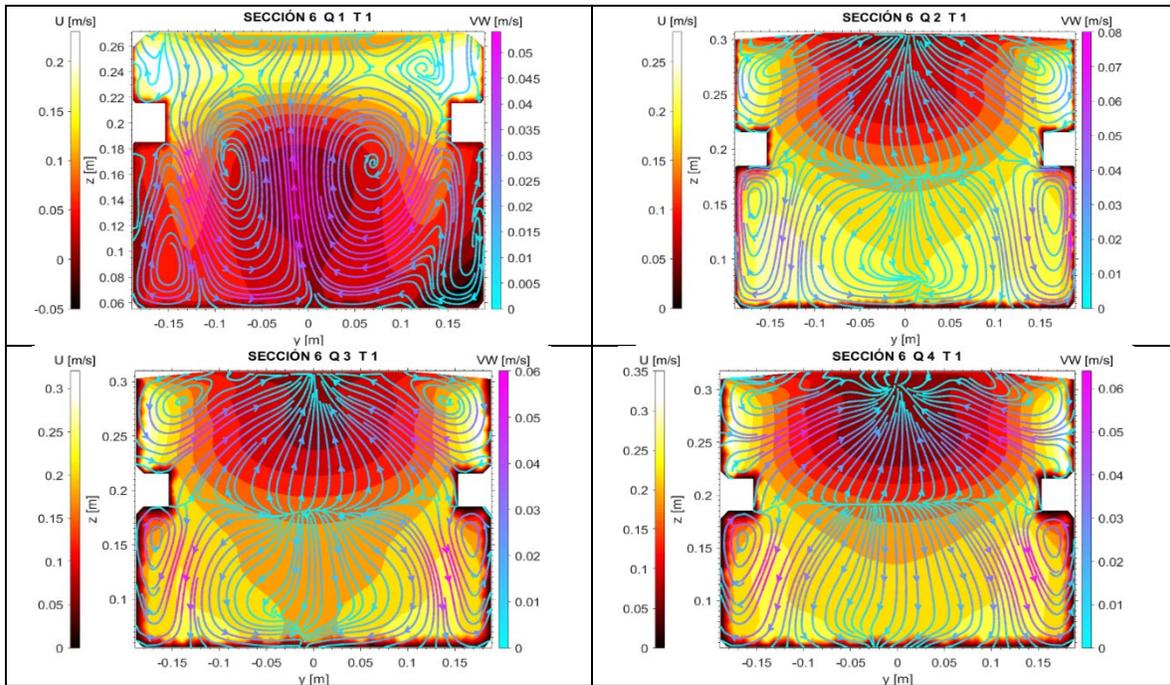


Figura 69. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 6 de la topología 1 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio.*

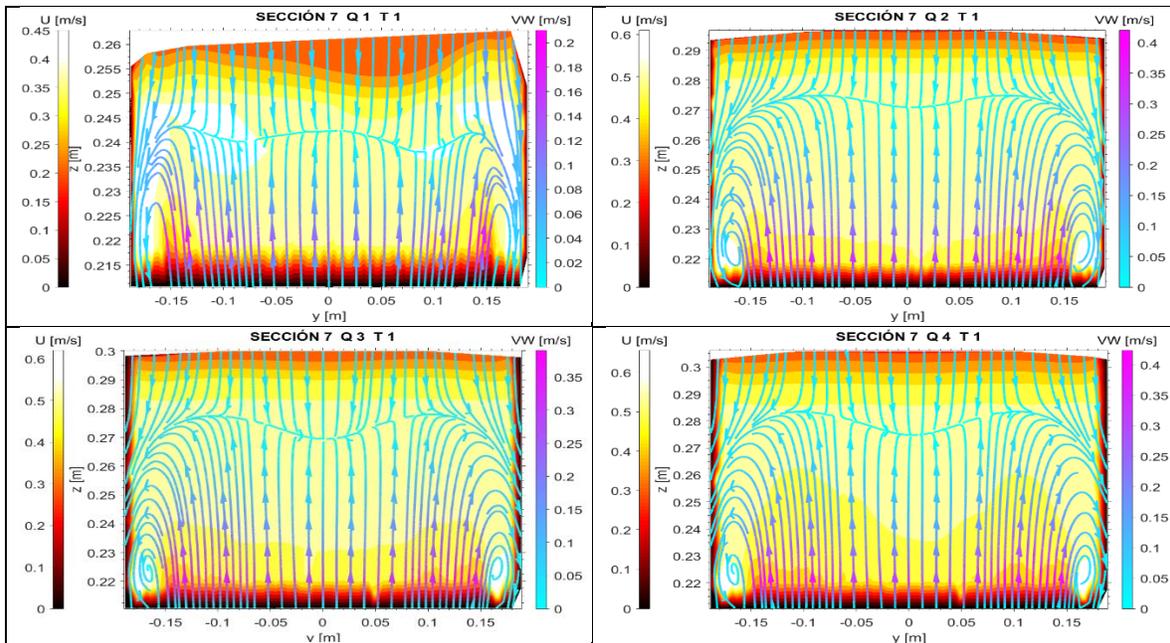


Figura 70. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 7 de la topología 1 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio.*

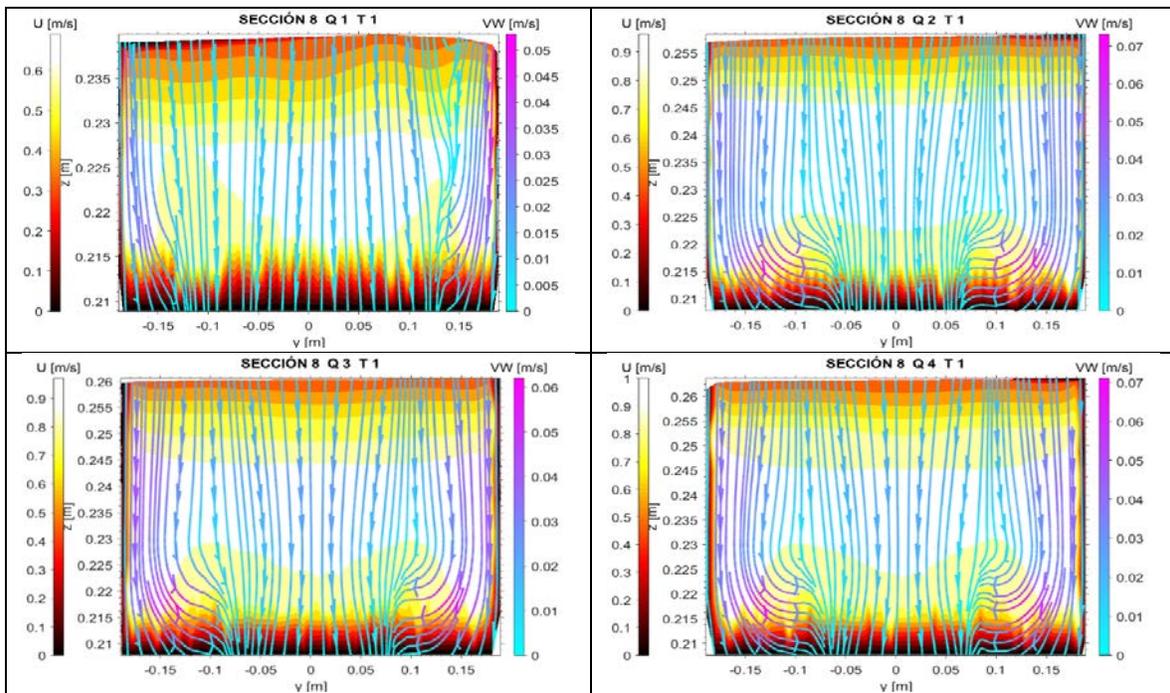


Figura 71. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 8 de la topología 1 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio*.

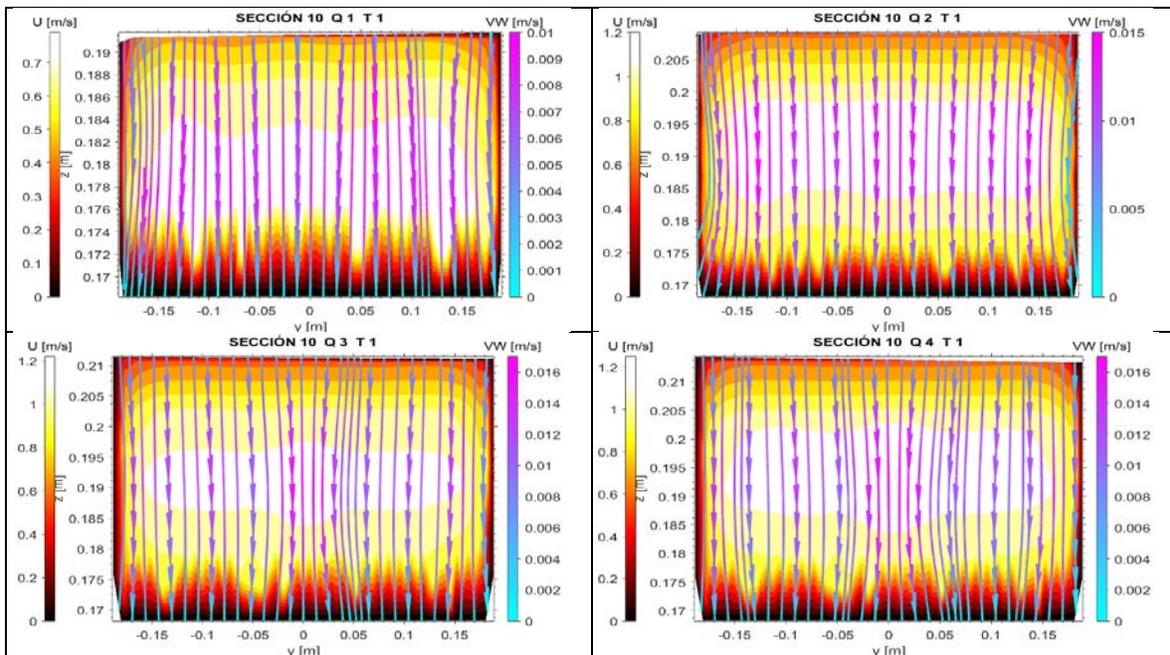


Figura 72. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 10 de la topología 1 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio*.

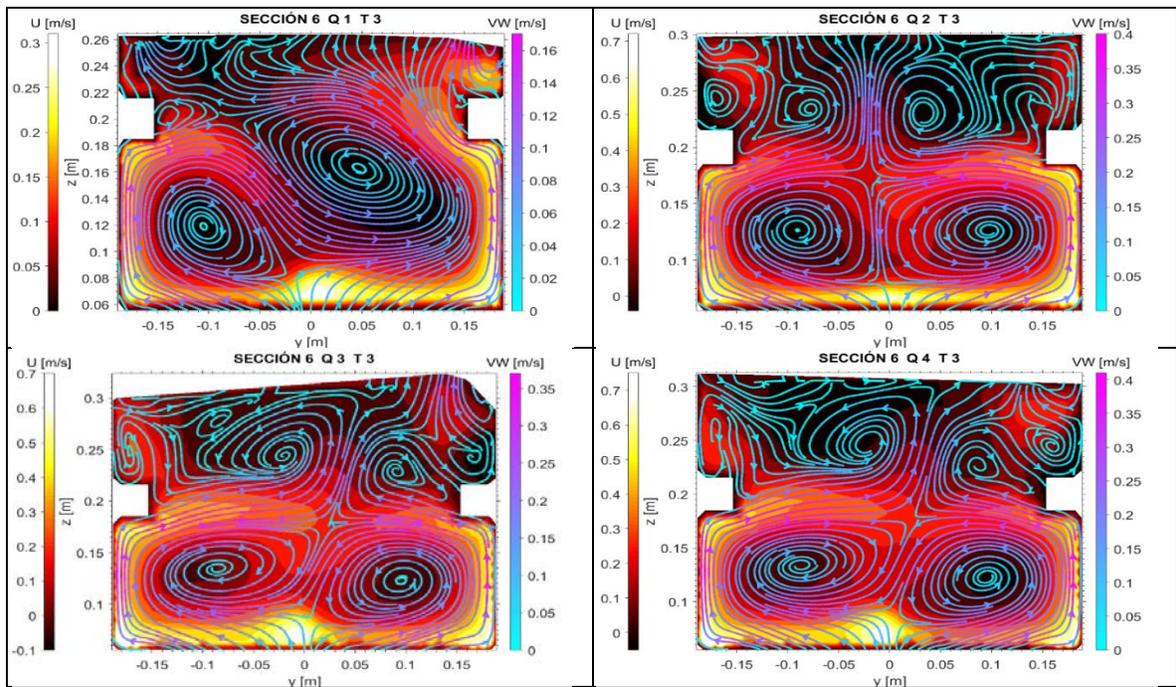


Figura 73. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 6 de la topología 3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio.*

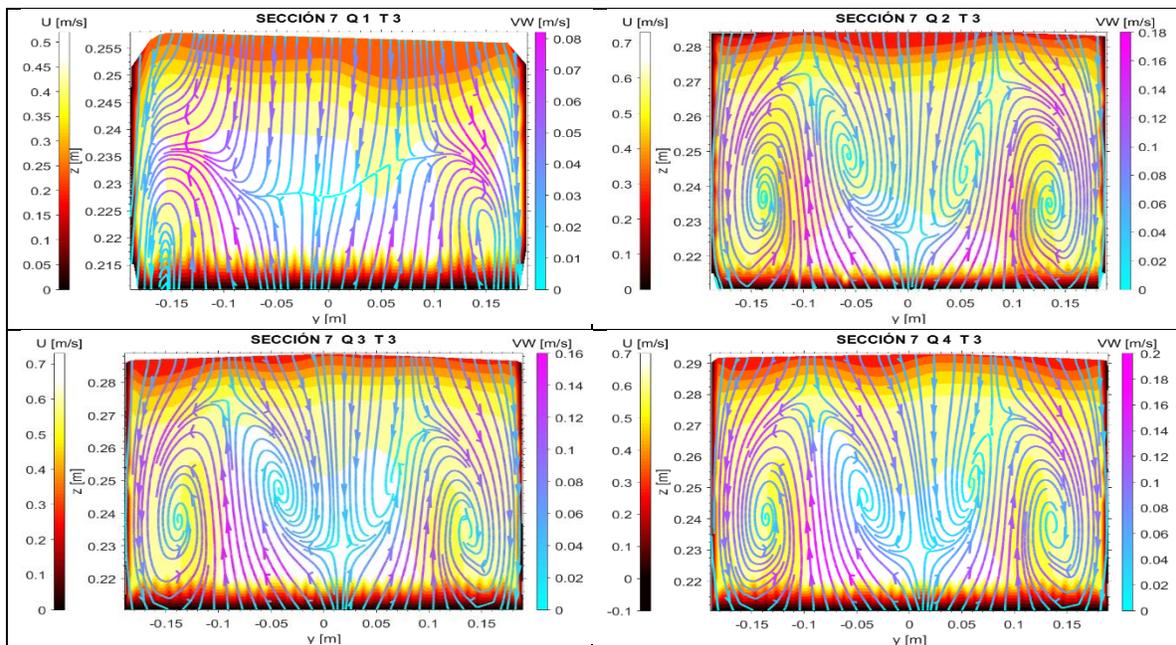


Figura 74. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 7 de la topología 3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio.*

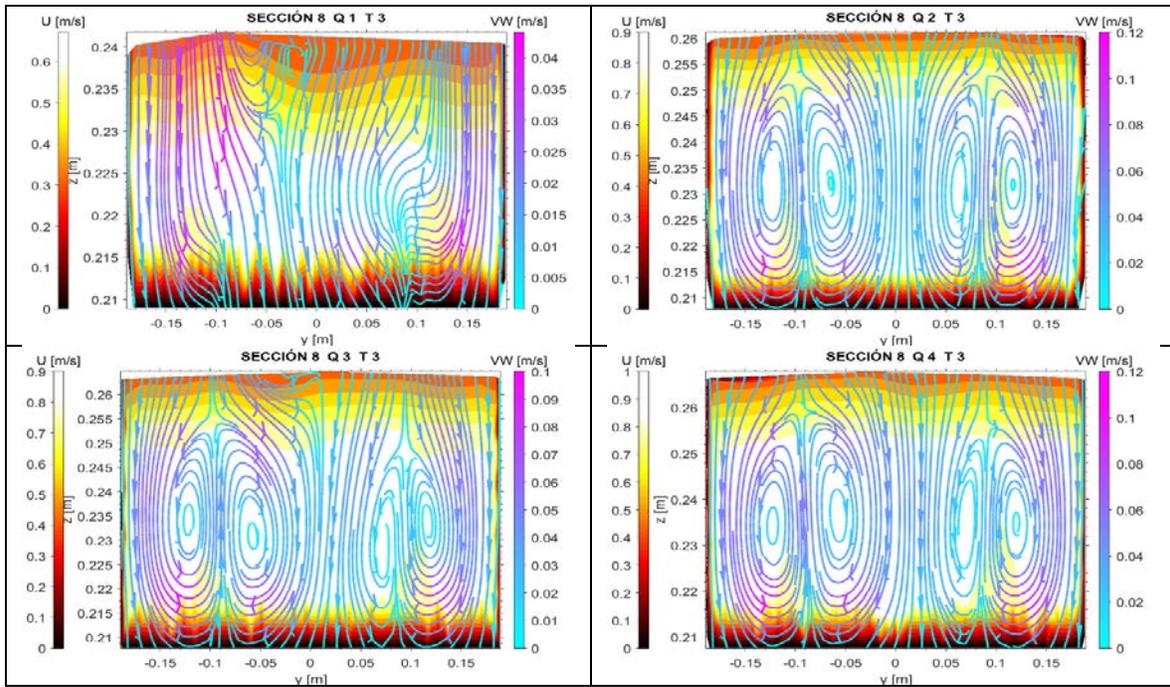


Figura 75. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 8 de la topología 3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio*.

