



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Modelación numérica para determinar la orientación de una
bifurcación en el Tramo B del Río Piura**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

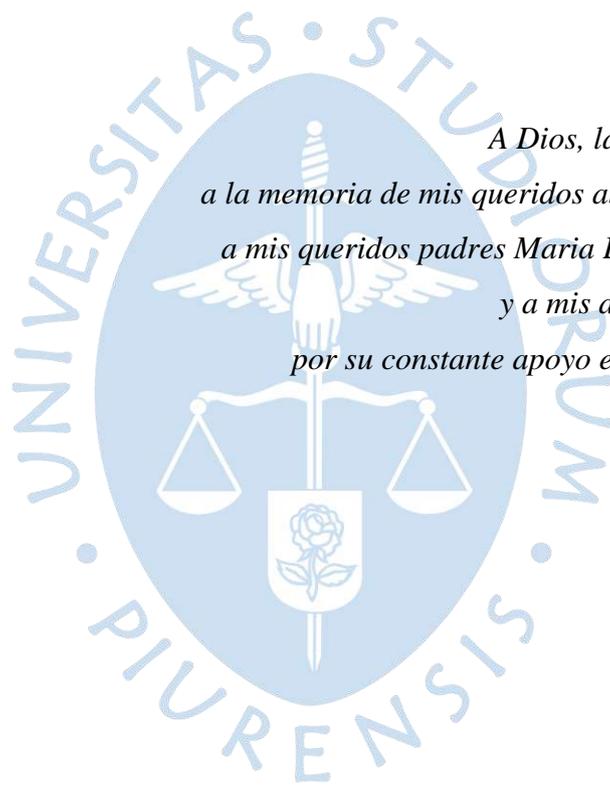
Luis Angel Noblecilla Palomino

Asesores:

Dr. Jorge Demetrio Reyes Salazar; Dr. Raúl La Madrid Olivares

Piura, julio de 2019





*A Dios, la Virgen, San Josemaría,
a la memoria de mis queridos abuelos Lucho y Orlando,
a mis queridos padres Maria Esther y Angel Gregorio,
y a mis abuelas Nery y Emeteria;
por su constante apoyo en cada logro de mi vida.*



Prólogo

El recurso hídrico es esencial para la vida de todo ser humano, pues se encuentra presente en sus actividades básicas de servicio de agua potable y alcantarillado, generación de energía eléctrica y riego.

Con el aumento de la población, el consumo del agua también ha crecido directamente y por ello es mucho más significativa su conservación y adecuado aprovechamiento. Y uno de los principales factores para conseguirlo es garantizar la mayor eficacia en la captación del recurso hídrico.

Las obras de captación son las estructuras hidráulicas necesarias para obtener de forma directa y controlada el agua para su posterior aprovechamiento. En la actualidad la mayor parte de la población obtiene el recurso hídrico de los ríos a través de una bifurcación.

Debido a que no poseen los recursos económicos necesarios para la construcción de todas las estructuras hidráulicas de gran envergadura que forman una bocatoma en su totalidad; tales como barrajes, aliviaderos, entre otros; la población en su mayoría opta por la construcción de bifurcaciones simples constituidas por sólo un canal de derivación, el cuál puede ser un canal natural o construido de concreto.

Por ello, es indispensable conocer la mejor orientación de la bifurcación que garantice la eficacia en la captación del recurso hídrico para su posterior aprovechamiento. Por ello, se escogió al Río Piura como escenario de estudio para cubrir la problemática de nuestra región.

Finalmente, quisiera expresar mi eterno agradecimiento a mis asesores Dr. Ing. Jorge Reyes Salazar y Dr. Ing. Raúl La Madrid Olivares por su constante apoyo, paciencia y amistad que me han proporcionado en todo este tiempo de elaboración del presente trabajo de tesis.



Resumen Analítico-Informativo

Modelación numérica para determinar la orientación de una bifurcación en el Tramo B del Río Piura.

Luis Angel Noblecilla Palomino

Asesor(es): Dr. Jorge Demetrio Reyes Salazar; Dr. Raúl La Madrid Olivares

Tesis.

Título de Ingeniero Civil

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, agosto de 2019

Palabras claves: Bifurcación/ ANSYS/ Modelación/ Captación/ Río/ Piura.

Introducción: Los sistemas para abastecimiento de agua potable constan de diversos componentes, entre ellos la captación del recurso hídrico. La forma más simple de concebir una obra hidráulica de captación es como una bifurcación, cuya principal función es otorgar a la población la mayor eficacia de captación del recurso hídrico. Se utilizaron técnicas y herramientas de mecánica de fluidos computacional para la realización del presente trabajo de tesis, debido a que representa el comportamiento del fluido con mucha precisión, y cuyo propósito es encontrar la mejor orientación de una bifurcación que garantice la mayor eficacia en la captación del agua.

Metodología: Se evaluará el comportamiento del fluido dentro de tres alternativas de solución para la orientación de una bifurcación: perpendicular a la dirección del flujo, aguas arriba y aguas abajo del río. El software elegido para el estudio del modelo numérico fue ANSYS CFX, el cual permite analizar la interacción entre el fluido y sus alrededores, y variar con mayor facilidad y rapidez la geometría y parámetros hidráulicos a fin de representar con una alta precisión los datos reales. Asimismo, los resultados se validan utilizando datos experimentales obtenidos del libro Hidráulica de Canales Abiertos (Ven Te Chow, 1994).

Resultados: Los gráficos de las líneas de flujo permitieron localizar las zonas de estancamiento y depósito dentro del canal de captación de cada una de las alternativas de solución e identificar dos nuevos parámetros de selección: ancho de captación del caudal del río y ancho efectivo. Los gráficos de los perfiles de velocidades en distintos planos de estudio (vista de planta, entrada y salida del canal), la proporcionalidad directa entre el caudal de captación y la velocidad actuante en la sección, y el cálculo de la velocidad promedio, permitieron establecer la orientación con mayor eficacia de captación.

Conclusiones: La alternativa aguas abajo se manifiesta como la mejor y más eficaz en la captación del recurso, ya que presenta la mayor velocidad actuante en el canal y una corta extensión de la zona de estancamiento y depósito. A partir de ello, se evaluó las distintas posiciones del ángulo de bifurcación, concluyendo que a medida que el ángulo va incrementando, las líneas de corriente se alejan del patrón de dirección del flujo del río e incrementa el área de las zonas de estancamiento y depósito, originando menor captación del recurso. No se podrá afirmar que existe un determinado ángulo eficaz de bifurcación, puesto que son muchos los factores y condiciones que intervienen en la construcción de un canal de captación.

Fecha de elaboración del resumen: julio de 2019

Analytical-Informative Summary

Numerical modeling to determine the orientation of a bifurcation in Section B of the Piura River.

Luis Angel Noblecilla Palomino

Advisor: Dr. Jorge Demetrio Reyes Salazar; Dr. Raúl La Madrid Olivares

Thesis

Civil Engineer Title

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, August 2019

Keywords: Bifurcation/ ANSYS/ Modeling/ Catchment/ River/ Piura.

Introduction: Potable water supply systems consist of several components, including collection of water resources. The simplest way of conceiving a hydraulic construction of collection is as a bifurcation, whose main function is to give the population the greatest efficiency of collection of the resource. Techniques and tools of computational fluid mechanics were used for the accomplishment of the present investigation, since it represents the behavior of the fluid with a significant precision, and whose purpose is to find the best orientation of a bifurcation that guarantees the greatest efficiency in the capture of the water.

Methodology: Three alternative solutions for the orientation of a bifurcation were considered to analyze the behavior of the fluid: perpendicular to the direction of the fluid, upstream and downstream of the river. For the study of the numerical model, it was used ANSYS CFX, which allows the analysis of interactions between the fluid and its surroundings, and to modify with greater facility geometry and hydraulic parameters in order to represent with high precision the real data. In addition, results are validated using experimental data obtained from “Hidráulica de Canales Abiertos” (Ven Te Chow, 1994).

Results: Fluid line graphs allowed to locate the stagnation and deposit areas within the catchment channel of each of the solution alternatives and to identify two new selection parameters: river flow catchment width and effective width. The graphs of the velocity profiles in different study planes (plan view, channel inlet and outlet), the direct proportionality between the capture fluid and the velocity acting in the section, and the calculation of the average velocity, allowed to establish the orientation with greater capture efficiency.

Conclusions: The downstream alternative turned out to be the most efficient in the capture of the resource, as it has the highest acting speed in the channel and a short extension of the stagnation zone and deposit. From this, the different positions of the bifurcation angle were evaluated, concluding that as the angle increases, the current lines move away from the direction pattern of the river fluid and increase the area of the areas of stagnation and deposit, causing less uptake of the resource. Since there are many factors and conditions involved in the construction of a catchment channel, will not be possible to affirm that a certain effective angle of bifurcation exists.

Summary date: July 2019

Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1.....	3
Estudio Hidráulico e Hidrológico del tramo B del río Piura.....	3
1 Hidrología e Hidráulica	3
2 Obras de captación.....	3
3 Canal de toma o derivación	4
3.1 Criterios de localización para el canal de derivación en ríos.....	5
3.2 Diseño hidráulico de un canal de toma	6
4 Bifurcaciones	7
4.1 Investigaciones experimentales.....	10
4.1.1 <i>Investigaciones de Thoma</i>	10
4.1.2 <i>Investigaciones de Bulle</i>	11
4.1.3 <i>Investigaciones de Vogel</i>	14
4.1.4 <i>Investigaciones de Dancy</i>	15
4.1.5 <i>Investigaciones de Cristiani y de Benini</i>	16
4.2 Análisis dimensional de una bifurcación	18
4.3 Relación de toma.....	20
4.4 Líneas de separación	21
4.5 Ángulo de bifurcación.....	22
4.6 Influencia de la curvatura.....	24
5 El fenómeno El Niño	27
5.1 El Fenómeno La Niña	29
5.2 Umbrales de magnitud de El Niño/ La Niña.....	30
5.3 Características de El Niño en el Perú.....	31
5.4 Impactos de El Niño en el Perú.....	32
6 El río Piura	36
6.1 Descripción geográfica del departamento de Piura.....	36
6.2 La cuenca del río Piura.....	37
6.3 El tramo urbano del río Piura.....	40
6.4 Hidrología del río Piura	42
6.4.1 <i>Precipitaciones</i>	42
6.4.2 <i>Avenidas</i>	43
6.4.3 <i>Niveles de agua – Velocidad</i>	46
6.4.4 <i>Rugosidad</i>	48

6.5	Geología.....	49
6.6	Erosión y sedimentación	51
6.6.1	Principio de inicio de movimiento.....	52
6.6.2	Transporte de sedimentos	54
Capítulo 2.....		57
Modelación numérica.....		57
1	Dinámica de fluidos computacional (CFD)	57
1.1	Descripción general.....	57
1.2	Algoritmos numéricos CFD	59
1.3	Procesos de cálculo CFD	60
2	Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	64
2.1	Definiciones generales de la CFD.....	65
2.1.1	El fluido como medio continuo	66
2.1.2	Sistema o volumen de control.....	66
2.1.3	Enfoques Lagrangiano y Euleriano.....	67
2.1.4	Régimen de flujo.....	71
3	Modelos y ecuaciones de la dinámica de fluidos computacional	72
3.1	Ecuaciones de Navier-Stokes.....	72
3.2	Turbulencia	75
3.3	Modelos de turbulencia.....	77
3.3.1	DNS (Direct Numerical Simulation)	78
3.3.2	SRS (Scale Resolving Simulation)	78
3.3.3	RANS (Reynolds – Averaged Navier Stokes).....	80
3.4	Ecuaciones Reynolds - Averaged Navier Stokes (RANS)	85
3.5	Modelo de turbulencia $k-\epsilon$	88
3.6	Modelos multifásicos	90
3.6.1	Modelo Euleriano	90
3.6.2	Modelo Lagrangiano.....	90
3.7	Modelo VOF	91
3.7.1	Ecuación de fracción de volumen.....	92
4	Modelo numérico computacional ANSYS CFX	94
4.1	Módulo de ejecución.....	94
4.2	Pre-procesamiento.....	95
4.2.1	Geometría.....	95
4.2.2	Mallado	96
4.2.3	Parámetros de modelación	101

4.2.4	Condiciones de contorno	102
4.3	Procesamiento	104
4.3.1	Simulación y control de convergencia.....	105
4.4	Post-Procesamiento.....	107
4.4.1	Análisis de resultados	107
Capítulo 3	109
ANSYS CFX: Bifurcación en el tramo B del río Piura	109
1	Problema en estudio.....	109
1.1	Definición del problema	109
1.2	Objetivos	109
2	Condiciones generales del proyecto	110
3	ANSYS Workbench.....	110
4	ANSYS CFX: Pre – Procesamiento.....	112
4.1	Geometría.....	112
4.2	Mallado	115
4.3	Propiedades del fluido y condiciones de frontera (Setup)	133
4.3.1	Propiedades del fluido	135
4.3.2	Condiciones de borde.....	138
4.4	Configuración del tipo de análisis y control del solucionador (Setup)	153
4.4.1	Configuración del tipo de análisis	153
4.4.2	Configuración del control del solucionador.....	154
5	ANSYS CFX: Procesamiento.....	155
5.1	Solución numérica	155
Capítulo 4	165
Resultados del modelo	165
1	Líneas de corriente.....	166
1.1	Ancho de captación del caudal del río (c).....	171
2	Zonas de estancamiento y depósito	175
3	Velocidades.....	178
3.1	CFD Post: Velocidad promedio	187
4	Ángulo de Bifurcación Θ	190
Conclusiones	201
Referencias Bibliográficas	205
Apéndices	209

Apéndice A.	Resultados de la comparación de los métodos de mallado	211
Apéndice B.	Resultados del dimensionamiento de mallado	215



Índice de Tablas

Tabla 1. Resultados de Bulle.....	13
Tabla 2. Resultados de Vogel.....	15
Tabla 3. Umbrales para identificar la magnitud de El Niño/La Niña, según la NOAA en la región del Pacífico tropical Niño 3.4.....	30
Tabla 4. Categorías de las anomalías en las condiciones de la temperatura según ICEN. .	31
Tabla 5. Características de los dos episodios extraordinarios de El Niño en el Perú.....	32
Tabla 6. Manifestaciones generales de El Niño en el Perú.	32
Tabla 7. Impactos de El Niño en el Perú.....	33
Tabla 8. Subcuencas del río Piura.	38
Tabla 9. Unidades litológicas de la cuenca del río Piura.	38
Tabla 10. Precipitaciones acumuladas de la cuenca del río Piura entre diciembre de 1997 y mayo de 1998.	43
Tabla 11. Periodos de retorno de las precipitaciones (distribución Log-normal con 3 parámetros, estación Miraflores).....	43
Tabla 12. Valores de la descarga máxima media diaria y de la descarga máxima instantánea diaria registradas durante el Fenómeno El Niño 1998.	44
Tabla 13. Caudales máximos instantáneos del río Piura en la estación Sánchez Cerro.....	45
Tabla 14. Avenidas máximas para los diferentes periodos de retorno (estación de Piura – puente Sánchez Cerro)	46
Tabla 15. Caudales máximos durante el Fenómeno El Niño 1997/98 (puentes Sánchez Cerro, Cáceres y Bolognesi, Piura)	47
Tabla 16. Coeficientes característicos de rugosidad de Manning (n).	49
Tabla 17. Profundidad del basamento rocoso en el tramo B del río Piura.	50
Tabla 18. Principales propiedades de los materiales del tramo B del río Piura.	50
Tabla 19. Terminología internacional del tamaño de partícula.....	51
Tabla 20. Experimentación vs Simulación.....	58

Tabla 21. Comparación entre los modelos RANS y LES.	79
Tabla 22. Fortalezas y debilidades de mallas estructuradas y no estructuradas.	97
Tabla 23. Criterios de evaluación de la calidad de mallado.	101
Tabla 24. Valores experimentales del coeficiente de rugosidad de Manning y el coeficiente de rugosidad absoluta k.	103
Tabla 25. Valores típicos de coeficientes de rugosidad.	104
Tabla 26. Tiempos de elaboración de malla y simulación para la elección del método de mallado.	120
Tabla 27. Rangos de oblicuidad y su correspondiente calidad.	125
Tabla 28. Dimensionamiento - Tiempo de elaboración de malla y simulación.	126
Tabla 29. Estudio de calidad de malla.	127
Tabla 30. Basic settings de las propiedades del fluido.	136
Tabla 31. Fluid models de las propiedades del fluido.	137
Tabla 32. Fluid pair models de las propiedades del fluido.	138
Tabla 33. Datos sobre la frontera <i>SUPERFICIE_LIBRE</i>	140
Tabla 34. Boundary details de la frontera <i>SUPERFICIE_LIBRE</i>	141
Tabla 35. Datos sobre la frontera <i>ENTRADA_RIO</i>	143
Tabla 36. Boundary details de la frontera <i>ENTRADA_RIO</i>	144
Tabla 37. Datos sobre la frontera <i>SALIDA_RIO</i>	145
Tabla 38. Datos sobre la frontera <i>SALIDA_CANAL</i>	147
Tabla 39. Datos sobre la frontera <i>PAREDES_CONCRETO_CANAL</i>	148
Tabla 40. Boundary details de la frontera <i>PAREDES_CONCRETO_CANAL</i>	149
Tabla 41. Datos sobre la frontera <i>PAREDES_ARENA_RIO</i>	150
Tabla 42. Configuración de las condiciones del Solver control.	155
Tabla 43. Detalles del gráfico <i>LINEAS DE CORRIENTE</i>	168
Tabla 44. Detalles de animación.	173
Tabla 45. Detalles del gráfico <i>PERFIL DE VELOCIDADES</i>	180
Tabla 46. Configuración del plano <i>entradacanal</i>	183

Tabla 47. Ancho efectivo de captación y Relación de ancho A_1 para cada ángulo de bifurcación.....	196
Tabla 48. Velocidad promedio y Relación de velocidad A_2 para cada ángulo de bifurcación.....	197
Tabla 49. Caudal de captación y Razón de descarga A_3 para cada ángulo de bifurcación.	199





Índice de Figuras

Figura 1. Canal de toma o derivación.	5
Figura 2. Ubicación de la obra de captación en tramos curvos. (Arriba: ubicación no permitida, debajo: ubicación permitida).....	6
Figura 3. Bifurcación simple (izquierda) y bifurcaciones sucesivas (derecha).....	8
Figura 4. Bifurcación en el río Chira.....	10
Figura 5. Investigaciones de Thoma.	11
Figura 6. Investigaciones de Bulle para un ángulo de 30° (zonas de separación y aparición de vértices).	12
Figura 7. Vinculación entre el porcentaje del material sólido captado y los valores de la relación de toma, para un ángulo de 30°.....	13
Figura 8. Vinculación entre el coeficiente de captación sólida y la relación de toma, en función del parámetro adimensional α , para un ángulo de 30°.....	16
Figura 9. Representación esquemática de una bifurcación.....	18
Figura 10. Líneas de separación en una bifurcación sin grada (izquierda) y en una bifurcación con grada (derecha).....	21
Figura 11. Fenómenos secundarios que se presentan en una bifurcación.....	23
Figura 12. Zonas de estancamiento y depósito.....	23
Figura 13. Influencia del ángulo de bifurcación en la captación de sólidos para una relación $Q_1/Q = 0.5$	24
Figura 14. Esguerramiento en un tramo curvo.....	25
Figura 15. Influencia de la curvatura en la captación de sólidos para $Q_1/Q = 0.5$	26
Figura 16. Regiones de monitoreo El Niño.....	28
Figura 17. Circulación de Walker en el Pacífico ecuatorial (arriba: situación normal, abajo: situación durante El Niño).....	29
Figura 18. Condiciones durante el fenómeno El Niño (izquierda) y La Niña (derecha) en el Pacífico tropical.....	30

Figura 19. Patrones de anomalías de temperatura superficial del mar en °C (arriba: durante El Niño 1982, abajo: durante El Niño 1997).....	34
Figura 20. Evolución comparativa de eventos El Niño AVHRR – Anomalía de temperatura superficial del mar (°C) – Latitud 0°.....	35
Figura 21. Anomalías de precipitación promediadas de febrero a abril [mm/día] para los diferentes patrones de El Niño.	35
Figura 22. Mapa del departamento de Piura.	36
Figura 23. La cuenca del río Piura.	39
Figura 24. Tramo urbano del río Piura.....	40
Figura 25. El tramo B de la zona urbana del río Piura.....	41
Figura 26. Hidrograma de la máxima avenida registrada en la presa de Los Ejidos en el mes de marzo de 1998, entre los días 10 (21:00 horas) y 14 (21:00 horas).	44
Figura 27. Hidrogramas sintéticos para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.	46
Figura 28. Relación velocidad – caudal en el tramo urbano del río Piura (puentes Cáceres, Bolognesi y Sánchez Cerro)	48
Figura 29. Perfil estratigráfico del tramo B del río Piura.....	49
Figura 30. Comportamiento reológico de los fluidos.....	66
Figura 31. Análisis Lagrangiano en la cinemática de un sólido rígido	68
Figura 32. Análisis del flujo con enfoque Lagrangiano	69
Figura 33. Análisis del flujo con enfoque Euleriano.....	70
Figura 34. Ejemplos de problemas de flujo con enfoque Euleriano.	70
Figura 35. Valores típicos de velocidad en un flujo medio.....	76
Figura 36. Recomendación en el uso de aproximaciones numéricas en relación con el número de Reynolds.....	85
Figura 37. Distribución de la fracción de volumen en una sección transversal de un canal.	92
Figura 38. Algoritmo o módulos de ANSYS CFX	94
Figura 39. Esquema de módulos en ANSYS CFX.....	95

Figura 40. Tipos de estructura de mallado. (a) Malla estructurada (b) Malla no estructurada.	98
Figura 41. Identidades geométricas. (“User Programming ans Automation”)	98
Figura 42. Celdas comunes para geometrías en 2D y 3D.	100
Figura 43. Diagrama de flujo de métodos de solución.....	107
Figura 44. Esquema resumen para modelo ANSYS CFX.	108
Figura 45. Interfaz Workbench de nuestro proyecto.....	111
Figura 46. Interfaz Workbench de nuestro proyecto - Fluid Flow (CFX).	112
Figura 47. Geometría de las alternativas de solución del proyecto.....	112
Figura 48. Opciones de la herramienta Geometry.....	113
Figura 49. Vista preliminar Geometry – SpaceClaim.....	113
Figura 50. Herramientas de diseño de Geometría – SpaceClaim.....	114
Figura 51. Generación del sólido – Herramienta Extruir (Pull).....	114
Figura 52. Verificación de Geometría.....	114
Figura 53. Opciones de la herramienta Mesh.....	115
Figura 54. Vista preliminar Meshing	115
Figura 55. Mesh - Mesh Control	117
Figura 56. Opciones del Mesh Control	117
Figura 57. Herramientas de selección del Meshing	117
Figura 58. Detalles de la elección del método Tetraédrico.....	118
Figura 59. Detalles de dimensionamiento y refinado del método tetraédrico.....	118
Figura 60. Mesh - Generate Mesh - Update	119
Figura 61. Verificación de mallado.....	119
Figura 62. Métodos de mallado.....	120
Figura 63. Detalles de mallado del estudio de dimensionamiento y calidad de malla.....	122
Figura 64. Face Sizing del estudio del dimensionamiento y calidad de malla.....	123
Figura 65. Mallado con dimensión del elemento de 1.0 m.	123

Figura 66. Orthogonal Quality de la dimensión de 1.0 m.	124
Figura 67. <i>Element Quality</i> de la dimensión de 1.0 m.	124
Figura 68. Relación de aspecto.	124
Figura 69. Aspect ratio de la dimensión de 1.0 m.	125
Figura 70. Skewness de la dimensión de 1.0 m.	125
Figura 71. Número de elementos de la dimensión 1.0 m.	126
Figura 72. Distribución de velocidades en una sección de canal para diferentes geometrías.	128
Figura 73. Mallado final del proyecto.	129
Figura 74. Create Named Selection (N)	131
Figura 75. Creación de nombres de las secciones del dominio en el Meshing	131
Figura 76. Secciones de estudio	132
Figura 77. Model (A3) - Named Selections	133
Figura 78. Opciones de la herramienta Setup	134
Figura 79. Vista preliminar <i>Setup – CFX Pre</i>	134
Figura 80. Inicio de la configuración Setup.	135
Figura 81. Basic settings de las propiedades del fluido	135
Figura 82. Add and delete fluid and particle definitions.	136
Figura 83. Fluid models de las propiedades del fluido	137
Figura 84. Fluid pair models de las propiedades del fluido	138
Figura 85. Opción de insertar frontera para su configuración.	139
Figura 86. Creación de nombres de las fronteras en el <i>Setup</i>	139
Figura 87. Basic settings de la frontera <i>SUPERFICIE_LIBRE</i>	140
Figura 88. Boundary details de la frontera <i>SUPERFICIE_LIBRE</i>	141
Figura 89. Fluid values de la frontera <i>SUPERFICIE_LIBRE</i>	141
Figura 90. Configuración completa y gráfico de la frontera <i>SUPERFICIE_LIBRE</i>	142
Figura 91. Basic settings de la frontera <i>ENTRADA_RIO</i>	143

