

Modelación hidrodinámica bi- y tridimensional del nuevo canal con disipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería, utilizando Ansys Fluent

Bi- and three-dimensional hydrodynamic modeling of the new energy-dissipator enabled channel from Escuela Colombiana de Ingeniería, using Ansys Fluent

JORGE ALEJANDRO MORA USCÁTEGUI¹ - GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS²

1. Ingeniero sanitario. Maestría en Ingeniería Civil.

2. Director de tesis.

Programa de Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá (Colombia).

jorge.mora@escuelaing.edu.co - german.santos@escuelaing.edu.co

Recibido: 07/10/2017 Aceptado: 11/11/2017

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

Resumen

El presente artículo trata de la modelación de la dinámica de fluidos computacional en flujo permanente del nuevo canal de laboratorio a superficie libre, con una estructura de transición que funciona como disipador de energía más una rampa correctora de líneas de corriente. Se usó el *software* Ansys Fluent para modelar la interfaz agua-aire con el modelo de volumen de fluidos (VOF) y el modelo “Baseline (BSL) $k-\omega$ ” para flujo turbulento. Los resultados fueron comparados y analizados con mediciones realizadas en un modelo físico. Se hicieron modelaciones comparativas, con topologías sin disipador de energía y sin rampa, de parámetros como la altura de la lámina de agua, energía mecánica, simetría del flujo, distribución de la magnitud velocidad y presión estática.

Palabras claves: modelación numérica, canal a superficie libre, disipador de energía, dinámica de fluidos computacional (CFD).

Abstract

This paper deals with the modeling of the computational fluid dynamics in permanent flow of the new free surface channel laboratory with a transition structure that functions as an energy dissipator plus a correction ramp of current lines. The Ansys Fluent software was used to model the water-air interface with the volume of fluids model (VOF) and the “Baseline (BSL) $k-\omega$ ” model for turbulent flow. The results were compared and analyzed with measurements performed on a physical model. Comparative models were analyzed, with energy-dissipator-free and ramp-free topologies, in terms of parameters such as surface water height, mechanical energy, flow symmetry, distribution of magnitude of velocity, and static pressure.

Keywords: numerical modeling, free surface channel, energy dissipator, computational fluid dynamics (CFD).

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) (Cengel & Cimbala, 2006). En la actualidad, los ingenieros en general diseñan estructuras hidráulicas con relaciones empíricas en las que el análisis de resultados es limitado, ya que no se toman en cuenta fenómenos que pueden presentarse en otras dimensiones.

Los 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 artículo se analiza la dinámica de fluidos en flujo permanente en el nuevo canal de laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería (en adelante, ECI N.º 2), usando modelos numéricos 1D con las ecuaciones de Runge Kutta de cuarto orden, 2D y 3D con el *software* de dinámica de fluidos computacional (CFD) Ansys Fluent versión 15 (figura 1). La modelación de esta estructura hidráulica se compone 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.

El contenido del presente artículo forma parte del estudio original de Mora Uscátegui (2017).

OBJETIVOS

- Modelar la superficie libre de agua en el canal ECI N.º 2.

- Analizar la disipación de energía mecánica en el sistema del canal ECI N.º 2.
- Analizar la simetría del flujo de agua en el sistema del canal ECI N.º 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 de agua en el sistema del canal ECI N.º 2.

MODELO FÍSICO

El canal se diseñó y construyó de modo tal que sea alimentado por una tubería de 4" de diámetro, compuesta por dos materiales. El primero es PVC, que está conectado al tanque elevado del sistema de bombeo, y el segundo es un 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 su interior contiene una estructura de transición con la función de disipar la energía, el cual descansa en un tanque con medidas de 0,378 m de ancho y 0,96 m de longitud, entregando un flujo de agua calmado con la ayuda de una rampa para corregir las líneas de corriente a un canal rectangular de sección uniforme, con medidas de 0,378 m de ancho y 5,05 m de longitud.

En el estudio original se analizaron cuatro caudales, pero, en el presente artículo se analizó el caudal denominado Q3 igual a 18,21 L/s. Se generó un perfil hidráulico supercrítico con pendiente del 1 %.

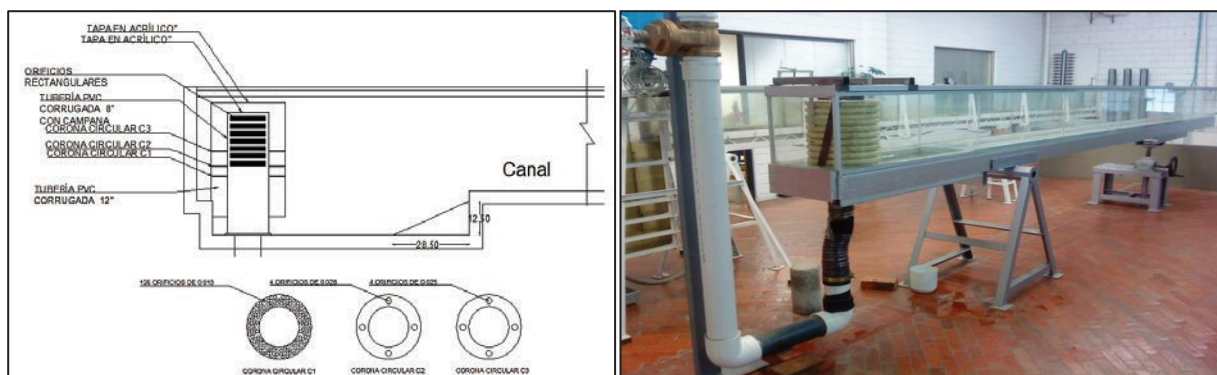


Figura 1. Canal de laboratorio ECI N.º 2.

Fuente: Rodríguez Cárdenas & Camargo, 2013.

Modelación 1D

El método que se utilizó para flujo permanente en 1D es el método de cuarto orden de Runge-Kutta, programado en lenguaje Visual Basic de Excel.

Modelaciones 2D y 3D

Se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo incompresible, permanente, y flujos internos y externos multifase (agua y aire). El *software* Ansys Fluent es una herramienta computacional que resuelve estas ecuaciones, basada en el método de volumen finito. El dominio computacional está discretizado en un conjunto finito de volúmenes de control (celdas). La ecuación general de conservación de la masa (transporte) y cantidad de movimiento se resuelven en este conjunto de volúmenes de control.

Las ecuaciones diferenciales parciales son discretizadas dentro de un sistema de ecuaciones algebraicas. Todas estas ecuaciones algebraicas se resuelven luego numéricamente para interpretarlas en un campo de solución.

Al utilizar 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 su sigla en inglés), utilizando la hipótesis de Boussinesq para relacionar los esfuerzos de Reynolds a los gradientes de velocidad media. 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 considerarse como la relación de k y ϵ (tasa de disipación de la energía cinética turbulenta por unidad de masa). El modelo *Baseline* (BSL) $k-\omega$ fue desarrollado por Menter para mezclar el modelo $k-\omega$ en la zona cercana a la pared, con la independencia de la corriente libre del modelo $k-\epsilon$ en la zona lejana a la pared, utilizado en el presente estudio.