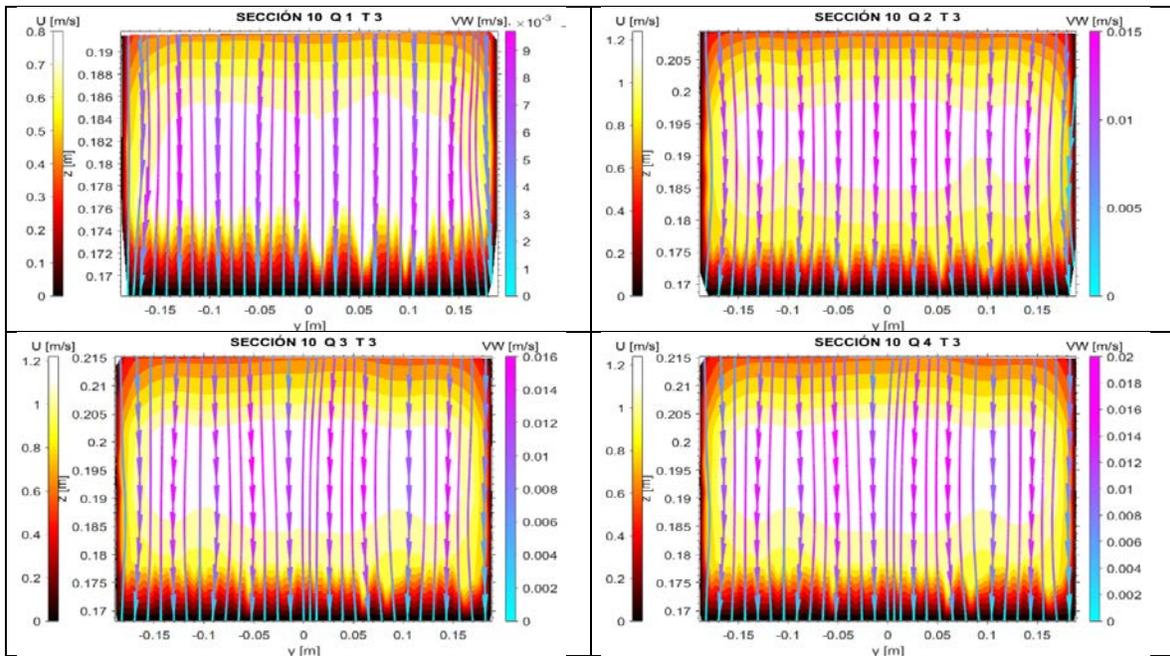


Figura 76. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en la sección 10 de la topología 3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio*.

Teniendo en cuenta que el coeficiente de fricción C_f es la relación del esfuerzo cortante local en el muro (paredes o fondo del canal) con la presión dinámica, es necesario multiplicar por el ancho del canal para obtener un C_f promedio en la sección. Este criterio se utiliza tanto en 2D y 3D a la hora de compararlo con el esfuerzo cortante global calculado inicialmente al construir la primera celda paralela a la condición de frontera “Wall” del dominio en general.

A continuación, se presenta el análisis de la distribución del coeficiente de fricción C_f correspondiente a la topología 1:

- Para la topología T1 y Q1 la distribución de C_f de la sección 7 a 8 se observa que aproximadamente la mitad del tramo contiene valores mínimos debido a los gradientes de presión y del flujo primario. Inmediatamente después de estos valores mínimos los flujos secundarios distribuyen C_f dibujándose dos picos hacia margen derecha e izquierda pero debilitándose al atravesar la sección 8 para después de una manera homogénea que aumenta hasta encontrar valores constantes hasta la sección 10; sin embargo, al pasar la sección 10 aumenta por efectos de flujos secundarios descendentes y por estar en cercanías de un flujo levemente acelerado que es la napa de agua con dirección vertical (z) negativo (Ver la Figura 81).

Tomando valores máximos de Rex , $C_f \cdot b$ y localizándolos en la Figura 78 se establece un flujo laminar en la sección 8 y más adelante el flujo pasa a turbulento en desarrollo en las secciones 9 y 10, donde el “ n ” de Manning se vuelve homogéneo acercándose al “ n ” teórico propuesto inicialmente (Ver Figura 79 y Figura 80). Según el eje central del canal representado por $y = 0m$ el flujo es eje simétrico.

- Para la topología T1 y Q2 la distribución de C_f de la sección 7 a 8 se observa que aproximadamente la mitad del tramo contiene valores mínimos debido a los gradientes de presión y del flujo primario. Inmediatamente después de estos valores mínimos los flujos secundarios distribuyen C_f dibujándose dos picos hacia margen derecha e izquierda pero debilitándose al atravesar la sección 9 para después de una manera homogénea aumenta hasta encontrar valores constantes hasta la sección 10; sin embargo, al pasar la sección 10 aumenta

por efectos de flujos secundarios descendentes y al estar en cercanías de un flujo levemente acelerado que es la napa de agua con dirección vertical (z) negativo (Ver la Figura 81).

Tomando valores máximos de R_{ex} , C_f^*b y localizándolos en la Figura 78 se establece un flujo laminar en la sección 8 y más adelante el flujo pasa a turbulento en desarrollo en las secciones 9 y 10, donde el “ n ” de Manning se vuelve homogéneo acercándose al “ n ” teórico propuesto inicialmente (Ver Figura 79 y Figura 80). Según el eje central del canal representado por $y = 0m$ el flujo es eje simétrico.

- Para la topología T1 y Q3 la distribución de C_f de la sección 7 a 8 se observa que aproximadamente la mitad del tramo contiene valores mínimos debido a los gradientes de presión y del flujo primario. Inmediatamente después de estos valores mínimos los flujos secundarios distribuyen C_f dibujándose dos picos hacia margen derecha e izquierda pero debilitándose al atravesar mitad de tramo entre la sección 8 y 9 para después distribuirse con un valor máximo en el eje central del canal hasta el final del canal, donde aumenta por efectos de flujos secundarios descendentes y al estar en cercanías de un flujo levemente acelerado que es la napa de agua con dirección vertical (z) negativo (Ver la Figura 81).

Tomando valores máximos de R_{ex} , C_f^*b y localizándolos en la Figura 78 se establece un flujo laminar en la sección 8 y más adelante el flujo pasa a turbulento en desarrollo en las secciones 9 y 10, donde el “ n ” de Manning se vuelve homogéneo acercándose al “ n ” teórico propuesto inicialmente (Ver Figura 79 y Figura 80). Según el eje central del canal representado por $y = 0m$ el flujo es eje simétrico.

- Para la topología T1 y Q4 la distribución de C_f de la sección 7 a 8 se observa que aproximadamente la mitad del tramo contiene valores mínimos debido a los gradientes de presión y del flujo primario. Inmediatamente después de estos valores mínimos los flujos secundarios distribuyen C_f dibujándose dos picos hacia margen derecha e izquierda pero debilitándose al atravesar mitad de tramo entre la sección 8 y 9 para después distribuirse con un valor máximo en el eje central del canal hasta el final del canal, donde aumenta por efectos de flujos secundarios descendentes y al estar en cercanías de un flujo levemente acelerado que es la napa de agua con dirección vertical (z) negativo (Ver la Figura 81).

Tomando valores máximos de R_{ex} , $C_f \cdot b$ y localizándolos en la Figura 78 se establece un flujo laminar en la sección 8 y más adelante el flujo pasa a turbulento en desarrollo en las secciones 9 y 10, donde el “n” de Manning se vuelve homogéneo acercándose al “n” teórico propuesto inicialmente (Ver Figura 79 y Figura 80). Según el eje central del canal representado por $y = 0m$ el flujo es eje simétrico.

Análisis de la distribución del coeficiente de fricción C_f correspondientes a la topología 3:

- Para la topología T3 y Q1 la distribución de C_f de la sección 7 a 8 se observa que aproximadamente la mitad del tramo contiene valores mínimos debido a los gradientes de presión y del flujo primario, pero más fuertes que lo que pasa en la topología T3 y Q1 que por efectos de flujos secundarios distribuyen C_f dibujándose dos picos hacia margen derecha e izquierda pero debilitándose al atravesar la sección 8 para después de una manera homogénea aumenta hasta encontrar valores constantes hasta la sección 10; sin embargo al pasar la sección 10 aumenta por efectos de flujos secundarios descendentes y al estar en cercanías de un flujo levemente acelerado que es la napa de agua con dirección vertical (z) negativo (Ver la Figura 83).

Tomando valores máximos de R_{ex} , $C_f \cdot b$ y localizándolos en la Figura 78 se establece un flujo laminar en la sección 8 y más adelante el flujo pasa a turbulento en desarrollo en las secciones 9 y 10, donde el “n” de Manning se vuelve homogéneo acercándose al “n” teórico propuesto inicialmente (Ver Figura 79 y Figura 80). Según el eje central del canal representado por $y = 0m$ el flujo es eje simétrico.

- Para la topología T3 y Q2 la distribución de C_f de la sección 7 a 8 se observa que aproximadamente la mitad del tramo contiene valores mínimos debido a los gradientes de presión y del flujo primario, pero más fuertes que lo que pasa en la topología T3 y Q2 que por efectos de flujos secundarios distribuyen C_f dibujándose dos picos hacia margen derecha e izquierda pero debilitándose al atravesar la sección 9 para después de una manera homogénea aumenta hasta encontrar valores constantes hasta la sección 10; sin embargo al pasar la sección 10 aumenta por efectos de flujos secundarios descendentes y al estar en cercanías de un flujo levemente acelerado que es la napa de agua con dirección vertical (z) negativo (Ver la Figura 83).

Tomando valores máximos de R_{ex} , $C_f \cdot b$ y localizándolos en la Figura 78 se establece un flujo laminar en la sección 8 y más adelante el flujo pasa a turbulento en desarrollo en las secciones 9 y 10, donde el “n” de Manning se vuelve homogéneo acercándose al “n” teórico propuesto inicialmente (Ver Figura 79 y Figura 80). Según el eje central del canal representado por $y = 0m$ el flujo es eje simétrico.

- Para la topología T3 y Q3 la distribución de C_f de la sección 7 a 8 se observa que aproximadamente la mitad del tramo contiene valores mínimos debido a los gradientes de presión y del flujo primario, pero más fuertes que lo que pasa en la topología T3 y Q3 que por efectos de flujos secundarios distribuyen C_f dibujándose dos picos hacia margen derecha e izquierda pero debilitándose al atravesar la sección 9 para después de una manera homogénea aumenta hasta encontrar valores constantes hasta la sección 10; sin embargo al pasar la sección 10 aumenta por efectos de flujos secundarios descendentes y al estar en cercanías de un flujo levemente acelerado que es la napa de agua con dirección vertical (z) negativo (Ver la Figura 83).

Tomando valores máximos de R_{ex} , $C_f \cdot b$ y localizándolos en la Figura 78 se establece un flujo laminar en la sección 8 y más adelante el flujo pasa a turbulento en desarrollo en las secciones 9 y 10, donde el “n” de Manning se vuelve homogéneo acercándose al “n” teórico propuesto inicialmente (Ver Figura 79 y Figura 80). Según el eje central del canal representado por $y = 0m$ el flujo es eje simétrico.

- Para la topología T3 y Q4 la distribución de C_f de la sección 7 a 8 se observa que aproximadamente la mitad del tramo contiene valores mínimos debido a los gradientes de presión y del flujo primario, pero más fuertes que lo que pasa en la topología T3 y Q4 que por efectos de flujos secundarios distribuyen C_f dibujándose dos picos hacia margen derecha e izquierda pero debilitándose al atravesar la sección 9 para después de una manera homogénea aumenta hasta encontrar valores constantes hasta la sección 10; sin embargo al pasar la sección 10 aumenta por efectos de flujos secundarios descendentes y al estar en cercanías de un flujo levemente acelerado que es la napa de agua con dirección vertical (z) negativo. Según el eje central del canal representado por $y = 0m$ el flujo es eje simétrico (Ver la Figura 83).

Tomando valores máximos de R_{ex} , $C_f \cdot b$ y localizándolos en la Figura 78 se establece un flujo laminar en la sección 8 y más adelante el flujo pasa a turbulento en desarrollo en las secciones 9 y 10, donde el “n” de Manning se vuelve homogéneo acercándose al “n” teórico propuesto inicialmente (Ver Figura 79 y Figura 80). Según el eje central del canal representado por $y = 0$ m el flujo es eje simétrico.

Según (Gautam & Vinayak, 2002, págs. 128 - 130) este tipo de distribuciones de C_f en un canal rectangular tienen relación con los flujos secundarios y los esfuerzos cortantes tal que “las corrientes secundarias idealizadas comparten varias de las características fundamentales de corrientes secundarias en las capas límite, canales cerrados y canales abiertos. La más esencial es el esfuerzo cortante en el fondo, donde aumenta en una región de flujo descendente de las corrientes secundarias, mientras que disminuye en las regiones de flujo ascendente como se muestra en la Fig. 5.16”. Ver la Figura 77, Figura 82 y Figura 84.

En resumen, desde el análisis de la distribución del coeficiente de fricción, para todas las topologías y caudales, desde la sección 8 a la 10 el flujo es eje-simétrico asumiendo que las variaciones son pequeñas a diferencia del análisis de distribución de flujos primarios y secundarios donde se notaba la variabilidad de la eje-simetría entre topologías, caudales y secciones, aunque más completo ya que se aborda la sección 6. La distribución del coeficiente de fricción local está fuertemente relacionada con la distribución de flujos primarios y secundarios en cercanías del fondo del canal, como también con el número de Reynolds en x , el tipo de flujo y el “n” de Manning.

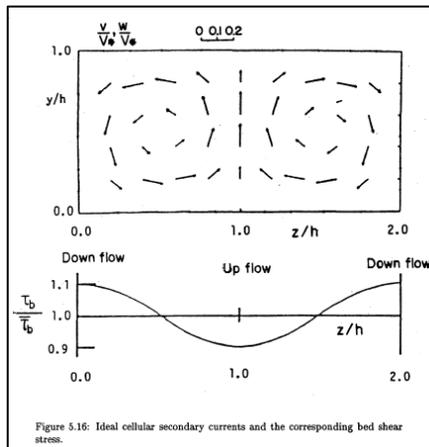


Figura 77. Corrientes secundarias celulares ideales y los correspondientes esfuerzos de corte en el fondo.
Fuente. (Gautam & Vinayak, 2002, pág. 130).

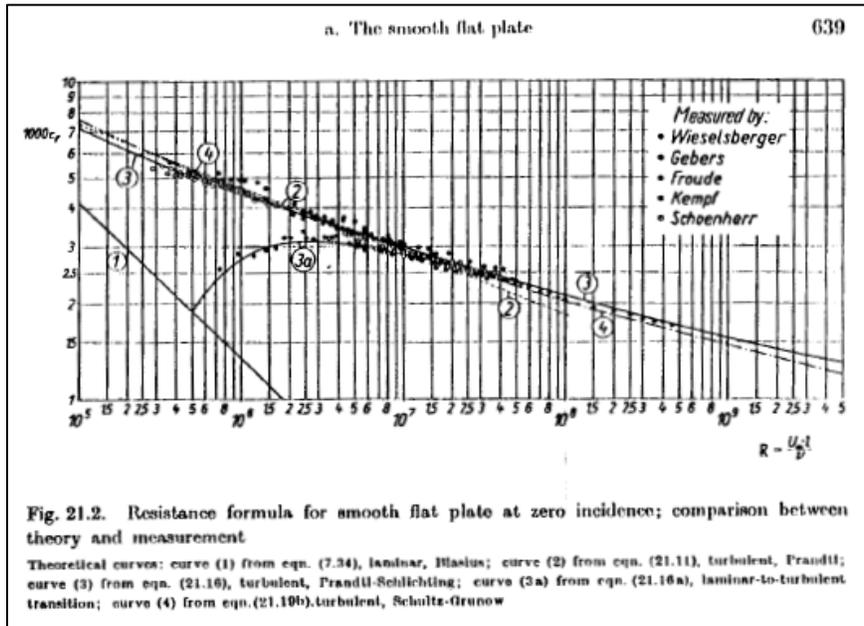


Figura 78. Esquema de curvas teóricas y medidas del coeficiente de fricción local versus número de Reynolds de diferentes tipos de flujo para una placa plana lisa.

Fuente. (Schlichting & Gersten, 2006, pág. 639).

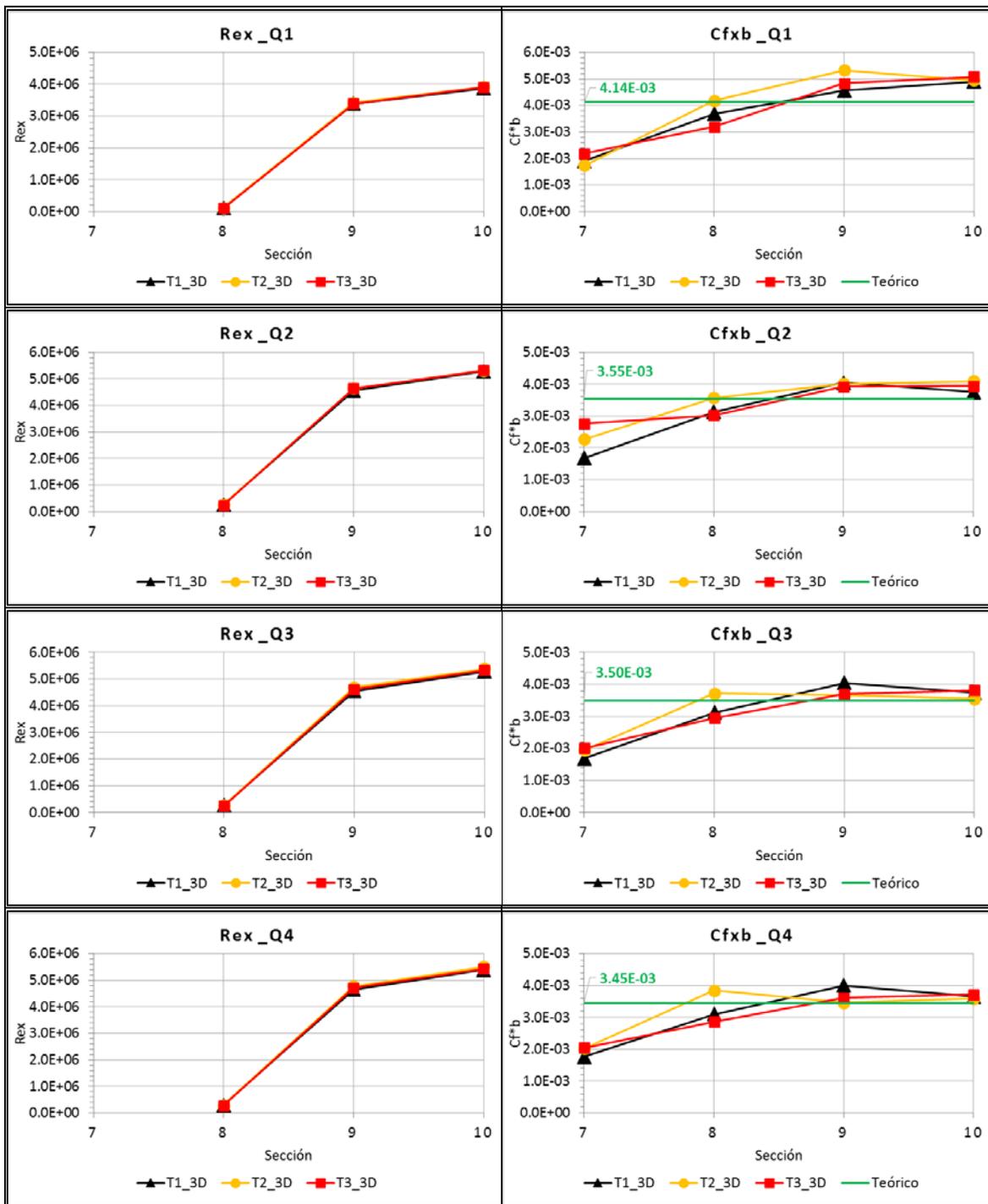


Figura 79. Valores de número de Reynolds R_{ex} y el coeficiente de fricción. T#: Topología.