Figura 92. Boundary details de la frontera <i>ENTRADA_RIO</i>	143
Figura 93. Fluid values de la frontera <i>ENTRADA_RIO</i>	144
Figura 94. Configuración completa y gráfico de la frontera <i>ENTRADA_RIO</i>	145
Figura 95. Basic settings de la frontera <i>SALIDA_RIO</i>	145
Figura 96. Boundary details de la frontera <i>SALIDA_RIO</i>	146
Figura 97. Configuración completa y gráfico de la frontera <i>SALIDA_RIO</i>	146
Figura 98. Basic settings de la frontera <i>SALIDA_CANAL</i>	147
Figura 99. Boundary details de la frontera <i>SALIDA_CANAL</i>	147
Figura 100. Configuración completa y Gráfico de la frontera <i>SALIDA_CANAL</i>	148
Figura 101. Basic settings de la frontera <i>PAREDES_CONCRETO_CANAL</i>	149
Figura 102. Boundary details de la frontera <i>PAREDES_CONCRETO_CANAL</i>	149
Figura 103. Configuración completa y gráfico de la frontera <i>PAREDES_CONCRETO_CANAL</i>	150
Figura 104. Basic settings de la frontera <i>PAREDES_ARENA_RIO</i>	151
Figura 105. Boundary details de la frontera <i>PAREDES_ARENA_RIO</i>	151
Figura 106. Configuración completa y gráfico de la frontera <i>PAREDES_ARENA_RIO</i>	152
Figura 107. Gráfico completo de la configuración de las fronteras del proyecto.	152
Figura 108. Opción de edición de las condiciones del tipo de análisis.	153
Figura 109. Configuración de las condiciones del tipo de análisis.	153
Figura 110. Opción de edición de las condiciones del Solver control.	154
Figura 111. Configuración de las condiciones del Solver control.	154
Figura 112. Verificación del Setup.	155
Figura 113. Opciones de la herramienta <i>Solution</i>	156
Figura 114. Vista preliminar <i>Solution</i> – Configuración de <i>Define Run</i>	157
Figura 115. Zonas del <i>CFX Solution</i>	157
Figura 116. Residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de conservación de Momentum y masa.	158

Figura 117. Residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de turbulencia.....	159
Figura 118. Residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de fracción de volumen.....	159
Figura 119. Opción New Monitor del Solution.....	160
Figura 120. Opción para nombrar el nuevo monitor de Imbalances.....	160
Figura 121. Configuración del monitor Imbalances.....	160
Figura 122. Imbalances de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido.	161
Figura 123. Configuración de las propiedades del monitor.	162
Figura 124. Detallado de Imbalances en un rango de estudio más reciente.....	162
Figura 125. Propiedades y características del fluido al final de la convergencia.....	163
Figura 126. Verificación del Solution.	163
Figura 127. Opciones de la herramienta <i>Results</i>	165
Figura 128. Vista preliminar Results – CFD Post.....	166
Figura 129. Líneas de corriente y tubo de corriente.....	167
Figura 130. Opción Streamline – CFD Post.....	167
Figura 131. Opción para nombrar el gráfico Streamline de <i>LÍNEAS DE CORRIENTE</i>	168
Figura 132. Detalles del gráfico <i>LÍNEAS DE CORRIENTE</i>	168
Figura 133. Gráfico <i>LÍNEAS DE CORRIENTE</i> del Outline - CFD Post.	169
Figura 134. Líneas de corriente de las alternativas de solución del proyecto.....	170
Figura 135. Vista de planta de una Bocatoma.....	171
Figura 136. Opción Animation – CFD Post.....	172
Figura 137. Detalles de animación.....	172
Figura 138. Ancho de captación del caudal del río de las alternativas de solución del proyecto.....	174
Figura 139. Perfil detallado de una zona de estancamiento y depósito en un canal hidráulico.....	176

Figura 140. Ancho efectivo y Zonas de estancamiento y depósito de las alternativas de solución del proyecto.	177
Figura 141. Opción Contour – CFD Post.	179
Figura 142. Opción para nombrar el gráfico Contour de <i>PERFIL DE VELOCIDADES</i>	179
Figura 143. Detalles del gráfico <i>PERFIL DE VELOCIDADES</i>	179
Figura 144. Perfil de velocidades en vista de planta de las alternativas de solución del proyecto.	181
Figura 145. Creación de un nuevo plano de estudio.	182
Figura 146. Opción para nombrar el plano <i>entradacanal</i>	183
Figura 147. Configuración del plano <i>entradacanal</i>	183
Figura 148. Gráfico del plano <i>entradacanal</i> del Outline - CFD Post.	184
Figura 149. Detalles del <i>PERFIL DE VELOCIDADES</i> - Localización: <i>entradacanal</i>	184
Figura 150. Detalles del <i>PERFIL DE VELOCIDADES</i> - Localización: <i>SALIDA_CANAL</i> . ..	185
Figura 151. Perfil de velocidades en las secciones de entrada (arriba) y salida (debajo) del canal de captación de las alternativas de solución del proyecto.	186
Figura 152. Opción <i>Expression</i> – CFD Post.	187
Figura 153. Opción para nombrar la ventana de cálculo de la velocidad promedio.	188
Figura 154. Configuración de la ventana de cálculo velocidad promedio: Expresión <i>areaAve</i>	188
Figura 155. Configuración de la ventana de cálculo velocidad promedio: Expresión <i>AGUA.Velocity</i>	188
Figura 156. Configuración de la ventana de cálculo velocidad promedio: Expresión <i>SALIDA_CANAL</i>	189
Figura 157. Cálculo de la velocidad promedio a la salida del canal de captación.	189
Figura 158. Geometría para los ángulos de bifurcación Θ de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°.	191
Figura 159. Líneas de corriente y zonas de estancamiento y depósito para los ángulos de bifurcación Θ de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°.	192

Figura 160. Perfil de velocidades a la salida del canal de captación para los ángulos de bifurcación Θ de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°.	193
Figura 161. Velocidad promedio a la salida del canal de captación para los ángulos de bifurcación Θ de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°.	194
Figura 162. Relación de ancho A_1 en función del ángulo de bifurcación para un $Fr = 0.52$.	196
Figura 163. Relación de velocidad A_2 en función del ángulo de bifurcación para un $Fr = 0.52$.	198
Figura 164. Razón de descarga A_3 en función del ángulo de bifurcación para un $Fr = 0.52$.	199
Figura 165. Verificación del proyecto.	200



Nomenclatura

Caracteres Latinos

A	Superficie de la sección del agua [m ²]	n^*	Propiedad intensiva [Cantidad de la propiedad por unidad de masa]
A_1	Relación de ancho [adimensional]		
A_2	Relación de velocidad [adimensional]	\vec{n}	Vector normal exterior unitario de la velocidad
A_3	Razón de descarga [adimensional]		
B_h	Ancho de separación de líneas de corriente en una bifurcación [m]	p	Presión [N/m ²]
		p'	Presión de fluctuación [N/m ²]
C_p	Calor específico del fluido [j/kg-k]	\bar{p}	Presión media [N/m ²]
D	Tamaño de partículas [m]	P_H	Perímetro mojado del agua [m]
d	Tamaño representativo de la resistencia del lecho [m]	Q	Caudal a través del canal [m ³ /s]
		Q_0	Gasto crítico de arrastre [m ³ /s]
Fr	Número de Froude [adimensional]	Q_1	Caudal captado a la salida del río [m ³ /s]
I	Pendiente motriz [m/m]	Q_2	Caudal no captado a la salida del río [m ³ /s]
k	Energía cinética de turbulencia [J/kg]	q	Caudal específico total [m ² /s]
\dot{m}_{pq}	Transferencia de masa de la fase p a la fase q [kg/s]	q_1	Caudal específico captado [m ² /s]
\dot{m}_{qp}	Transferencia de masa de la fase q a la fase p [kg/s]	Q_r	Caudal total en la entrada del río [m ³ /s]
M_x	Momentum x [N.s]	R	Radio hidráulico [m]
M_y	Momentum y [N.s]	Re	Número de Reynolds [adimensional]
M_z	Momentum z [N.s]	Re_{crit}	Número de Reynolds crítico [adimensional]
n	Coeficiente de Manning [adimensional]		

N	Propiedad extensiva [Cantidad total de masa, cantidad de movimiento, energía en un instante de tiempo].	s	Pendiente del canal en un tramo [m/m]
T_F	Gasto sólido del fondo en la entrada del río [m ³ /s]	S_{qq}	Término de la fuente.
T_{F1}	Gasto sólido del fondo captado a la salida del río [m ³ /s]	T	Cantidad de calor del fluido [j/kg-k]
T_{F2}	Gasto sólido del fondo no captado a la salida del río [m ³ /s]	v'	Velocidad de fluctuación en dirección y [m/s]
t	Gasto específico sólido total [m ² /s]	\bar{V}	Operador "nabla"
t_1	Gasto específico sólido captado [m ² /s]	V^*	Velocidad de corte [m/s]
T	Tiempo [s]	$V_{río}$	Velocidad del río [m/s]
U	Velocidad en dirección x [m/s]	\vec{V}_q	Velocidad media del flujo [m/s]
\bar{u}	Velocidad media en dirección x [m/s]	V	Velocidad media del agua [m/s]
u'	Velocidad de fluctuación en dirección x [m/s]	W	Velocidad en dirección z [m/s]
u_c	Celeridad absoluta del fluido [m/s]	\bar{w}	Velocidad media en dirección z [m/s]
V	Velocidad en dirección y [m/s]	w'	Velocidad de fluctuación en dirección z [m/s]
\bar{v}	Velocidad media en dirección y [m/s]	w	Velocidad de caída de las partículas [m/s]
		y	Tirante del canal principal [m]
		$Y_{río}$	Tirante del río [m]

Caracteres Griegos

α	Constante de Dancy [adimensional]	τ_0	Tensión cortante inicial en el fondo [N]
ε	Tasa de disipación de la energía cinética [adimensional]	τ'	Esfuerzo cortante [N/m ²]
π_1	Relación de toma [adimensional]	μ	Viscosidad dinámica [N-s/m ²]
π_2	Coefficiente de Captación Sólida [adimensional]	μ_T	Viscosidad turbulenta [kg/m-s]
π_3	Rugosidad Relativa [adimensional]	ν	Viscosidad cinemática [N-s/m ²]
π_4	Relación entre la velocidad de caída de las partículas y la velocidad media [adimensional]	γ	Peso específico del flujo [kg/m ³]
φ	Función de Análisis [adimensional]	γ_s	Peso específico de la partícula sólida [kg/m ³]
θ	Ángulo de bifurcación [°]	γ	Coefficiente de Bazin [adimensional]
ρ	Densidad del agua [kg/m ³]	Δt	Paso temporal [s]
λ	Conductividad térmica [w/m-k]	Δx	Longitud del volumen finito [m]
τ	Tensión cortante final en el fondo [N]	$\frac{\Delta u}{\Delta y}$	Gradiente transversal de velocidad entre una capa relativa a una capa adyacente [adimensional]

Constantes

C_u	Constante de modelo estándar Launder and Spalding [adimensional]	g	Aceleración de la gravedad [m/s ²]
C_1	Constante de modelo estándar Launder and Spalding [adimensional]	σ_k	Constante de modelo estándar Launder and Spalding [adimensional]
C_2	Constante de modelo estándar Launder and Spalding [adimensional]	σ_ε	Constante de modelo estándar Launder and Spalding [adimensional]



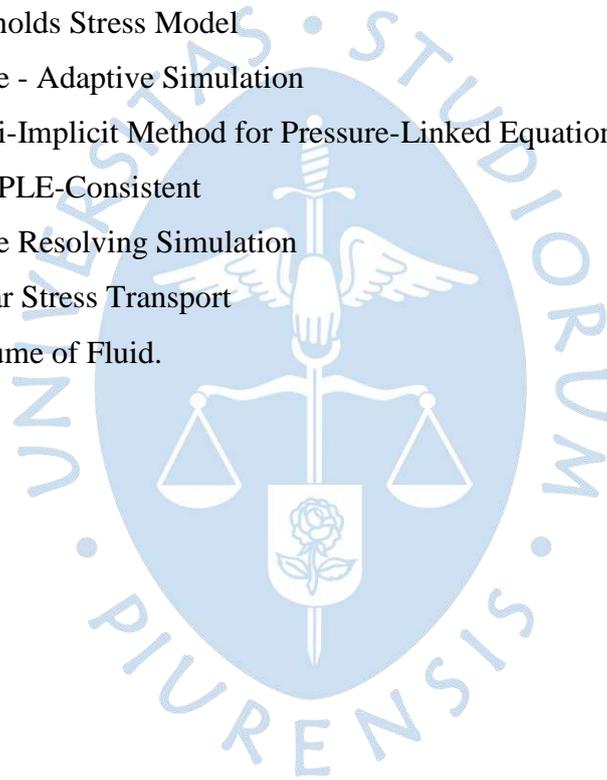
Abreviaturas

Español

CAD	Diseño asistido por computadoras.
CFD	Dinámica de Fluido Computacional.
CFL	Número de Courant.
ENFEN	El Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño.
ENSO	Fenómeno El Niño y Oscilación Sur.
GDL	Grados de libertad.
ICEN	Índice Costero El Niño.
IGP	Instituto Geofísico del Perú.
IHHS	Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura.
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática.
IOS	Índice de Oscilación Sur.
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio.
NOAA	Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos de América.
ONI	Índice Oceánico El Niño
RANS	Ecuaciones Reynolds – Averaged Navier Stokes
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SNIRH	Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos.
TSM	Temperatura Superficial del agua del Mar.
VC	Volumen de control.
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical.

Inglés

ANSYS	Swanson Analysis System
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
DNS	Direct Numerical Simulation
ERSST	Extended Reconstructed Sea Surface Temperature
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
LES	Large Eddy Simulation
NPARC	Alliance Verification and Validation
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operators
RSM	Reynolds Stress Model
SAS	Scale - Adaptive Simulation
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SIMPLEC	SIMPLE-Consistent
SRS	Scale Resolving Simulation
SST	Shear Stress Transport
VOF	Volume of Fluid.



Introducción

Los sistemas para abastecimiento de agua potable constan de diversos componentes: captación, conducción, potabilización, desinfección, regulación y distribución. En cada uno se construyen las obras necesarias para que sus objetivos particulares sean alcanzados de forma satisfactoria.

La forma más simple de concebir una obra hidráulica de captación es como una bifurcación. Es decir, del canal principal o del río, nace un canal lateral, derivando parte del caudal que arriba. La principal función que cumple una bifurcación es otorgar a la población la mayor eficacia de captación del recurso hídrico para su posterior aprovechamiento.

Se utilizaron técnicas y herramientas de mecánica de fluidos computacional para la realización del presente trabajo de tesis, debido a que representa el comportamiento del fluido con mucha precisión, y cuyo propósito es encontrar la mejor orientación de una bifurcación que garantice la mayor eficacia en la captación del recurso hídrico.

Para la simulación numérica, es decir para la fase de pre-proceso (generación de geometría, mallado, ingreso de la física del modelo y la configuración del solucionador), proceso y post proceso, se utilizó el software ANSYS® Academic Research Mechanical en sus versiones 18.0 y 19.1; específicamente las herramientas *Discovery SpaceClaim*, *Meshing Grid*, CFX y CFD-Post.

Para una buena comprensión y presentación de los puntos más resaltantes del tema, este estudio se presenta en cuatro capítulos.

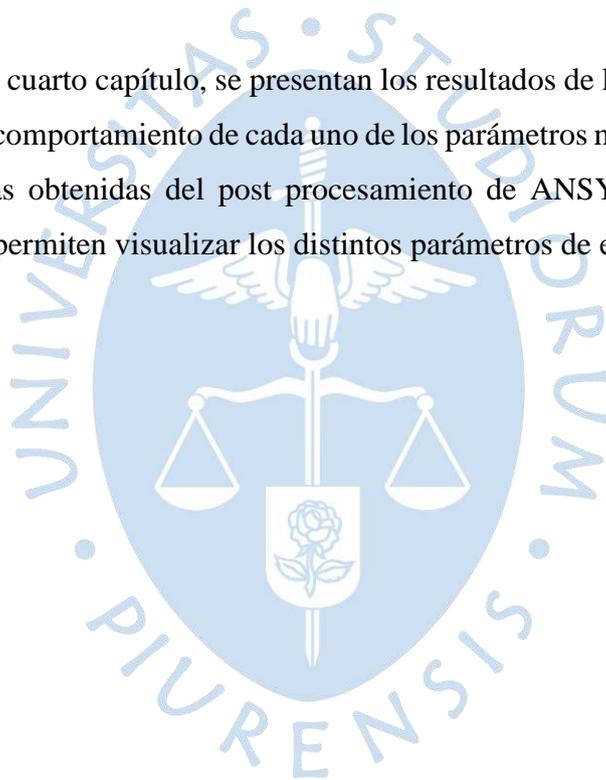
En el primer capítulo se desarrollan los fundamentos teóricos, hidráulicos e hidrológicos, de una bifurcación como principal estructura hidráulica de captación de agua de la mayor parte de la población, cuyos recursos económicos no les permite construir una obra hidráulica de gran envergadura y, adicionalmente, del tramo B del Río Piura, área de estudio de la presente tesis.

En el segundo, se describen los fundamentos teóricos de la Dinámica de Fluidos Computacional, las ecuaciones que gobiernan el movimiento, los modelos matemáticos utilizados en la modelación del comportamiento del fluido, y la selección del mejor modelo

numérico, el cual permite representar de manera amplia y con mayor precisión el comportamiento del agua dentro de una bifurcación, y así poder utilizar el software como herramienta de solución. Así mismo se describe brevemente el software ANSYS CFX y los procesos a seguir para la obtención de resultados.

En el tercer capítulo se cumple con todos los procesos que manda la modelación numérica en ANSYS CFX: se define el problema a simular: geometría, malla (incluyendo un estudio de mallado: calidad de malla y dimensionamiento) y condiciones de frontera utilizadas. El análisis del proceso se ha realizado en un solo dominio para las tres alternativas de solución. Se controla la simulación y el estado de convergencia de las ecuaciones que gobiernan el movimiento.

Por último, en el cuarto capítulo, se presentan los resultados de la simulación del modelo y la interpretación del comportamiento de cada uno de los parámetros mostrados. Los resultados se muestran en figuras obtenidas del post procesamiento de ANSYS CFD Post y gráficas complementarias que permiten visualizar los distintos parámetros de estudio.



Capítulo 1

Estudio Hidráulico e Hidrológico del tramo B del río Piura

1 Hidrología e Hidráulica

La Hidrología es la ciencia que estudia el agua y sus manifestaciones en la atmósfera, sobre y debajo de la superficie terrestre; abarcando sus propiedades e interrelaciones naturales.

La Hidráulica es la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en función de sus propiedades específicas, es decir, estudia las propiedades mecánicas de los líquidos dependiendo de las fuerzas a las que son sometidos. Posee un rol importante, ya que permite analizar las leyes que rigen el movimiento de los líquidos y las técnicas para el mejor aprovechamiento del agua.

Mediante el cálculo matemático y el diseño de modelos a pequeña escala es posible determinar las características de construcción que deben tener las diferentes estructuras hidráulicas.

De esta manera, la hidráulica e hidrología establecen las principales normas y criterios para la creación de un Proyecto Hidráulico, el cual está ligado en gran medida a los usos que el hombre hace del agua, pudiendo ser éstos los que la utilizan con fines de aprovechamiento y los que suministran protección contra los posibles efectos dañinos de la misma.

2 Obras de captación

El agua es un recurso esencial para la vida de todo ser humano, sin ello no podría sobrevivir. Se encuentra presente en cada actividad del hombre: consumo diario doméstico y público, abastecimiento de cultivos y alimentación de ganado, generador de energía y procesos de fabricación de productos.

Con el aumento de la población, el consumo del agua también ha crecido directamente y por ello es mucho más significativa su conservación y adecuado aprovechamiento. Y para conseguirlo debemos garantizar la mayor eficacia en la captación del recurso.

Las obras de captación son las estructuras necesarias para captar directamente y de forma controlada, el agua de la fuente a utilizar (superficial o subterránea) para su posterior aprovechamiento. Dicha captación se puede hacer por gravedad, aprovechando la diferencia de nivel del terreno o por impulsión (bombas).

El diseño de las obras de toma incluye como base, el conocimiento de la demanda y calidad de agua en sus diferentes usos (agrícola, ganadero o doméstico), así como los niveles de operación, mínimos y máximos, del cuerpo de agua de la fuente (presa, río, corriente subsuperficial o manantial).

También es importante el conocimiento de otras características del río, que incidirán en el diseño tales como contenido normal de arena, arrastre de sedimentos durante las crecidas y la magnitud del material de arrastre. Esta información será útil para la selección del dispositivo de captación más aconsejable.

Todo ese conocimiento debe estar acompañado de estudios complementarios, tales como geología, geotecnia y topografía de la zona.

3 Canal de toma o derivación

Es una obra hidráulica de captación que canaliza el agua desde la toma hasta el punto inicial de reparto (ver Figura 1). Se utilizan en ríos de gran caudal, en los cuales los mínimos de estiaje aportan el tirante de agua necesario para derivar el caudal requerido.

Tiene la desventaja de ser obstruida fácilmente en épocas de crecida, por ello deberán preverse rejas, tamices y compuertas para evitar el ingreso de sólidos flotantes. Son recomendables en zonas de muy baja pendiente.

El canal de derivación se construirá sobre tramo rectilíneo o en tramo de transición entre curvas del curso superficial para el nivel mínimo de aguas.

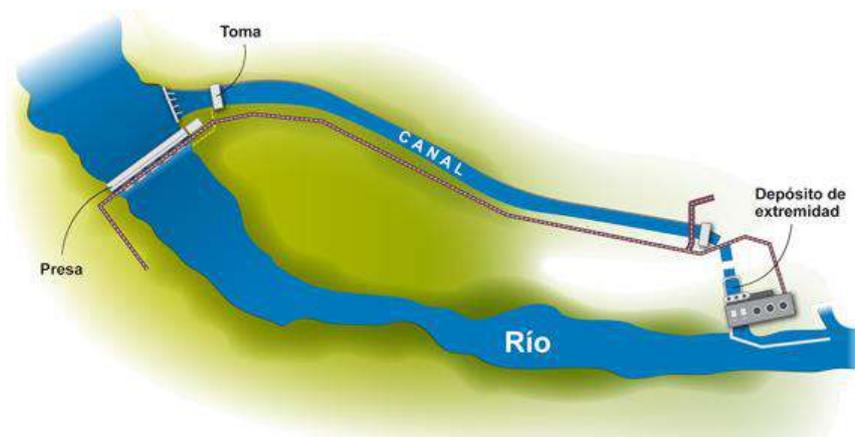


Figura 1. Canal de toma o derivación.
Fuente: Sánchez, 2014.

3.1 Criterios de localización para el canal de derivación en ríos. A continuación, se detallan los criterios de localización para el canal de derivación en ríos:

- El caudal de captación debe ser bastante mayor que el caudal de diseño.
- El cauce debe ser estable y tener firmeza en sus orillas para que no existan derrumbes, sedimentos o erosión que puedan interferir en el comportamiento óptimo de la estructura de captación. Es sumamente difícil impedir la entrada de sedimentos en la estructura de captación, pero debe ser limitada en lo máximo posible.
- La conducción debe ser lo más económica posible y la obra de captación debe ser lo más cerca posible a la estructura de aprovechamiento.
- La captación de agua debe ser posible incluso en tiempo de estiaje.
- La velocidad en los conductos libres o forzados de la toma de agua no debe ser inferior a 0.60 m/s.
- Un punto recomendable para cumplir con las condiciones expuestas se encuentra ubicado inmediatamente aguas abajo del centro de la parte cóncava en los tramos curvos del río, puesto que la ubicación en la parte interna de la curva de un cauce puede ocasionar la acumulación excesiva de sedimentos (ver Figura 2). Lógicamente, este punto estará condicionado a cumplir con las condiciones topográficas (cota de captación), condiciones geológicas y geotécnicas, condiciones sobre facilidades constructivas (disponibilidad de materiales), evitar posibles inundaciones y daños a construcciones vecinas, etc.

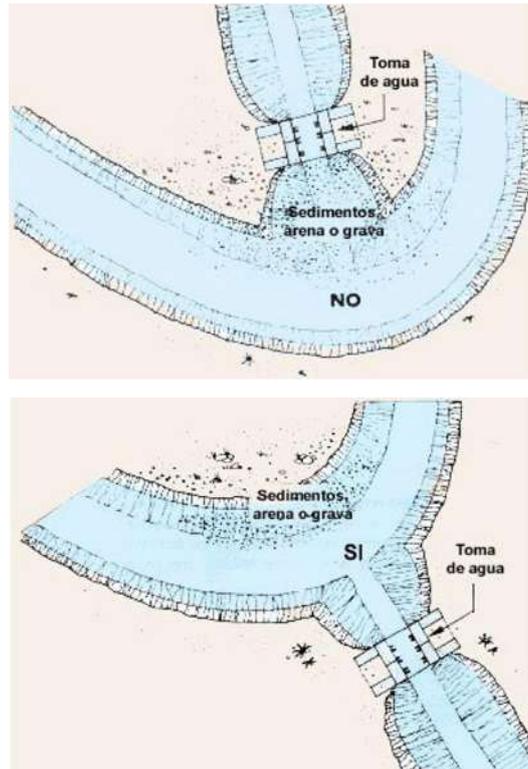


Figura 2. Ubicación de la obra de captación en tramos curvos. (Arriba: ubicación no permitida, debajo: ubicación permitida).
Fuente: FAO, 2007.