Para modelar la superficie libre se usó el modelo de volumen de fluido VOF, que puede modelar dos o más fluidos inmiscibles por la solución de un único conjunto de ecuaciones de cantidad de movimiento y el seguimiento de la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio. Para el presente estudio se emplearon los fluidos de agua y aire.

Los métodos de discretización utilizados se presentan a continuación (tabla 1):

Tabla 1
Métodos de discretización

Acoplamiento de la presión - velocidad	
Esquema	Simple
Discretización espacial	Método
Gradientes	<i>Least squares cell based</i>
Presión	<i>Body force weighted</i>
Cantidad de movimiento	<i>First order upwind</i>
Fracción de volumen	<i>Modified HRIC</i>
Energía cinética turbulenta	<i>First order upwind</i>
Tasa de disipación específica	<i>First order upwind</i>

Para el proceso de cálculo se utilizó un computador personal con procesador Intel® Core™ i7 - 4700HQ CPU @ 2.40 GHz - 2.39 GHz, 4 núcleos y 8 procesadores lógicos, 16 GB de memoria RAM y tarjeta gráfica Nvidia Geforce GTX 760M.

Para diseñar y crear la malla del dominio en 2D y 3D se usaron 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 estructurado con celdas cuadradas. Para dominios 3D se empleó el mallado tipo híbrido, con el método Delaunay con celdas tetraedro en los límites y hexagonal en el núcleo del dominio. El mallado para 3D se escogió por la complejidad de la geometría en la región del disipador de energía y alrededores al tener espacios y regiones de gran variabilidad. 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 esté en desarrollo.

Se analizaron cuatro topologías. Las dos primeras son teóricas en 1D y 2D, llamadas canal con entrada larga sin rampa "T0a" y canal con entrada larga con rampa "T0b". Las otras dos son en 3D, llamadas canal sin disipador de energía y sin rampa "T1" y canal con disipador de energía y con rampa "T3". En el estudio original existe una topología llamada canal con disipador de energía y sin rampa "T2", pero no se analiza en el presente artículo, aunque se dejan algunos resultados como referencia. Para T0a se utilizaron 125.784 celdas, con un costo computacional de 3,7 horas y 60.000 iteraciones; para T0b se usaron 104.800 celdas, con un

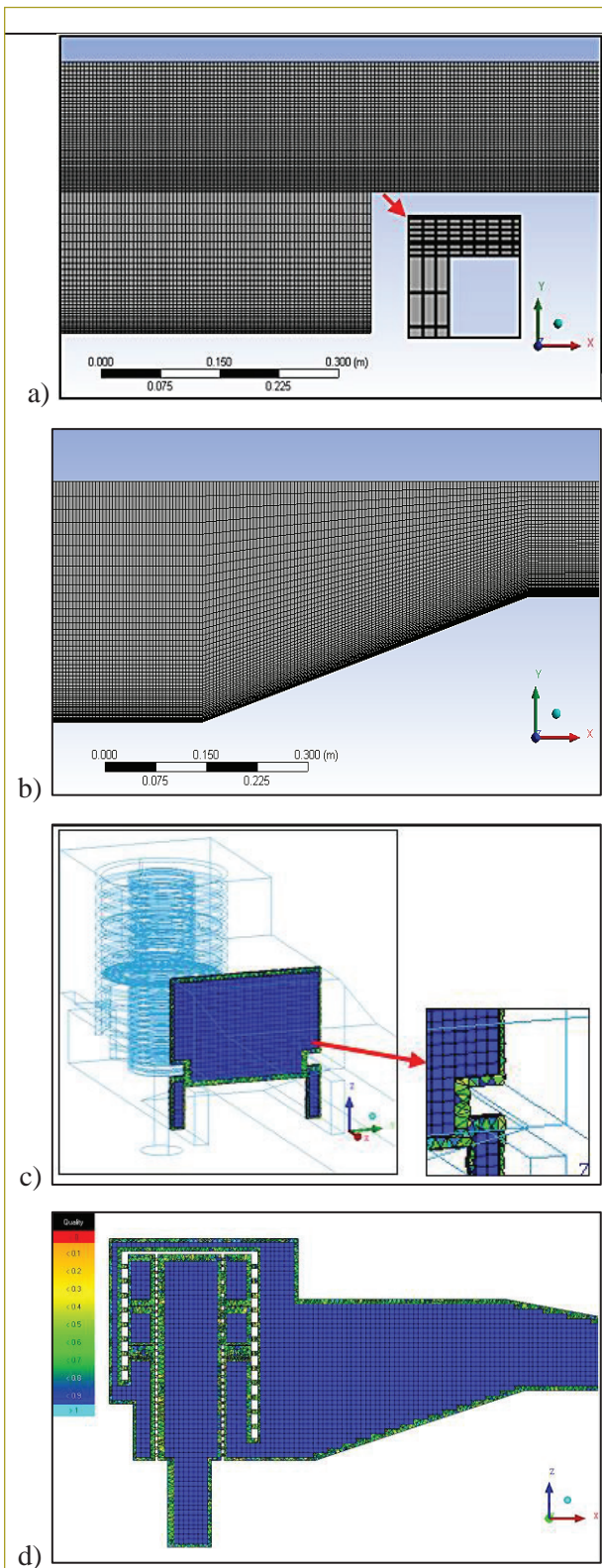


Figura 2. Malla estructurada utilizada para modelaciones en 2D (a, b) y malla híbrida usada para modelaciones en 3D (c, d).

costo computacional de 2,5 horas y 60.000 iteraciones; para T1 se emplearon 1.341.579 celdas, con un costo computacional de 10 horas y 4350 iteraciones; para T3 se usaron 1.656.580 celdas, con un costo computacional de 10,23 horas y 7000 iteraciones.

Como criterio de verificación, en las modelaciones en 2D y 3D se monitorearon 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} .

Se monitoreó el caudal másico de la fase agua en la salida de agua, hasta alcanzar valores constantes en cada iteración y cercanos al valor inyectado. También se monitoreó la presión estática en las superficies localizadas, hasta alcanzar valores constantes en cada iteración y cercanos al valor medido.

Se estableció un intervalo de confianza del 4 % como criterio de validación y para medir la incertidumbre de los resultados de mediciones versus modelaciones del caudal volumétrico, presión estática y altura de lámina de agua. También se establecieron secciones de control para realizar análisis de resultados (figura 3).