Fuente. Este estudio.

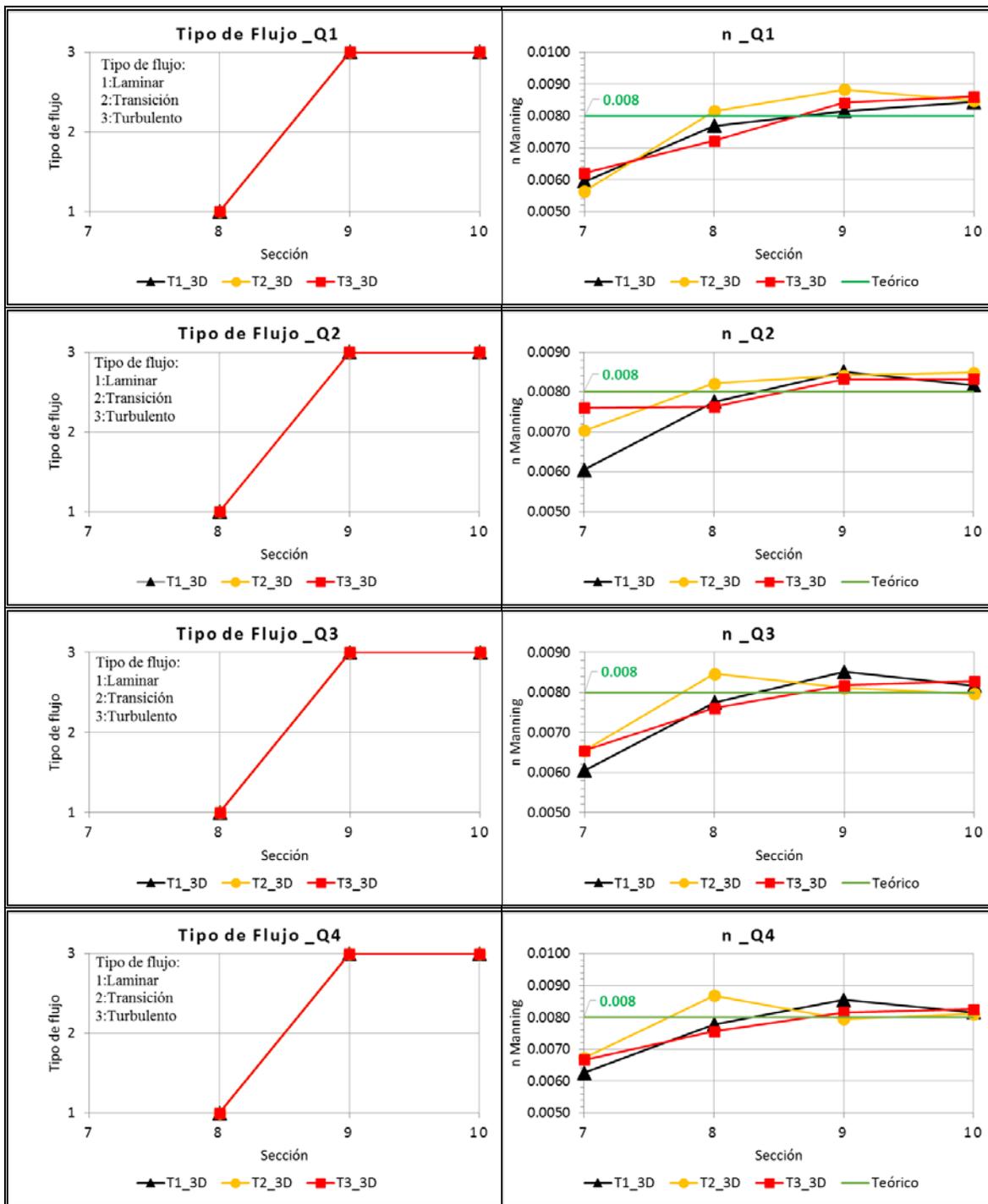


Figura 80. Tipo de flujo y valores de n de Manning. T#: Topología.

Fuente. Este estudio.

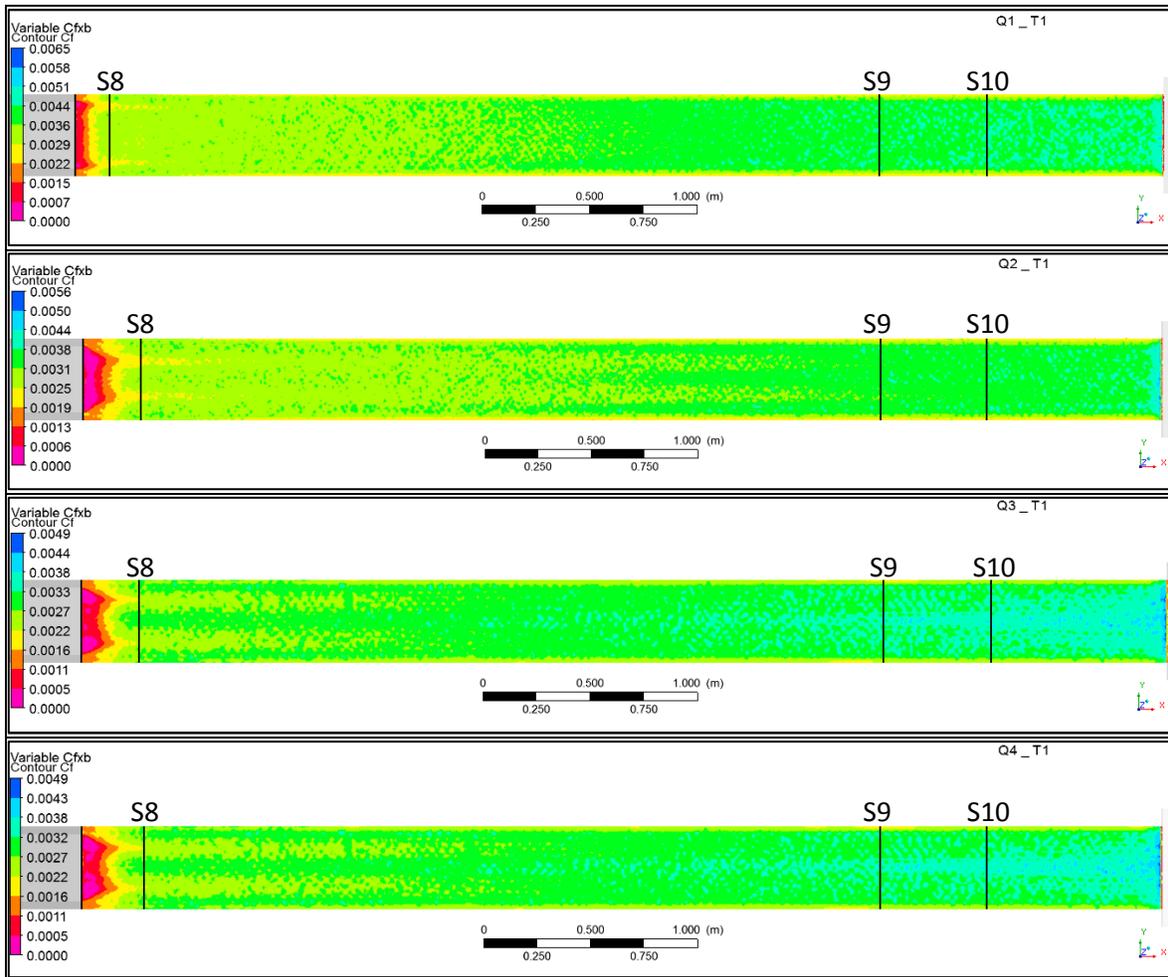


Figura 81. Distribución del coeficiente de fricción por ancho de canal de la topología 1 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4. (Vista de planta).

Fuente. *Este estudio.*

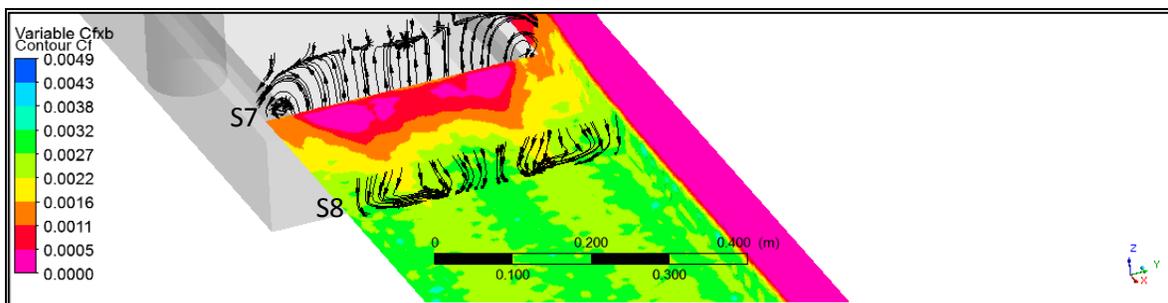


Figura 82. Influencia de los flujos secundarios en la distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, en la sección 7 y 8 de la topología 1, para el caudal Q4.

Fuente. *Este estudio.*

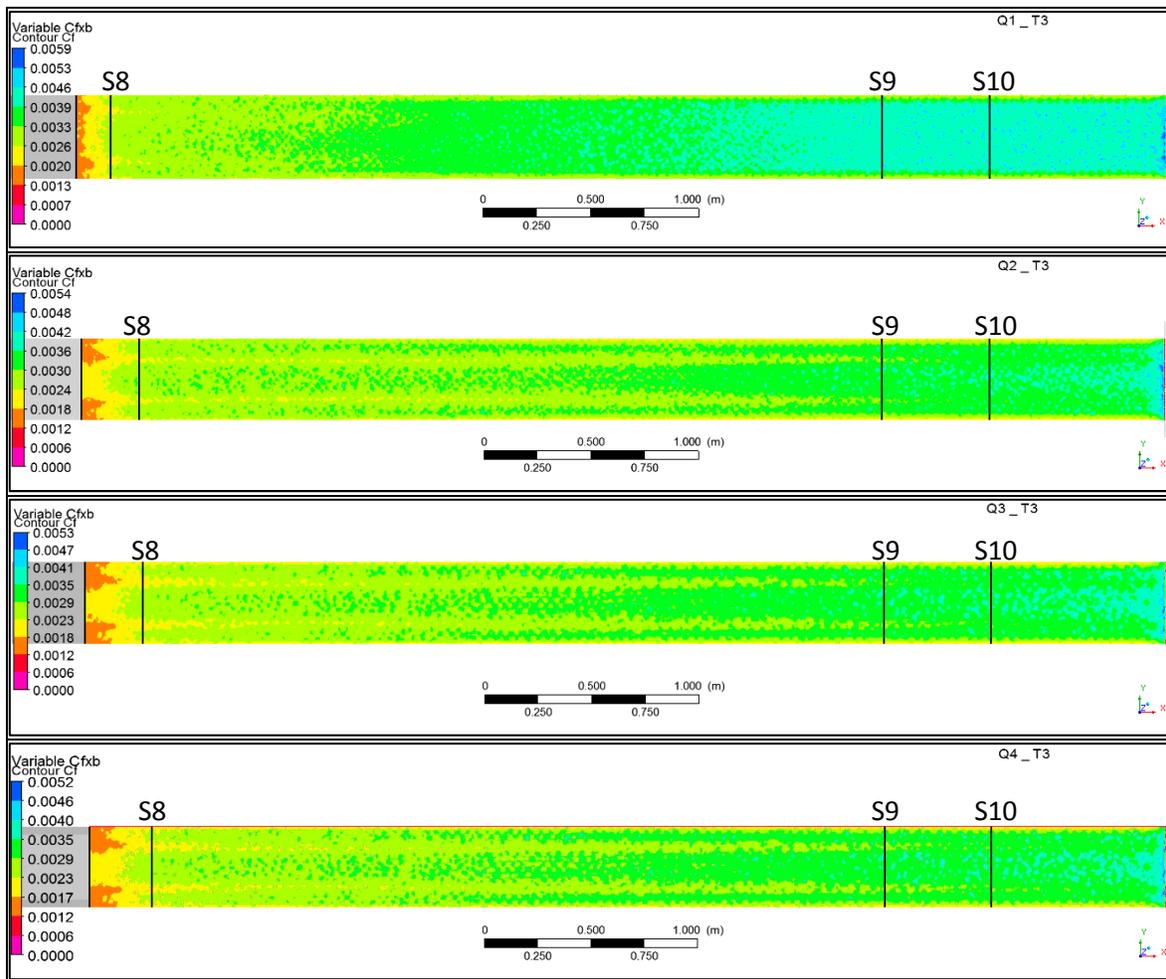


Figura 83. Distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, de la topología 3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4. (Vista de planta).

Fuente. *Este estudio.*

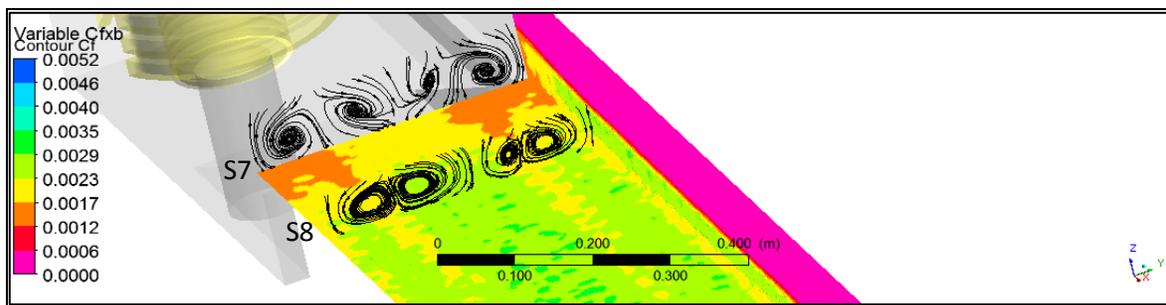


Figura 84. Influencia de los flujos secundarios en la distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, en la sección 7 y 8 de la topología 3, para el caudal Q4.

Fuente. *Este estudio.*

Análisis de la distribución de las líneas de corriente correspondientes a la topología 1:

- Con respecto a la topología T1 y los 4 caudales, las líneas de corriente se distribuyen de una forma acampanada en el chorro ascendente que sale de la tubería de alimentación que aumenta de altura a mayor caudal, que después descansan sobre el volumen de agua en el tanque donde es amortiguado causando una desaceleración con una curvatura en sus líneas llegando a la sección 7 donde comienza el canal rectangular y ocurre un flujo rápidamente acelerado que según las trazas de partículas de agua, se presentan flujos dominantes a margen derecha e izquierda. Según el eje central del canal representado por $y = 0\text{m}$ el flujo es eje simétrico. Ver la Figura 85.

Análisis de la distribución de las líneas de corriente correspondientes a la topología 3:

- Con respecto a la topología T3 y los 4 caudales, las líneas de corriente se distribuyen de una forma caótica en el chorro ascendente que sale de la tubería de alimentación hacia el dissipador de energía donde choca con la parte superior del tubo con agujeros rectangulares, que después pasa por las tres coronas con agujeros circulares donde el flujo se acelera y descansa sobre el volumen de agua en el tanque donde es amortiguado causando una desaceleración pero corrigiendo la curvatura de las líneas de corriente que se formaba con la topología T1, llegando a la sección 7 donde comienza el canal rectangular y ocurre un flujo gradualmente acelerado que según las trazas de partículas de agua, se presentan flujos dominantes a margen izquierda para Q1, en el centro para Q2 y a margen derecha para Q3 y Q4, por lo que confirma que el chorro ascendente en el dissipador de energía sufre un sesgo según el caudal utilizado. Según el eje central del canal representado por $y = 0\text{m}$ el flujo no es eje simétrico. Ver la Figura 86.

Recapitulando, desde el análisis de la distribución de las líneas de corriente para la topología T1 y los 4 caudales el flujo es eje-simétrico; sin embargo, para T3 y los 4 caudales el flujo no es eje-simétrico, teniendo más concordancia con el análisis de distribución de flujos primarios y secundarios que con el análisis del coeficiente de fricción local.