3.2 Diseño hidráulico de un canal de toma. Los canales deberán ser construidos cuidando que la velocidad no ocasione erosión ni sedimentación de material. En los canales revestidos la velocidad deberá ser mayor a 0.6 m/s para evitar la sedimentación de sólidos suspendidos.

Para el cálculo hidráulico de canales se empleará la ecuación de continuidad (Moreno, 2004):

$$Q = VA \quad (1.1)$$

Donde:

- Q : Caudal a través del canal [m^3/s]
- A : Superficie de la sección del agua [m^2]
- V : Velocidad media del agua [m/s]

La superficie se calculará mediante fórmulas geométricas de acuerdo a la forma del canal, y la velocidad por medio de cualquiera de las siguientes fórmulas:

- *Fórmula de Manning*

$$V = \frac{R^{2/3} s^{1/2}}{n} \quad (1.2)$$

Donde:

- R : Radio hidráulico [m]
- s : Pendiente del canal en un tramo [m/m]
- n : Coeficiente de Manning [adimensional]

- *Fórmula de Bazin*

$$V = \frac{87Rs^{1/2}}{\gamma + R^{1/2}} \quad (1.3)$$

Donde:

$$R = \frac{A}{P_H} \quad (1.4)$$

- P_H : Perímetro mojado del agua [m]
- γ : Coeficiente de Bazin [adimensional]

4 Bifurcaciones

Según Rocha (2005), La forma más simple de concebir una obra de toma es como una bifurcación. Es decir, del canal principal o del río, nace un canal lateral, derivando parte del caudal que arriba.

En una bifurcación se distribuyen el agua y los sólidos transportados por la corriente en proporciones diferentes generalmente.

El estudio teórico y experimental de las bifurcaciones es muy interesante e importante para el mejor conocimiento de lo que ocurre en una obra hidráulica de captación.

La bifurcación se puede presentar en el tramo recto o en el tramo curvo del río. Y según el número de entradas que presente se clasifica en bifurcación simple (una sola entrada) y bifurcaciones sucesivas (más de una entrada), tal como se muestra en la Figura 3.

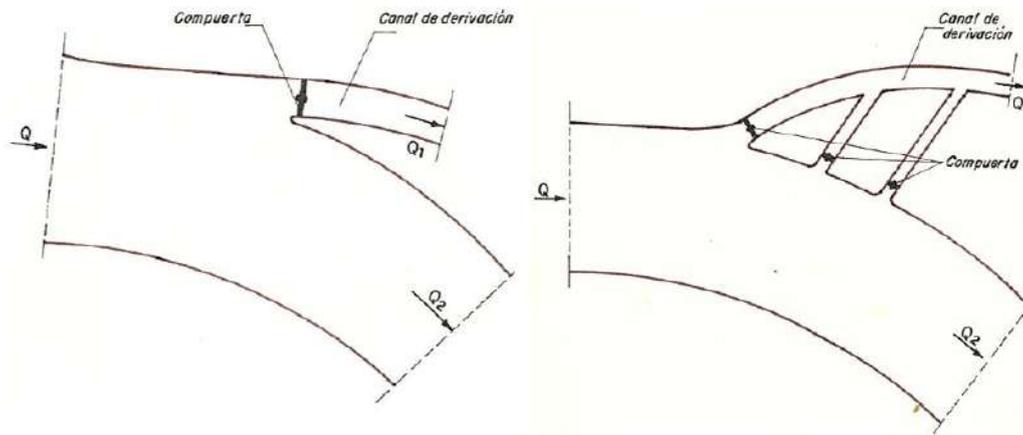


Figura 3. Bifurcación simple (izquierda) y bifurcaciones sucesivas (derecha).

Fuente: Rocha, 2005.

En una bifurcación se puede controlar fácilmente la cantidad de agua que ingresa, pero presenta dificultades en el control de sólidos.

El ángulo formado por el eje del canal principal del río y el eje del canal lateral en el lugar de bifurcación recibe el nombre de *Ángulo de Bifurcación*.

Los cálculos se realizan basándose en las ecuaciones de continuidad:

$$Q_r = Q_1 + Q_2 \quad (1.5)$$

Donde:

Q_r : Caudal total en la entrada del río [m^3/s]

Q_1 : Caudal captado a la salida del río [m^3/s]

Q_2 : Caudal no captado a la salida del río [m^3/s]

- Relación de toma

Se denomina relación de toma a la relación que existe entre el caudal específico captado y el caudal específico en el río:

$$\pi_1 = \frac{q_1}{q} \quad (1.6)$$

Donde:

π_1 : Relación de Toma [adimensional]

q_1 : Caudal específico captado [m²/s]

q : Caudal específico total [m²/s]

En el apartado 1.4.3 se detallará el tema.

- Coeficiente de Captación Sólida

Es la relación entre el gasto específico sólido captado y el que le corresponde al canal principal:

$$\pi_2 = \frac{t_1}{t} \quad (1.7)$$

Donde:

π_2 : Coeficiente de Captación Sólida [adimensional]

t_1 : Gasto específico sólido captado [m²/s]

t : Gasto específico sólido total [m²/s]

En la actualidad la mayor parte de la población obtiene el recurso hídrico de los ríos a través de una bifurcación para su posterior aprovechamiento, debido a que no poseen los recursos económicos necesarios para la construcción de todas las estructuras hidráulicas de gran

envergadura que forman una bocatoma en su totalidad; tales como barrajes, aliviaderos, entre otros (ver Figura 4).



Figura 4. Bifurcación en el río Chira.

Fuente: Jorge Reyes, 2018.

4.1 Investigaciones experimentales. El análisis de una bifurcación libre incluye, en primer lugar, examinar bajo qué condiciones es posible predecir la distribución del gasto sólido a partir del conocimiento de la partición del gasto líquido.

Si intentáramos resolver este problema analíticamente, considerando las capacidades de transporte, obtendríamos resultados que difieren notablemente de lo observado y medido.

4.1.1 Investigaciones de Thoma. Las primeras investigaciones sistemáticas sobre la distribución de los sólidos de fondo en una bifurcación fueron hechas por H. Thoma en 1923, a partir de los estudios en una bocatoma en el Mittel Isar, ubicada aguas debajo de Múnich (Alemania).

Realizó sus investigaciones en una canaleta simple de 4 m de largo, 0.30 m de ancho y 0.20 m de profundidad (ver Figura 5). El canal de derivación tenía la misma sección transversal y el gasto se repartió en partes iguales, en consecuencia, la Relación de Toma era de 0.5.

Para sus primeras pruebas utilizó un ángulo de bifurcación de 30° y borde interior redondeado, obteniendo así que el 85.2% del gasto sólido del fondo (T_f) se dirigía hacia la derivación.

En otras pruebas utilizó un ángulo de bifurcación de 90° , obteniendo así que el 92.1% de los sólidos de fondo ingresara al canal lateral.

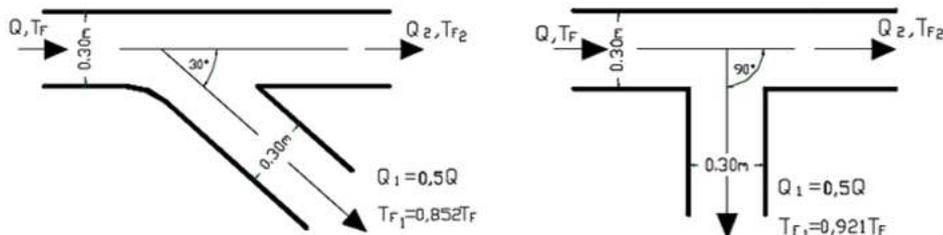


Figura 5. Investigaciones de Thoma.

Fuente: Rocha, 2005.

Donde:

T_F : Gasto sólido del fondo en la entrada del río [m^3/s]

T_{F1} : Gasto sólido del fondo captado a la salida del río [m^3/s]

T_{F2} : Gasto sólido del fondo no captado a la salida del río [m^3/s]

Los resultados de Thoma permitieron establecer experimentalmente que en una bifurcación el material de fondo tiene una marcada tendencia a dirigirse hacia el canal de derivación. Para comprobar dicha tendencia, Thoma realizó también pruebas con materiales de bajo peso específico, llegando a la misma conclusión.

Este problema también fue estudiado por Rehbock, científico del laboratorio de hidráulica de Karlsruhe, y explicó que dicha tendencia es consecuencia de la pendiente transversal que se produce al efectuarse una bifurcación en un canal.

4.1.2 Investigaciones de Bulle. H. Bulle realizó experiencias sistemáticas en el laboratorio de hidráulica de Karlsruhe (Alemania) en 1926, con el objetivo de profundizar el estudio de la distribución de sedimentos de fondo en una bifurcación y establecer sus causas. Hizo sus investigaciones partiendo de las experiencias de Thoma, de que no existía la misma relación entre la distribución de caudales líquidos y sólidos del fondo; y que tampoco se obtenían resultados correctos si se hacía un cálculo teórico en base a las capacidades de transporte de

cada canal (Relación de toma y coeficiente de captación no son necesariamente iguales).

La mayor parte de sus experiencias las realizó en un canal rectangular de 0.20 m de ancho, velocidad media de 0.37 m/s y un caudal de 5 l/s; el cual se repartió en la mayor parte de los casos en una relación aproximada de 1:1. Los ángulos de bifurcación estudiados por Bulle fueron 30° , 60° , 90° , 120° y 150° .

El canal de inicio tenía un ángulo de bifurcación de 30° y fondo rígido (ver Figura 6). Las observaciones de Bulle sobre el comportamiento del flujo indicaron que la capa inferior de sólidos de 1cm de espesor, aproximadamente $1/7$ del tirante del flujo, se dirigía íntegramente al canal lateral.

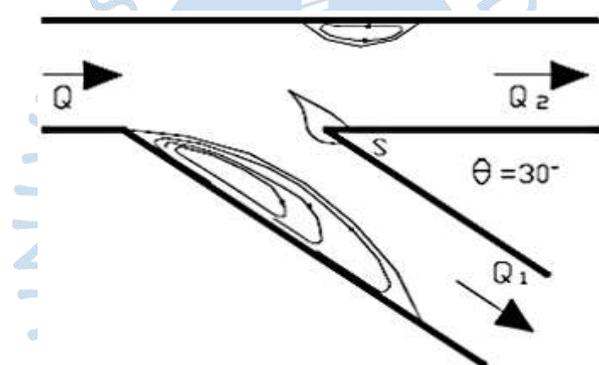


Figura 6. Investigaciones de Bulle para un ángulo de 30° (zonas de separación y aparición de vértices).
Fuente: Rocha, 2005.

Además, logró observar e identificar zonas de separación y aparición de vórtices. En la Figura 6 se observa que en la margen derecha del canal aparece un gran vórtice, que en la superficie ocupaba casi la mitad del ancho del canal. Así mismo, en el canal principal se observó vórtices menores en la margen izquierda y en una pequeña zona alrededor del punto S de separación.

Posteriormente, Bulle realizó experiencias incorporando arena de diámetro 1.2 mm como material de fondo. En la Tabla 1 se presentan los resultados de captación de sólidos en función al ángulo de bifurcación:

Tabla 1. Resultados de Bulle.

θ°	Captación de sólidos [%]
30	97
60	96
90	90
120	88
150	92

Fuente: Rocha, 2005.

Bulle realizó también algunas pruebas cambiando la Relación de Toma. Sus resultados se presentan en el siguiente diagrama de la Figura 7 y conclusiones posteriores:

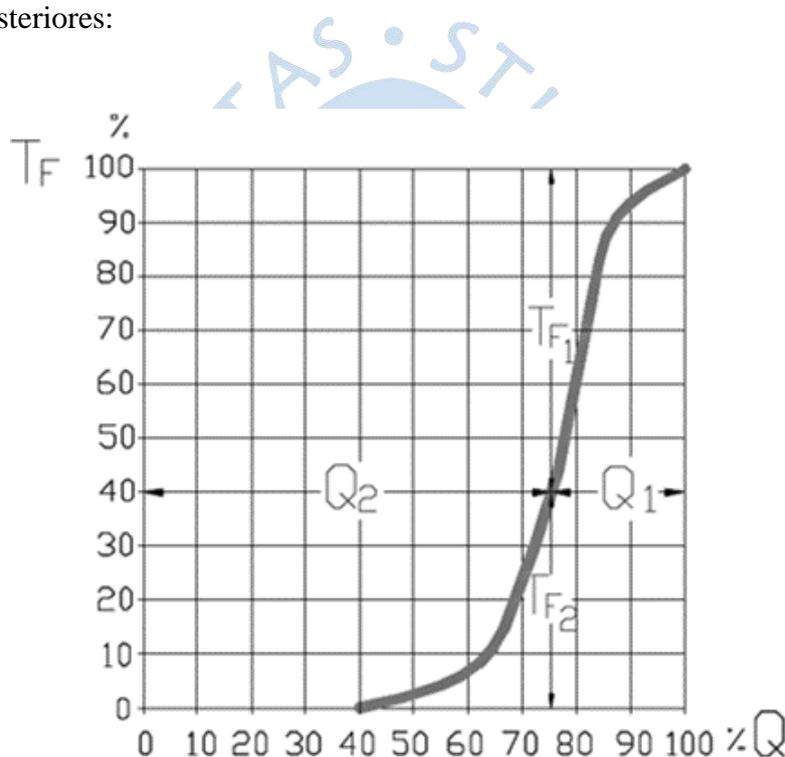


Figura 7. Vinculación entre el porcentaje del material sólido captado y los valores de la relación de toma, para un ángulo de 30°.

Fuente: Rocha, 2005

– Conclusiones de Bulle

- I. La capa inferior del escurrimiento se dirige preferentemente hacia la derivación.
- II. La tendencia del material sólido por dirigirse hacia la derivación se explica como una consecuencia de la pendiente transversal que se crea en la

bifurcación. Esta tendencia es mayor, tanto al aumentar el caudal derivado como al aumentar el ancho del canal lateral.

- III. En las inmediaciones de la derivación ocurren zonas de vórtices y de estancamiento.
- IV. Existe, para las condiciones de la experimentación, vinculación entre la captación de sólidos y la variación del ángulo de bifurcación para un valor constante de Relación de Toma.
- V. La vinculación entre el porcentaje del material sólido captado y los valores de la Relación de Toma, para un ángulo de 30° (ver Figura 7).
- VI. Existe la posibilidad de aprovechar el efecto de curva que se produce en la derivación para lograr una captación libre de sólidos, disponiendo la toma en la parte exterior de una curva del río.

Luego de estas experiencias, primero de Thoma y luego de Bulle, queda perfectamente claro que en una bifurcación los gastos líquidos y sólidos se distribuyen en proporciones diferentes. En las capas inferiores las velocidades son muy pequeñas y, por lo tanto, son éstas las que preferentemente realizan el cambio de dirección. Por el contrario, las capas superiores de mayor velocidad son las que siguen de largo.

– **Efecto Bulle**

Es la tendencia que tienen en una bifurcación las capas inferiores del escurrimiento, cargadas de sedimentos, de dirigirse preferentemente hacia el canal de derivación.

4.1.3 Investigaciones de Vogel. En 1934, H. D. Vogel realizó sus investigaciones sobre el comportamiento de las bifurcaciones en el Waterways Experiment Station, de Vicksburg (Estados Unidos). La diferencia fundamental con los demás estudios, fue la consideración del transporte de fondo y en suspensión de los sedimentos.

Utilizó una canaleta de 0.61 m de ancho con una velocidad media de 0.30 m/s. Para un ángulo de bifurcación de 30° , arena fina y repartición igual de

caudales obtuvo que el 76% del material sólido se dirigió hacia la derivación (Para un material muy fino y en condiciones iguales a las anteriores, ingresaba el 55% de los sólidos).

Vogel realizó también otra serie de experimentos en una canaleta de sección circular de 0.61 m de radio, de la que salía una derivación a 30° y estaba constituida por una canaleta de 0.305 m de radio. Los resultados que se obtuvieron se presentan en la Tabla 2:

Tabla 2. Resultados de Vogel

Material	Relación de toma (π_1)	Coefficiente de captación sólida (π_2)
Arena fina	0.5	0.52
Arena Gruesa	0.36	0.65

Fuente: Rocha, 2005

Confirmó que el gasto líquido y el gasto sólido no se reparten en la misma proporción. Además, de sus investigaciones se concluye que un material fino transportado íntegramente en suspensión, tiende a distribuirse en una bifurcación en la misma proporción que los caudales líquidos (el Coeficiente de Captación Sólida tiende a ser igual a la Relación de Toma).

4.1.4 Investigaciones de Dancy. A. G. Dancy realizó en Iowa (Estados Unidos), en 1927, una serie de estudios experimentales sobre bifurcaciones con el objeto de estudiar la repartición del gasto sólido según la modalidad de transporte. El canal principal y el lateral fueron de sección rectangular de 0.15 m de ancho y 0.125 m de altura.

Las conclusiones de Dancy se muestran en la Figura 8, donde muestra la vinculación entre el Coeficiente de Captación Sólida y la Relación de Toma, en función del parámetro adimensional α y para un ángulo de bifurcación de 30°.

Para preparar este gráfico ha sido necesario calcular la velocidad de caída de las partículas y la velocidad de corte, y determinar así el parámetro α :

$$\alpha = \frac{2.5 w}{V^*} \quad (1.8)$$

Donde:

- α : Constante de Dancy [adimensional]
 w : Velocidad de caída de las partículas [m/s]
 V^* : Velocidad de corte [m/s]

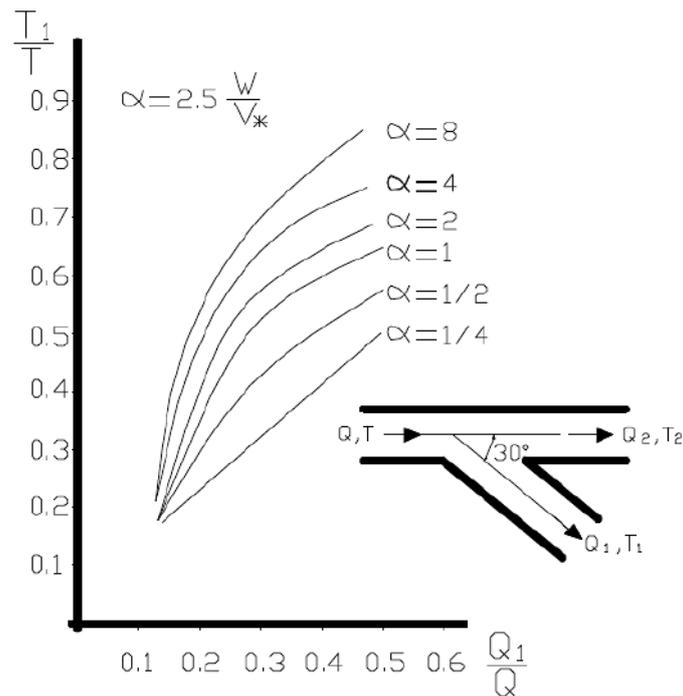


Figura 8. Vinculación entre el coeficiente de captación sólida y la relación de toma, en función del parámetro adimensional α , para un ángulo de 30° .
Fuente: Rocha, 2005.

En la Figura 8 se observa que para valores altos de α , que corresponden a grandes concentraciones de sólidos en las zonas cercanas al fondo, la distribución de sólidos tiende a realizarse según el Efecto Bulle. En cambio, para valores pequeños de α , que corresponden a una distribución más o menos uniforme del material sólido en suspensión en toda la sección transversal, el Coeficiente de Captación Sólida tiende a ser igual a la Relación de Toma.

4.1.5 Investigaciones de Cristiani y de Benini. El Ingeniero M. Cristiani, de Verona (Italia), realizó sus investigaciones en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Padua, las cuales quedaron inconclusas debido a su muerte en la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, sus resultados fueron presentados por

Benini, del mismo laboratorio, en un estudio crítico muy interesante de algunos trabajos hechos hasta 1952, y que posteriormente serían ampliados, hacia 1955, a raíz de su experiencia.

Cristiani trabajó en un canal trapezoidal de 0.28 m de ancho en la base y taludes 1:4, del cual derivaba un canal de sección rectangular cuyo ancho era de 0.10 m durante los primeros ensayos, y 0.206 m en posteriores. En todas las pruebas se mantuvo un ángulo de bifurcación de $26^{\circ} 45'$.

Benini, a partir de las investigaciones de Cristiani, planteó las siguientes conclusiones:

- I. En todos los ensayos, el Coeficiente de Captación Sólida aumenta rápidamente con la Relación de Toma.
- II. No se nota influencia de la velocidad; sin embargo, esta afirmación sólo puede mantenerse en tanto que la velocidad no sea tan grande que cause la suspensión parcial o total del material sólido.
- III. Al aumentar el diámetro de la arena, el Coeficiente de Captación Sólida tiende a disminuir.

Las investigaciones propias de Benini siguió la línea trazada por Cristiani: utilizó una canaleta de 0.30 m de ancho y 0.20 m de profundidad, para tres ángulos de bifurcación de 30° , 60° y 90° ; dos tirantes de 0.10 m y 0.17 m; y dos velocidades medias en el canal principal de 0.47 m/s y 0.73 m/s. Utilizó material sólido de una sola granulometría.

En todos los ensayos los sólidos se desplazaban como material de fondo (arrastre), concluyendo:

- I. El ángulo de bifurcación no tiene una influencia bien determinada sobre el Coeficiente de captación sólida.
- II. El ancho del canal de derivación tiene poca importancia.
- III. El peso específico y el diámetro de las partículas tienen poca relevancia.
- IV. El Coeficiente de captación sólida disminuye con el aumento del tirante.

4.2 Análisis dimensional de una bifurcación. Luego de haber examinado las diferentes investigaciones experimentales sobre las bifurcaciones, es conveniente presentar una aproximación teórica al problema, partiendo de un análisis dimensional.

Para el estudio sistemático del problema de la distribución de sólidos en una bifurcación (ver Figura 9), se consideran las siguientes cantidades fundamentales: gasto específico total, gasto específico captado, gasto sólido específico total, gasto sólido específico captado, velocidad de caída, velocidad media de la corriente, tamaño representativo de la resistencia del lecho y el tirante del canal principal.

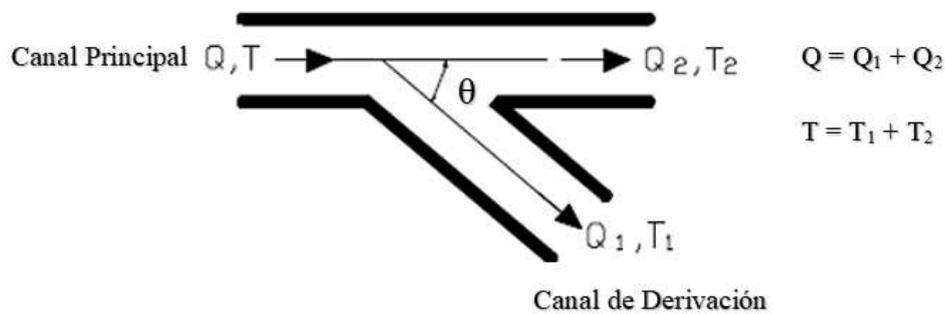


Figura 9. Representación esquemática de una bifurcación

Fuente: Rocha, 2005.

En consecuencia, se tendrá que en una bifurcación:

$$\varphi(q, q_1, t, t_1, w, V, d, y) = 0 \quad (1.9)$$

Donde:

d : Tamaño representativo de la resistencia del lecho [m]

y : Tirante del canal principal [m]

φ : Función de Análisis Adimensional

Estas cantidades pueden reducirse por medio del teorema de Buckingham a cuatro parámetros π adimensionales:

i. *Relación de Toma*: ya mencionada en líneas anteriores.

$$\pi_1 = \frac{q_1}{q} \quad (1.6)$$

ii. *Coefficiente de Captación Sólida*: ya mencionada en líneas anteriores.

$$\pi_2 = \frac{t_1}{t} \quad (1.7)$$

iii. *Rugosidad Relativa*: Es la relación entre el tirante del canal principal y el tamaño representativo de la resistencia del lecho. Cuando el fondo es móvil, la resistencia dependerá de las características de la fase del transporte que se presente (rizos o dunas). Su expresión es:

$$\pi_3 = \frac{y}{d} = \frac{q}{vd} \quad (1.10)$$

iv. *Relación entre la velocidad de caída de las partículas y la velocidad media*: Expresa la relación entre una característica de las partículas y una característica del escurrimiento. Su expresión es:

$$\pi_4 = \frac{w}{V} \quad (1.11)$$

Si se considera el ángulo de bifurcación θ como un parámetro adicional, obtenemos:

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \theta) = 0 \quad (1.12)$$

En líneas generales, lo más importante es obtener un Coeficiente de Captación Sólida de menor valor posible. Si fuese cero, entonces no habría ingreso de sólidos teóricamente.