Condiciones de frontera utilizadas

Para modelar VOF en un canal abierto se utilizaron las siguientes condiciones de frontera (*boundary conditions*, BC). *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. *Mass flow inlet* (flujo másico a la entrada): Se especifica el flujo másico de la fase agua y aire, intensidad turbulenta, diámetro hidráulico. *Pressure inlet* (presión a la entrada): Se especifican velocidad absoluta, intensidad turbulenta, diámetro hidráulico. *Velocity inlet* (velocidad a la entrada): se especifican velocidad absoluta, diámetro hidráulico y método de interpolación de la densidad. *Pressure outlet* (presión a la salida): Presión manométrica igual a cero (0), simulando presión atmosférica a la salida y en la

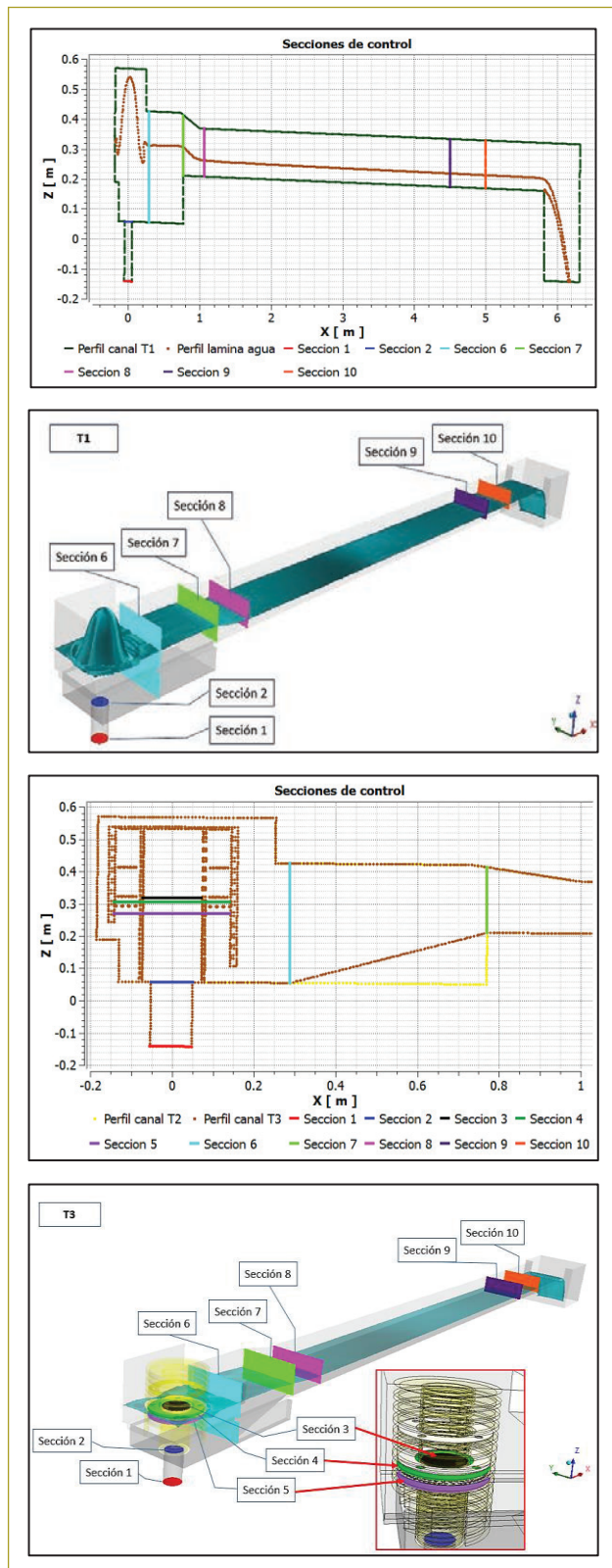


Figura 3. Ubicación de las secciones de control para el análisis de escenarios con topologías T1 y T2 en 3D.

parte superior del dominio (canal), simulando que el aire corre libremente.

RESULTADOS

Perfil de lámina de agua medido versus modelado

Al superponer el perfil de la lámina de agua medida con la modelada con Ansys Fluent 3D, se puede analizar la capacidad de representar el nivel de agua en diferentes regiones del dominio, para así tener un criterio de aceptabilidad. El perfil de la lámina de agua modelado se ajusta al medido, encontrando una singularidad en la región del dissipador de energía, donde se observa que el flujo se encuentra presurizado y el modelo no dibuja una interfaz agua-aire (figura 5).

En cuanto a las modelaciones comparativas de los modelos ideales con entrada larga con respecto a los dominios con dissipador de energía reales y sin él (figura 6), las modelaciones en 1D y 2D fueron importantes al tener en cuenta solo flujo uniforme con perfiles ideales para secciones transversales semejantes. Estos modelos 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 “yc” a la sección inicial del canal rectangular y compararlo con las modelaciones del perfil de lámina de agua en 3D. Los modelos 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 “yc” está más cerca de la entrada del canal rectangular, con un perfil de lámina de agua con leves perturbaciones.

Según la bibliografía existente, en la altura crítica la energía específica y la fuerza específica son mínimas y el caudal unitario es máximo, pero como se observa, puede sufrir un desplazamiento en dirección al flujo.

Energía mecánica

En el presente aparte se analizó la variación de estos parámetros entre secciones de cada topología y caudal, teniendo en cuenta la ecuación $h = h_{EP} + (\bar{h}_{EC} + h_K) + h_f$, donde h : energía mecánica total o cabeza total, h_{EP} : cabeza potencial o piezométrica, \bar{h}_{EC} : cabeza de energía cinética promedio, h_K : cabeza de energía cinética turbulenta, h_f : pérdida por fricción (esfuerzos cortantes).

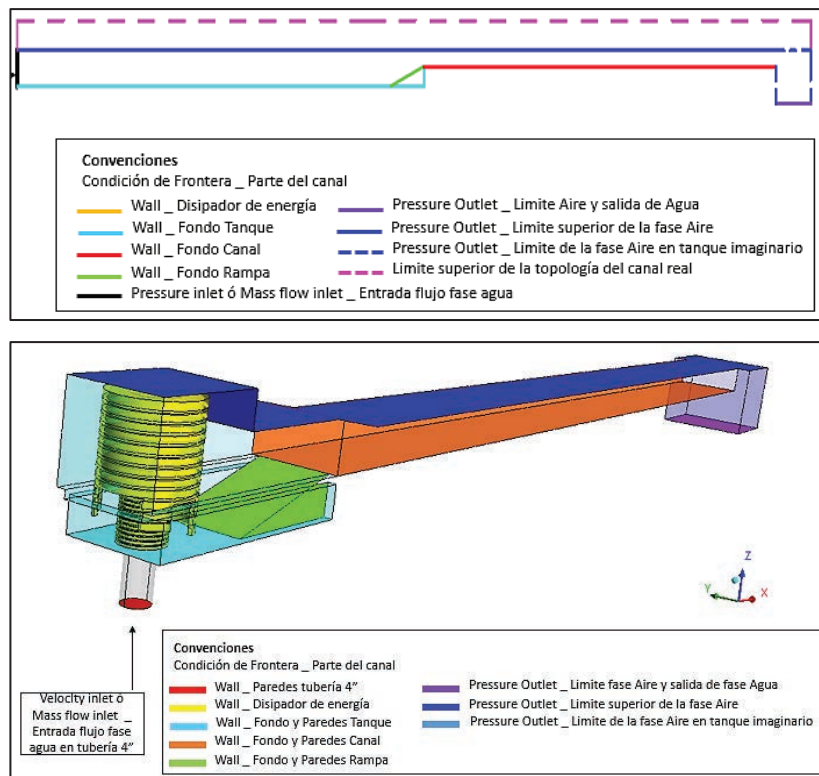


Figura 4. Condiciones de frontera para modelos 2D y 3D para el canal ECI N.º 2.