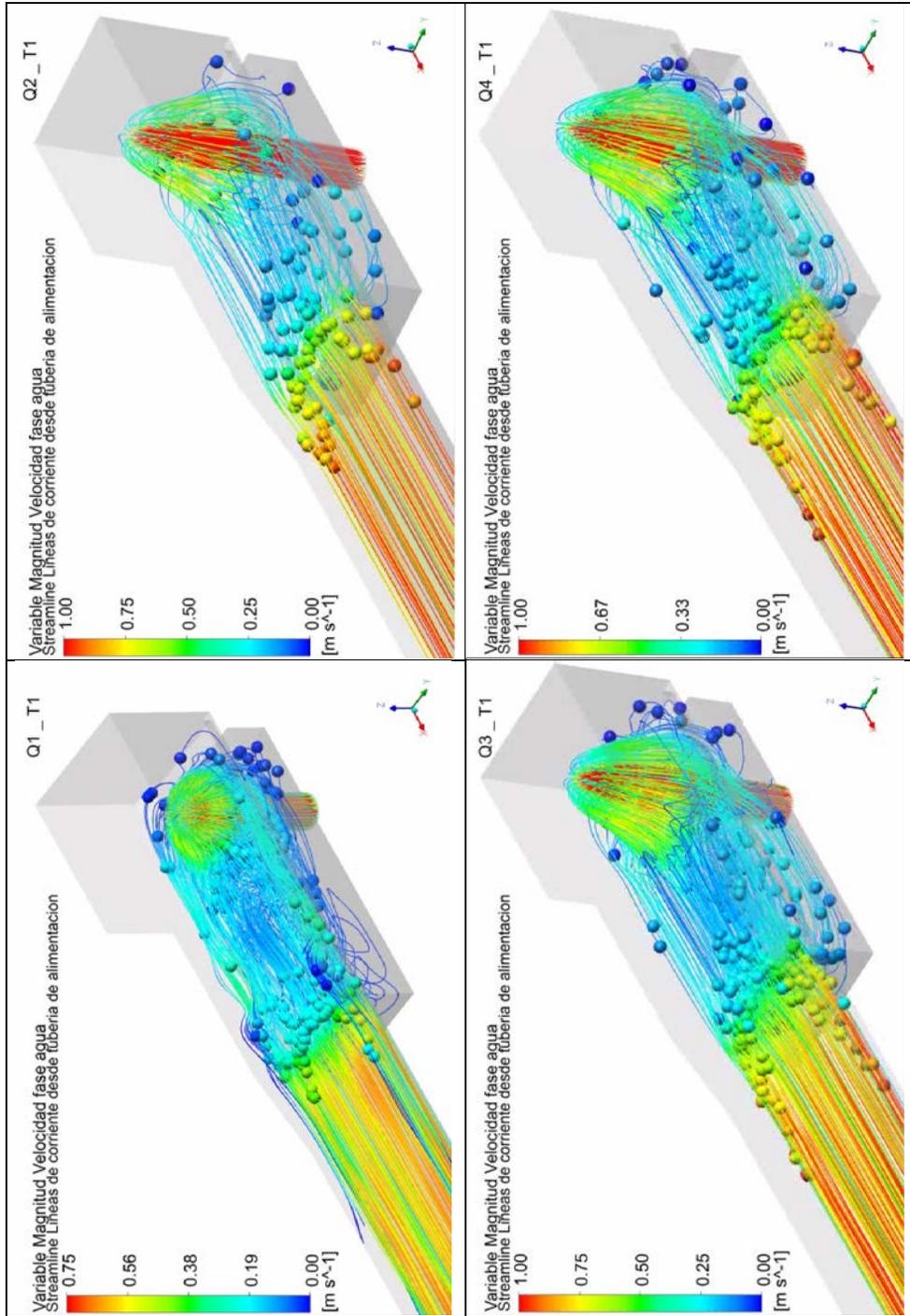


Figura 85. Distribución de líneas de corriente y trazas de partículas de agua modelado desde la tubería de alimentación, de la topología 1, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.
Fuente. *Este estudio*.

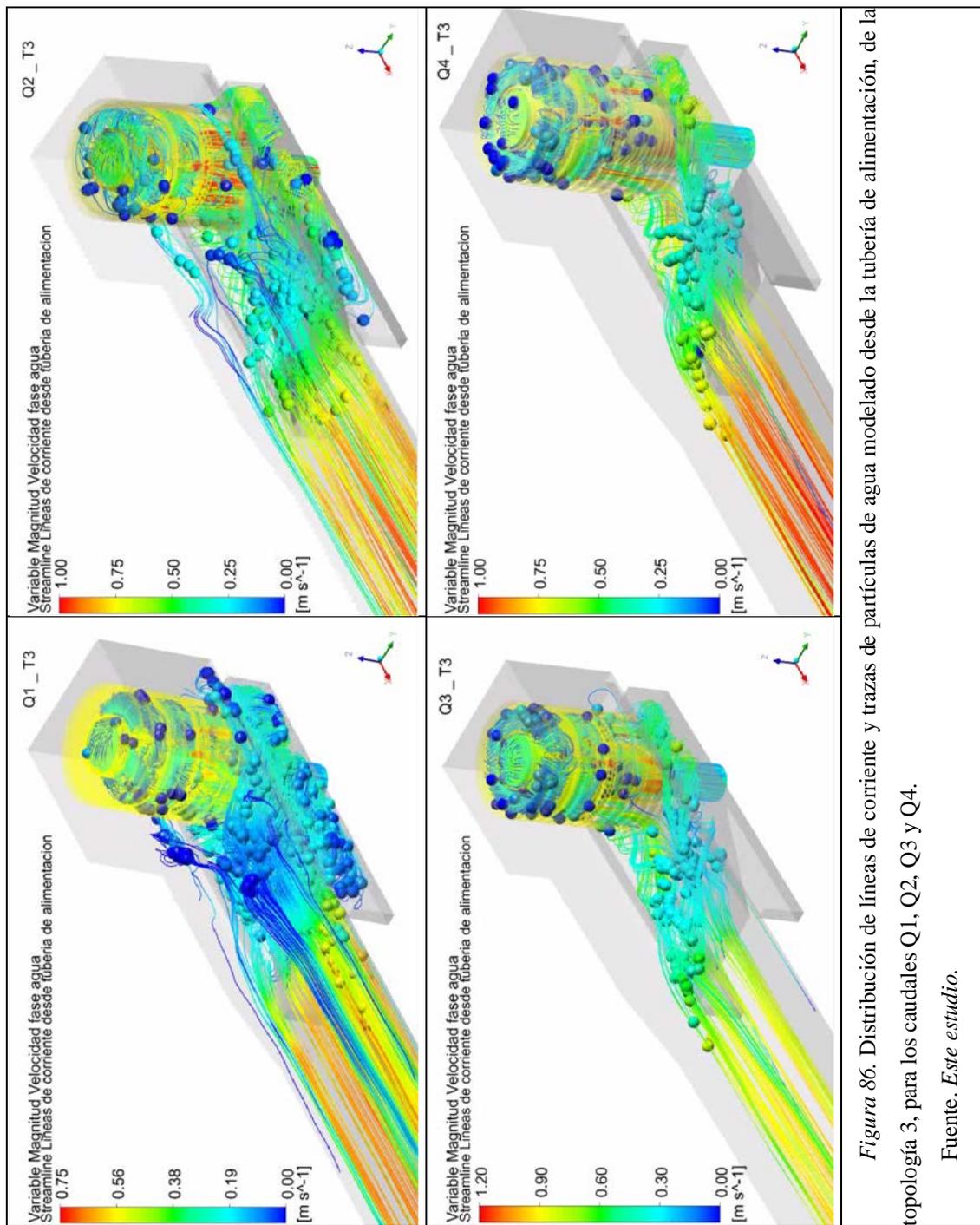


Figura 86. Distribución de líneas de corriente y trazas de partículas de agua modelado desde la tubería de alimentación, de la topología 3, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio.*

Según los registros fotográficos tomados en el momento de las mediciones para T3 se evidencia que para Q1 en la Figura 87 (b) el flujo es tranquilo y uniforme, para Q2 en la Figura 88 (b) a margen derecha del tanque existe una elevación mayor que a margen derecha y que en el mismo lugar para Q3 en la Figura 88 (b) esta sobre elevación aumenta. Esta presencia de un flujo dominante se refleja también en la Figura 88 (d) donde a margen derecha del tanque el flujo contiene trazas de burbujas coincidiendo con las modelaciones y la observación para T3.

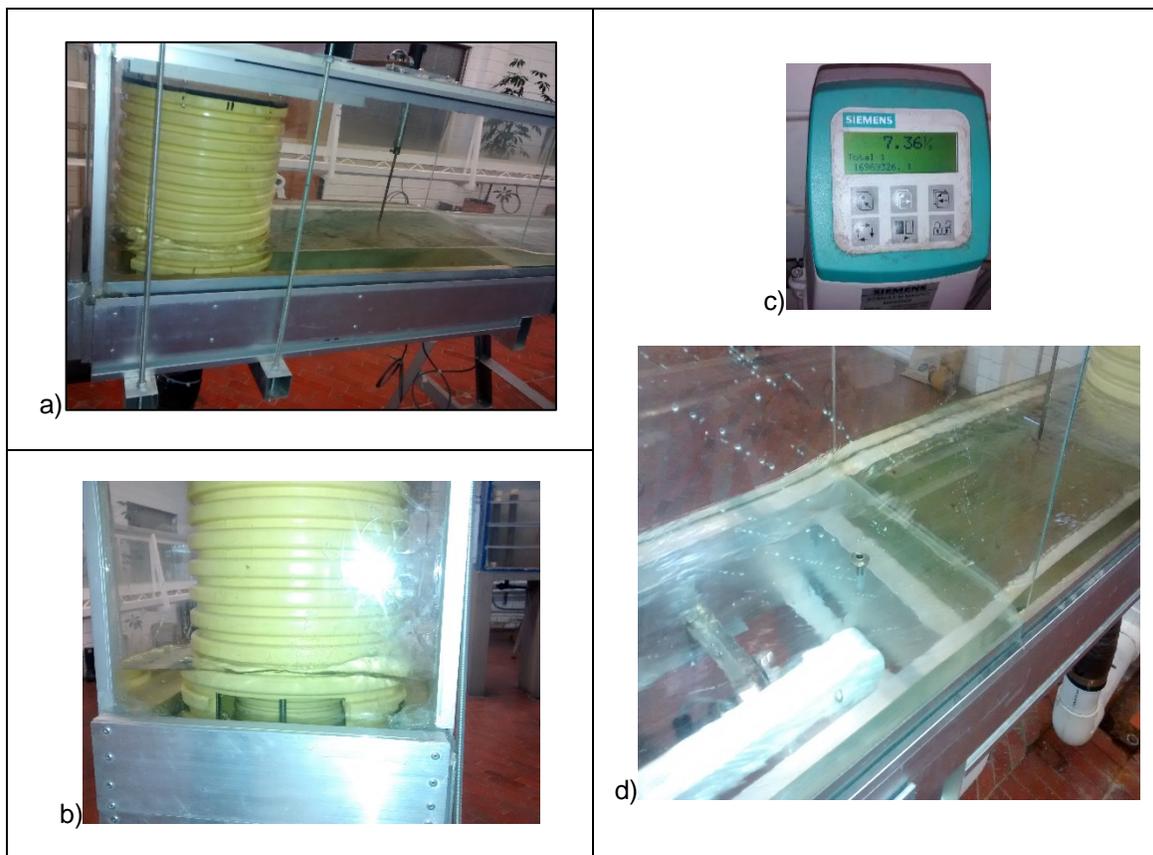


Figura 87. Registro fotográfico de toma de datos para T3 Q1.

Fuente. *Este estudio.*

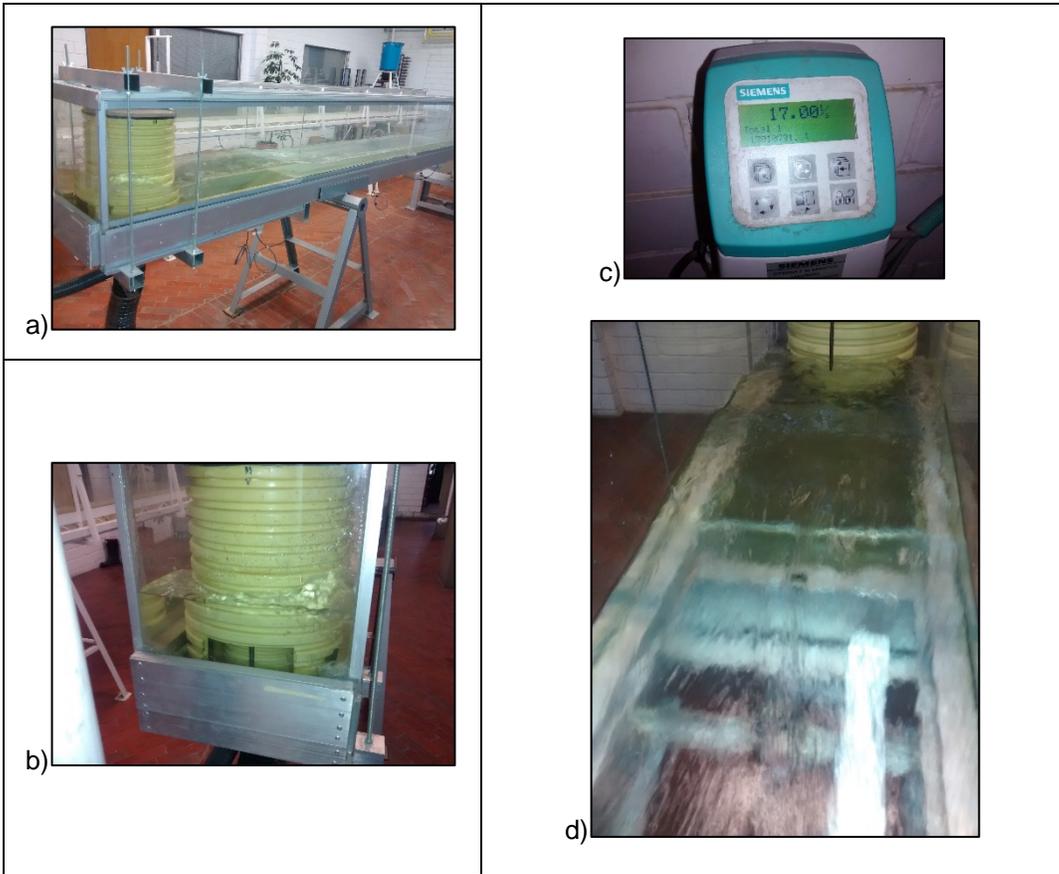


Figura 88. Registro fotográfico de toma de datos para T3 Q2.

Fuente. *Este estudio.*



Figura 89. Registro fotográfico de toma de datos para T3 Q3.

Fuente. Este estudio.

5.2 Modelación comparativa – Distribución de la velocidad y presión estática

Se graficó la distribución de perfiles verticales de la magnitud velocidad, la distribución de perfiles transversales de la magnitud velocidad (a una altura del 20% de h_p calculada desde la superficie de la lámina de agua) y la distribución de perfiles verticales de la cabeza presión estática h_p , de la sección 6 a la 10 y la sección donde se localiza la altura crítica (y_c) para cada escenario, todas en el eje central del canal $y=0$ m para las topologías T1 y T3 presentadas de la Figura 90 a la Figura 95.

5.2.1 Comentarios sobre la modelación comparativa – Distribución de la velocidad

Con respecto a la distribución de los perfiles verticales de la magnitud velocidad se presenta el siguiente análisis:

- Para la sección 6 tanto en las topologías T1 y T3 para todos los caudales, el perfil de velocidad vertical indica un perfil estratificado con deformación de la capa límite y diferente a un perfil logarítmico por efecto de las barras laterales del tanque, lo que representa que la teoría de la capa límite no es válida, es decir que las ecuaciones de RANS fueron calculadas completamente y el modelo no utilizó la ecuación de la ley logarítmica de velocidad. Ver Figura 90 y Figura 93.
- Para la sección 7 tanto en las topologías T1 y T3 para todos los caudales, el perfil de velocidad vertical indica un perfil tipo inviscido con un pico en la parte inferior y diferente a un logarítmico al estar localizado en el punto de ataque, lo que representa que la teoría de la capa límite no es válida, es decir que las ecuaciones de RANS fueron calculadas completamente y el modelo no utilizó la ecuación de la ley logarítmica. Ver Figura 90 y Figura 93.
- Para la sección 8 tanto en las topologías T1 y T3 para todos los caudales, el perfil de velocidad vertical indica un perfil logarítmico no desarrollado al estar localizado en el punto de reataque, lo que representa que la teoría de la capa límite es válida, es decir que las ecuaciones de RANS fueron calculadas y el modelo utilizó la ecuación de la ley logarítmica. Ver Figura 90 y Figura 93.
- Para la sección 9 y 10 tanto en las topologías T1 y T3 para todos los caudales, A pesar de estar localizadas en una malla de baja calidad, el perfil de velocidad vertical indica un perfil

logarítmico que tiende a desarrollarse al estar localizado en un flujo uniforme, lo que representa que la teoría de la capa límite es válida, es decir que las ecuaciones de RANS fueron calculadas y el modelo utilizó la ecuación de la ley logarítmica. Ver Figura 90 y Figura 93.

Con respecto a la distribución de los perfiles transversales de la magnitud velocidad se presenta el siguiente análisis:

- Para la sección transversal 6 en la topología T1 para los caudales Q2, Q3 y Q4, el perfil de velocidad transversal indica con un patrón definido donde hay una aceleración hacia la margen derecha e izquierda del tanque y una desaceleración hacia el eje central del tanque $y=0m$; sin embargo, para Q1 presenta perfiles desorganizados sin un patrón definido. Para la topología T3 para todos los caudales presenta perfiles desorganizados con deformación con picos máximos. Ver Figura 91 y Figura 94.
- Para la sección transversal 7 en la topología T1 para los caudales Q2, Q3 y Q4, el perfil de velocidad transversal indica que hay una aceleración homogénea; sin embargo, para Q1 presenta perfiles desorganizados sin un patrón definido. Caso contrario pasa en la topología T3 donde muestra que el perfil tiene una leve deformación con picos máximos para todos los caudales. Ver Figura 91 y Figura 94.
- Para las secciones transversales de la altura crítica (y_c) y 8 en la topología T1 para los caudales Q2, Q3 y Q4, el perfil de velocidad transversal indica que hay una aceleración homogénea; sin embargo, para Q1 presenta perfiles desorganizados sin un patrón definido. Caso contrario pasa en la topología T3 donde muestra que el perfil tiene una leve deformación con picos máximos para todos los caudales. Ver Figura 91 y Figura 94.
- Para las secciones transversales 9 y 10 en la topología T1 y T3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4, el perfil de velocidad transversal indica que hay una leve deformación con picos máximos. Ver Figura 91 y Figura 94.