4.3 Relación de toma. Investigadores sostienen que la Relación de Toma es el parámetro que tiene mayor influencia sobre la captación de sólidos. Así mismo, cuanto mayor sea la Relación de Toma, mayor será el Coeficiente de Captación Sólida.

Sólo tiene un significado de parámetro descriptivo de la captación de sólidos de fondo cuando $Q > Q_0$, este último se denomina gasto crítico de arrastre y marca el inicio del movimiento de las partículas de fondo de una cierta granulometría.

La Relación de toma es importante en el diseño de captación para proyectar el esquema de funcionamiento y operación.

El funcionamiento eficiente de una obra de captación tiene que estar basado en el principio de no aceptar una Relación de Toma muy alta, debido a que pueden dar lugar a dos problemas:

- Uno de ellos es que el gasto remanente en el canal principal sea tan pequeño que no dé lugar a la suficiente capacidad de transporte para arrastrar los sólidos hacia aguas abajo.
- El otro problema reside en que si se capta el 100% del agua será inevitable captar el 100% de sólidos, si $Q > Q_0$.

Estos problemas son muy relevantes cuando se diseñan obras de toma en zonas de gran escasez de agua.

No captar toda el agua del río por razones operativas implica mucho trabajo, y a veces es imposible, y se suele tener un mal funcionamiento de la obra como consecuencia.

Hay que tener en cuenta que los caudales de un río varían mucho a lo largo del año, también ocurrirá lo mismo con la Relación de Toma: en época de avenidas su valor puede ser muy pequeño y en estiaje, muy alto.

4.4 Líneas de separación. Son aquellas superficies de separación en el escurrimiento determinadas por las líneas de corriente del flujo que ingresan al canal lateral y las que siguen la dirección del río. Son originadas por la Relación de Toma y las características geométricas de una bifurcación.

Para esquematizar el fenómeno se puede distinguir una línea de separación en el fondo y otra de separación en la superficie, ambas se encuentran unidas por una superficie curva, es decir, para cada altura hay un ancho de separación B_h .

En la Figura 10 se observa las líneas características de una bifurcación libre: la línea de separación B_1 , próxima al fondo, está más lejos de la derivación que la línea superficial B_2 . La presencia de una grada a la entrada del canal de derivación alteraría la forma de esa superficie de separación, produciéndose una inversión.

No existen criterios uniformes y universales para determinar con precisión el ancho de separación B_h en una bifurcación libre, la cual aumenta con el gasto líquido captado. Se conocen varias fórmulas y expresiones que proporcionan una estimación de valores, pero en lo único que coinciden es que en una bifurcación libre sin grada el ancho de separación en el fondo es 50% mayor que el ancho de separación en la superficie.

Se ha comprobado también que, al aumentar la Relación de Toma, aumenta el ancho de separación comprometido.

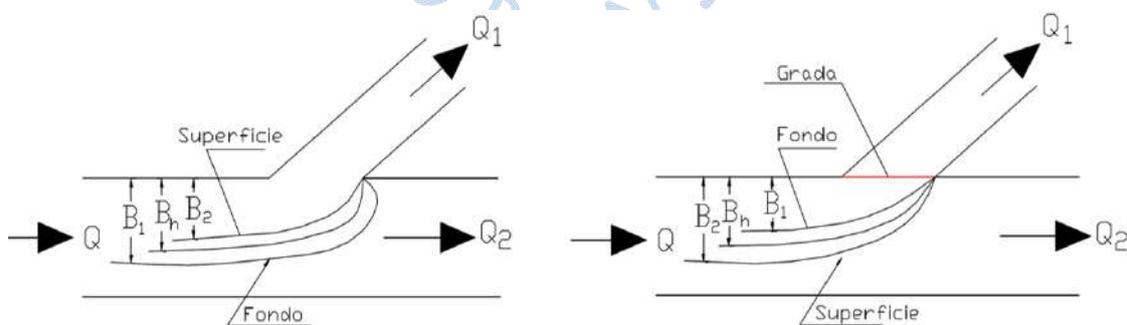


Figura 10. Líneas de separación en una bifurcación sin grada (izquierda) y en una bifurcación con grada (derecha).

Fuente: Rocha, 2005.

4.5 Ángulo de bifurcación. Conforman uno de los parámetros que determinan la distribución de sólidos en una bifurcación. Así mismo, establece que para un mismo ancho del canal de derivación se presenta una mayor o menor abertura de la entrada, como consecuencia de la captación de sólidos.

Por ejemplo, para un ángulo de bifurcación $\theta = 90^\circ$: el ancho del canal de derivación coincide con la abertura del canal principal, dando como resultado un ancho de entrada mínimo.

El ángulo de bifurcación determina también la curvatura de las líneas de corriente y la trayectoria de las partículas que se dirigen hacia el canal de derivación: un ángulo grande produce una fuerte curvatura.

En la Figura 11, se puede apreciar un esquema de algunos de los fenómenos secundarios que se presentan en una bifurcación con el borde interior redondeado, como consecuencia de la curvatura de las líneas de corriente y la aparición de una capa límite:

- Alrededor del punto A aparece una pequeña zona de vórtices en la que se presenta una contracorriente y, finalmente, una zona de estancamiento, esta última corresponde a un fenómeno de separación.
- El redondeo de la esquina comprometida no elimina la zona de estancamiento, pero la altera ligeramente al desplazar la parte más ancha hacia aguas abajo. Además, produce un aumento del ancho de entrada y hace más inestable la zona de separación, lo que origina incertidumbre a la hora de afirmar que disminuye la cantidad de material sólido.
- Como consecuencia del redondeo pueden presentarse fluctuaciones turbulentas de la velocidad que determinan el ingreso de una mayor cantidad de material fino.



Figura 11. Fenómenos secundarios que se presentan en una bifurcación.
Fuente: Rocha, 2005.

La Figura 12 muestra las respectivas zonas de estancamiento en una bifurcación con ángulos de 30° , 90° y 120° , sin redondear.

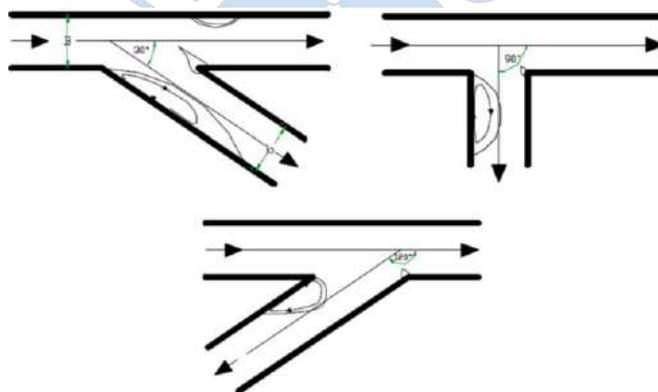


Figura 12. Zonas de estancamiento y depósito.
Fuente: Rocha, 2005.

Con el objeto de apreciar la influencia del ángulo de bifurcación sobre la cantidad de sólidos captados, como resultado de las investigaciones de Thoma, Benini, Bulle, Dancy y las del laboratorio de Vicksburg, se elaboró la siguiente gráfica mostrada en la Figura 13:

- Thoma realizó mediciones para ángulos de 30° y 90° , este último con la esquina redondeada, pero con efecto del redondeo pequeño.
- Las mediciones de Vicksburg se originaron en un modelo del río Mississippi, por lo tanto, las condiciones son diferentes a la bifurcación esquematizada que se presenta, sin embargo, se ha considerado útil su incorporación.
- Benini y Bulle corresponden al caso genérico en estudio.
- Dancy sólo estudió el ángulo de 30° , pero con diversos diámetros de material.

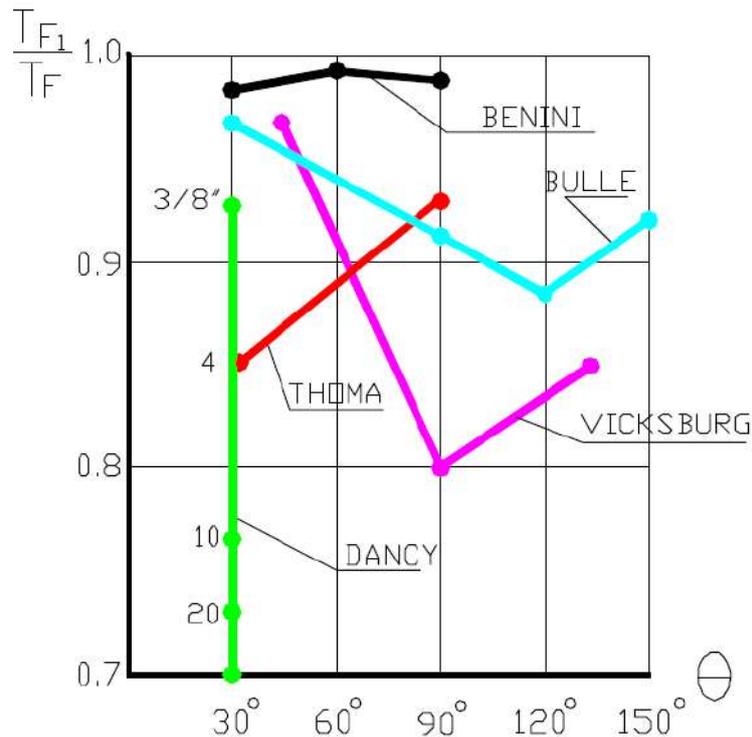


Figura 13. Influencia del ángulo de bifurcación en la captación de sólidos para una relación $Q_1/Q = 0.5$.

Fuente: Rocha, 2005.

La conclusión que se obtuvo, luego de analizar las diversas investigaciones efectuadas y diseños de diferentes países, es que no hay un ángulo óptimo. En general, se dice que la influencia del ángulo de derivación es pequeña, pero no es bien conocida ni susceptible de generalización.

4.6 Influencia de la curvatura. Hasta el momento, se ha presentado el problema general de las bifurcaciones a partir de un canal principal recto. Ahora se examinará lo que ocurre en un tramo curvo, en donde el escurrimiento presenta, tanto en su fase líquida como sólida, características especiales y diferentes a la de un tramo recto.

En la Figura 14, se aprecia las características del escurrimiento en un tramo curvo como consecuencia de la circulación transversal:

- Se produce una corriente helicoidal y un desnivel entre ambas márgenes que da lugar a una pendiente transversal.
- La influencia de este fenómeno se manifestará según la naturaleza del cauce: rígido o móvil.

- En los cauces móviles se produce una modificación de la sección transversal, de modo que las corrientes superficiales se dirigen hacia el margen exterior y las corrientes de fondo, cargadas de sedimentos, se dirigen hacia el margen interior. Este comportamiento se denomina *Efecto de Curva*.

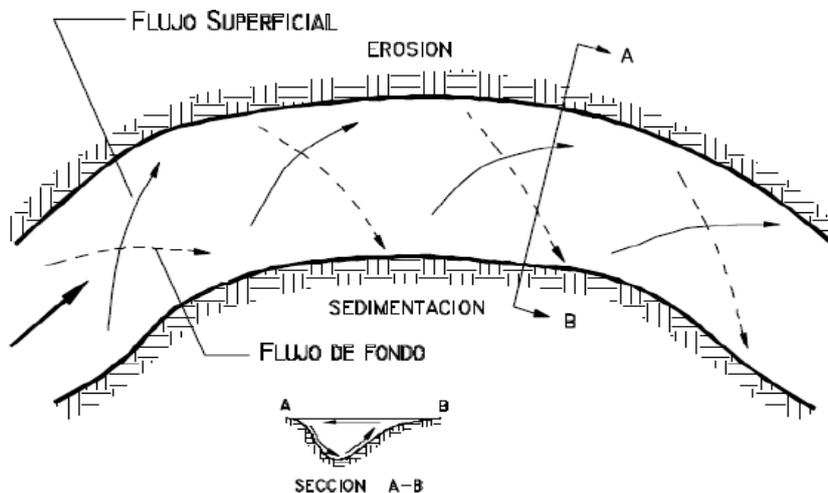


Figura 14. Escurrimiento en un tramo curvo.

Fuente: Rocha, 2005.

Fritz Habermaas en Karlsruhe hacia 1935, realizó sus estudios sobre la influencia de la ubicación del canal lateral con respecto a la curvatura del canal principal. Sus investigaciones continúan lo sugerido por Bulle en su última conclusión.

Habermaas utilizó canales trapezoidales de 0.15m de ancho en el fondo y 0.30 m en la superficie; y para la determinación del gasto sólido de fondo empleó la fórmula de Du Boys (1879).

Luego de las primeras experiencias comprendió la importancia del flujo helicoidal en los tramos curvos, y estudió a detalle diversas bifurcaciones que presentaban diferente ubicación de derivación con respecto a la curvatura del canal. Para todos sus ensayos utilizó una Relación de Toma de 0.5 (ver Figura 15).

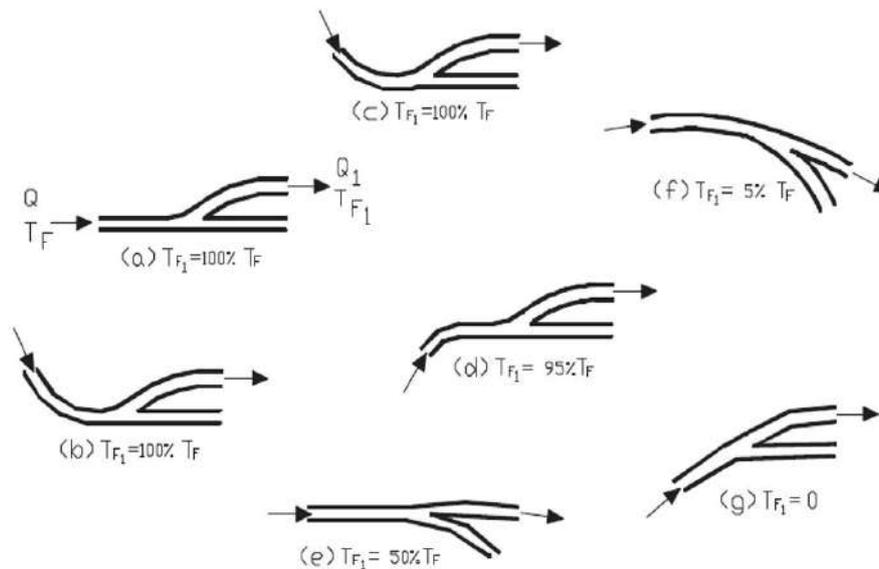


Figura 15. Influencia de la curvatura en la captación de sólidos para $Q_1/Q = 0.5$.
Fuente: Rocha, 2005.

En la Figura 15 se exponen algunos resultados de Habermas:

- El ensayo “a” corresponde a la captación en un tramo recto. Los resultados fueron muy malos, ingresó el 100% del material sólido a la derivación. En este caso muestra una buena correspondencia con los resultados de Bulle.
- En los ensayos “b” y “c” la toma se ubicó en el margen interior de la curva, una al inicio y otra al final. En ambos casos los resultados fueron similares al caso anterior.
- En los ensayos “d”, “e” y “f” la toma se ubica en el margen exterior. En el caso “d” la toma está muy alejada del inicio de la curva e ingresó el 95% de sólidos. En el caso “e” la derivación está en un punto intermedio e ingresó el 50% de los sólidos. Y en el caso “f” la toma se ubica casi en el inicio de la curva e ingresó sólo el 5% de los sólidos.
- Por último, en el ensayo “g” la toma se ubica en el inicio de curva e impidió totalmente el ingreso de sólidos.

Como se puede observar, se obtiene menor ingreso de sólidos a medida que la toma se ubica cerca de la iniciación de la curva (margen exterior). Entonces se interpreta que:

- Los resultados favorables se deben a la presencia de una corriente helicoidal.
- Los resultados favorables de la experiencia “g” se debe a que el canal de derivación, como consecuencia de su ubicación, aparece como una continuación del cauce

principal, mientras que la parte del canal principal en aguas debajo de la bifurcación aparece como el canal derivado. De esta forma se obtiene un Efecto Bulle invertido.

Las conclusiones que se obtienen de estos ensayos son:

- La curvatura del canal y la ubicación de la toma con respecto a ella tienen una gran importancia para impedir el ingreso del material sólido.
- La ubicación más favorable corresponde al inicio del tramo en curva en su margen exterior.
- No se debe ubicar la toma en el margen interior.

5 El fenómeno El Niño

Según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - SENAMHI (2014), el término “El Niño” fue utilizado por los pescadores del norte del Perú, a fines del siglo XIX, para referirse a una corriente marina de aguas cálidas que solía aparecer todos los años hacia finales de diciembre.

Este calentamiento marino – costero se acentúa cada cierto número de años, siendo una manifestación de cambios en las capas superficiales y subsuperficiales del océano; y se vincula a interacciones complejas con la atmósfera que se producen en el Océano Pacífico Ecuatorial.

La combinación de los dos procesos: “El Niño” (EN) y un fenómeno conocido actualmente como Oscilación Meridional, en inglés *Southern Oscillation* (SO), producen el ENSO, un fenómeno integrado marítimo y atmosférico que abarca toda la cuenca del Pacífico.

En países como Perú y Ecuador, se denomina “El Niño” al incremento de la Temperatura Superficial del agua del Mar (TSM) en el litoral de la costa oeste de Sudamérica con ocurrencia de lluvias intensas. Antes era considerado como un fenómeno local, pero en la actualidad, se le conoce como el principal modulador de la variabilidad climática interanual en todo el mundo.

Para centrar la atención en el proceso de la evolución de las temperaturas de la superficie del océano y en los vientos, los científicos han sectorizado la franja ecuatorial del Océano

Pacífico en cuatro cuadrantes (ver Figura 16). La mayoría de ellos concentran su atención en los cuadrantes Niño 3 y Niño 3.4 para tratar de comprender el origen de este fenómeno.

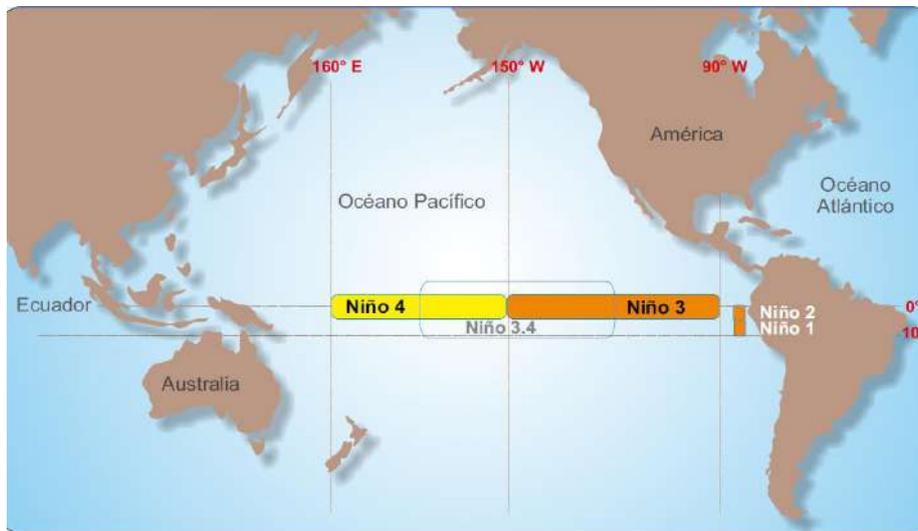


Figura 16. Regiones de monitoreo El Niño.

Fuente: SENAMHI, 2014.

- *Regiones Niño 3 y 4:* Están ubicadas en el lado oriental y occidental del Pacífico respectivamente, y se caracterizan por presentar las máximas anomalías de temperatura superficial del mar.
- *Región Niño 3.4:* Subregión comprendida entre las regiones Niño 3 y 4, representa un buen indicador de la correlación entre la temperatura superficial del mar y el índice de Oscilación Sur.
- *Región Niño 1+2:* Incluye las costas de Perú y Ecuador incluidas las Islas Galápagos, representa un indicador de los cambios inducidos por El Niño en los patrones de variabilidad de la costa del Pacífico de América del Sur.

Durante el ENSO, los vientos alisios en el Pacífico y la circulación de Walker se debilitan. Las aguas más calientes del Pacífico del Oeste se esparcen a lo largo del ecuador mediante las ondas de Kelvin y las temperaturas de la superficie del mar en el Pacífico Central y del Este son elevadas, por lo menos en 2°C. Al mismo tiempo estas ondas deprimen la termoclina a lo largo de la costa sudamericana, impidiendo el afloramiento de las aguas frías subyacentes (ver Figura 17 y Figura 18).

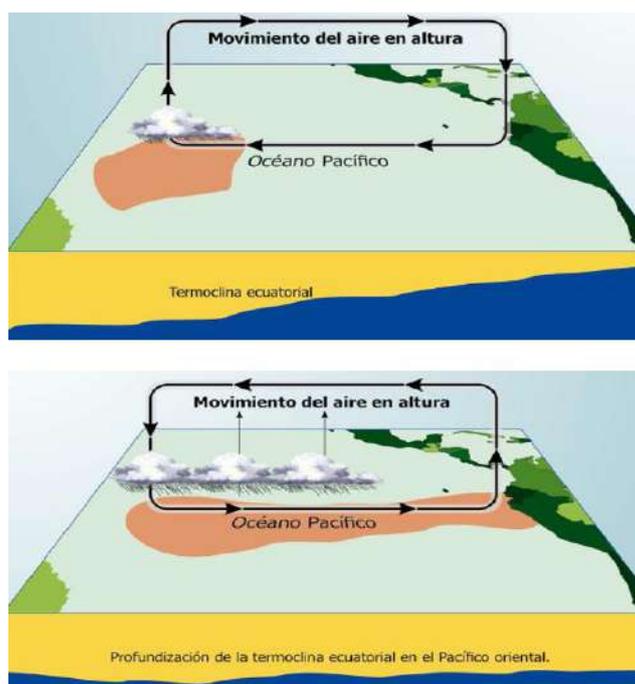


Figura 17. Circulación de Walker en el Pacífico ecuatorial (arriba: situación normal, abajo: situación durante El Niño).
Fuente: SENAMHI, 2014.

5.1 El Fenómeno La Niña. Según Elera (2005), la expresión “La Niña” fue utilizada por especialistas a partir de la década de los ochenta para referirse a un periodo frío que se oponía al periodo caliente del Fenómeno “El Niño”, provocando eventos climáticos contrarios. Por ejemplo: en algún lugar del Pacífico tropical, que presenta sequía durante El Niño, lloverá más de lo normal durante La Niña. (ver Figura 18).

No se asegura que los efectos en el clima en otras regiones del planeta sean simétricos durante dichos fenómenos, además, no siempre sigue un evento de La Niña a uno de El Niño; por lo que se habla de no periodicidad del sistema climático.

Las investigaciones indican que los índices oceánicos y el IOS son una oscilación pendular, en la cual se intercambian eventos fríos con los cálidos. El periodo frío del ENSO se manifiesta en la costa peruana como masas de aguas frías que se propagan hacia el oeste:

- Los vientos alisios se intensifican, provocando el aumento de la diferencia del nivel del mar entre el Pacífico oriental y occidental, y el incremento de la pendiente de la temperatura superficial del mar.

- La termoclina es levantada al lado de la costa sudamericana, acompañado de una intensificación de aguas frías de la Corriente de Humboldt, con un consiguiente incremento de la productividad marina.

La Niña es menos predecible que El Niño, por ello existen pocos registros de sus efectos.

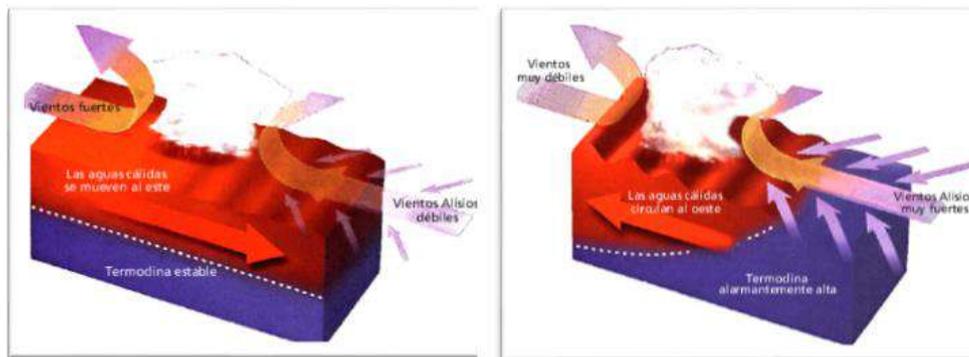


Figura 18. Condiciones durante el fenómeno El Niño (izquierda) y La Niña (derecha) en el Pacífico tropical.

Fuente: Elera, 2005.