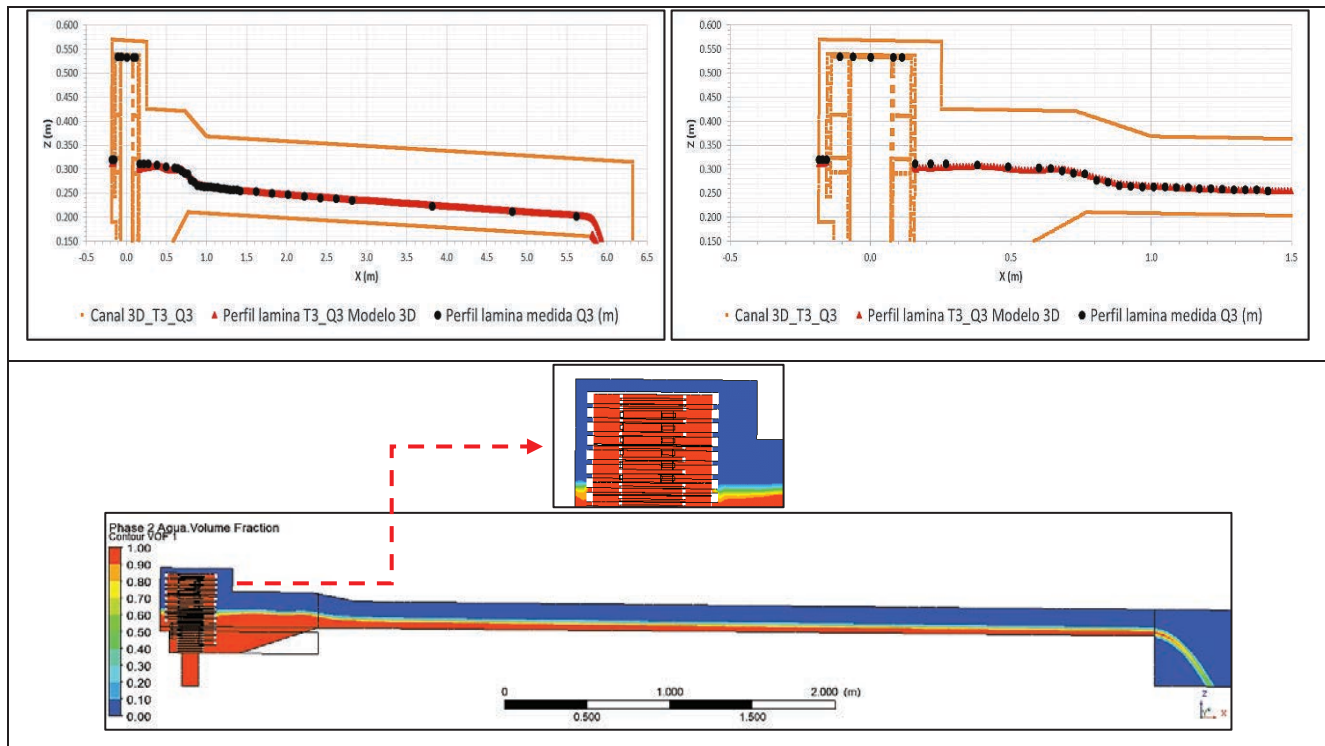


Figura 5. Perfil de lámina de agua medido vs. 3D, T3_3D_Q3 (en el eje central).

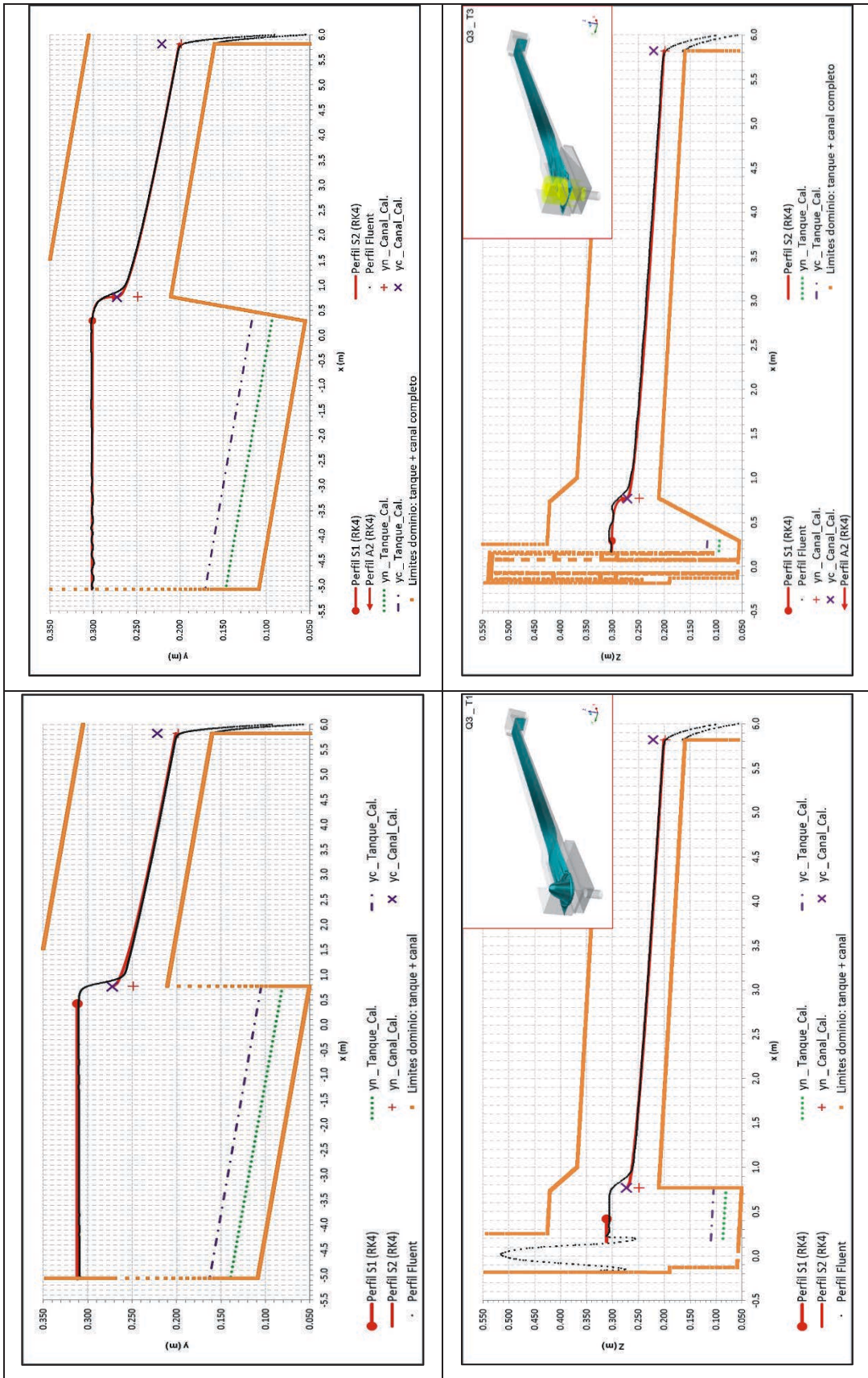


Figura 6. Perfiles de lámina de agua para T0a_1D_Q3 vs. T0a_2D_Q3 y T0b_1D_Q3 y T0b_2D_Q3 (arriba), (VOF=0,5). Perfiles de lámina de agua para T1_3D_Q3 y T3_3D_Q3 (abajo), (VOF=0,5).