Con respecto a la distribución de los perfiles de la presión estática se presenta el siguiente análisis:

- Normalmente, para el análisis de los perfiles de presión estática se grafica la altura de la lámina de agua versus la presión estática en forma de cabeza de presión h_p con unidades de m.c.a, de modo que, si el perfil se considera hidrostático, se formaría una línea de 45° cuyos extremos indicarían el mismo valor de altura. En este documento se graficó de forma que se distinguiera la localización con respecto a la altura del fondo del tanque y canal de cada sección; sin embargo, para realizar el análisis anteriormente descrito basta con restar el valor máximo con el mínimo de la altura del nivel de agua con coordenada (Z) y compararlo con el valor de h_p .
- Para las secciones verticales 6, 8, 9 y 10 en las topologías T1 y T3 las líneas forman un ángulo de 45° considerándose desde la base de la teoría con hidrostáticas, con la presencia de un leve quiebre en la parte inferior. Pero para la sección vertical 7 en T1 se observa una curvatura con un quiebre más definido en la parte inferior; sin embargo, en la misma sección para T3 esta curvatura desaparece, pero con un quiebre menor al de T1, encontrando una razón de como la rampa ayuda a que el perfil sea más hidrostático desde la sección 7. Ver Figura 92 y Figura 95.

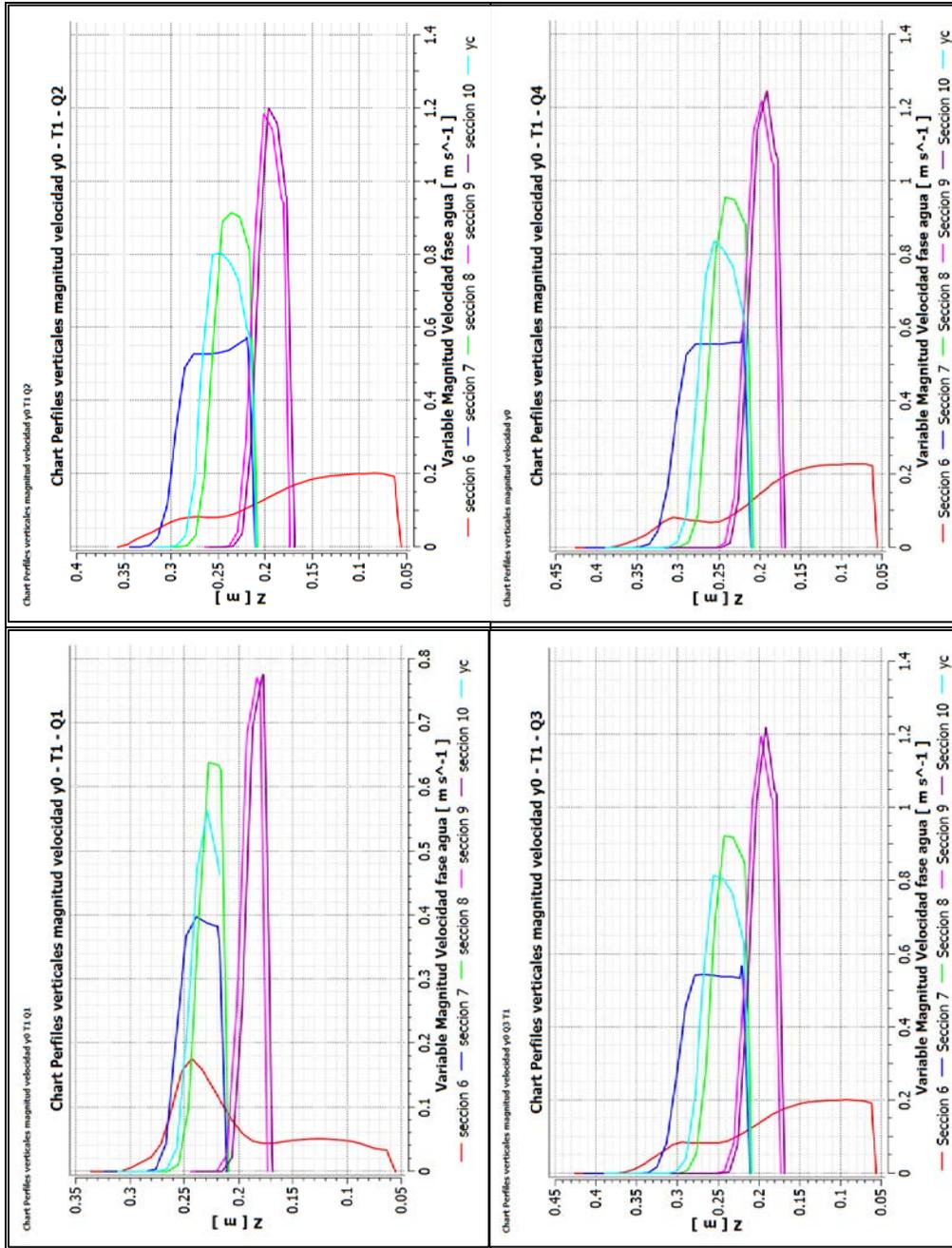


Figura 90. Distribución de la magnitud velocidad vertical, en las secciones de la topología 1, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio.*

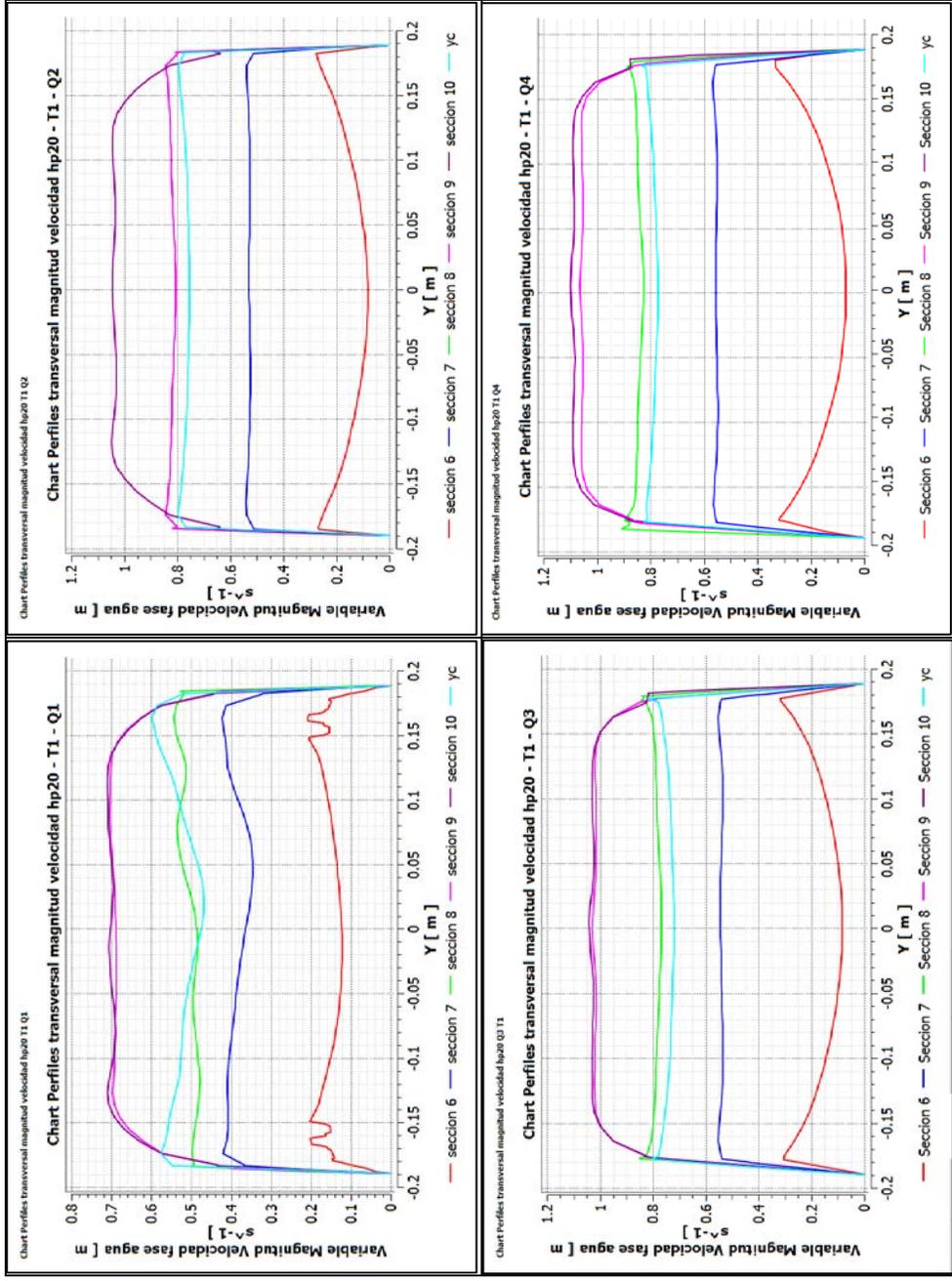


Figura 91. Distribución de la magnitud velocidad transversal, en las secciones de la topología 1, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.
Fuente. *Este estudio*.

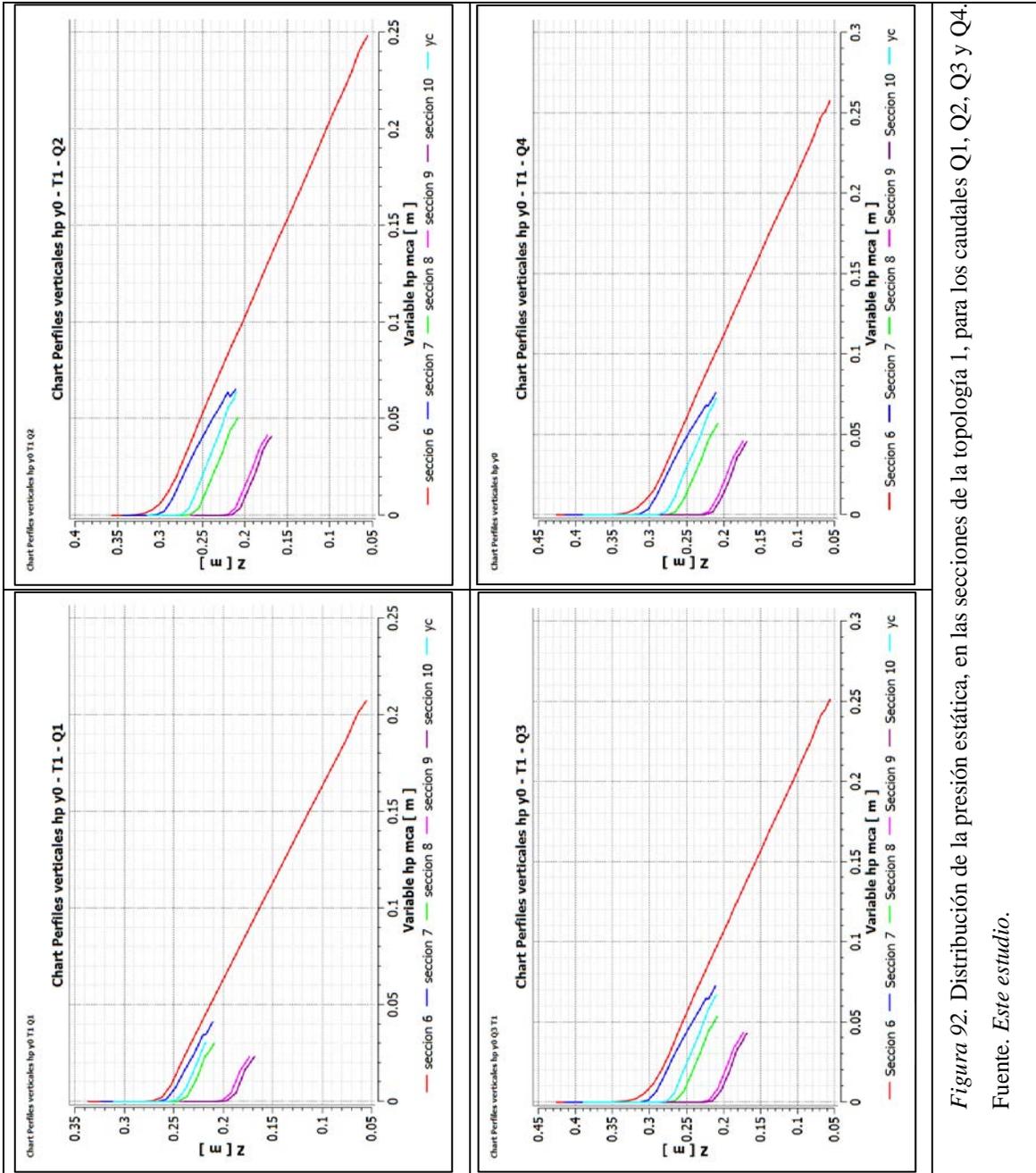


Figura 92. Distribución de la presión estática, en las secciones de la topología 1, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4. Fuente. *Este estudio*.

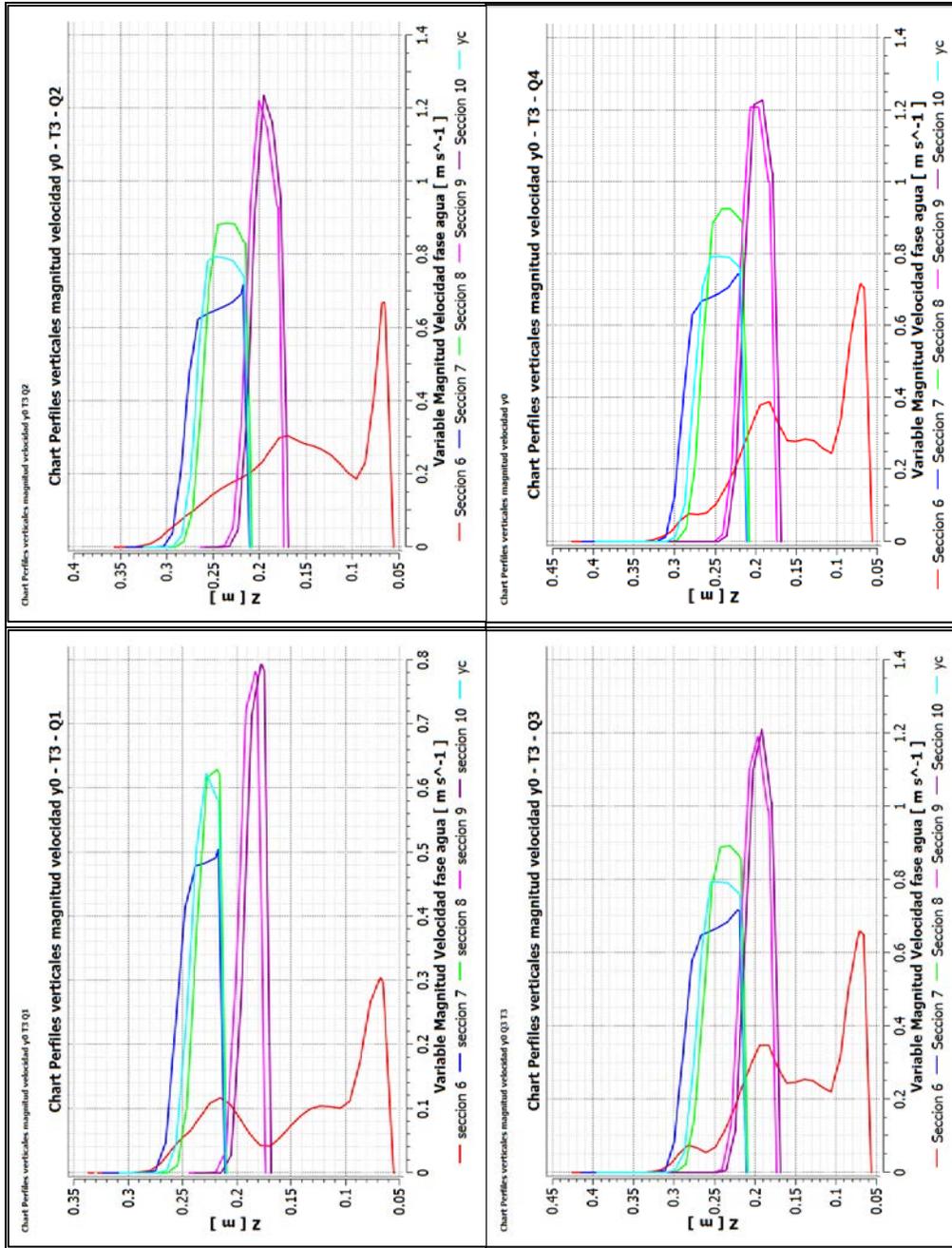


Figura 93. Distribución de la magnitud velocidad vertical, en las secciones de la topología 3, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio.*