5.2 Umbrales de magnitud de El Niño/ La Niña. La Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos de América (NOAA), utiliza el Índice Oceánico El Niño (ONI) para identificar la magnitud de El Niño y La Niña. Este índice se calcula como el promedio de 3 meses consecutivos de la serie mensual de las anomalías de la temperatura superficial del mar medidas en el Pacífico tropical en la Región El Niño 3.4 (5°N – 5°S, 120° - 170°W). Se consideran episodios cálidos y fríos cuando el ONI supera el umbral +/- 0.5°C. Cuando dicho umbral es cubierto durante un mínimo de 5 meses continuos, se definen como episodios El Niño (+) o La Niña (-) (ver Tabla 3).

Tabla 3. Umbrales para identificar la magnitud de El Niño/La Niña, según la NOAA en la región del Pacífico tropical Niño 3.4.

Categoría	Índice Oceánico El Niño (ONI)
Cálido Fuerte	Mayor o igual a +1.4
Cálido Moderado	Mayor que +0.9 y menor que +1.4
Cálido Débil	Mayor que +0.5 y menor que +0.9
Neutro	Mayor que -0.5 y menor que +0.5
Frío Débil	Mayor que -0.9 y menor que -0.5
Frío Moderado	Mayor que -1.5 y menor que -0.9
Frío Fuerte	Menor o igual que -1.5

Fuente: SENAMHI, 2014.

El Comité Multisectorial para el Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), en el año 2012, introdujo el Índice Costero El Niño (ICEN) para identificar las magnitudes de los eventos El Niño y La Niña en la costa peruana.

El ICEN consiste en la media móvil trimestral de las anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) mensual en la región Niño 1+2 (90° - 80°W, 10°S - 0°) frente a la costa norte del Perú y Ecuador.

Además, se establecieron valores umbrales para determinar la presencia de condiciones cálidas o frías y sus magnitudes (ver Tabla 4).

Debido a que las diferentes fuentes de datos pueden producir valores ligeramente distintos, estos umbrales fueron establecidos usando la base de datos denominada *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature* (ERSST), versión 3b de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) de Estados Unidos.

Tabla 4. Categorías de las anomalías en las condiciones de la temperatura según ICEN.

Categoría	Valor Mensual del ICEN
Frío Fuerte	Menor que -1.4
Frío Moderado	Mayor o igual que -1.4 y menor que -1.2
Frío Débil	Mayor o igual que -1.2 y menor que -1.0
Neutro	Mayor o igual que -1.0 y menor o igual que +0.4
Cálido Débil	Mayor que +0.4 y menor o igual que +1.0
Cálido Moderado	Mayor que +1.0 y menor o igual que +1.7
Cálido Fuerte	Mayor que +1.7 y menor o igual que +3.0
Cálido Extraordinario	Mayor que +3.0

Fuente: IGP, 2015.

5.3 Características de El Niño en el Perú. Durante el desarrollo del Fenómeno El Niño, dependiendo de su intensidad y temporalidad, el comportamiento de las condiciones meteorológicas en el territorio nacional se altera, provocando anomalías en el comportamiento de las lluvias y temperaturas del aire, principalmente en la vertiente occidental y el Altiplano.

La Tabla 5 muestra un resumen de datos observados por el SENAMHI durante los dos grandes episodios extraordinarios de El Niño ocurridos en los años 1982/1983 y 1997/1998.

Tabla 5. Características de los dos episodios extraordinarios de El Niño en el Perú.

Episodio El Niño	Anomalías de temperatura mínima	Anomalías de precipitación
El Niño 1982-1983	+0.8 °C (Chiclayo) +10.0 °C (Chimbote)	<ul style="list-style-type: none"> • En la costa norte: 3000 mm entre setiembre y mayo; en verano, mayores núcleos en Piura. • En la sierra sur: déficit severo de precipitación.
El Niño 1997-1998	+0.8 °C desde Chiclayo al Norte Chico	<ul style="list-style-type: none"> • En la costa norte: 3000 mm entre setiembre y mayo; en verano, mayores núcleos en Piura y Tumbes; incrementos de alrededor 2000% en algunas estaciones costeras norteñas: Miraflores, Talara (Piura), Tumbes; lluvias intensas en Lambayeque y Lima. • En la sierra sur: déficit de precipitación.

Fuente: SENAMHI, 2014.

La Tabla 6 resume las manifestaciones de El Niño en el Perú:

Tabla 6. Manifestaciones generales de El Niño en el Perú.

En el océano	En la atmósfera
<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de la temperatura superficial y subsuperficial del mar. • Incremento del nivel del mar en la zona de calentamiento. • Disminución del afloramiento de las aguas frías y nutrientes hacia la superficie. • Variación de la salinidad de las aguas costeras. • Incremento del contenido del oxígeno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Debilitamiento de los vientos alisios a lo largo de la costa. • Incremento de la temperatura del aire en las zonas costeras adyacentes al mar caliente, y en toda la tropósfera. • Incremento del contenido de humedad en el aire. • Incremento de la nubosidad en la estación de verano y primavera. • Disminución de la presión atmosférica.

Fuente: SENAMHI, 2014.

5.4 Impactos de El Niño en el Perú. Las variaciones del clima que el Perú exhibe de un año a otro, conocido como variabilidad interanual, están en gran medida determinados por la presencia de El Fenómeno El Niño. Los eventos extremos asociados a este son los que causan impactos, afectando las condiciones de vida de la población.

Nuestro país muestra una gran vulnerabilidad ante las variaciones climáticas drásticas, como los episodios extremos de lluvia y las altas temperaturas asociadas a El

Niño. Una evidencia de ello son las enormes pérdidas económicas que se presentaron en El Niño 1982/83 (US\$ 3283 millones) y El Niño 1997/98 (US\$ 3500 millones), pérdidas equivalentes al 11.6% y 6.2% del PBI anual de cada año.

La Tabla 7 se resume los impactos positivos y negativos de El Niño, asociados al incremento de las temperaturas en el aire y a las intensas lluvias que se presentan durante episodios El Niño de intensidad fuerte a extraordinaria.

Tabla 7. Impactos de El Niño en el Perú.

Impactos positivos	Impactos negativos
<ul style="list-style-type: none"> • Aparición de otras especies pelágicas (especies que viven en aguas medias o cerca de la superficie). • El incremento de lluvias y temperatura del aire favorece el desarrollo del cultivo de arroz en la costa. • Las lluvias intensas, en eventos El Niño de fuertes a extraordinarios, favorecen la regeneración natural de los bosques secos en la costa norte. • La aparición de praderas temporales en la costa norte es importante para la ganadería. • El exceso de lluvias favorece la recarga de acuíferos. • Las altas temperaturas del mar durante el otoño e invierno, favorecen a la disminución de la intensidad de las heladas en la sierra central y norte. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aceleración del retroceso glaciar. • Pérdida de terrenos agrícolas. • Colmatación de reservorios. • Salinización de suelos. • Destrucción de la infraestructura productiva (canales de irrigación, bocatomas, compuertas, etc.) • Destrucción de vías de comunicación (colapso de carreteras y puentes). • Muerte o migración de algunas especies vegetales y animales. • Altas probabilidades de que se produzcan incendios forestales, debido a las altas temperaturas. • Las altas temperaturas generan impacto en la producción pecuaria (baja producción de carne y leche). • Disminución de la producción de papa en la costa y sierra, como consecuencia de las altas temperaturas y exceso de humedad. • En algunos cultivos, el ciclo vegetativo se acorta, provocando ausencia de inducción floral. • Destrucción de infraestructuras de saneamiento básico.

Fuente: SENAMHI, 2014.

Tabla 7 (Continuación): Impactos de El Niño en el Perú.

Impactos positivos	Impactos negativos
	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de enfermedades como el cólera, la malaria, infecciones estomacales, conjuntivitis, dengue, entre otros. • Desplazamiento y profundización de cardúmenes de anchoveta, que no puede ser compensada

Fuente: SENAMHI, 2014.

En las Figura 19, 20 y 21 se presentan las anomalías de temperatura y precipitaciones que ocurren durante el Fenómeno El Niño.

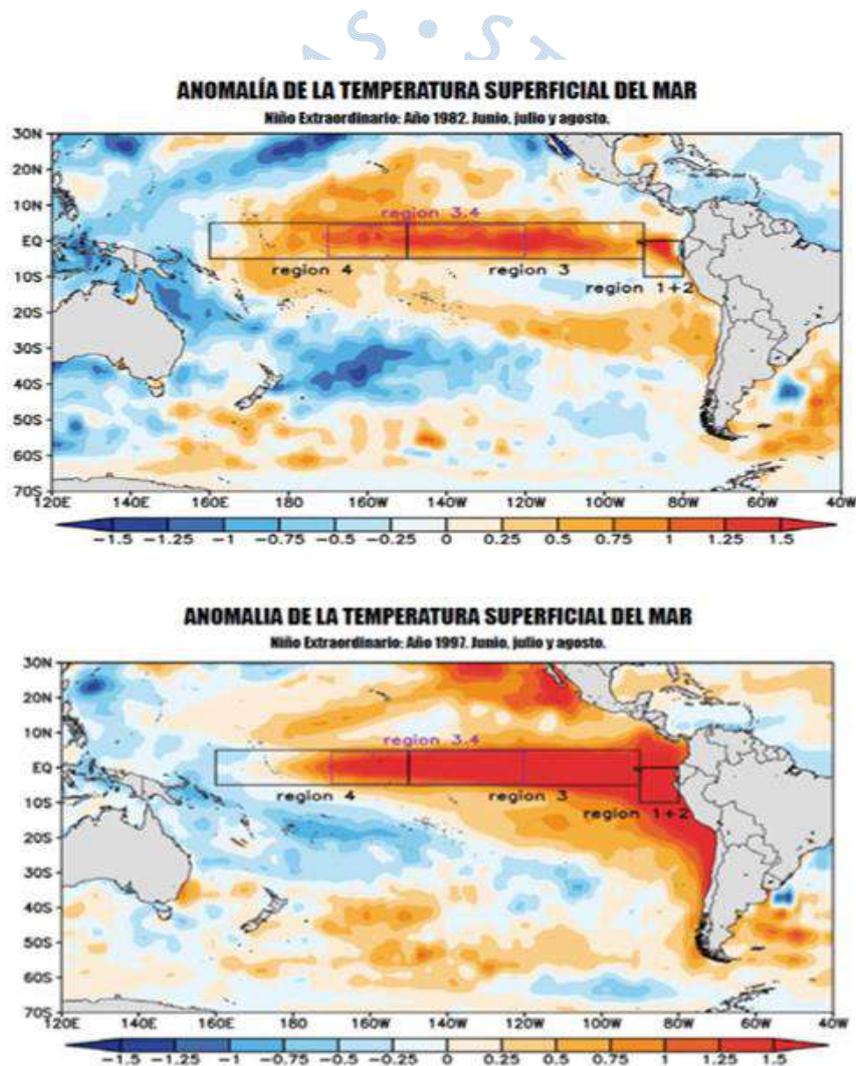


Figura 19. Patrones de anomalías de temperatura superficial del mar en °C (arriba: durante El Niño 1982, abajo: durante El Niño 1997).

Fuente: SENAMHI, 2014.

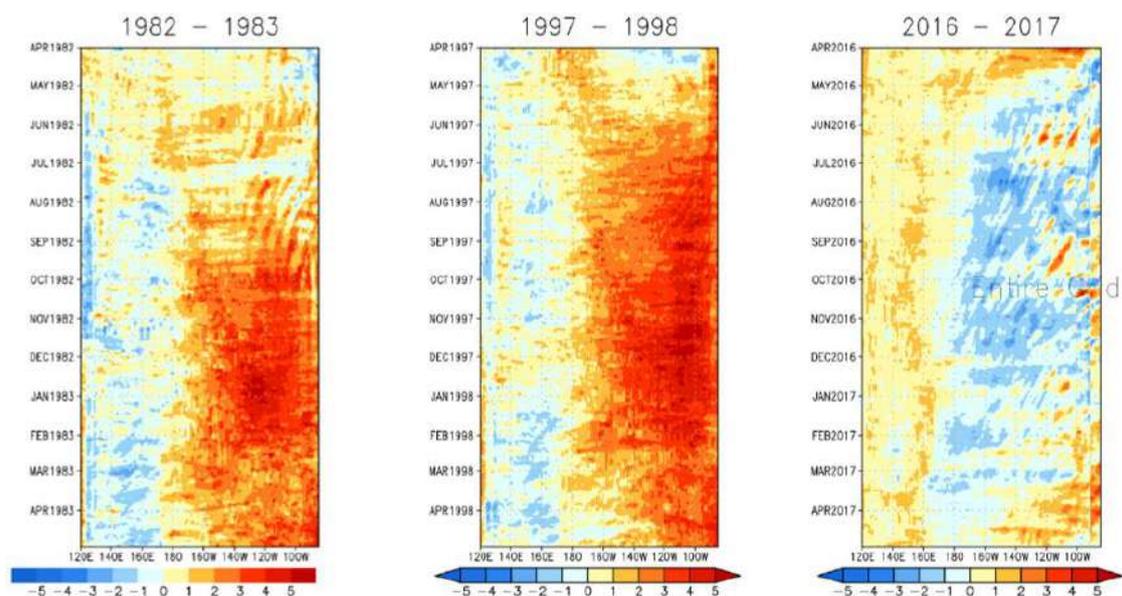


Figura 20. Evolución comparativa de eventos El Niño AVHRR – Anomalía de temperatura superficial del mar ($^{\circ}\text{C}$) – Latitud 0° .

Fuente: SNIRH, 2017.

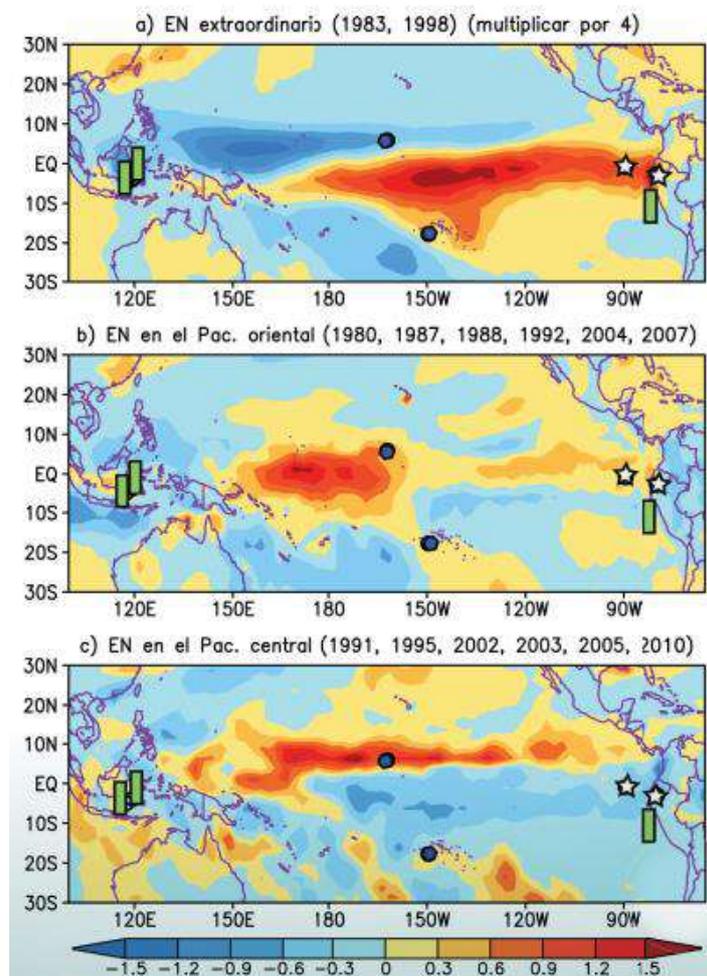


Figura 21. Anomalías de precipitación promediadas de febrero a abril [mm/día] para los diferentes patrones de El Niño.

Fuente: IGP, 2015.

6 El río Piura

En esta parte de la tesis se presentará brevemente características relevantes del río Piura, tales como: geografía, topografía, características de la cuenca, caudales históricos, problemas de erosión y sedimentación, así como datos importantes del tramo en estudio; con la finalidad de formar una introducción al modelo matemático que se describirá en capítulos posteriores, y que se usará en el futuro para determinar la orientación de un canal de toma.

6.1 Descripción geográfica del departamento de Piura. El departamento de Piura se ubica a unos 1000 km al norte de la capital Lima, próxima a la frontera con Ecuador. Tiene una superficie de 40580 km², correspondiente al 3.2% del territorio peruano. Limita al norte con el Departamento de Tumbes y Ecuador, al sur con el Departamento de Lambayeque, al este con el Departamento de Cajamarca y al oeste con el Océano Pacífico.

El Departamento de Piura se encuentra dividido en 8 provincias: Talara, Sullana, Paíta, Piura, Sechura, Ayabaca, Morropón y Huancabamba. Junto al Departamento de Tumbes forma la Región Grau (ver Figura 22).



Figura 22. Mapa del departamento de Piura.
Fuente: SERVINDI, 2013.

El clima es árido con altas temperaturas ambientales. Existen cuatro zonas climáticas: Clima Selva (permanentemente húmedo al norte), Clima Templado Moderado Lluvioso (predomina), Clima de Estepa y Clima de Desierto (ambas en la zona central y costera).

6.2 La cuenca del río Piura. La cuenca del río Piura tiene un área de 10230 km² y abarca parte del territorio de las provincias de Piura, Sullana, Morropón, Huancabamba, Ayabaca, Paita y Sechura, cercana a la frontera con Ecuador y a la línea ecuatorial. Se encuentra limitada por los 4°45' y 5°45' de latitud sur y los 79°30' y 80°60' de longitud oeste.

El río Piura nace como río Chalpa en la Provincia de Huancabamba a 2680 msnm, y pasa por las provincias de Huancabamba, Morropón, Piura y Sechura.

En su recorrido toma los nombres de los ríos Huarmaca y Canchaque, adquiriendo el nombre de río Piura desde su confluencia con el río Bigote:

- Tramo 1: Desde su nacimiento hasta Tambogrande al nor-oeste, representando 125 km y recibiendo los nombres de río Chalpa, río Huarmaca y río Piura.
- Tramo 2: Desde Tambogrande hasta un avance de 25 km aproximadamente.
- Tramo 3: Desemboca en la Laguna Ramón, con una dirección sur-oeste y una longitud de 145 km.

Los ríos Huarmaca, Bigote, Piscán, Yapatera, San Jorge y La Gallega forman la red hidrográfica de la cuenca del río Piura, con un cauce principal de 295 km de longitud aproximadamente, y 1010 km de longitud total de la red.

La cuenca está dividida en 5 subcuencas (ver Tabla 8 y Figura 23).

Tabla 8. Subcuencas del río Piura.

Subcuenca	Área (km ²)	Longitud (km)	Perímetro (km)
Bigote - Huarmaca	1934.98	69.72	222.36
Chulucanas	2796.14	54.60	256.79
Tambogrande	1442.79	37.50	204.64
Medio Piura	1615.47	82.10	183.68
Bajo Piura	2440.26	50.90	227.68
Total	10229.64	294.82	601.56

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

La cuenca del río Piura presenta una amplia variedad de rocas y agregados de edad comprendida entre el Pre-Cambriano y el Cuaternario. Geológicamente, las unidades litológicas son muy variadas desde el Basamento metamórfico, compuesto por los tipos detallados en la Tabla 9:

Tabla 9. Unidades litológicas de la cuenca del río Piura.

Tipo	Origen
Gneises, esquistos	Complejo Olmos
Esquistos, filitas	Grupo Salas
Filitas, cuarcitas	Formación río Seco
Sedimentos calcáreos	Formación Chignia
Derrames volcánicos, volcano-sedimentarios	Volcánico Lancones
Depósitos cuaternarios	Tipo aluvial, fluvial y eólico
Sedimentos clásticos	Formaciones Yapatera y San Pedro
Lavas, piroclastos	Volcánicos Llama y Porculla

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

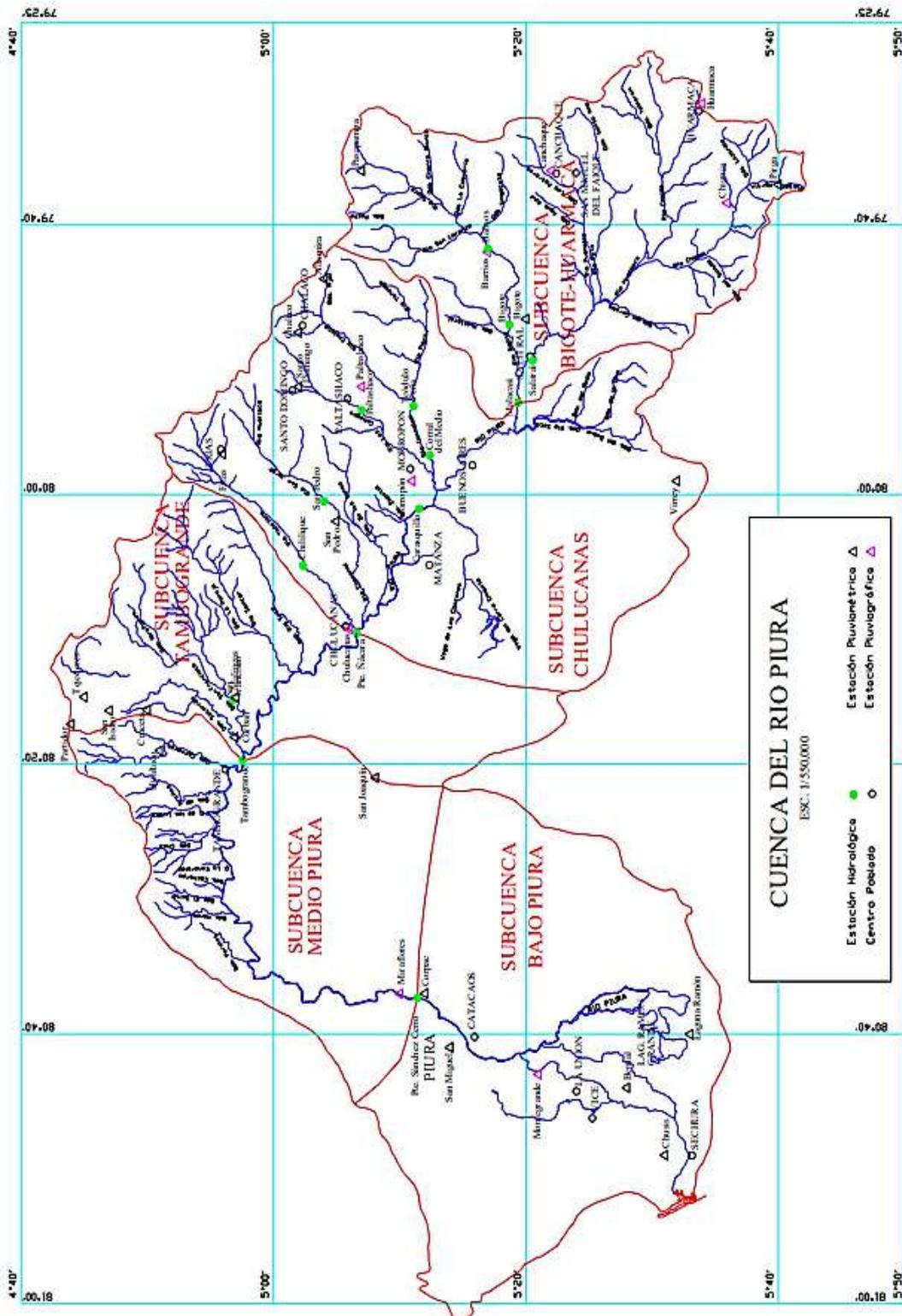


Figura 23. La cuenca del río Piura.
Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

6.3 El tramo urbano del río Piura. El tramo urbano del río Piura forma el área de estudio de la presente tesis (ver Figura 24) y ha sido dividido en cinco tramos bien definidos.



Figura 24. Tramo urbano del río Piura

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

El tramo inicial lo forma la zona aguas arriba de la presa Los Ejidos, representando la cuenca media y alta del Río Piura. El lado izquierdo tiene una longitud aproximada de 600 m y niveles de ribera entre 32 y 36 msnm. Aguas abajo, el terreno es más bajo (entre 28.5 y 30 msnm), expuesto a inundación durante avenidas.

Los tramos A y B abarcan el río Piura en su paso por la ciudad: el tramo A describe la zona entre la presa Los Ejidos y el puente Cáceres, tiene una longitud aproximada de 3 km, con un pendiente longitudinal promedio del fondo del cauce de 0.035% (cota 22.5 Los Ejidos y 21.5 puente Cáceres). El ancho del cauce principal varía entre los 200 m al inicio del tramo, controlado por el vertedero fijo y el vertedero con compuertas de la represa Los Ejidos, 300 m en la zona aguas debajo de la presa, reduciéndose a 180 m en la progresiva 2+000; finalmente el ancho del cauce baja a 130 - 140 m en la zona aguas arriba del puente Cáceres, como consecuencia de la construcción del puente.

Las pendientes laterales de la ribera derecha del tramo A son más bajas que las de la ribera del lado izquierdo y destacan dos zonas de inundación: la primera entre 22 y 28 msnm y la otra entre 28 y 30 msnm.