En cuanto a las modelaciones comparativas sobre la energía mecánica, el parámetro de energía cinética turbulenta fue importante para cuantificar la disminución del flujo caótico observado por Rodríguez Cárdenas & Camargo (2013) al implementar el dissipador de energía y la rampa antes del canal rectangular. Parámetros como cabeza de energía potencial, cabeza de energía cinética promedio y cabeza de energía total no reflejaron el fenómeno, entendiendo que el flujo, al pasar por las topologías sin dissipador de energía y sin rampa, también se encuentra disipando energía pero con menor eficiencia (figuras 7 a 9).

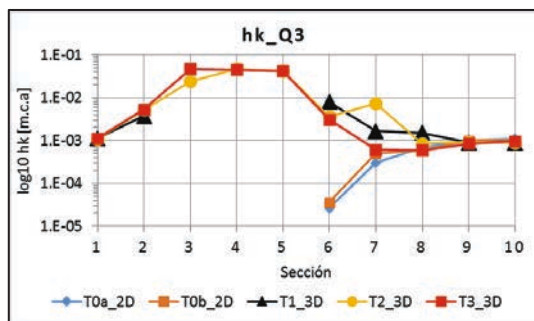


Figura 7. Valores de la cabeza de energía cinética turbulenta h_k (m.c.a.). T#: Topología.

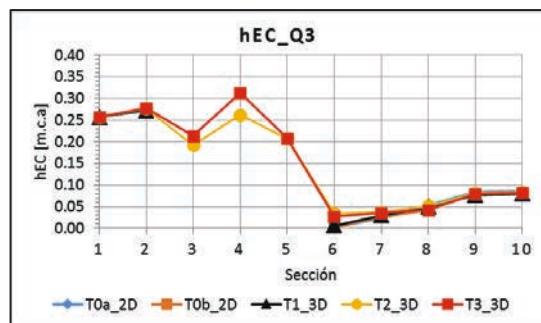
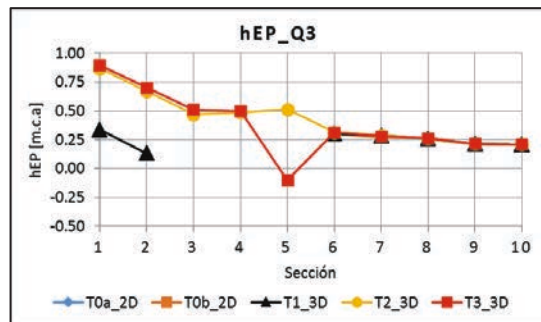


Figura 8. Valores de la cabeza de energía potencial h_{EP} (m.c.a.) y la cabeza de energía cinética promedio h_{EC} (m.c.a.). T#: Topología.

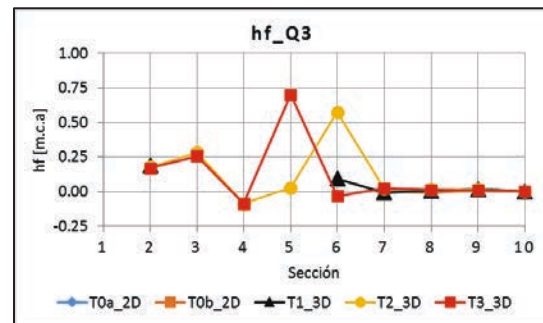
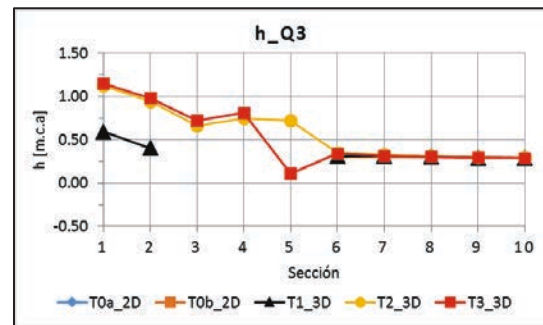


Figura 9. Valores de la cabeza energía total h (m.c.a.) y la pérdida por fricción h_f (m.c.a.). T#: Topología.

Simetría del flujo

Los resultados de la modelación de la distribución de flujos primarios y secundarios para las topologías T1 y T3 arrojaron que la decisión de modelar el dominio completamente desde un principio fue acertada, ya que la simetría del flujo varía de acuerdo con la topología y la sección en la que se analizó, y según el caudal inyectado.

A su vez, los resultados de la modelación de la distribución del coeficiente de fricción (C_f) en el fondo del canal para todas las topologías, desde la sección 8 hasta la 10 evidencian que el flujo es eje-simétrico, asumiendo que las variaciones son pequeñas, a diferencia del análisis de distribución de flujos primarios y secundarios; 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.

Desde el análisis de la distribución de las líneas de corriente para la topología T1, el flujo es eje-simétrico; sin embargo, para T3 el flujo no es eje-simétrico, puesto que tiene más concordancia con el análisis de distribución de flujos primarios y secundarios que con el análisis del coeficiente de fricción local (figuras 11 a 17).