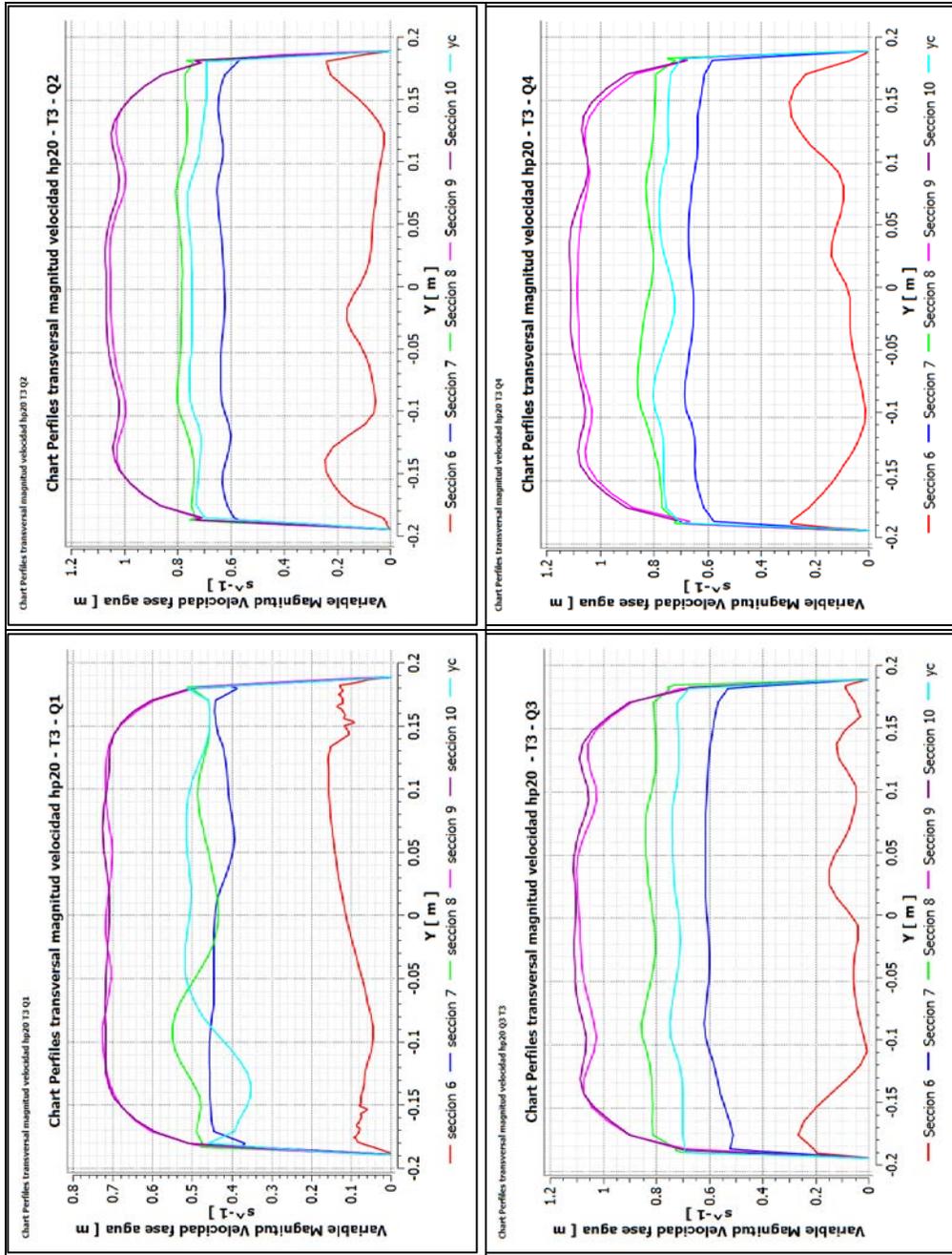


Figura 94. Distribución de la magnitud velocidad transversal, en las secciones de la topología 3, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio.*

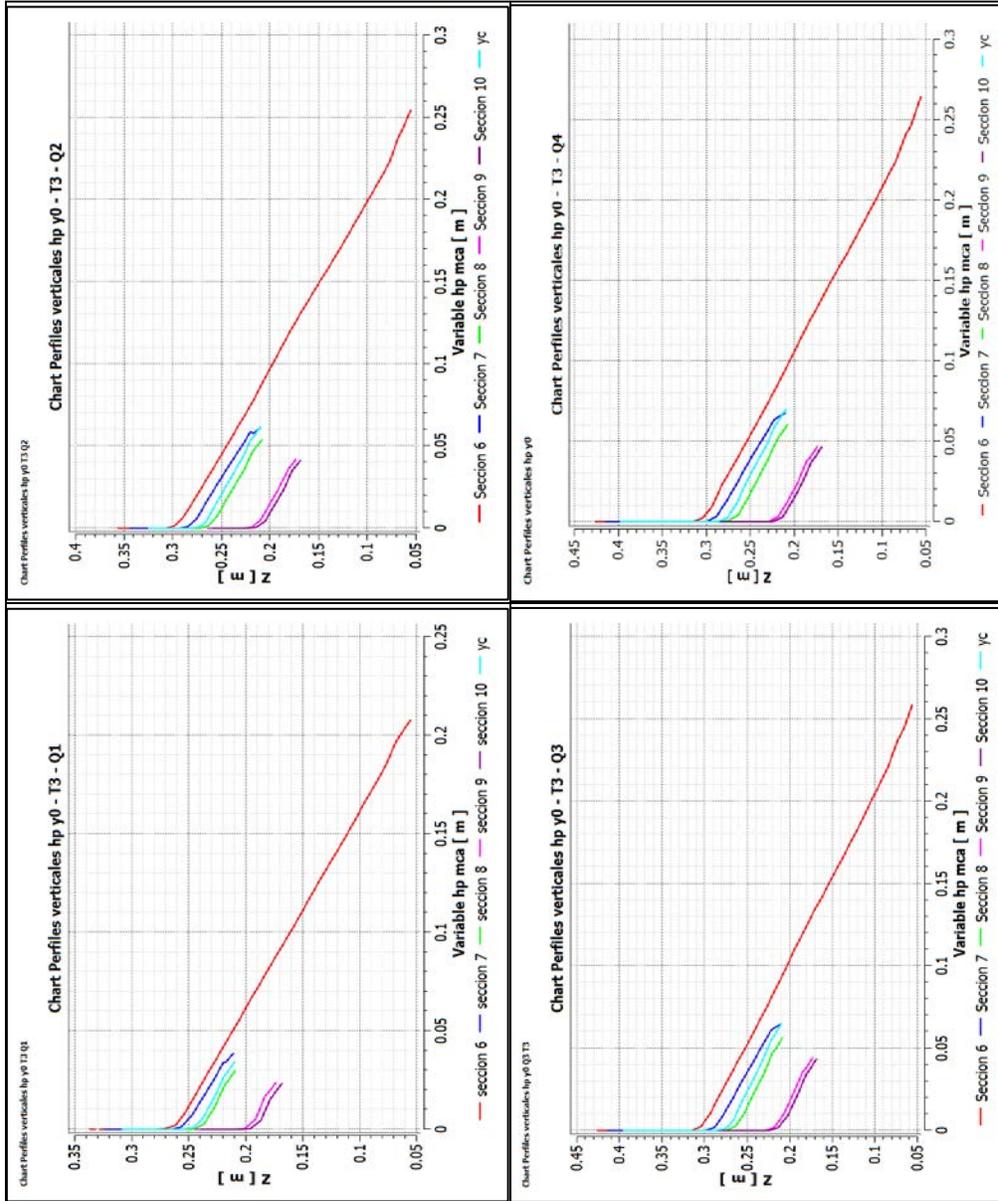


Figura 95. Distribución de la presión estática, en las secciones de la topología 3, para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4.

Fuente. *Este estudio.*

6 Resultados Parte 2. Modelación del canal ECI No. 1 en flujo no permanente.

6.1 Análisis comparativo de modelos en 2D flujo no permanente

Para realizar el análisis de las alturas de lámina de agua medida y calculadas se utilizó los mismos parámetros de comparación utilizados por Arenas Amado (2002) donde se cuantificó dos errores definidos por las siguientes ecuaciones, en donde “ $y_{\text{calculado}}$ ” representa el valor de la profundidad arrojado por el método de las características o ANSYS FLUENT, mientras que “ y_{medido} ” se asocia con el dato obtenido del transductor (Ver Tabla 48).

$$\text{Error típico} = \frac{y_{\text{pico calculado}} - y_{\text{pico transductor}}}{y_{\text{pico transductor}}} \times 100$$

$$\text{Error promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_{\text{pico calculado}} - y_{\text{pico transductor}}|}{y_{\text{pico transductor}}} \times 100}{n}$$

6.1.1 Modelación comparativa – altura lámina de agua

Para la modelación comparativa de la altura de la lámina de agua medida con el método de las características rectas explícitas se tomó el ejemplo 5.4.1 llamado “ejemplo para hidrograma en la entrada” del documento de Arenas Amado (2002, págs. 121 - 126) donde se supuso que el hidrograma de entrada al canal es el mismo que arroja el medidor de flujo ubicado en la parte superior del sistema, aguas abajo se dispone de un vertedero de cresta delgada con una altura de $Y_o = 0.05$ m. Se corrió el método de las características con en una malla con discretización $\Delta x = 0.9876$ metros y $\Delta t = 0.0265$. Estos resultados se compararon con los calculados por ANSYS FLUENT en 2D con respecto a los parámetros de presión estática en metros columna de agua y el nivel de la lámina de agua tomando como referencia el nivel del fondo del canal en cada transductor, graficados en la Figura 96 a la Figura 100.

Tabla 47. Costo computacional de modelaciones en ANSYS FLUENT en 2D flujo no permanente.

Escenario	Celdas (#)	Costo computacional (horas)	Costo computacional (días)	Pasos de tiempo (#)
CTT_2D_Q(t)	90386	155.22	4.8	75861

Fuente. *Este estudio.*

Nota: CTT_2D_Qmín fue condición inicial para CTT_2D_Q(t)

6.1.1.1 Comentarios sobre modelación comparativa – altura de la lámina de agua

En cuanto a las modelaciones con el método de las características Arenas Amado (2002, pág. 126) comentó lo siguiente:

En todas las figuras es posible observar un desfase hacia la derecha, de la gráfica generada con el método, con respecto a la gráfica generada por el transductor. Dicho desplazamiento se origina por tomar como condición de entrada el hidrograma del medidor de flujo, ya que al hacer esto se desprecia el tránsito de la onda por el sistema antes de llegar al canal. Es importante recalcar que el método tiende a reproducir el “estilo” de la condición de entrada, es decir debido a que dicha condición para este ejemplo fue un hidrograma sin muchas irregularidades, las gráficas generadas por el método presentan curvaturas suaves.

Teniendo en cuenta estas singularidades en los resultados con el método de las características con respecto al tiempo, los limnigramas con ANSYS FLUENT teniendo en cuenta la presión estática y el nivel de la lámina de agua también sufren un desplazamiento con respecto al tiempo de 2.7 segundos aproximadamente, aun localizando el hidrograma a la salida de la tubería de alimentación en el dominio, es decir a 0.7m aproximadamente aguas arriba de la entrada del canal rectangular.

Con respecto a las alturas de la lámina de agua y la Tabla 48, el método de la características tiene un mejor error típico que el de ANSYS FLUENT 2D teniendo en cuenta la presión estática, obteniendo un error máximo del 5.221% en el transductor T1 por debajo del medido, pero con un error promedio mejor en la mayoría de los transductores aunque desfavorable en el transductor T8 con un 5.055%. Con respecto a los resultados de ANSYS FLUENT 2D teniendo en cuenta el nivel de la lámina de agua, tiene un error típico y error promedio mejor que el método de la característica y el de ANSYS FLUENT 2D teniendo en cuenta la presión estática; sin embargo, los errores en el transductor T8 es desfavorable, donde se tiene un error típico del 11.505% y un error promedio de 7.859%.

Tabla 48. Análisis de resultados de alturas de lámina de agua medidos y calculados.

Transductor	Altura de lámina de agua “y” máximo (m)				(M_C)**		AF_PE*		AF_NA*	
	Medido **	Calculado (M_C) **	Calculado (AF_PE) *	Calculado (AF_NA) *	E.T. (%)	E.P. (%)	E.T. (%)	E.P. (%)	E.T. (%)	E.P. (%)
T1	0.300	0.305	0.284	0.297	1.800	2.270	-5.221	2.325	-1.110	1.859
T2	0.270	0.279	0.269	0.271	3.460	2.810	-0.305	2.007	0.472	1.980
T4	0.238	0.244	0.236	0.241	2.580	3.100	-1.030	2.522	1.117	2.417
T5	0.228	0.230	0.221	0.227	0.950	3.350	-3.002	2.743	-0.563	2.524
T6	0.203	0.206	0.197	0.201	1.630	3.690	-3.020	3.228	-0.979	3.028
T7	0.191	0.192	0.188	0.193	0.370	4.240	-1.383	3.657	0.884	3.715
T8	0.167	0.166	0.165	0.148	-0.470	4.630	-0.960	5.055	-11.505	7.859

Fuente. *Este estudio (*) y Adaptado de (Arenas Amado, 2002)**).*

Nota: M_C: Método de las características; AF_PE: ANSYS FLUENT _ Presión Estática; AF_NA.: ANSYS FLUENT _ Nivel lámina de agua; E.T (%): Error Típico; E.P (%): Error promedio.

Estos errores desfavorables se pueden observar en la Figura 96 para el transductor T1 donde la modelación del nivel de la lámina de agua se ajusta mejor al medido que la modelación de la presión estática, aunque con una sobre estimación del ruido en la cresta del hidrograma en comparación al medido que se propaga aguas abajo como se observa en los limnigramas de los demás transductores, debido a la forma que toma el hidrograma al transitar desde la salida del tubo de alimentación hasta el transductor T1 (Ver Figura 47 y Figura 100). Con respecto a los errores del transductor 8, como se observa en la Figura 99, la modelación de la presión estática se ajusta mejor al medido que la modelación del nivel de la lámina de agua.

En síntesis, según lo modelado con el método de las características y contrastado con lo medido, las modelaciones son aceptables con respecto a la presión estática a excepción de los transductores T2, T7 y T8. Según lo modelado con ANSYS FLUENT 2D en flujo no permanente y comparado con lo medido, las modelaciones son aceptables con respecto a la presión estática con la diferencia de los transductores T1, T7 y T8, a diferencia de las modelaciones con respecto al nivel de la lámina de agua donde no se obtuvieron una aceptabilidad en los transductores T7 y T8.

Sin embargo, los transductores de presión relativa merecen una revisión ya que los registros de presión que arrojan se asocian con la profundidad de la lámina de agua mediante el supuesto de distribución hidrostática de presión que, en otras palabras, el flujo es uniforme como es el caso de las regiones donde se ubican los transductores T1, T2, T4, T5, T6 y T7, pero ¿qué pasa con la región en donde se encuentra el transductor T8? Pues bien, si se asume que las modelaciones del nivel de lámina de agua en todos los transductores es aceptable, el transductor T8 no mide la altura de lámina de agua adecuadamente, ya que alcanza niveles supuestos muy por encima de la lámina de agua estimada como se observa en la Figura 99. Desde el punto de vista teórico esto es posible, ya que según Henderson (1966, pág. 177) y observando la Figura 101 (a, b, c y d) se presenta las siguientes características de la distribución de presión en la sección vertical ABD similar a la posición del transductor T8 y los resultados de las modelaciones:

- La distribución de presión no es hidrostática ya que las líneas de corriente presentan una curvatura distinta en el plano vertical.
- La presión es superior a la atmosférica dentro de la sección AB. Esta última característica es consistente con la contracción y aceleración que tiene lugar después de AB; se requiere una fuerza de presión a lo largo de AB para lograr esta aceleración en una región de presión atmosférica.

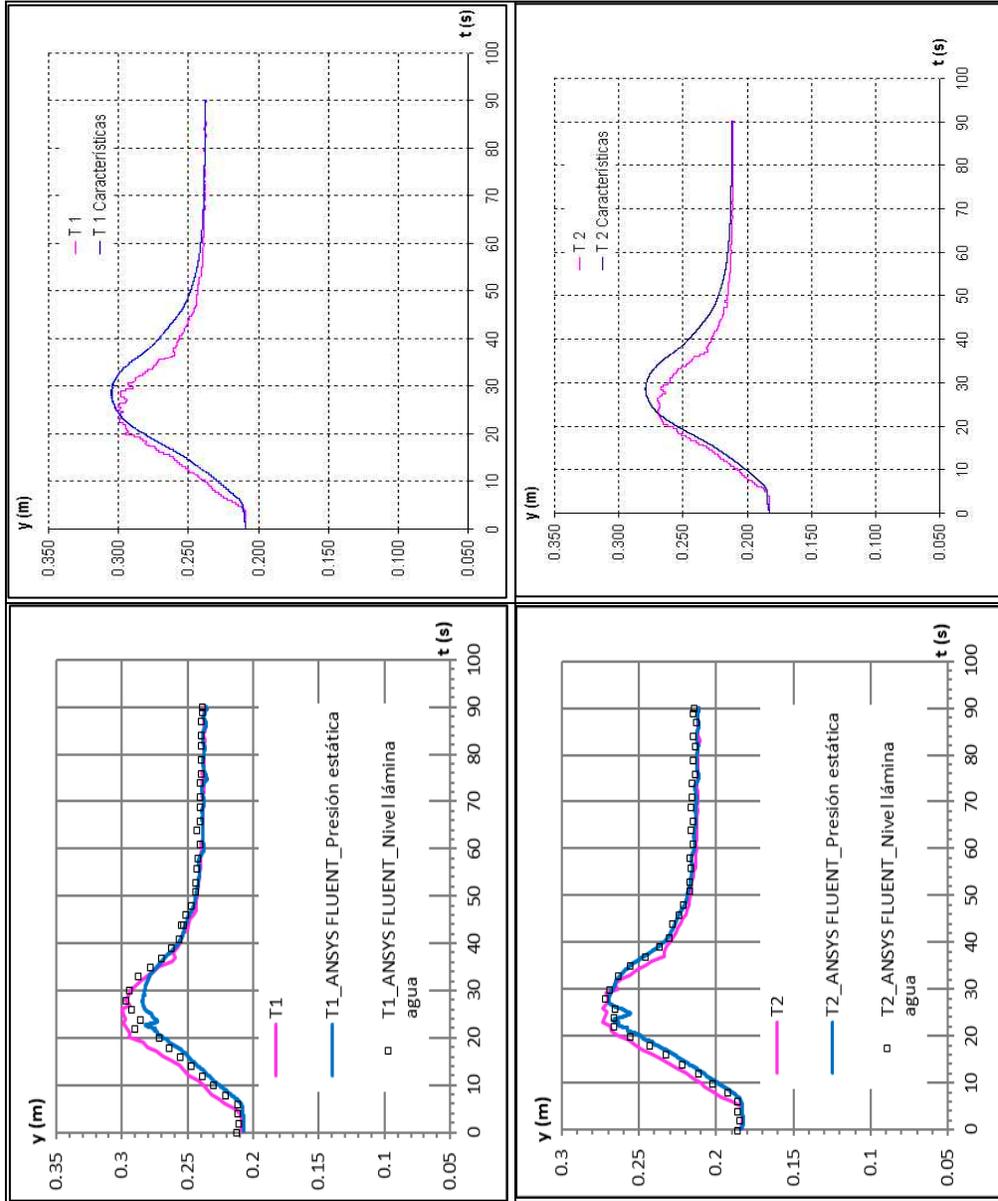


Figura 96. Comparación de limnigramas del transductor 1 y 2, medidos y modelados con ANSYS FLUENT y con el método de las características utilizando un hidrograma en la entrada.