El tramo en estudio (Tramo B) se encuentra entre el puente Cáceres y el proyectado puente de Integración, con una longitud total de 2.5 km, dividido en cinco sectores: puente Cáceres – puente Intendencia, puente Intendencia – puente Sánchez Cerro, puente Sánchez Cerro – puente San Miguel, puente San Miguel – puente Bolognesi, puente Bolognesi – puente Integración. Tiene una pendiente de 0.030% y el ancho del cauce se reduce a 80 – 120 m (ver Figura 25).

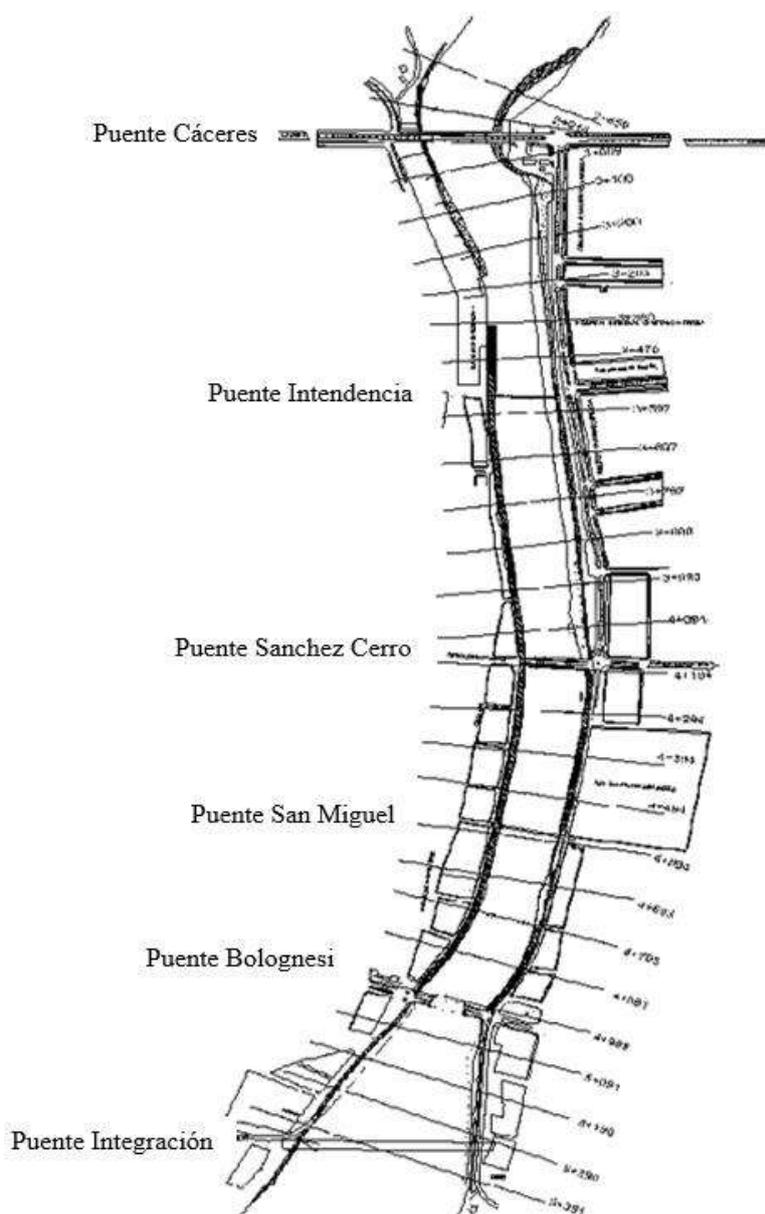


Figura 25. El tramo B de la zona urbana del río Piura.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

El Tramo C está formada por la proyección, aguas abajo, del puente Integración hasta el puente Grau. Finalmente, el tramo D abarca el río Piura aguas abajo del puente Grau hasta su desembocadura en la Laguna Ramón.

6.4 Hidrología del río Piura. El estudio hidrológico del río Piura tiene como objetivo la determinación de avenidas características que pueden ocurrir a su paso por la ciudad de Piura, como consecuencia de las lluvias que se producen aguas arriba de la cuenca en la zona urbana. Es importante tener en cuenta que durante los impactos del fenómeno El Niño, las precipitaciones en la cuenca baja sobrepasan las intensidades de las precipitaciones en la parte media y alta de la cuenca.

6.4.1 Precipitaciones. El régimen hidráulico del río Piura se puede dividir en dos temporadas, correspondiente a la distribución de las precipitaciones en la zona de la cuenca:

- Febrero hasta abril: periodo de avenidas.
- Junio hasta diciembre: periodo de estiaje.

En la cuenca baja, las precipitaciones se presentan entre enero y mayo (con valores altos en marzo y abril). Durante los otros meses, prácticamente no hay precipitaciones en esta zona.

La cuenca alta se caracteriza por presentar precipitaciones durante todo el año (pero también con valores altos entre enero y mayo).

Las precipitaciones más altas se presentan en una zona comprendida entre 1700 y 2900 msnm, a excepción de la ocurrencia del Fenómeno El Niño. Por ejemplo, las precipitaciones acumuladas en 1998 fueron extremadamente intensas en la cuenca media del río Piura, provocando caudales muy elevados, especialmente en la zona urbana de la ciudad (ver Tabla 10).

Tabla 10. Precipitaciones acumuladas de la cuenca del río Piura entre diciembre de 1997 y mayo de 1998.

Estación	Precipitaciones (mm)
Miraflores	2031.4
Mallares	1765.2
Chulucanas	3410.1
Tambogrande	3949.6
Ayabaca	1659.2
Tumbes	2453.5
Talara	1315.3
Paita	910.8
Sechura	1040.2

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

La estación Miraflores en la ciudad de Piura se considera la estación clave de las precipitaciones (P^{max}_{24h}): de la cuenca. El análisis estadístico (distribución Log-Normal con 3 parámetros) llega a los valores presentados en la siguiente Tabla 11 para el periodo de retorno de las precipitaciones:

Tabla 11. Periodos de retorno de las precipitaciones (distribución Log-normal con 3 parámetros, estación Miraflores).

Periodo de retorno [años]	P^{max}_{24h} [mm]
10	62
25	106
50	147
100	196
200	230
500	275

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

6.4.2 Avenidas. Las estaciones más importantes para la medición de las precipitaciones y los caudales son las de Chulucanas (puente Nácara), Tambogrande y Piura (puente Sánchez Cerro). Según los registros obtenidos desde 1926, el régimen de flujo que presenta el río Piura es muy irregular y depende directamente de la ocurrencia del Fenómeno El Niño y las precipitaciones.

En la estación hidrológica del puente Sánchez Cerro, los caudales varían entre $0 \text{ m}^3/\text{s}$ y más de $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ ($4424 \text{ m}^3/\text{s}$) como resultado del Fenómeno El Niño 1997/98 (ver Figura 26 y Tabla 13).

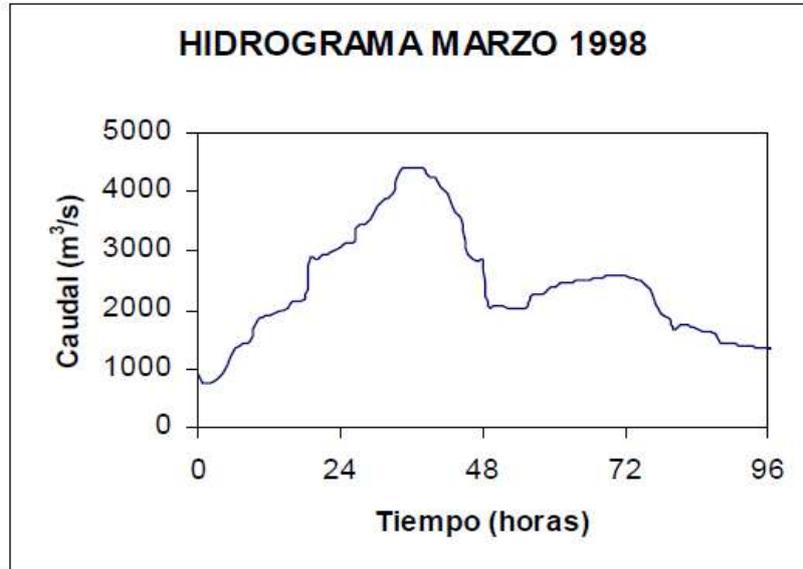


Figura 26. Hidrograma de la máxima avenida registrada en la presa de Los Ejidos en el mes de marzo de 1998, entre los días 10 (21:00 horas) y 14 (21:00 horas).

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

En el año 1998, la duración de la crecida estuvo comprendida entre enero y mayo, cuyos valores de descarga máxima media diaria (Q_{maxmd}) y de la descarga máxima instantánea diaria (Q_{maxid}) registrados en la estación hidrométrica Los Ejidos, se presentan en la siguiente Tabla 12:

Tabla 12. Valores de la descarga máxima media diaria y de la descarga máxima instantánea diaria registradas durante el Fenómeno El Niño 1998.

Fecha	Q_{maxmd} [m^3/s]	Q_{maxid} [m^3/s]
12/03/98	3256	4424
01/04/98	3367	3816

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

Tabla 13. Caudales máximos instantáneos del río Piura en la estación Sánchez Cerro.

Año	Q [m ³ /s]	Año	Q [m ³ /s]	Año	Q [m ³ /s]	Año	Q [m ³ /s]
1926	860	1945	220	1964	33	1983	3200
1927	610	1946	134	1965	2500	1984	980
1928	124	1947	41	1966	49	1985	112
1929	135	1948	42.5	1967	82	1986	25
1930	95	1949	1010	1968	21	1987	574
1931	450	1950	0	1969	180	1988	6
1932	1900	1951	0	1970	29	1989	845
1933	620	1952	153	1971	545	1990	6
1934	438	1953	2200	1972	1616	1991	14
1935	379	1954	44	1973	845	1992	1793
1936	390	1955	350	1974	58	1993	1042
1937	39	1956	1530	1975	272	1994	1108
1938	508	1957	1700	1976	388	1995	75
1939	1525	1958	690	1977	646	1996	101
1940	185	1959	900	1978	167	1997	638
1941	2220	1960	81	1979	74	1998	4424
1942	405	1961	88	1980	45	1999	3107
1943	2250	1962	115	1981	568		
1944	273	1963	37	1982	390		

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

El principal rango de periodos de retorno de las avenidas, considerado para el río Piura, es el intervalo entre 5 y 150 años. Dado que la inversión económica para la protección de las riberas del río podría sobrepasar largamente los daños eventuales que pudieran ocurrir en la cuenca.

Se concluye que no es recomendable aplicar avenidas de diseño con una probabilidad de ocurrencia mayor que 100 años. Por lo tanto, el periodo de retorno recomendable se encuentra entre 20 y 100 años. Se deben realizar avenidas con 25, 50 y 100 años de periodo de retorno (ver Tabla 14).

Tabla 14. Avenidas máximas para los diferentes periodos de retorno (estación de Piura – puente Sánchez Cerro)

Periodo de retorno [años]	Probabilidad de ocurrencia [%]	Qmax [m ³ /s]
25	4	2906
50	2	3773
100	1	4546

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

La Figura 27 presenta la variación en el tiempo de los distintos caudales registrados para los periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

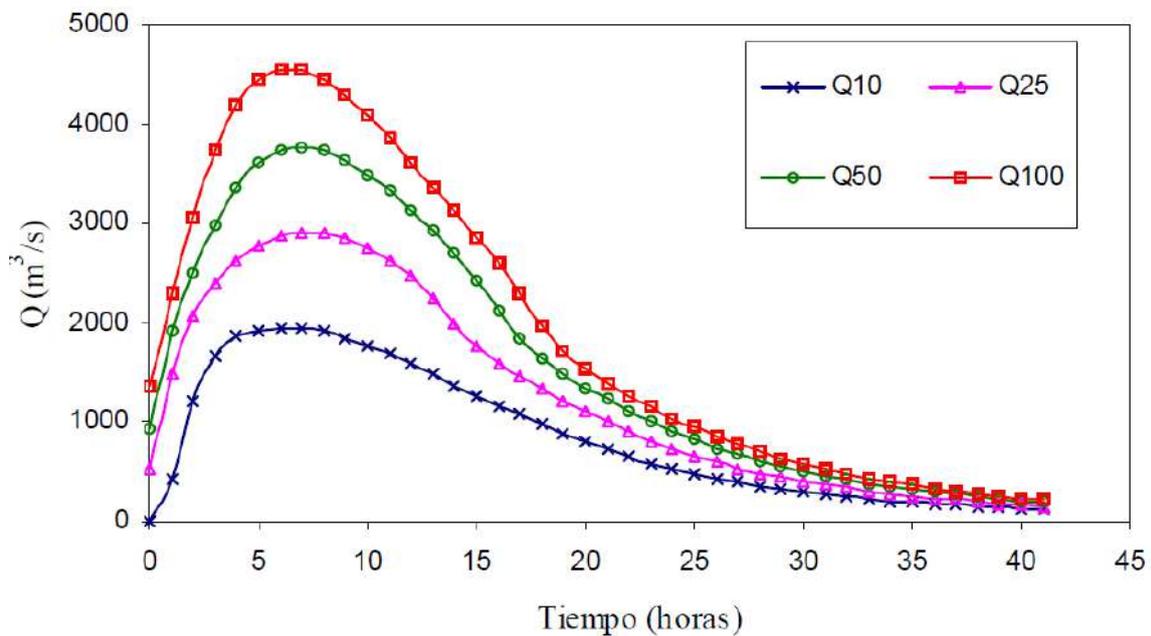


Figura 27. Hidrogramas sintéticos para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

6.4.3 Niveles de agua – Velocidad. Se ha recopilado las mediciones de caudales y niveles típicos tomados en los puentes Sánchez Cerro, Cáceres y Bolognesi durante el Fenómeno El Niño de 1997/98. Los resultados se exponen en la siguiente Tabla 15:

Tabla 15. Caudales máximos durante el Fenómeno El Niño 1997/98 (puentes Sánchez Cerro, Cáceres y Bolognesi, Piura)

Puente	Fecha	Caudal (m ³ /s)	Nivel (msnm)	Ancho (m)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)
Puente Sánchez Cerro	12/03/98	4424	29.8			
	18/03/98	1144	24.7	86	5.9	2.3
	23/03/98	2274	25.9	109	5.4	3.9
	25/03/98	1174	24.7	85	5.0	2.8
	31/03/98	2350	26.2	104	5.9	3.8
	01/04/98	3727	27.4	107	7.2	4.9
	02/04/98	2352	26.0	105	5.2	4.3
Puente Cáceres	12/03/98	4424	30.5			
	17/03/98	2491	27.7	138	8.5	2.1
	23/03/98	2219	26.7	140	6.9	2.3
	25/03/98	1324	25.0	121	5.1	2.1
	31/03/98	2289	27.1	135	6.8	2.5
	01/04/98	3650	28.6	140	8.3	3.1
	02/04/98	2352	26.7	131	6.7	2.7
Puente Bolognesi	22/12/97	308	24.7	90	3.3	1.0
	31/12/97	510	25.4	102	3.3	1.5
	09/01/98	1235	26.8	129	3.8	2.5
	18/02/98	424	24.7	105	4.1	1.0
	11/03/98	1750	27.3	126	5.2	2.7
	12/03/98	4424	27.8			

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

Se observó que el máximo nivel de agua en el puente Sánchez Cerro (cota 29.8 msnm), cuando se presentó una avenida de 4424 m³/s, fue 0.9 m menor que el máximo nivel registrado en 1983 (3200 m³/s). El caudal incrementó considerablemente, sin embargo, el nivel de agua disminuyó en lugar de aumentar, esta diferencia se debe a la erosión producida en el fondo del cauce.

En la determinación del caudal de diseño, buscar una relación entre los niveles de agua observados y el caudal registrado para el río Piura es incorrecto, ya que no existe relación alguna debido a los efectos de la erosión. Por ello se han buscado relaciones independientes de la erosión como la relación entre velocidad y caudal (ver Figura 28).

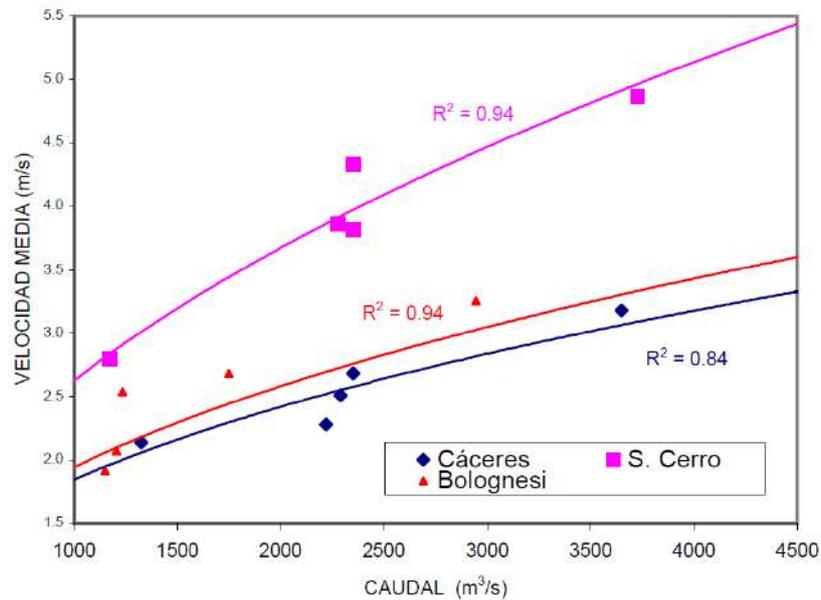


Figura 28. Relación velocidad – caudal en el tramo urbano del río Piura (puentes Cáceres, Bolognesi y Sánchez Cerro)

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

Según la Figura 28, las velocidades más altas se presentan en el puente Sánchez Cerro, con valores por encima de 4 m/s. Este puente es más angosto (110 m) en relación a los otros dos (130 m y 150 m), pero eso no explica un incremento considerable en la velocidad. La principal razón del gran incremento de velocidades es la existencia de un estrato de material muy duro, prácticamente no erosionable en la margen izquierda del río.

6.4.4 Rugosidad. La rugosidad del cauce se considera como el parámetro de calibración de los modelos hidráulicos para explicar los distintos niveles de agua con diferentes caudales. Sin embargo, no es válido usarlo en la modelación del río Piura, debido a que la incertidumbre en los niveles de agua viene establecida por la erosión.

Se adoptaron los valores característicos del coeficiente de rugosidad de Manning, expuestos en la Tabla 16. El cauce del tramo urbano está encauzado y rectificado, en su mayor parte, con una arena uniforme y poca vegetación, facilitando la estimación de los coeficientes de rugosidad.

Tabla 16. Coeficientes característicos de rugosidad de Manning (n).

Descripción	n de Manning
Llanura de inundación	0.030 a 0.040
Cauce principal	0.015 a 0.030
Talud de concreto	0.014 a 0.022

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

6.5 Geología. El tramo comprendido entre la presa Los Ejidos y el puente Integración está formado por un afloramiento de substrato posible Formación Zapallal (ver Figura 29), que constituye el basamento rocoso del cauce.

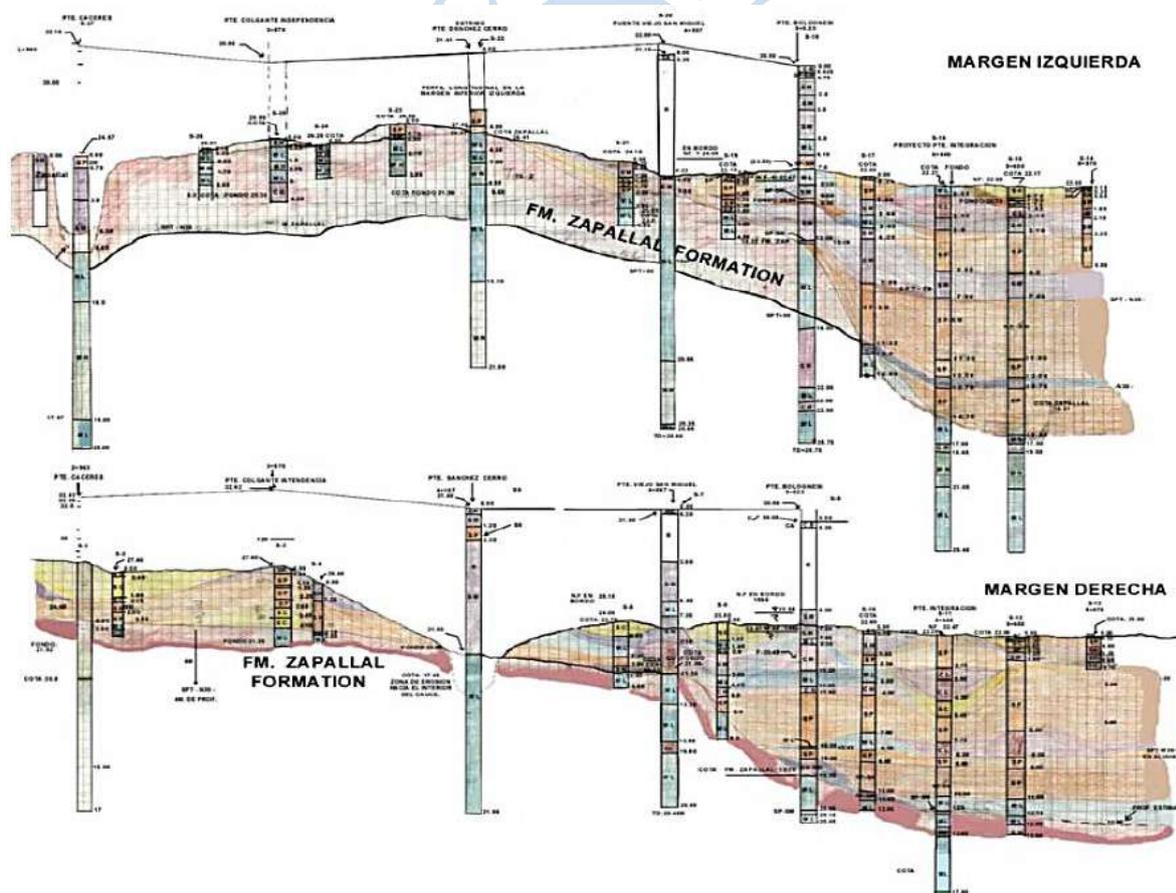


Figura 29. Perfil estratigráfico del tramo B del río Piura.

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

El estudio de calicatas del Tratamiento Integral del río Piura confirmó la presencia de limos ligeramente calcáreos, poco cohesivos. Las rocas de este tipo se encuentran meteorizadas con pronunciadas manifestaciones de oxidación, lo que determina un alto

grado de alteración que da lugar a niveles de erosión local en las riberas y erosión diferencial en el fondo del cauce.

En el tramo A (entre Los Ejidos y puente Cáceres), el basamento rocoso es aflorante y en las zonas de llanura de inundación se ubica a una profundidad de 5.50 m a 6.80 m, y llegando de 1.50 m a 0.50 m en los lugares más superficiales.

En el tramo B, la profundidad del basamento rocoso se describe en la siguiente Tabla 17:

Tabla 17. Profundidad del basamento rocoso en el tramo B del río Piura.

Estación	Profundidad del basamento rocoso [m]		
	Margen izquierda	Cauce	Margen derecha
Puente Cáceres	5.00		5.00
Puente Intendencia	0.50	1.20	3.45
Puente Sánchez Cerro	3.50	1.50	2.00
Puente San Miguel	9.50	10.50	11.25
Puente San Miguel – Puente Bolognesi	0.00		0.60
Puente Bolognesi	10.00		2.50
Puente Bolognesi – Puente Integración	10.00	14.55	14.50

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

Luego de algunos estudios, se han determinado las propiedades principales de los materiales del tramo B, expuestos en la Tabla 18:

Tabla 18. Principales propiedades de los materiales del tramo B del río Piura.

Propiedades	Tramo B
Peso específico	2.55 a 2.82
Peso volumétrico	1.56 a 2.02 gr/cm ³
Ángulo de rozamiento interno	29° a 36°
Cohesión	0.18 a 0.70 kg/cm ²
Resistencia a la Compresión Inconfinada	1.10 a 22.97 kg/cm ²
Límites de Atterberg	LL = 31.00 a 8.00 LP = 13.00 a 34.17 IP = 10.00 a 55.00
Tipos de suelos	SP, SM, SP-SM, SC, CL

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

6.6 Erosión y sedimentación. En el interior de la ciudad, el río Piura tiene una reducida capacidad hidráulica debido a la reducción de su ancho a menos de 100 m, en comparación a los más de 1000 m que presenta en la zona fuera de la ciudad. Esta capacidad depende directamente del proceso de erosión y sedimentación del río, así mismo, la capacidad hidráulica máxima se puede obtener únicamente combinada con la erosión máxima del fondo del cauce.

Ambas márgenes del río presentan erosión: la mayor observada de la margen izquierda, donde la cota de fondo llega a 15.20 msnm, y la de la margen derecha es 20.00 msnm. Gracias a estas erosiones, el río no desbordó durante El Niño de 1998, donde los caudales tuvieron un gran crecimiento desde 1485 m³/s del 9 de enero hasta 4424 m³/s del 12 de marzo, provocando un aumento de la capacidad hidráulica del cauce del río en el tramo urbano por erosión.