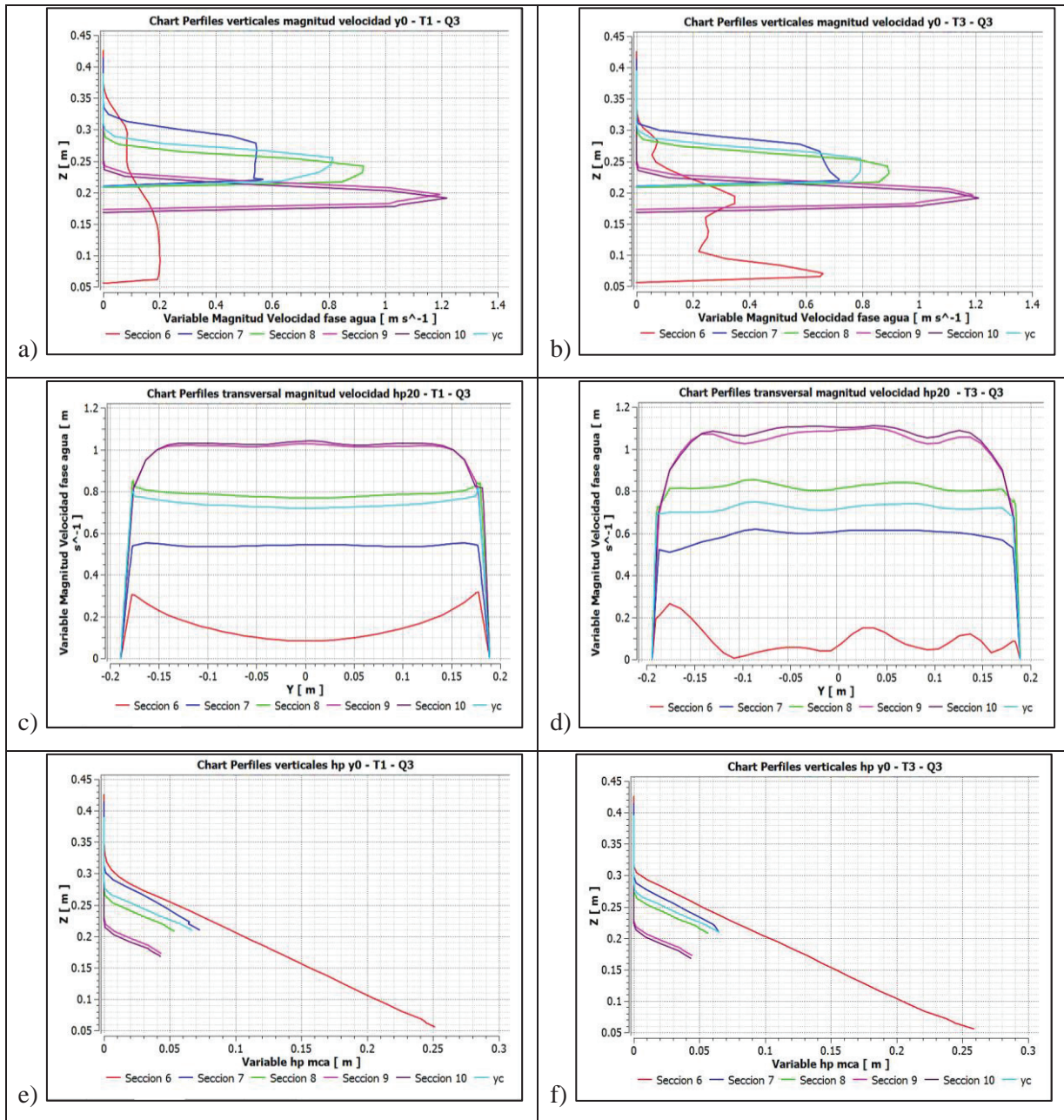


Figura 10. Distribución de la magnitud velocidad vertical, en las secciones de las topologías T1 (a) y T3 (b). Distribución de la magnitud de velocidad transversal, en las secciones de las topologías T1 (c) y T3 (d). Distribución de la presión estática (hp), en las secciones de las topologías T1 (e) y T3 (f).

Nota: hp_{20} = medido a 20 % de la presión estática de la sección, es decir, medido a 0,2 de la altura de la lámina de agua desde la superficie libre. Z = eje vertical del dominio en 3D. y_0 = eje central del canal en 3D.

Perfiles de velocidad

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 del 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, esto es, que las ecuaciones de RANS fueron calculadas y el modelo utilizó la ecuación de la ley logarítmica.

En relación con la distribución de los perfiles transversales de la magnitud velocidad, las secciones transversales 6, 7, “yc” y 8 de la topología T1 (sin dissipador de energía y rampa) presentan perfiles definidos, con regiones con aceleración y desaceleración del flujo en cercanías del inicio del canal. Caso contrario pasa en la

topología T3, donde se aprecia que el perfil tiene una leve deformación con picos máximos. Para las secciones transversales 9 y 10 en las topologías T1 y T3, el perfil de velocidad transversal indica que hay una leve deformación, con picos máximos. La variabilidad de picos máximos señala 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 (figura 10 a, b, c y d).

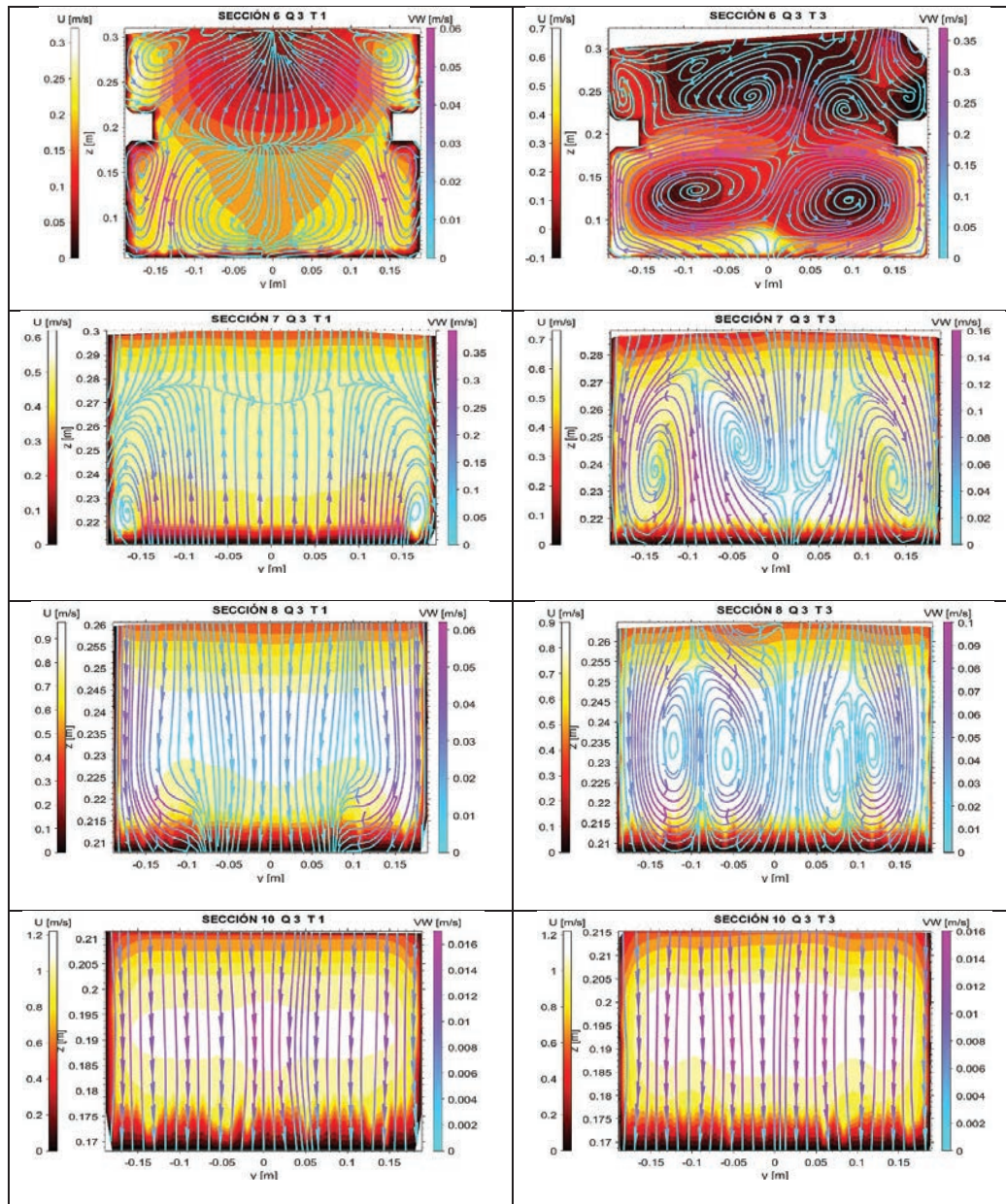


Figura 11. Flujos primarios (U) y secundarios (VW), en las secciones 6, 7, 8 y 10 de la topología 1 (izquierda) y de la topología 3 (derecha) para el caudal Q3.