Fuente. *Este estudio (derecha) y Adaptado de (Arenas Amado, 2002) (izquierda).*

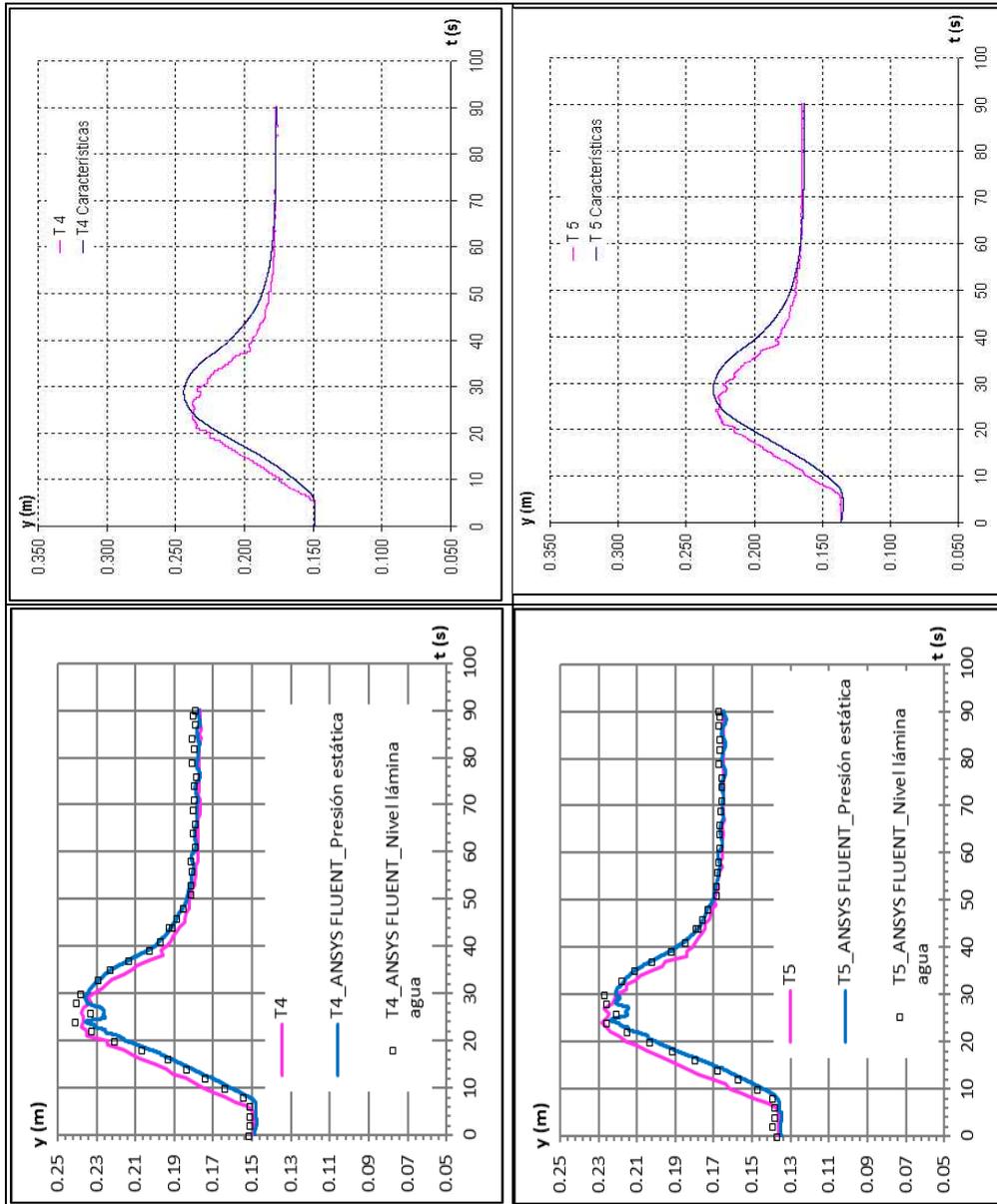


Figura 97. Comparación de limnigramas del transductor 4 y 5, medidos y modelados con ANSYS FLUENT y con el método de las características utilizando un hidrograma en la entrada.

Fuente. *Este estudio (derecha) y Adaptado de (Arenas Amado, 2002) (izquierda).*

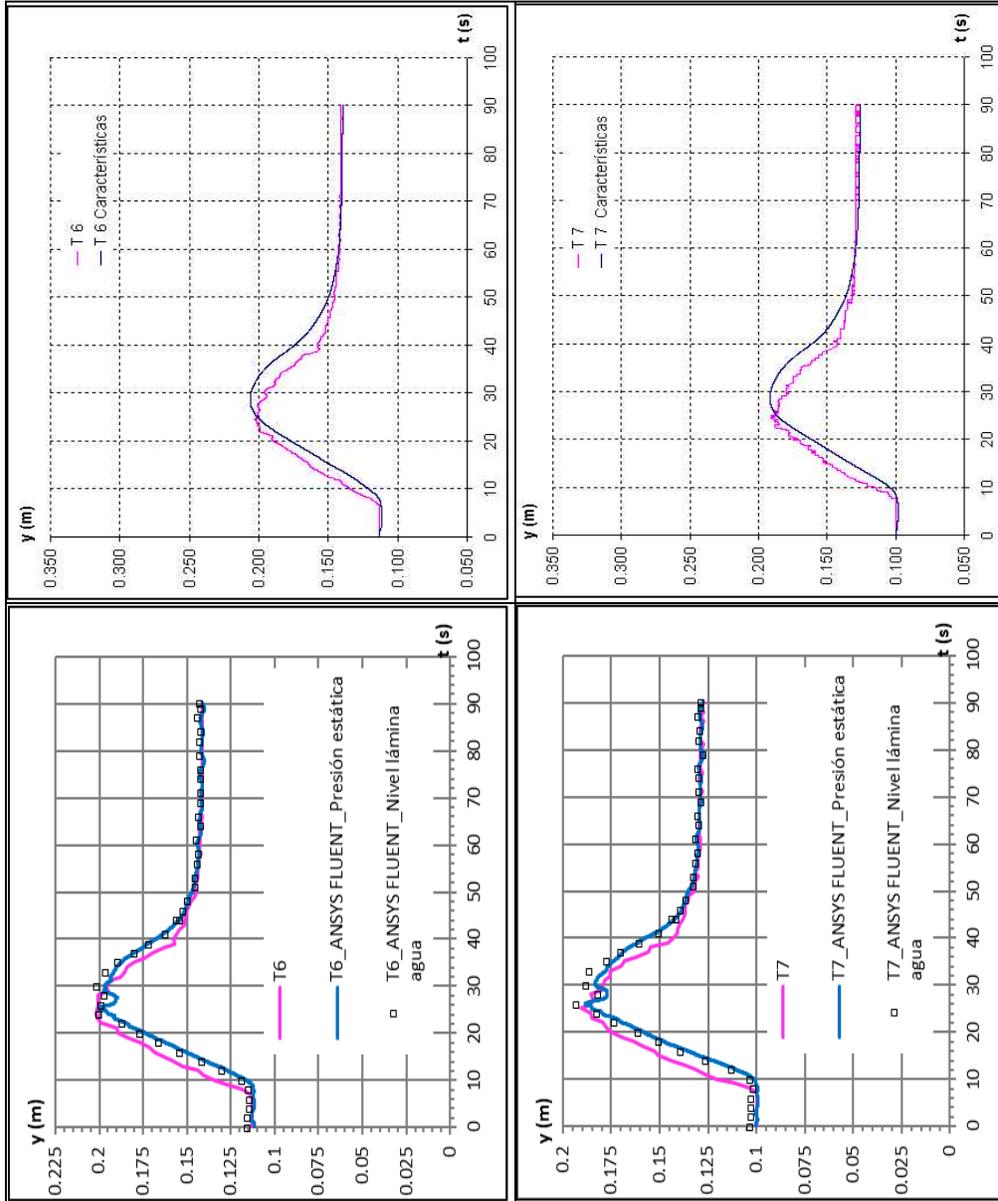


Figura 98. Comparación de limnigramas del transductor 6 y 7, medidos y modelados con ANSYS FLUENT y con el método de las características utilizando un hidrograma en la entrada.

Fuente. *Este estudio (derecha) y Adaptado de (Arenas Amado, 2002) (izquierda).*

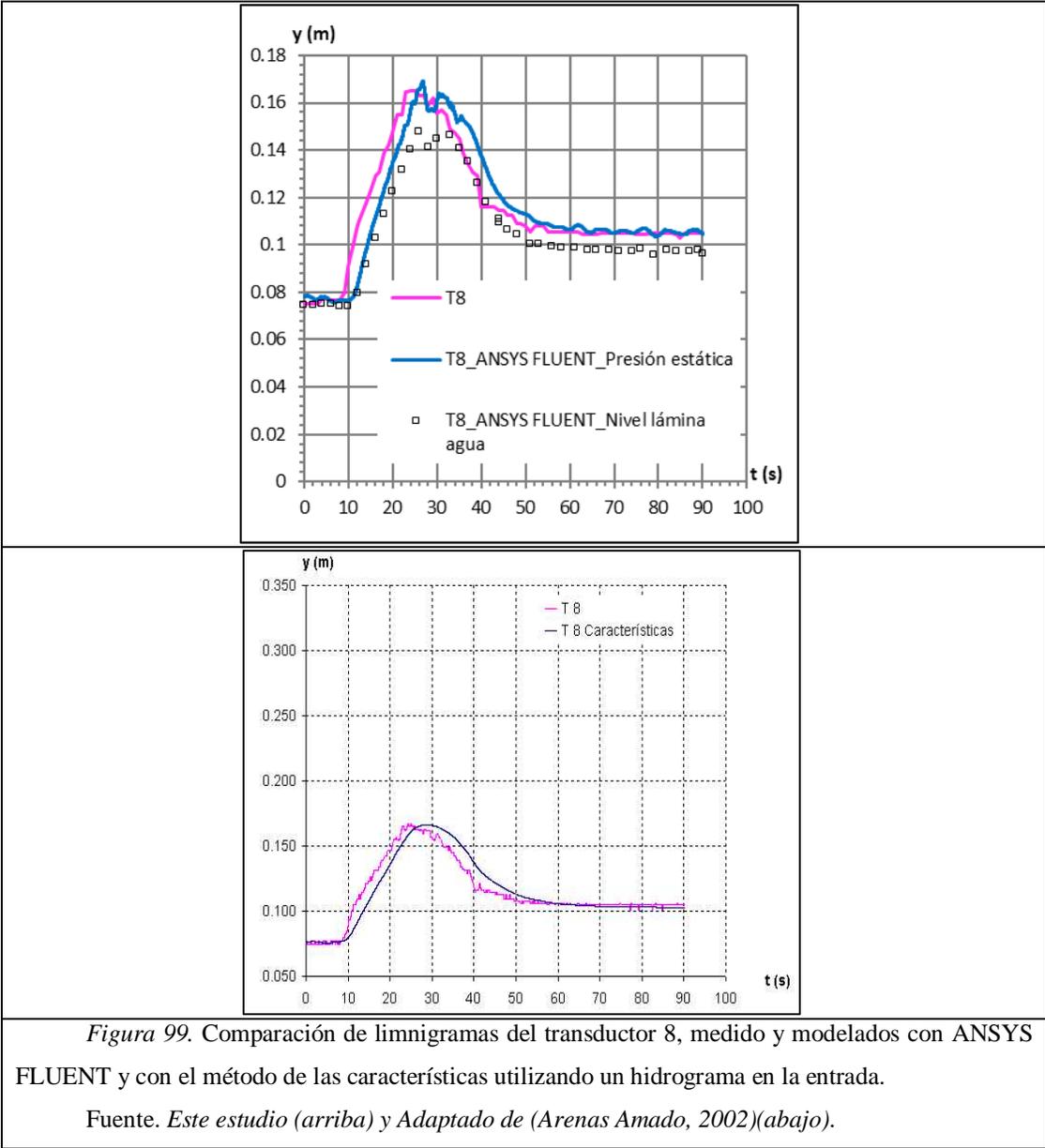


Figura 99. Comparación de limnigramas del transductor 8, medido y modelados con ANSYS FLUENT y con el método de las características utilizando un hidrograma en la entrada.

Fuente. Este estudio (arriba) y Adaptado de (Arenas Amado, 2002)(abajo).

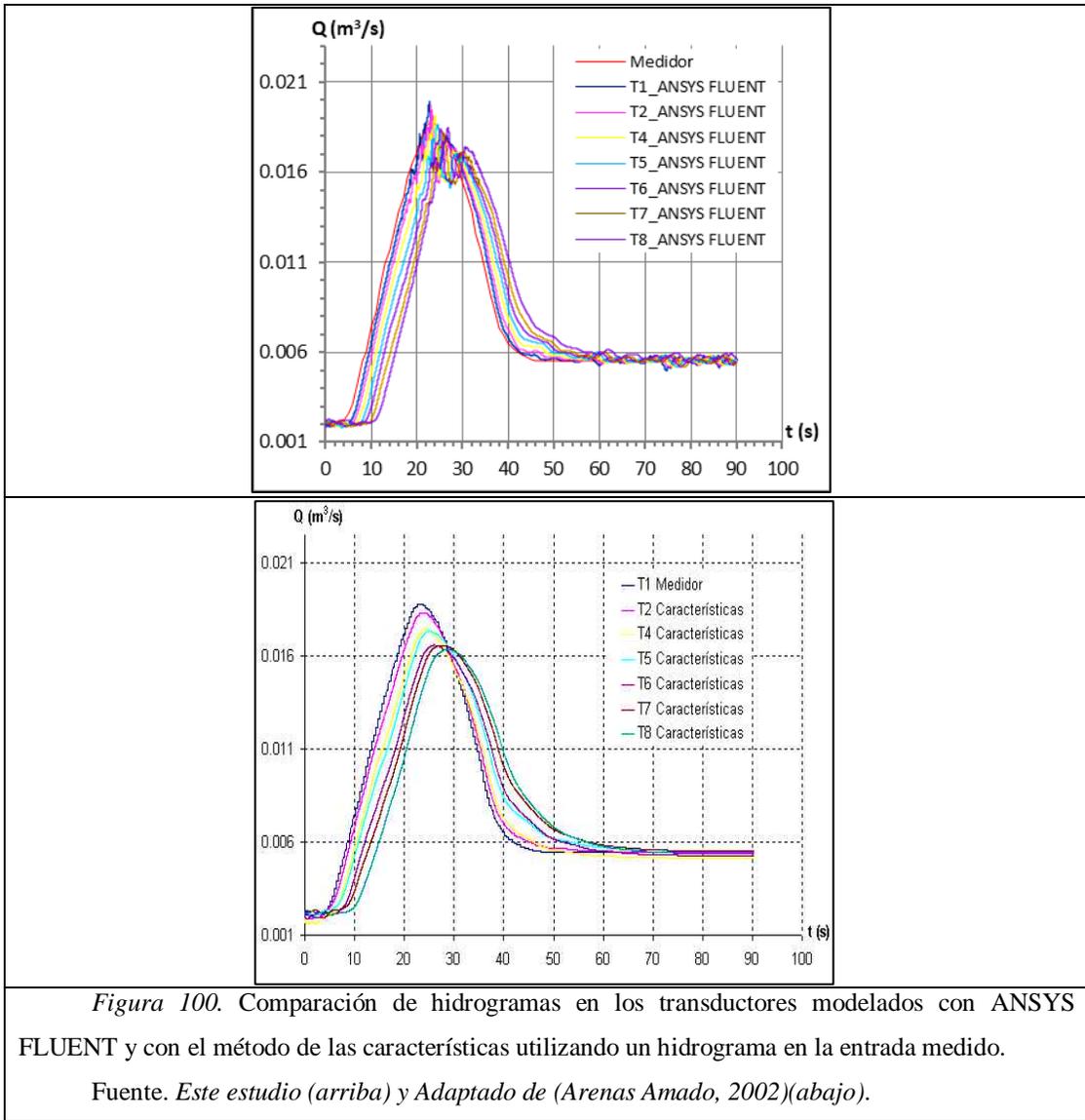


Figura 100. Comparación de hidrogramas en los transductores modelados con ANSYS FLUENT y con el método de las características utilizando un hidrograma en la entrada medido.
 Fuente. Este estudio (arriba) y Adaptado de (Arenas Amado, 2002)(abajo).

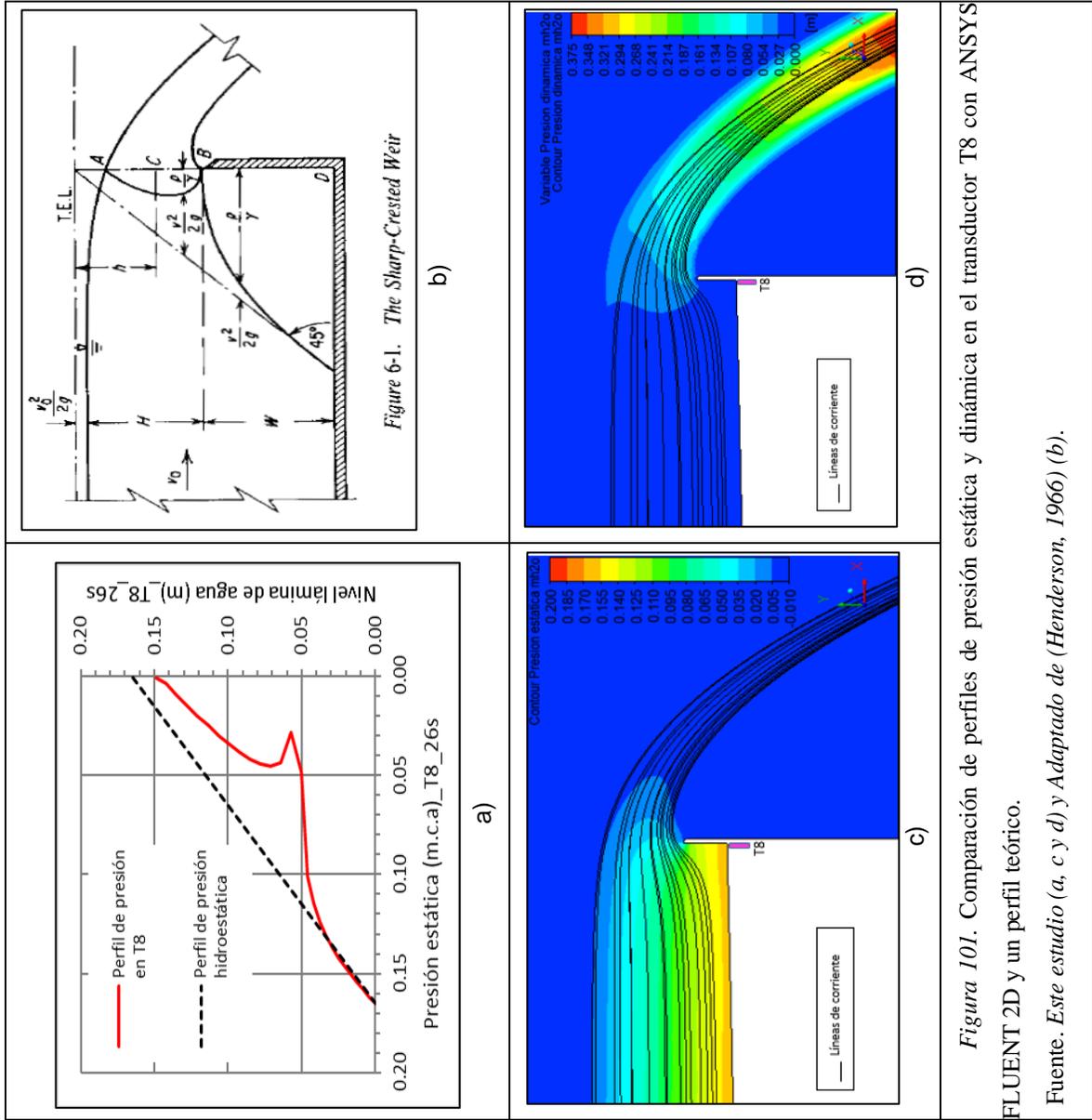


Figura 101. Comparación de perfiles de presión estática y dinámica en el transductor T8 con ANSYS FLUENT 2D y un perfil teórico.