En el tramo urbano, el río Piura tiene las características principales de un río aluvial: se trata de un lecho constituido por partículas sueltas y de diferentes tamaños, como resultado de la erosión de la cuenca. Según la terminología internacional, se obtiene la siguiente clasificación de partículas (ver Tabla 19):

Tabla 19. Terminología internacional del tamaño de partícula.

Tamaño	Denominación
$D < 0.004 \text{ mm}$	Arcilla
$0.004 \text{ mm} < D < 0.062 \text{ mm}$	Limo
$0.062 \text{ mm} < D < 2.0 \text{ mm}$	Arena
$2.0 \text{ mm} < D < 6.4 \text{ mm}$	Grava
$6.4 \text{ mm} < D < 25.6 \text{ mm}$	Cantos
$25.6 \text{ mm} < D$	Bolos

Fuente: Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, 2000.

El tamaño de partícula y la representación del volumen, son los principales parámetros que influyen de manera significativa en el proceso de erosión y sedimentación.

El lecho del tramo urbano del río Piura es principalmente de limo y arena. El peso del material sólido es del orden $\gamma_s = 2.60 \text{ t/m}^3$. A parte del material suelto, hay presencia de material rocoso denominado Zapallal, así que se representan zonas del lecho cohesivo.

6.6.1 Principio de inicio de movimiento. La condición crítica del movimiento de fondo es uno de los problemas más complicados del análisis sedimentológico en un río. Además del número de parámetros que influyen y de las condiciones específicas de cada río, existe un consenso general que para este tipo de estudios se puede usar el estudio de Shields.

La acción de agua sobre el fondo puede caracterizarse por una tensión cortante en el fondo:

$$\tau = \frac{\tau_0}{[(\gamma_s - \gamma)D]} \quad (1.13)$$

Donde:

- τ : Tensión cortante final en el fondo [N]
- τ_0 : Tensión cortante inicial en el fondo [N]
- D : Tamaño de partículas [m]
- γ_s : Peso específico de la partícula sólida [kg/m^3]
- γ : Peso específico del flujo [kg/m^3]

La fuerza τ compara como cociente la fuerza promotora del movimiento (acción de arrastre proporcional a $\tau_0 D^2$) con la fuerza estabilizadora (peso proporcional a $(\gamma_s - \gamma)D^3$).

La tensión del fondo se expresa como:

$$\tau_0 = \gamma R I \quad (1.14)$$

Donde:

I : Pendiente motriz [m/m]

La velocidad de corte (V^*), se define convencionalmente en función de la tensión τ_0 :

$$\tau_0 = \rho^2 V^{*2} \quad \vee \quad V^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho^2}} \quad (1.15)$$

Donde:

ρ : Densidad del agua [kg/m³]

Para llegar al movimiento, la tensión adimensional debe alcanzar un valor límite de principio de movimiento, el cual depende del tamaño de la partícula, de esta manera se necesita una tensión mayor cuanto mayor es el tamaño de la partícula.

Otro parámetro que influye en este fenómeno es el grado de turbulencia, definido como el *Número de Reynolds* (Re):

$$Re = \frac{V^* D}{\nu} \quad (1.16)$$

Donde:

ν : Viscosidad cinemática [N-s/m²]

Re : Número de Reynolds [adimensional]

A mayor número de Reynolds, el movimiento es más turbulento alrededor de la partícula. Cuando $Re > 70$, el movimiento es turbulento rugoso, debido a que la altura del grano D es mayor que la subcapa límite laminar. En el movimiento

turbulento rugoso, la tensión necesaria para iniciar el movimiento o tensión crítica ya no depende de Re , sino que se expresa:

$$\frac{\tau_0}{[(\gamma_s - \gamma)D]} = 0.056 \quad (1.17)$$

El flujo turbulento rugoso aparece especialmente durante el periodo de avenidas, así que se puede establecer el límite de movimiento como:

$$\tau_0 = 0.056[(\gamma_s - \gamma)D] = \gamma RI = \gamma hI \quad (1.18)$$

En este caso como hay presencia de caudal ancho, el radio hidráulico y el tirante coinciden prácticamente ($R = h$). Así se puede determinar el tirante mínimo necesario para iniciar el movimiento del lecho, con el $D_{50} = 0.3$ mm como diámetro característico:

$$\gamma hI = 0.056[(\gamma_s - \gamma)D_{50}] \quad (1.19)$$

$$h = \frac{0.056[(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1)D_{50}]}{I} \quad (1.20)$$

$$h = 0.073 \text{ [m]} \quad (1.21)$$

Este resultado representa que en caudales normales y durante avenidas, todo el material de fondo se encuentra en movimiento. Se puede deducir que una alta fracción de material entra en suspensión dentro del seno del fluido en movimiento. Un tirante de solamente unos cuantos centímetros es capaz de poner en movimiento el material de fondo.

6.6.2 Transporte de sedimentos. Una partícula inicialmente en reposo, puede ser transportada a saltos por el fondo cuando supera el límite de movimiento, y posteriormente por suspensión en cuanto crece el río. Este último es el modo de transporte de sedimentos más importante en el cauce principal del río Piura, sostenido por la turbulencia del flujo. A medida que hay un aumento de la fuerza

y la velocidad del río, mayor es el tamaño del material del fondo que es puesto en suspensión.

Durante el Fenómeno El Niño y periodos de lluvia, el origen del material transportado puede ser del cauce o de la cuenca hidrográfica del río. A largo plazo, el material del cauce tiene también su origen en la cuenca, transportado por suspensión. Generalmente se usa un tamaño de partícula $D = 0.065$ mm como separación entre el material de origen del cauce y de cuenca, con el fin de establecer que el material superior procede del lecho y el inferior del lavado de la cuenca.

El equilibrio del transporte de sedimentos está definido por los parámetros de caudal líquido y sólido, pendiente del río y el tamaño de partícula. En el caso del río Piura, estos parámetros presentan una variación importante en espacio y tiempo, entre unos m^3/s y unos miles de m^3/s . Durante avenidas, el río no tiene un equilibrio y se producen erosiones graves en el tramo urbano.

Después de las avenidas, la situación es diferente, la zona de erosión se transforma en zona de sedimentación. Debido a la morfología y condiciones hidráulicas, la erosión en los tramos A y B es más pronunciada que en los tramos C y D, que es la zona de sedimentación más pronunciada con una pendiente más reducida.

Las erosiones más importantes del río Piura, en especial del tramo urbano, son la erosión lateral, que es una erosión de orillas en tramos curvos, y la erosión en zonas de las estructuras, como los pilares de puentes.

También se puede distinguir una erosión transitoria y una permanente, tomando en cuenta la clasificación temporal de la erosión. La forma transitoria es el descenso del fondo de un cauce aluvial durante periodos de avenida. Cuando decrece la avenida, la superficie libre baja y el fondo asciende rellenando el espacio erosionado de forma transitoria.

Después de una avenida, la cota de fondo es la misma que al inicio, sin embargo, presenta un estado distinto durante la misma. La erosión transitoria puede provocar daños y colapso total de las estructuras en las riberas (las estructuras de protección) o de las estructuras en el río (los pilares de los puentes).



Capítulo 2 Modelación numérica

1 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

En esta parte de la tesis se presentan las bases de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), sobre las cuales está sustentada la presente investigación.

Se describe un marco teórico de las principales aplicaciones de CFD en la modelación y simulación de flujos; así mismo, se describen las etapas y procedimientos generales para llevar a cabo un análisis mediante CFD.

Además, se muestran los modelos y ecuaciones matemáticas en la que se basa el CFD para la simulación de flujos, así como los modelos de turbulencia y esquemas numéricos de solución más comunes que complementan el análisis.

1.1 Descripción general. La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*) es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos de fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados como reacciones químicas, combustión, aeroacústica, etc. El CFD tuvo origen en la combinación de dos disciplinas: mecánica de fluidos y cálculo numérico.

El CFD es un término genérico para esquemas numéricos que representan el flujo de masa y momentum a través de un fluido continuo (Peterson, 1999). Posee la ventaja de no requerir una etapa de calibración, ya que deriva de las ecuaciones universales que gobiernan el flujo de fluidos.

El comportamiento de un flujo dentro de un medio se puede predecir mediante la solución de las ecuaciones diferenciales parciales que representan las leyes de conservación de masa, momento y energía (Navier Stokes), las cuales son difíciles de resolver debido a la interacción entre partículas y su geometría, lo que da lugar al surgimiento de la CFD como herramienta de solución a dichos problemas.

Actualmente con la existencia de supercomputadoras, los procesos necesarios para resolver dichas ecuaciones se realizan en poco tiempo con la aplicación de CFD, siendo una herramienta efectiva y de gran potencial.

Las principales áreas de aplicación la conforman la industria automotriz (diseño de autos aerodinámicos), la aeronáutica (diseño de aviones) y la mecánica en general (diseño de turbo-bombas, álabes, motores, radiadores, etc.).

A continuación, en la Tabla 20 se presentan ventajas del uso de la simulación mediante CFD frente al método experimental para el análisis de fluidos.

Tabla 20. Experimentación vs Simulación

Experimentos	Simulación en CFD
<ul style="list-style-type: none"> • Se realiza un solo experimento a la vez. • Se analiza en un número de puntos limitados y a instantes de tiempo específicos. • Dirigido a un modelo escalado de laboratorio. • Dirigido a un número delimitado de problemas y condiciones de operación. • Costoso. • Lento. • Secuencial. • Para un solo propósito. • Errores comunes de medición, distorsiones de flujo por las probetas, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se pueden realizar diversas simulaciones con diversidad de ambientes. • Alta resolución en espacio y tiempo. • Dirigido a un dominio actual de flujo. • Se virtualiza cualquier problema y condiciones de operación reales. • Económico. • Rápido. • Paralelo. • Multipropósito. • Errores comunes de modelamiento, discretización e implementación.

Fuente: Bayona, Londoño, & Nieto, 2015.

En ingeniería, la aplicación de la CFD se encuentra en la mecánica de fluidos, principalmente en el estudio del comportamiento de un fluido dentro de un medio: simular difusión y convección de sustancias fluidas en los diferentes ambientes, simular hidrodinámica y hemodinámica, probar y desarrollar proyectos de sistemas propulsivos y de generación de energía, etc.

Su uso en el estudio de los fluidos garantiza resultados confiables. Por ello se puede llevar a cabo la implementación y diseño de componentes de un sistema para mejorar su funcionamiento. Además, se logra visualizar el comportamiento de un fluido y predecir los patrones de flujo presentes en un sistema.

La CFD cuenta con la ventaja de poder manipular a conveniencia cada componente del medio en estudio y sus condiciones de operación, esto con ahorro de dinero, tiempo y esfuerzo.

Algunas desventajas de la simulación mediante CFD es que nunca son 100% precisas debido a que en los datos de entrada puede haber muchas asunciones o imprecisiones, el modelo matemático del problema puede ser inadecuado y la precisión de los resultados pueden ser limitados por la capacidad computacional disponible.

1.2 Algoritmos numéricos CFD. Los algoritmos que utiliza CFD son estructurados alrededor de algoritmos numéricos que pueden abordar los problemas de flujo de fluido (Bayona, Londoño, & Nieto, 2015).

Estos algoritmos numéricos son:

I. SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*)

Este algoritmo es el más sencillo, es esencialmente un procedimiento de suposición y corrector para el cálculo de la presión. El método se ilustra al considerar las ecuaciones de equilibrio laminares bidimensionales de flujo en coordenadas cartesianas (Versteeg & Malalasekera, 2007).

II. SIMPLER (*SIMPLE Revised*)

Este es una versión mejorada del algoritmo SIMPLE. Aquí la ecuación de continuidad discretizada es usada para derivar la ecuación discretizada de la presión, en vez de usar una ecuación de corrección de la presión como en el algoritmo SIMPLE. Por lo tanto, se obtiene directamente un campo de presiones intermedias sin el uso de alguna corrección. De esta manera se obtiene la corrección de presiones necesaria para la corrección de la velocidad. (Versteeg & Malalasekera, 2007).

III. SIMPLEC (*SIMPLE-Consistent*)

Este algoritmo sigue los mismos pasos del algoritmo SIMPLE, la única diferencia es que en SIMPLEC se manipulan las ecuaciones de momento de manera que las ecuaciones de corrección de velocidad en SIMPLEC omiten términos que tienen menos importancia que en SIMPLE. (Versteeg & Malalasekera, 2007).

IV. PISO (*Pressure Implicit with Splitting of Operators*)

Es un procedimiento para el cálculo de la presión y la velocidad desarrollado originalmente para el cálculo no iterativo de los flujos compresibles inestables. Ha sido adaptado satisfactoriamente para soluciones iterativas en flujos compresibles inestables. PISO envuelve un paso predictor y dos pasos correctores; y puede ser vista como una extensión de SIMPLE, con un paso corrector más para mejorarlo. (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Los códigos de CFD son estructurados alrededor de algoritmos numéricos que pueden abordar problemas de flujo de fluido. Estos códigos contienen tres elementos principales: pre-procesador, procesador y post-procesador.

1.3 Procesos de cálculo CFD. Según López (2015), la preparación de los modelos virtuales en CFD implica 3 etapas generales: Pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento.

Durante el pre-proceso se establece las condiciones de análisis y la malla tridimensional a trabajar, en el proceso se realiza la resolución del problema mediante diferentes métodos y algoritmos de cómputo, y en el post-proceso se revisa e interpreta los reportes de los resultados.

El proceso general para el uso y aplicación de un análisis mediante CFD, recomendado por la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA), en el archivo *NPARC Alliance Verification and Validation*, consta de las siguientes etapas específicas, agrupadas en tres etapas generales:

- *PRE PROCESAMIENTO*

A. Formulación del problema

Etapa donde se describe el objetivo del análisis con las rutas más sencillas para poder alcanzarlo, la geometría que será analizada, si pertenece a un todo o si se puede trabajar de forma aislada. Se analiza la necesidad del dimensionamiento espacial, si se requiere un modelo de análisis unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D).

Además, se debe especificar la temporalidad del fenómeno en estudio, es decir, realizar un análisis de flujo en estado estacionario o transitorio, incluyendo la naturaleza viscosa del flujo (no viscoso, laminar o turbulento).

B. Modelo geométrico y el dominio del fluido

Se refiere al cuerpo sobre el cual el flujo será analizado y modelado, comúnmente se requiere de una herramienta de dibujo de CAD (Diseño asistido por computadoras) para poder definir la geometría. Al establecer la geometría, se deben considerar simplificaciones al mismo para permitir un esfuerzo de análisis óptimo y razonable; de esta forma, se delimita la extensión del dominio finito de la geometría.

Algunas zonas de la frontera del dominio coinciden con las superficies del cuerpo geométrico; otras son fronteras libres por donde el flujo entra o sale.

La geometría y el dominio del flujo son modelados de tal forma que provean las condiciones óptimas que beneficien en la generación de la malla computacional.

C. Establecimiento de las condiciones iniciales y de frontera

En esta etapa, se requiere especificar las condiciones físicas en las fronteras de dicho dominio establecido. La simulación generalmente empieza de una solución inicial, y esta usa un método iterativo para alcanzar la solución final del campo de flujo

D. Generación de malla

El dominio del fluido es discretizado en una malla o cuadrícula a través de elementos o volúmenes finitos. La generación de la malla implica la definición de la estructura y topología; posteriormente, la generación de la cuadrícula de dicha topología.

La malla debe poseer una mínima calidad en su cuadrícula, la cual se define con parámetros de ortogonalidad. Es importante tomar en cuenta la calidad de la malla en zonas donde se requiera ver los fenómenos de capa límite, donde se deben considerar los espesores muy finos.

E. Establecimiento de estrategias de simulación

Las estrategias para realizar una simulación implican la determinación de aspectos como los pasos de espacio o pasos de tiempo, los cuales se refieren a la evolución de la propiedad principal dependiente (temperatura, velocidad, densidad, presión, concentración, etc.) a través de las dimensiones independientes (tres coordenadas espaciales y el tiempo).

Otras estrategias de simulación se refieren a la elección del modelo, es decir, si es un modelo turbulento (flujos con esfuerzos de Reynolds significativos) o químico (procesos que incluyan reacciones químicas), así como la elección de algoritmos.

F. Establecimiento de parámetros de entrada

Un código CFD requiere de un archivo de entrada creado a partir de una lista de valores de parámetros de entrada, que sean consistentes con la estrategia planteada. Además, se requiere de un archivo de malla que contenga la estructura de la malla en sí unida a la información de las condiciones de frontera, para generar una solución inicial del flujo y posteriormente solucionar el dominio completo.

- *PROCESAMIENTO*

G. Realización de la simulación

La simulación se lleva a cabo con diversas opciones para el procesamiento interactivo o por secciones. Esto se realiza con el fin de lograr la obtención de un tiempo óptimo en la generación de la solución, de esto depende la capacidad computacional disponible.

H. Monitoreo de la simulación

El monitoreo de la solución, mientras la simulación está en proceso, se realiza con el objetivo de determinar si se ha obtenido una convergencia, denominada convergencia iterativa. La base principal de la convergencia está en lograr minimizar el error de solución mediante un número determinado de iteraciones, y por otro lado, satisfacer con la igualdad en los modelos matemáticos planteados con una mínima diferencia de error.

- *POST PROCESAMIENTO*

I. Post-procesamiento para obtención de resultados

El post-procesamiento incluye la obtención de las propiedades del flujo (empuje, sustentación, resistencia, velocidad, turbulencia, etc.) deseadas del campo de flujo analizado y calculado computacionalmente.

J. Comparación de resultados

Las propiedades del flujo calculadas son comparadas con resultados analíticos, computacionales, o estudios experimentales para establecer la validez de los resultados obtenidos.

K. Análisis de sensibilidad.

La sensibilidad de los resultados obtenidos es examinada para comprender las posibles diferencias en la exactitud de los resultados y la realización de la simulación con respecto a parámetros como: dimensiones, condiciones del flujo, condiciones iniciales, estrategia de los pasos, algoritmos, topología y densidad de la malla, modelo de turbulencia, modelo químico, modelo de flujo, viscosidad, condiciones de frontera y sistema computacional. Se debe considerar unas repeticiones en el proceso de simulación hasta llegar a una sensibilidad satisfactoria de los parámetros antes mencionados.

L. Reporte de resultados

Etapa final donde se reportan los resultados obtenidos en el análisis, incluyendo la descripción de los pasos antes mencionados.

Con lo expuesto se garantiza que un análisis CFD tenga un sustento teórico que garantice la fiabilidad y validez de los resultados obtenidos en cualquier etapa de la simulación. A pesar de que el listado anterior es una guía para el desarrollo de un análisis CFD, estos pasos son un fundamento válido y sugerido para lograr resultados que sean fieles representantes del fenómeno físico a simular.

2 Fundamentos de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Este segmento se refiere a las Ecuaciones Generales de la Mecánica de Fluidos, las cuales gobiernan el equilibrio y movimiento de los fluidos considerados incompresibles, así como su interacción con los contornos sólidos que conforman el dominio de estudio o volumen de control (Monge, 2017).

2.1 Definiciones generales de la CFD. Los fluidos se dividen en dos tipos debido al comportamiento reológico, el cual describe a un fluido en torno a su deformación.

– *Fluidos Newtonianos*

El esfuerzo cortante es linealmente proporcional a la deformación, como ejemplo: agua, gasolina.

Se enuncia de forma matemática de la siguiente manera:

$$\tau' = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (2.1)$$

Donde:

τ' : Esfuerzo cortante [N/m²]
 μ : Viscosidad dinámica [N-s/m²]
 $\frac{\Delta u}{\Delta y}$: Gradiente transversal de velocidad entre una capa relativa a una capa adyacente [adimensional]

– *Fluidos no Newtonianos*

El esfuerzo cortante no es linealmente proporcional a la deformación, como ejemplo: sangre, fango, pasta. Además, estos fluidos no se comportan de acuerdo a la ecuación 2.1.

La Figura 30 ilustra detalladamente la diferencia reológica de los fluidos, donde se puede apreciar la diferencia entre fluidos newtonianos y fluidos no newtonianos.

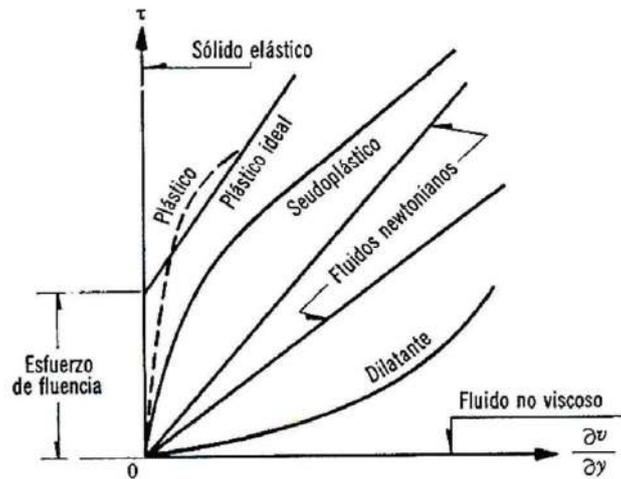


Figura 30. Comportamiento reológico de los fluidos.
Fuente: Monge, 2017.

2.1.1 El fluido como medio continuo. Debido a la gran cantidad de moléculas existentes en un volumen de fluido, la distancia entre ellas es considerada relativamente corta, por lo que se supone al fluido como un medio continuo sin espacios vacíos entre moléculas.

La mayor parte de problemas de ingeniería presentan cálculos sobre una masa de fluido o “Volumen de control” y no solo sobre una partícula, de modo que las propiedades del fluido pueden considerarse como variables continuas en el espacio y tiempo.

2.1.2 Sistema o volumen de control. Con frecuencia en la mecánica de los sólidos, se trabaja con un sistema (también llamado sistema cerrado), que se define como una cantidad de materia de masa fija. En la dinámica de fluidos es más común que se trabaje con un volumen de control (también conocido como sistema abierto).

Volumen de control se refiere a una región en el espacio donde se realizará el estudio, el cual está definido por una frontera y sus alrededores. Estos pueden tener fronteras fijas o móviles (superficies de control), también pueden moverse y deformarse durante un proceso, todo depende del fluido a estudiar. Para este proyecto se considera volúmenes de control abiertos donde el fluido entra y sale continuamente, además, de forma y tamaño fijos.

Las ecuaciones de la mecánica de fluidos, tales como, conservación de masa, cantidad de movimiento y ecuación de energía, describen la interacción del volumen de control (VC) con sus alrededores.

La siguiente ecuación representa las propiedades del fluido dentro del volumen de control:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho n^* \partial \Omega + \int_{VC} \rho n^* \vec{V} \cdot \vec{n} \partial A \quad (2.2)$$

Donde:

- n^* : Propiedad intensiva [Cantidad de la propiedad por unidad de masa].
- \vec{n} : Vector normal exterior unitario de la velocidad.
- N : Propiedad extensiva [Cantidad total de masa, cantidad de movimiento, energía en un instante de tiempo].

En la ecuación 2.2, el primer término de la derecha representa la razón de cambio respecto del tiempo del contenido de N en el volumen de control. El segundo término representa la razón neta del flujo de salida de N a través de toda la superficie de control.

2.1.3 Enfoques Lagrangiano y Euleriano. Hay dos formas de analizar y describir el movimiento de un fluido:

- *Enfoque Lagrangiano*

El enfoque Lagrangiano identifica una pequeña masa de fluido de un flujo, denominada partícula fluida, y determina la evolución temporal de las magnitudes de todas y cada una de las partículas del fluido.

Matemáticamente las magnitudes se consideran en función de la posición inicial de la partícula del sistema (X_0) y del tiempo (t).

Por ejemplo, en cinemática $r(X_0, t)$:

- Fijando t : $r(X_0, t)$ proporciona la posición de todas las partículas en ese instante.
- Fijando X_0 : $r(X_0, t)$ proporciona la evolución temporal de la posición de la partícula que en $t = 0$ tiene las coordenadas X_0 . (ver Figura 31)

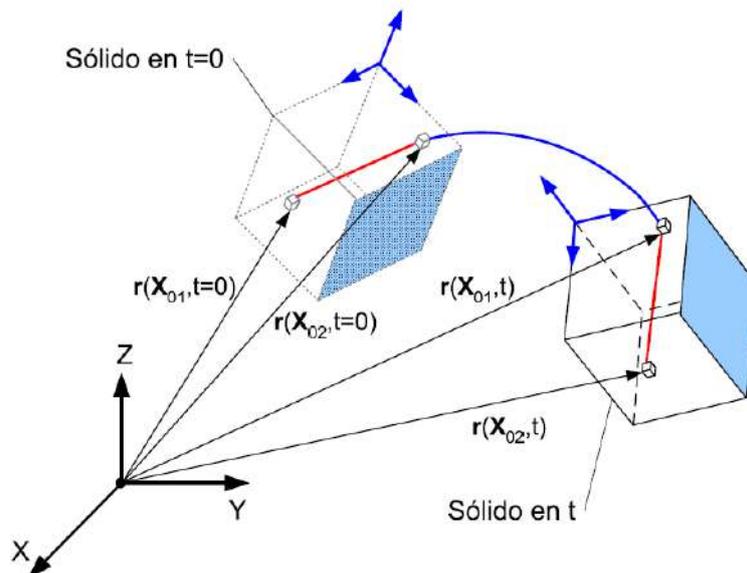


Figura 31. Análisis Lagrangiano en la cinemática de un sólido rígido
Fuente: TECNUN, 2007.