Perfiles de la presión estática

En 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 hidroestáticas, 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 que el de T1, encontrando una razón de cómo la rampa ayuda a que el perfil sea más hidroestático desde la sección 7 (figura 10 e y f).

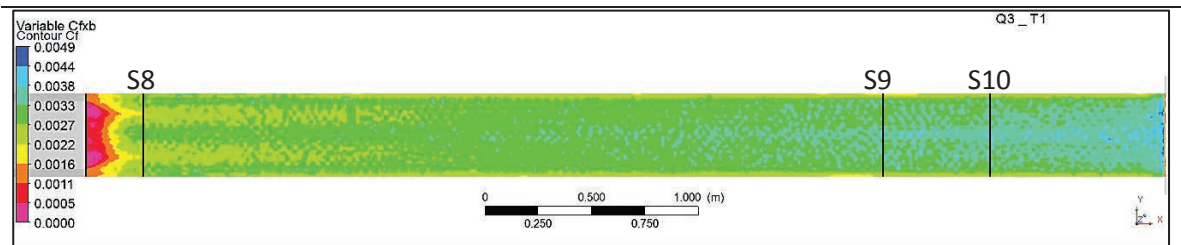


Figura 12. Distribución del coeficiente de fricción por ancho de canal de la topología 1 para los caudales Q3 (vista de planta).

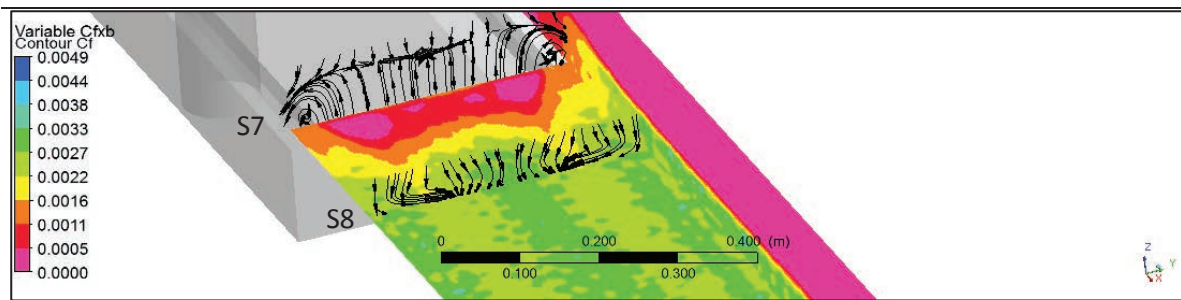


Figura 13. Influencia de los flujos secundarios en la distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, en las secciones 7 y 8 de la topología 1, para el caudal Q3.

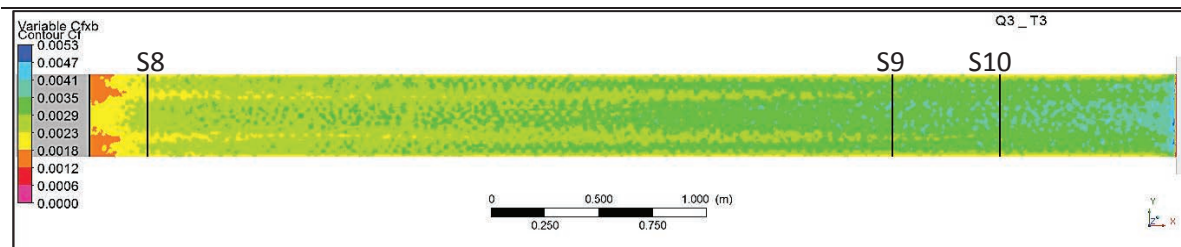


Figura 14. Distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, de la topología 3 para los caudales Q3 (vista de planta).

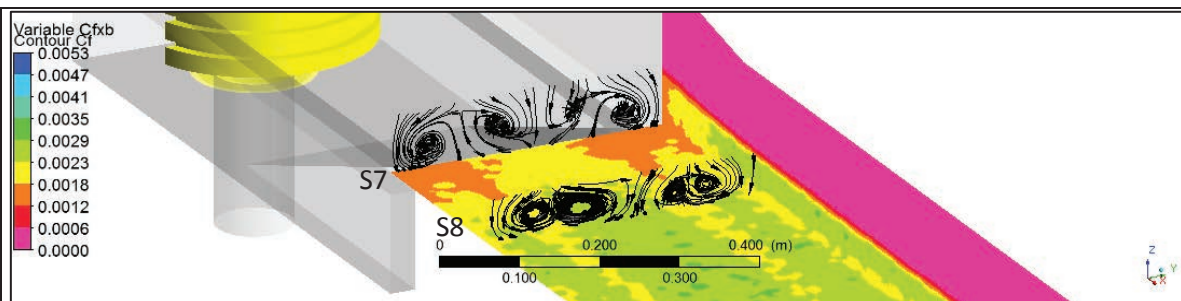


Figura 15. Influencia de los flujos secundarios en la distribución del coeficiente de fricción por ancho del canal, en las secciones 7 y 8 de la topología 3, para el caudal Q3.

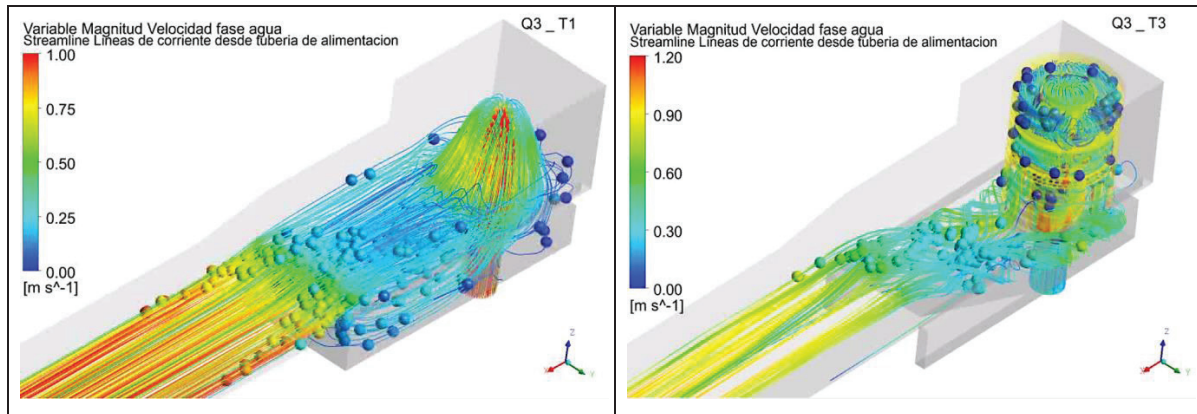


Figura 16. Distribución de líneas de corriente y trazas de partículas de agua modelado desde la tubería de alimentación, de las topologías T1 (izquierda) y T3 (derecha), para el caudal Q3.