Fuente. *Este estudio* (a, c y d) y *Adaptado de* (Henderson, 1966) (b).

Conclusiones y recomendaciones

- La metodología empleada utilizando el plan de trabajo de ANSYS FLUENT (2013) Y guías de buenas prácticas fue satisfactoria ya que se estableció un orden de actividades para llegar al cumplimiento de los objetivos deseados.
- La verificación y validación de los modelos en 1D, 2D y 3D fueron importantes para tener en cuenta aspectos como el costo computacional, la precisión de los modelos, la elección del modelo según el criterio de aceptabilidad de las modelaciones frente a la representación de la realidad representada en mediciones. Para flujo permanente, los modelos en 3D con esquemas implícitos tiene una mejor aproximación a los perfiles de lámina de agua medidos que los modelos en 1D y 2D, pero los esquemas explícitos en flujo no permanente en 2D tiene mayor aproximación que los modelos en flujo permanente, con la desventaja del alto costo computacional.
- En la primera parte de las modelaciones del canal ECI No. 2, las modelaciones en 1D y 2D frente a las mediciones de la altura de la lámina de agua no fueron aceptadas ya que en regiones como el dissipador de energía, tanque y canal rectangular no se ajustaron al perfil medido, encontrando un nivel de aceptabilidad en las modelaciones en 3D, pese a los errores que se pudieron tener tanto humanos como instrumental en las mediciones y la calidad de la malla y los modelos elegidos para las modelaciones.
- Con respecto a las modelaciones comparativas del canal ECI. No. 2, las modelaciones en 1D y 2D fueron importantes al tener en cuenta solo flujo uniforme con perfiles ideales para secciones transversales semejantes, los cuales fueron claves para modelar un canal rectangular lo suficientemente largo con condiciones tranquilas y tener en cuenta singularidades como el desplazamiento de la altura crítica “ y_c ” al aumentar el caudal y compararlo con las modelaciones del perfil de lámina de agua en 3D, los cuales arrojaron el mismo desplazamiento en las diferentes topologías, obteniendo mejores resultados con la topología con dissipador de energía y rampa al encontrar que la ubicación de “ y_c ” está más cerca de la sección de entrada del canal rectangular con un perfil de lámina de agua con leves perturbaciones.

- En cuanto a los resultados de las modelaciones de la energía mecánica total y sus componentes, se encontró que la topología T1 disipa energía al encontrarse el chorro de agua ascendente con una masa de agua embalsada y luego con la presión atmosférica donde cae libremente para seguir la dirección normal de la corriente, pero con un flujo caótico. Al incluir la estructura de transición de disipación de energía y la rampa, la entrega del flujo al canal de sección uniforme mejora considerablemente, encontrando que la energía cinética turbulenta es la responsable de tal condición caótica inicial, disminuyendo su magnitud desde la sección 6 a la 9, donde el flujo se torna uniforme.
- Las modelaciones en 3D sirvieron para realizar análisis de simetría del flujo el cual es un tema importante en la decisión de modelar en 3D un dominio completo o solo con la mitad de este utilizando la condición de frontera “Symmetry” en ANSYS FLUENT como herramienta de optimización de tiempo computacional. Los resultados de la modelación de la distribución de flujos primarios y secundarios para la topología T1 y T3 arrojaron que la decisión de modelar el dominio completamente desde un inicio fue acertada, ya que la simetría del flujo varía según la topología, el caudal inyectado y la sección en la que se analizó. Los resultados de la modelación de la distribución del coeficiente de fricción C_f en el fondo del canal para todas las topologías y caudales, desde la sección 8 a la 10 el flujo es eje-simétrico asumiendo que las variaciones son pequeñas a diferencia del análisis de distribución de flujos primarios y secundarios donde se notaba la variabilidad de la eje-simetría entre topologías, caudales y secciones; además, se encontró que la distribución del coeficiente de fricción local está fuertemente relacionada con la distribución de flujos primarios y secundarios en cercanías del fondo del canal, como también con el número de Reynolds en x , el tipo de flujo y el “ n ” de Manning. Desde el análisis de la distribución de las líneas de corriente para la topología T1 y los 4 caudales el flujo es eje-simétrico; sin embargo, para T3 y los 4 caudales el flujo no es eje-simétrico, teniendo más concordancia con el análisis de distribución de flujos primarios y secundarios que con el análisis del coeficiente de fricción local.
- Según las comparaciones del perfil de velocidad vertical en la región de la sección 6 ubicada en el tanque y la región de la sección 7 ubicada al inicio del canal rectangular de las topologías T1 y T3 para todos los caudales, se observó un perfil diferente al logarítmico lo que representa que

la teoría de la capa límite no es válida, es decir que las ecuaciones de RANS fueron calculadas completamente y el modelo ANSYS FLUENT no utilizó la ecuación de la ley logarítmica de velocidad. Lo contrario se observó en las secciones 8, 9 y 10 ubicadas en el canal rectangular, encontrando un perfil de velocidad vertical logarítmico lo que representa que la teoría de la capa límite es válida, es decir que las ecuaciones de RANS fueron calculadas y el modelo utilizó la ecuación de la ley logarítmica.

- Con relación a la distribución de los perfiles transversales de la magnitud velocidad, la sección transversal 6, 7, “yc” y 8 de la topología T1 (sin dissipador de energía y rampa), presenta patrones definidos para los caudales Q2, Q3 y Q4, con regiones con aceleración y desaceleración del flujo en cercanías del inicio del canal; sin embargo, para Q1 presenta perfiles desorganizados sin un patrón definido, representando un flujo caótico. Caso contrario pasa en la topología T3 donde muestra que el perfil tiene una leve deformación con picos máximos para todos los caudales. Para las secciones transversales 9 y 10 en la topología T1 y T3 para los caudales Q1, Q2, Q3 y Q4, el perfil de velocidad transversal indica que hay una leve deformación con picos máximos. La variabilidad de picos máximos indica que el flujo no es simétrico y por ende no se puede realizar un análisis de perfiles de velocidad vertical con ecuaciones teóricas como la ley logarítmica o la raíz séptima de Prandtl adaptadas para flujo externos.
- La distribución de los perfiles de la presión estática para las secciones verticales 6, 8, 9 y 10 en las topologías T1 y T3 las líneas forman un ángulo de 45° considerándose desde la base de la teoría como hidrostáticas, con la presencia de un leve quiebre en la parte inferior. Pero para la sección vertical 7 en T1 se observa una curvatura con un quiebre más definido en la parte inferior; sin embargo, en la misma sección para T3 esta curvatura desaparece, pero con un quiebre menor al de T1, encontrando una razón de como la rampa ayuda a que el perfil sea más hidrostático desde la sección 7.
- Para la segunda parte de las modelaciones del canal ECI No. 1, la información de los registros de medición del flujo y geométrica del canal, como los resultados del documento de Arenas Amado (2002) fueron importantes a la hora de definir las metas de la modelación, verificación y validación, condiciones iniciales y posibles errores que podían presentarse por la configuración real del sistema del canal ECI No. 1. La validación de las modelaciones en flujo permanente con

caudales inicial y máximo encontrados en el hidrograma de entrada arrojaron una aceptabilidad, pero con incertidumbre alto con los resultados del transductor T4 y T8 para el caudal pico o máximo, los cuales se tuvieron en cuenta para las modelaciones en flujo no permanente.

- Con base a los resultados con el método de las características con respecto al tiempo realizado por Arenas Amado (2002), los limnigramas con ANSYS FLUENT teniendo en cuenta la presión estática y el nivel de la lámina de agua también sufren un desplazamiento con respecto al tiempo de 2.7 segundos aproximadamente, aun localizando el hidrograma a la salida de la tubería de alimentación en el dominio en 2D, es decir a 0.7m aproximadamente aguas arriba de la entrada del canal rectangular.
- Según lo modelado con el método de las características y contrastado con lo medido, las modelaciones son aceptables con respecto a la presión estática a excepción de los transductores T2, T7 y T8. Según lo modelado con ANSYS FLUENT 2D en flujo no permanente y comparado con lo medido, las modelaciones no son aceptables con respecto a la presión estática para los transductores T1, T7 y T8, a diferencia de las modelaciones con respecto al nivel de la lámina de agua donde no hubo aceptabilidad para los transductores T7 y T8.
- Asumiendo que la modelación del nivel de lámina de agua en todos los transductores es aceptable, el transductor T8 real no mide la altura de lámina de agua adecuadamente, ya que alcanza niveles supuestos muy por encima de la lámina de agua estimada y los transductores de presión relativa arrojan registros de presión que se asocian con la profundidad de la lámina de agua mediante el supuesto de distribución hidrostática de presión. Esta conclusión es respaldada desde el punto de vista teórico desde Henderson (1966, pág. 177) y lo observado en las modelaciones en T8, donde la distribución de presión no es hidrostática en la región del veredero de cresta delgada, ya que las líneas de corriente presentan una curvatura distinta en el plano vertical y el perfil de presión graficado no forma una línea transversal de 45° entre el eje de la presión estática y el eje del nivel de la lámina de agua.
- Se recomienda para trabajos futuros, desde el punto de vista computacional para modelaciones en 2D y 3D, utilizar un clúster o red de procesadores para realizar procesos de cálculo con mayor rapidez que el utilizado en este estudio y realizar las posibles correcciones que se presenten como

el análisis de la dependencia de la malla, reduciendo la incertidumbre de lo calculado o modelado y lo medido. Desde lo instrumental, se recomienda instalar transductores para el canal ECI No. 2 y para los dos canales un sensor de ultrasonido o un sistema de fotointerpretación de nivel de agua como testigo en regiones donde se presume que el perfil no es hidrostático. También es necesario para calibraciones de los modelos de turbulencia, utilizar medidores de turbulencia en canales abiertos enlistados por Nezu (2005) como el medidor de corriente ultrasónica, medidor de corriente electromagnético (EM), anemómetro de película caliente (HFA), velocímetro Doppler acústico (ADV), anemómetro laser Doppler o velocímetro LDA o LDV, los basados en la inyección de tinta o burbujas de hidrógeno como trazadores, el seguimiento de partículas y los velocímetros de imagen de partícula PTV y PIV. Lo anterior en aras de mejorar las modelaciones en 2D y 3D flujo permanente y no permanente de los escenarios expuestos en este documento o cualquiera que se dese realizar utilizando modelos de turbulencia incorporados en ANSYS FLUENT.

Bibliografía

- Nezu, I. (2005). Open-Channel Flow Turbulence and Its Research Prospect in the 21st Century. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 19.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-layer Theory*. New York: McGRAW-HILL.
- Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Van Wachem, B. (2012). *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. New York: Cambridge University Press.
- ANSYS. (2013). Introduction to ANSYS. *Introduction to the CFD Methodology* (pág. 31). Bogotá: ANSYS.
- ANSYS, Inc. (2013). Ansys help 16.0, Fluent. Canonsburg, Pensilvania, Estados Unidos.
- Arenas Amado, A. (2002). *Métodos numéricos para la solución de las ecuaciones de Saint-Venant. Comparación con datos experimentales*. Escuela Colombiana de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá.
- Axelsson, J., & Knutsson, R. (2011). *Numerical modeling of a slotted flip bucket spillway system - the shibuya hydropower project (tesis de maestría)*. Stockholm: Department of Land and Water Resources Engineering. Royal Institute of Technology (KTH).
- Bakker, A. (2012). *The Colorful Fluid Mixing Gallery*. Obtenido de Course materials for the Computational Fluid Dynamics (ENGS 150), Dartmouth College from 2002-2006: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/>
- Ballesteros Tajadura, R., & Etal. (2003). *Técnicas numéricas en mecánica de fluidos, monografías de mecánica de fluidos*. Recuperado el 12 de Abril de 2013, de Universidad de Oviedo: <http://web.uniovi.es/Areas/Mecanica.Fluidos/>
- Bates, P. D., Lane, S. N., & Ferguson, R. I. (2005). *Computational Fluid Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Butler, D., & Davies, W. J. (2011). *Urban drainage*. Abingdon: Taylor & Francis Group.
- Casey, M., & Wintergerste, T. (2000). *ERCFTAC Special Interest Group on "Quality and Trust in Industrial CFD", Best Practice Guidelines*. Winterthur, Suiza: ERCFTAC.
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de fluidos, Fundamentos y aplicaciones*. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Chaudhry, M. H. (2007). *Open-Channel Flow*. New York: Springer.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos (Juan Saldarriaga, Trads.)*. Santafé de Bogotá: Mac Graw-Hill Interamericana S.A.
- Chung, T. (2010). *Computational Fluid Dynamics*. Cambridge: Cambridge University.
- Dingman, S. L. (2009). *Fluvial hydraulics*. New York: Oxford University Press.
- Gautam, B., & Vinayak, E. (2002). *Turbulent Flows: Fundamentals, Experiments and Modeling*. Kanpur, India: Alpha Science International Ltd.

- Hargreaves, D., H. P., M., & N. G., W. (2007). Validation of the volume of fluid method for free surface calculation the broad-crested weir. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics Vol. 1, No. 2*, 136 –146.
- Henderson, F. (1966). *Open channel flow*. New York: Macmillan publishing Co.
- Hirsch, C. (2007). *Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics* (Vol. 1). Estados Unidos.
- L. Oberkampf, W., & J. Roy, C. (2009). *Verification and validation in scientific computing*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Liscia, S., Angulo, M., de Dios, M., & del Blanco, M. (2010). Modelación matemática y física de un vertedero modificado. *XXIV Congreso latinoamericano de hidráulica punta del este, Uruguay*, 1 - 14.
- M. Salih, K., M. Sami, A., & Oner, A. (2008). Experimental and theoretical analyses of 2D flows upstream of broad-crested weirs. *Canadian journal of civil engineering Vol. 35, NRC Reserch Press.*, 975 - 986.
- Pulido Rueda, R. E. (2010). *Evaluación de estructuras de alivio para alcantarillado combinado*. Tesis de Maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Bogotá.
- Qu, J., Ramamurthy, A., Tadayon, R., & Chen, Z. (2009). Numerical simulation of sharp-crested weir flows. *Canadian Journal of Civil Engineering, NRC Research Press*, 1530 - 1534.
- Rahimzadeh, H., Maghsoodi, R., Sarkardeh, H., & Tavakkol, S. (2012). Simulating flow over circular spillways by using different turbulence models. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics Vol. 6, No.1, Taylor & Francis*, 100–109.
- Ramamurthy, A., Junying, Q., & Diep, V. (2005). Volume of fluid model for an open channel flow problem. *Canadian Journal of Civil Engineering, NRC Reserch Press*, 996 - 1001.
- Ramamurthy, A., Junying, Q., & Diep, V. (2006). VOF Model for Simulation of a Free Overfall in Trapezoidal Channels. *Journal of irrigation and drainage engineering, ASCE*, 425 - 428.
- Ramazza, M. (2008). *Undular jump, numerical model and sensitivity analysis (tesis de maestría). Corso di Laurea specialistica in Fisica*. Bologna: Università di Bologna.
- Rhinoceros 5.0. (29 de Octubre de 2016). *Rhinoceros diseñar, modelar, presentar, analizar, producir*. Obtenido de Descargar Rhino 5: <https://www.rhino3d.com/download/rhino/5/latest>
- Rodríguez Cárdenas, H. S., & Camargo, S. A. (2013). *Diseño y construcción de un dispositivo de disipación de energía a la entrada del canal experimental de pendiente variable de la ECI*. Escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito, Especialización en recursos hidráulicos y medio ambiente, Bogotá.
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2006). *Grenzschicht-Theorie*. Berlin: Springer.
- Song, T., & Chiew, Y. M. (2001). Turbulence measurement in nonuniform open-channel flow using acoustic doppler velocimeter (ADV). *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 14.
- Sotelo Avila, G. (2002). *Hidraulica de canales*. Mexico D.F.: Universidad Nacional Autonoma de Mexico.

- Stoesser, T., Ruether, N., & Boe Olsen, N. R. (2010). Calculation of primary and secondary flow and boundary shear stresses in a meandering channel. *Advances in Water Resources* 33, Elsevier Ltd., 158–170.
- US Army Corps of Engineers. (2010). *HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, Version 4.1*. Report, Institute For Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, California.
- Usman Ghani, S., & Sabahat, A. (2013). Comparison of Different Turbulence Models in Open Channels with Smooth-Rough Bedforms. *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology, Volume 32, No. 4, October*, 623 - 630.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the finite volume method*. Harlow: Pearson Education Limited.
- White, F. (1998). *Fluid Mechanics*. United States: McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering.
- Y. Wang, S., J. Roche, P., Schmalz, R., Jia, Y., & E. Smith, P. (2009). *Verification and validation of 3D free-surface flow models*. Reston: American Society of Civil Engineers ASCE.