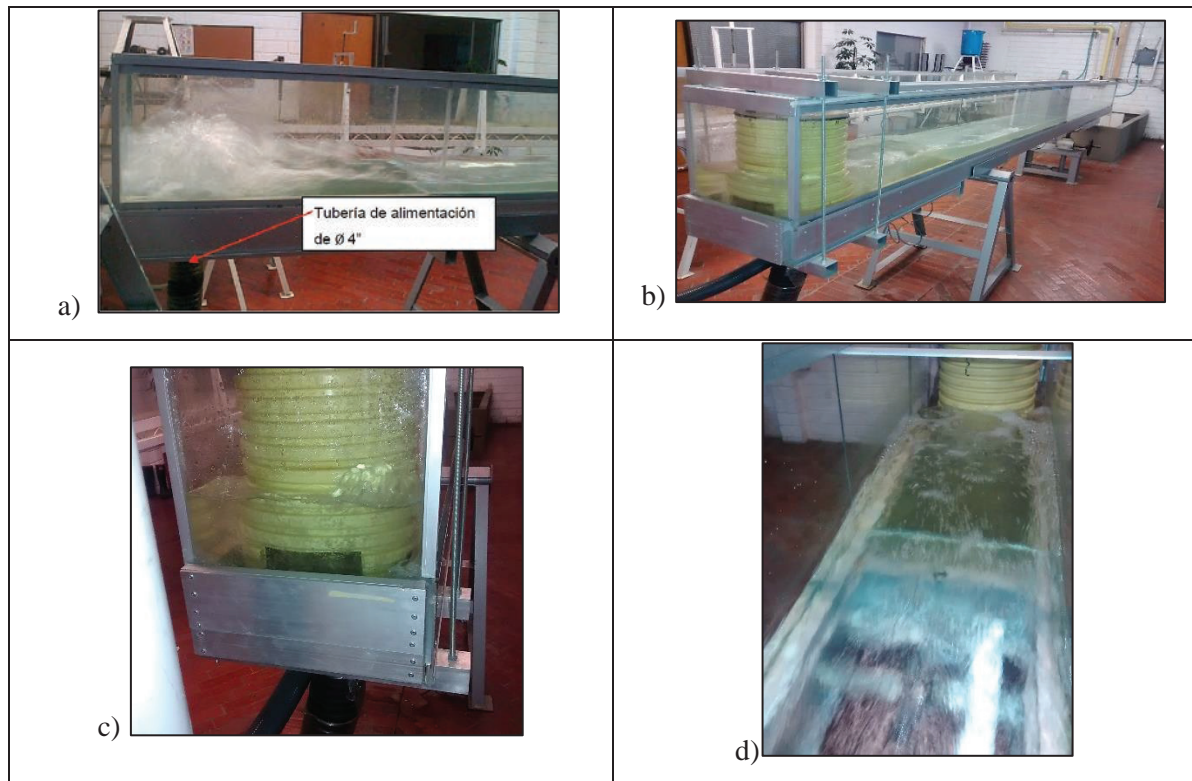


Figura 17. Condiciones iniciales (a) para T1 y finales (b, c, d) para T3 y Q3 a la entrada del canal.

Fuente: Adaptado de Rodríguez Cárdenas & Camargo, 2013, (a) y este estudio (b, c, d).

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 hacer 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 aconseja instalar

transductores para el canal ECI N.º 2, y 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 hidroestático. 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, el medidor de corriente electromagnético (EM), el

anemómetro de película caliente (HFA), el velocímetro Doppler acústico (ADV), el anemómetro laser Doppler o el velocímetro LDA o LDV.

CONCLUSIONES

- Mediante las modelaciones de CFD con el *software* Ansys Fluent, a través de la verificación del código y la validación con mediciones en el modelo físico del canal ECI N.º 2, se logró representar la superficie libre de agua en flujo permanente y realizar análisis complementarios, pese a los errores que se pudieron tener, tanto humanos como del instrumental en las mediciones y la calidad de la malla, como los modelos elegidos para las modelaciones.
- Según los modelos en 1D, 2D y 3D, se encontró que la altura crítica sufre un desplazamiento en dirección del flujo según el tipo de entrada al canal rectangular con sección uniforme, observando que para una entrada con escalón de 90° el desplazamiento es mayor y para una entrada en forma de rampa de 18,43° el desplazamiento es menor, mejorando notablemente con el disipador de energía.
- 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, hallando que la energía cinética turbulenta es la responsable de tal condición caótica inicial, disminuyendo su magnitud desde la sección 6 hasta la 9, donde el flujo se torna uniforme.
- Las modelaciones en 3D sirvieron para realizar análisis de simetría del flujo. Este tema es importante en la decisión de modelar en 3D un dominio completo o solo con la mitad de éste, utilizando la condición de frontera “Symmetry” en Ansys Fluent, como herramienta de optimización de tiempo computacional. Además, se demostró que el flujo se encuentra sufriendo una inclinación hacia la margen derecha del canal al incluir el disipador de energía, dejando la puerta abierta a futuras investigaciones en cuanto a la optimización de la estructura de transición.
- De acuerdo con la distribución de la magnitud velocidad vertical y transversal, Ansys Fluent no sólo utiliza la ley logarítmica para el cálculo de perfil de velocidades, sino que también calcula completamente las ecuaciones de RANS en regiones en las que existen recirculaciones con aceleraciones y desaceleraciones, donde la teoría de la capa límite no es válida. Con respecto a la distribución de la presión estática, las secciones de T3 presentan perfiles hidroestáticos más definidos que en T1, atribuyendo esta mejora a la presencia del disipador de energía y rampa.
- Según los resultados arrojados por los modelos en 1D, 2D y 3D, el canal con disipador de energía y rampa disminuye espacio y recursos en las instalaciones del laboratorio de hidráulica, al comparar la geometría de la topología ideal modelada en 1D y 2D con la modelada en 3D.

REFERENCIAS

- Nezu, I. (2005). Open-Channel Flow Turbulence and Its Research Prospect in the 21st Century. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 19.
- Andersson, B., Andersson, R., Hakansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Van Wachem, B. (2012). *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Nueva York: Cambridge University Press.
- Ansys, Inc. (2013). Ansys help 16.0, Fluent. Canonsburg, Pennsylvania, Estados Unidos.
- 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/>.
- Butler, D., & Davies, W. J. (2011). *Urban drainage*. Abingdon: Taylor & Francis Group.
- 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.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos* (Juan Saldañriaga, Trad.). Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Gautam, B., & Vinayak, E. (2002). *Turbulent Flows: Fundamentals, Experiments and Modeling*. Kanpur, India: Alpha Science International Ltd.
- Mora Uscátegui, J. A. (2017). *Modelación hidrodinámica bi- y tridimensional de dos canales con disipador de energía del laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería, utilizando Ansys Fluent*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, maestría en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.
- 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*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, especialización en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics, the Finite Volume Method*. Harlow: Pearson Education Limited.