El enfoque Lagrangiano proporciona buenos resultados en el análisis del movimiento de sólidos rígidos (Mecánica del Sólido Rígido), pero no ocurre lo mismo en el análisis del comportamiento del flujo de un fluido.

Desde un punto de vista práctico, el análisis se centra en describir el flujo en una determinada región del espacio (Dominio de Flujo o Volumen de control V.C.). Una partícula de fluido no tiene interés si no se encuentra en el V.C.

Además, el movimiento del fluido presenta grandes deformaciones y las partículas tienen movimiento relativos complejos, y no aceptan una reducción de grados de libertad GDL (ver Figura 32)

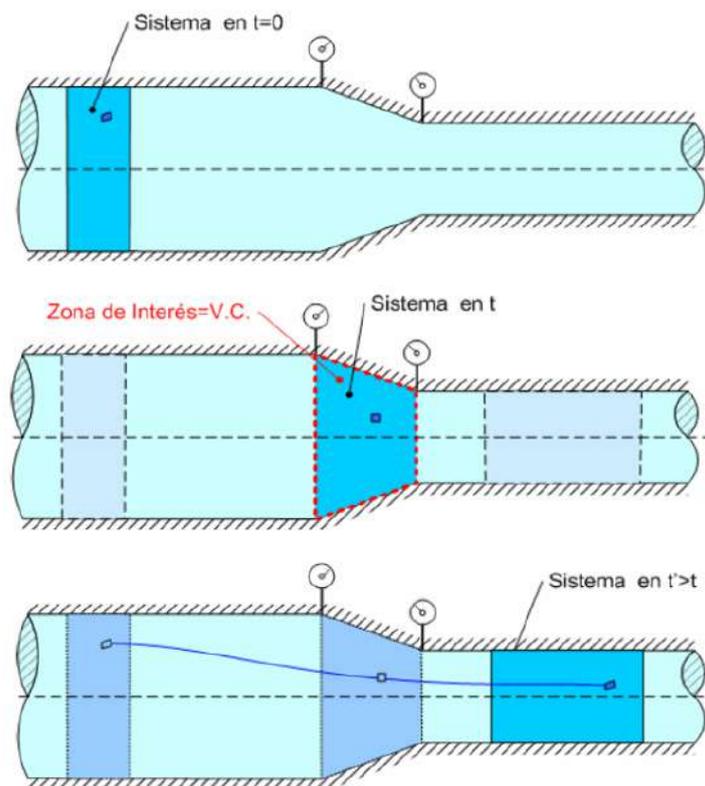


Figura 32. Análisis del flujo con enfoque Lagrangiano
Fuente: TECNUN, 2007.

- *Enfoque Euleriano*

El enfoque Euleriano estudia el flujo a partir de un volumen de control fijo, considerando la cantidad de flujo que entra y sale. La solución de este método es el valor de las magnitudes de las partículas de fluido (sistema) que en cada instante (t) están ocupando el V.C.

Matemáticamente las magnitudes que se analizan son funciones de la posición en el V.C. (x) y del tiempo (t). Por ejemplo, en cinemática $v(x, t)$:

- Fijando t: $v(x, t)$ proporciona la velocidad de todas las partículas que en el instante t están ocupando el V.C.
- Fijando x: $v(x, t)$ proporciona la velocidad de la partícula que en cada instante está ocupando la posición x en el V.C. (ver Figura 33).

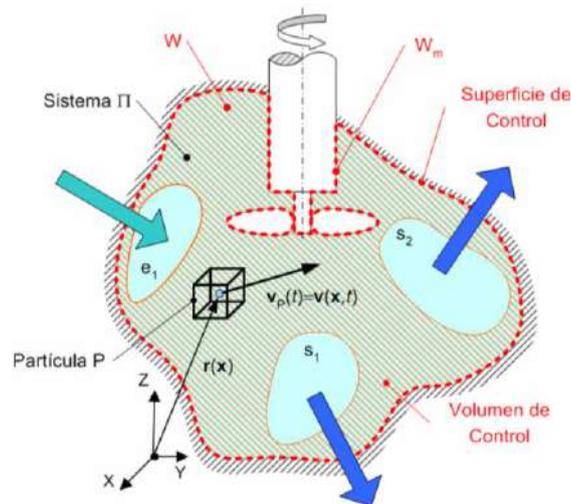


Figura 33. Análisis del flujo con enfoque Euleriano.
Fuente: TECNUN, 2007.

La Figura 34 presenta algunos problemas representativos de mecánica de fluidos donde interviene el enfoque Euleriano.

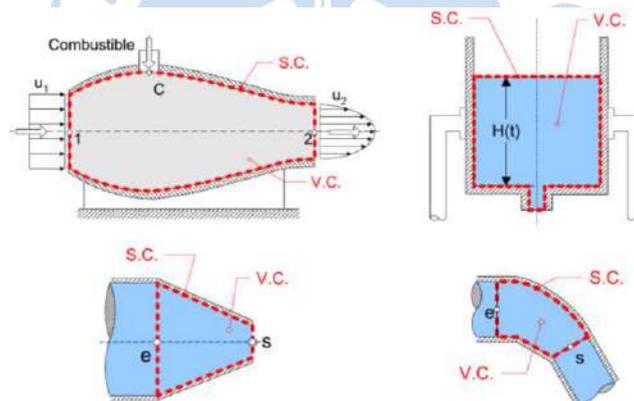


Figura 34. Ejemplos de problemas de flujo con enfoque Euleriano.
Fuente: TECNUN, 2007.

En conclusión, el enfoque Euleriano es adecuado y permite obtener resultados sobresalientes en el análisis de flujos de fluidos.

La mayoría de software de CFD usa el enfoque Euleriano (ANSYS, ABAQUS, OPENFOAM, FLOW-3D, etc.), es decir se basan en la creación de un volumen de control en el cual es generada una malla (discretización) analizando el flujo que entra y sale (condiciones de frontera). Sin embargo, existen unos pocos softwares que tienen el enfoque Lagrangiano (análisis de partículas) y uno de los que más destaca en ese enfoque es el XFlow (NAVIER.SXYZ, 2017).

El software de enfoque Lagrangiano no requiere generar una malla, lo cual simplifica el desarrollo de la simulación, debido a que la creación de la malla es la parte más importante en el proceso tradicional de una simulación. No obstante, existen discrepancias sobre la precisión de resultados y la inestabilidad usando dicho enfoque.

2.1.4 Régimen de flujo. Según el comportamiento del fluido, puede ser:

– Flujo estable

En CFD, es aquel que luego de la convergencia, el campo de flujo se mantiene fijo, es decir, las variables no cambian con el tiempo.

– Flujo inestable

En este tipo de flujo, las características en un punto determinado, son variables con el tiempo, pero pueden ser cíclicas.

– Flujo laminar

Las partículas se desplazan siguiendo trayectorias paralelas, formando así en conjunto capas o láminas, de ahí su nombre. El fluido se mueve sin que haya mezcla significativa de partículas de fluido vecinas. Este flujo se rige por la ley que relaciona la tensión cortante con la velocidad de deformación angular.

– Flujo turbulento

Este tipo de flujo, debido a los gradientes de flujo cortante, es un flujo caótico y varía de forma constante. La forma para determinar si un flujo es turbulento es mediante el número Reynolds.

3 Modelos y ecuaciones de la dinámica de fluidos computacional

Los modelos de CFD están basados en las ecuaciones de conservación de masa, energía y momentum, las cuales se derivan de las ecuaciones de movimiento de Navier-Stokes.

Siempre que el flujo presente un régimen turbulento, dichas ecuaciones deben ser promediadas sobre un pequeño incremento de tiempo aplicando una descomposición de Reynolds, del cual se obtiene buenos resultados en ciertas ecuaciones y modelos que describen la energía de turbulencia presente en el flujo.

La CFD se basa en dichas ecuaciones para predecir el comportamiento del flujo, considerando cualquier régimen en que se encuentre el mismo.

3.1 Ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones de la dinámica de fluidos de Navier-Stokes forman la teoría básica de la modelación mediante la CFD, las cuales son utilizadas para modelar los parámetros del flujo de un fluido, entre las cuales se encuentran la velocidad, temperatura y presión (López, 2015).

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de pequeños volúmenes de fluido; surgen de la aplicación de la segunda ley de Newton para el movimiento de fluidos unido con el supuesto de que los esfuerzos del fluido son la suma de un término difuso viscoso (proporcional al gradiente de velocidad), más un término de presión.

La forma general de las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas para un flujo compresible es:

- *Ecuación de conservación de masa:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

Donde:

u : Velocidad en dirección x [m/s]

v : Velocidad en dirección y [m/s]

w : Velocidad en dirección z [m/s]

t : Tiempo [s]

El primer término de la expresión representa la variación de masa por unidad de volumen y unidad de tiempo en cierto punto del espacio, y los demás términos hacen referencia a la variación de velocidad de entrada y salida de la materia en el sistema.

- *Ecuaciones de cantidad de movimiento (momentum):*

$$M_x : \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + u \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (2.4)$$

$$M_y : \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + v \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \quad (2.5)$$

$$M_z : \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + v \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (2.6)$$

Donde:

M_x : Momentum x [N.s]

M_y : Momentum y [N.s]

M_z : Momentum z [N.s]

P : Presión [N/m²]

Las ecuaciones de momentum muestran la igualdad entre la aceleración local sumada a tres términos de advección, por un lado, con un gradiente de presión adicionado a tres términos de difusión.

- *Ecuación de la energía:*

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.7)$$

Donde:

T : Cantidad de calor del fluido [j/kg-k]

λ : Conductividad térmica [w/m-k]

C_p : Calor específico del fluido [j/kg-k]

La ecuación de la energía muestra la igualdad entre la aceleración local sumada a tres términos de advección, por un lado, con una expresión de difusión del otro lado.

Considerando un flujo incompresible y de viscosidad constante, el desarrollo de las ecuaciones de momentum para un flujo tridimensional y tridireccional es:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.8)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.9)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad [m/s²]

μ : Viscosidad dinámica [N-s/m²]

La ecuación de continuidad para un flujo incompresible se define como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

Al prescindir de los términos ρ y ν , las ecuaciones quedan simplificadas a sólo cuatro incógnitas: u , v , w y p .

Las ecuaciones de Navier-Stokes son ecuaciones diferenciales parciales acopladas y no lineales, y están dentro de las ecuaciones mejor conocidas y más difíciles de las ciencias de la ingeniería. A partir de ellas se pueden obtener expresiones para casos especiales, como flujo estacionario o flujo bidimensional, omitiendo los términos adecuados.

Excepto para unos flujos especiales y muy simplificados, las ecuaciones de Navier-Stokes han sido muy difíciles de ser solucionadas desde su desarrollo original.

Actualmente, con el avance de las computadoras se ha podido dar solución a diversos fenómenos representados por estas ecuaciones, aunque técnicamente son aproximadas, muchas de ellas han resultado ser válidas.

3.2 Turbulencia. Para lograr la simulación en dinámica de fluidos computacional (CFD), se requieren en el lenguaje de programación del software ecuaciones que rigen el comportamiento de cada uno de los parámetros de un fluido.

Uno de los parámetros más característicos de los fluidos es la turbulencia, Wilcox (1994) expresa que las teorías matemáticas alrededor del modelado de fluidos fueron desarrolladas profundamente, pero aún no se había adquirido un modelado preciso para los fenómenos turbulentos debido a la complejidad del fenómeno (Bayona, Londoño, & Nieto, 2015).

La turbulencia se define como un comportamiento desordenado y caótico que depende del tiempo, presente en casi todos los flujos. Se cree que se origina debido a la inercia del fluido como un todo: la culminación de la dependencia del tiempo y aceleración convectiva. Por lo tanto, aquellos flujos que presentan efectos de inercia relativamente pequeños, tienden a ser laminares; de ahí se deriva el número de Reynolds, el cual cuantifica el efecto de las fuerzas inerciales sobre el flujo.

El número de Reynolds de un flujo expone la importancia relativa de las fuerzas de inercia (asociado con efectos convectivos) y las fuerzas viscosas. En experimentos con sistemas de fluidos se observa que:

- A valores por debajo del denominado número de Reynolds crítico Re_{crit} el flujo es suave y las capas adyacentes del fluido se deslizan entre sí de una manera ordenada.
- A valores del número de Reynolds por encima de Re_{crit} se lleva a cabo una complicada serie de eventos, lo que finalmente conduce a un cambio radical del carácter de flujo. El movimiento se convierte en intrínsecamente inestable, incluso con condiciones de contorno impuestas constantes. La velocidad y todas las demás propiedades de fluido varían de forma aleatoria y caótica. Este régimen se llama flujo turbulento (La Madrid, 2015).

La velocidad que se presenta en la Figura 35 se descompone en un valor medio constante \bar{u} con una componente fluctuante $u'(t)$. Esto es llamado la descomposición de Reynolds. Un flujo turbulento ahora se puede caracterizar en términos de valores medios de propiedades de flujo (u, v, w, p, \dots) y algunas propiedades estadísticas de sus fluctuantes (u', v', w', p', \dots).

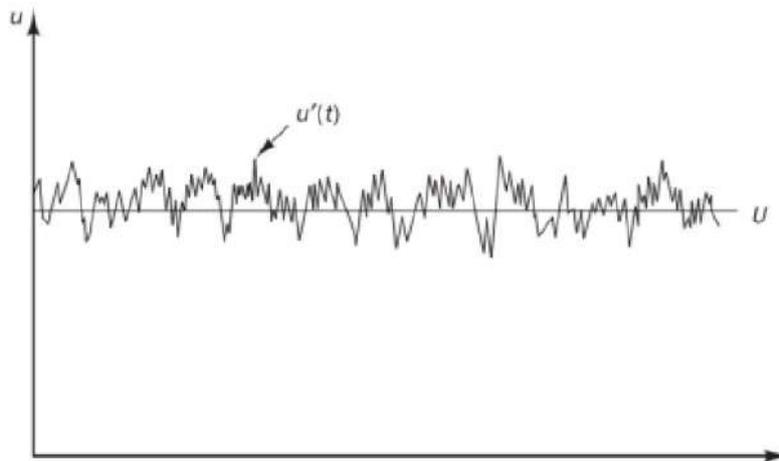


Figura 35. Valores típicos de velocidad en un flujo medio.

Fuente: La Madrid, 2015.

La turbulencia es tridimensional, dependiente del tiempo y una gran cantidad de información necesaria para resolver la mecánica del movimiento de un flujo turbulento. Debido a que estas fluctuaciones pueden ser demasiado pequeñas y de alta frecuencia,

modelarlas por métodos numéricos directamente representa un costo computacional muy alto.

Para reducir la carga de procesamiento se diseñaron modelos de ecuaciones, los cuales eliminan las escalas más pequeñas mediante un promedio basado en tiempo o en un conjunto de variables, esto da como resultado ecuaciones menos exigentes para el proceso, pero con mayor número de variables, las cuales se deben resolver con ecuaciones adicionales para encontrar el valor de las incógnitas.

Se piensa, sin total certeza, que las ecuaciones de Navier-Stokes describen la turbulencia del flujo de manera apropiada. Sin embargo, la solución numérica obtenida para flujos turbulentos presenta un elevado nivel de dificultad debido a las diferencias significativas en la escala de mezcla-longitud.

La solución estable de estas ecuaciones requiere de una discretización muy fina. Por ejemplo, en una sección de 0.1×0.1 m se tienen vórtices de 10 – 100 micrómetros de tamaño. Para ello se necesitaría contar con una malla discretizada en al menos $10^9 - 10^{12}$ puntos.

Debido a que la turbulencia depende del tiempo, para poder obtener un análisis adecuado se necesita una discretización temporal en intervalos de tiempo de aproximadamente 100 microsegundos, lo que demanda un tiempo computacional casi imposible de cubrir.

Para contrarrestar esta dificultad, al aplicar una modelación para flujos turbulentos en un esquema práctico de CFD, se utilizan ecuaciones como las RANS (Reynolds – Averaged Navier Stokes).

3.3 Modelos de turbulencia. El software de dinámica de fluidos computacional ANSYS® Academic Research Mechanical ofrece las siguientes alternativas de análisis respecto a modelos de turbulencia (Bayona, Londoño, & Nieto, 2015):

- Spallart – Allmaras
- $K - \varepsilon$ (En sus variables RNG, Realizable y Standard)
- $K - \omega$ (En sus variables Standard, y SST)
- Transition SST
- $K - kl - \omega$
- Reynolds Stress
- SAS
- DES
- LES

Los modelos de turbulencia suelen encajar en tres categorías principales según Davoudabadi (2012): DNS, SRS y RANS.

3.3.1 DNS (Direct Numerical Simulation). Modelo numérico de resolución completa de las ecuaciones de Navier – Stokes de todas las características de la turbulencia, en cualquier espacio y tiempo. El modelo DNS debe ser aplicado en geometrías muy simples y a bajos números de Reynolds, ya que para aplicaciones de ingeniería no podrán ser obtenidas soluciones numéricas de turbulencia en escalas con números relativos a Re^3 y números de Reynolds entre 10^4 y 10^9 .

Se puede hacer una idea de los recursos que consume el método numérico relativo a los que consumiría un modelo RANS con base en Menter (2011): “El orden en que el uso de CPU se reduce en los modelos RANS relativo a DNS para aplicaciones técnicas es astronómico (fácilmente alcanza una reducción de 10^{10} y más); estos modelos, entonces, no son simples “modelos” que alteran y redefinen las ecuaciones resueltas.”

3.3.2 SRS (Scale Resolving Simulation). Es un modelo mediante el cual una parte de todo el conjunto de la turbulencia es resuelto mediante métodos numéricos, y la otra parte es modelada por medio de RANS. Se ha demostrado que los modelos RANS presentan grandes ventajas en simular flujos que se encuentran unidos a las paredes, mientras que los fluidos libres o combinados sin esfuerzos cortantes son una de sus desventajas principales.

Dentro de los modelos SRS encontramos los modelos LES, DES y SAS.

El modelo LES (*Large Eddy Simulation*) por sus siglas en inglés, es un modelo el cual no ha sido muy aceptado por la comunidad que se inclina por los problemas de ingeniería y se ha mantenido como herramienta de investigación de acuerdo a Menter (2011). El modelo LES igualmente requiere mallas muy finas, mayor número de iteraciones por tiempo y su procesamiento comparado con algún modelo RANS es muy superior.

A manera de ejemplo encontramos un comparativo expuesto por Davoudabadi (2012) entre el costo computacional de un proceso realizado mediante LES y el mismo realizado bajo un modelo RANS. La Tabla 21 expuesta a continuación corresponde a los resultados de los recursos utilizados en una simulación de un fluido a través de un canal con un Re igual a 114,000.

Tabla 21. Comparación entre los modelos RANS y LES.

Modelo	Celdas	Cálculo	Duración
LES	1200000	Transigente	Días
RANS	140	Estable	Minutos

Fuente: Bayona, Londoño, & Nieto, 2015.

Las principales causas para inclinarse por el modelo LES es que puede ofrecer datos mucho más exactos que los modelos RANS y además puede dar resultados de información adicional tales como cavitación, fenómenos acústicos, interacción estructural con la respuesta en frecuencia y resultados aerodinámicos de alta precisión (Davoudabadi, 2012).

El modelo DES es una alternativa para las simulaciones SRS. Este modelo está bajo la influencia de la resolución de la malla y contiene una formulación híbrida la cual permite que el software escoja entre un modelo SRS y un modelo RANS. Este modelo ha ganado peso en la comunidad debido a su capacidad para implementarse en aplicaciones de ingeniería con relativa facilidad como manifiesta Menter (2011).

Según ANSYS Inc. (2013), los modelos DES fueron específicamente diseñados para lograr obtener resultados en simulaciones con alto número de Reynolds en flujos cercanos a paredes, y además este modelo a diferencia de LES puede seleccionar el modelo RANS adecuado en cada etapa del flujo. También argumenta que, a pesar de los beneficios del modelo, el costo computacional sigue siendo demasiado alto.

(ANSYS Inc, 2013): “Los costos computacionales, usando modelos DES, son menores que los costos computacionales de LES, pero mayores que los de RANS.”

El modelo SAS (*Scale - Adaptive Simulation*) es un modelo en el cual la densidad de la malla no afecta la formulación RANS. La simulación SAS le permite al modelo adaptarse de acuerdo a las condiciones de viscosidad Eddy. El modelo es capaz de reajustarse y proveer una formulación LES en secciones permitidas, pero así mismo en secciones donde las condiciones son propias de RANS, el modelo se mantiene bajo esas características.

3.3.3 RANS (*Reynolds – Averaged Navier Stokes*). Los modelos derivados de los modelos RANS consisten en el principio establecido por Reynolds en 1985, en el cual todas las cantidades son expresadas como la suma de las partes individuales. Esta formulación permite crear un promedio de las variables con respecto al tiempo (Wilcox, 1993).

Este proceso de promediar las ecuaciones se deriva en ventajas y desventajas con respecto al análisis de los fluidos, una de las primeras desventajas que salta a la vista es que en este proceso se eliminan los cambios propios de la turbulencia. Por otro lado, la gran ventaja que adquieren los modelos bajo esta formulación, es la facilidad para realizar gran variedad de procesos en cualquier computador hoy en día.

La ecuación de Navier – Stokes promediada adiciona incógnitas desconocidas, mayores al número de ecuaciones que se tiene, por lo tanto, es trabajo de los modelos de turbulencia RANS completar estas ecuaciones para modelar totalmente las características turbulentas de un fluido.

Se puede establecer la importancia que han ganado estos modelos en la industria, convirtiéndose en el estándar para simulaciones de aplicaciones de ingeniería en muchos campos. Según Menter (2011): “[...] si se selecciona una propiedad aplicada, los ingenieros ofrecen un balance altamente atractivo entre recursos computacionales y la precisión requerida para la mayoría de aplicaciones industriales.”

Los modelos RANS son los que se describen a continuación:

– *Spallart-Allmaras*

Es un modelo de turbulencia de una ecuación, principalmente diseñado para análisis de perfiles aerodinámicos en flujo subsónico.

Es acertado en fluidos cercanos a las paredes y ha sido probado como un buen modelo para capas límite con gradientes de presión adversos (ANSYS Inc., 2013).

Expone que, en casos de turbulencia isotrópica, la disminución en la viscosidad turbulenta representa una sobre predicción de flujo turbulento, este modelo no tiene en cuenta en sus ecuaciones la energía cinética que produce la turbulencia, por lo cual, según el ambiente de simulación, las zonas de flujo turbulento pueden presentar un mayor margen de error.

Por otro lado, según Fluent (2003), en cuestión de mallas este modelo resulta tener una buena aproximación cuando los resultados esperados acerca de fluidos turbulentos y sus afectaciones no necesitan ser de gran precisión, es por esto que una malla no tan fina se puede usar con aceptables resultados bajo este modelo, debido a su tratamiento de pared cercana.

– *Standard k – ε*

Este modelo es de dos ecuaciones que permite tener solución independiente de las escalas de longitud y la velocidad turbulenta. (ANSYS Inc., 2013). Sus ecuaciones de transporte permiten obtener los términos k y ϵ los cuales se refieren a la energía cinética y a la tasa de disipación de la turbulencia.

El modelo k - ϵ se presenta como una solución adecuada para distintas aplicaciones de ingeniería y ha sido ampliamente usado. Dentro de las ventajas de este modelo encontramos que es un modelo simple de implementar, los cálculos convergen relativamente fácil y se dan resultados coherentes para distintos regímenes de fluidos y tipos de fluidos. (Fluent Inc., 2003).

Además, según Karthik (2011), este modelo presenta algunas desventajas puntuales. Este modelo resulta no ser muy preciso para flujos en rotación, con gran separación, flujos simétricos y fluidos totalmente desarrollados en tubos no circulares.

– *RNG k – ε*

De acuerdo a ANSYS Inc. (2013), las ecuaciones de k - ϵ en este modelo han sido derivadas mediante un método estadístico riguroso de las ecuaciones de Navier – Stokes. Estas ecuaciones son similares a las de su modelo inicial. Además, analiza el efecto de ondas fluctuantes en la turbulencia (Swirl).

El modelo cuenta con ecuaciones adicionales las cuales se desarrollan para darle características al modelo, superiores a las de su modelo estándar, se tiene la ecuación de modificación del efecto de ondas fluctuantes en la turbulencia y ecuación del término Re. (ANSYS Inc., 2013).

Debido a las características de aumento de ϵ reduciendo k y además la efectividad viscosa el modelo resulta ser más certero en la evaluación de flujos deformados y de líneas de corriente curvadas (ANSYS Inc., 2013).

– **Realizable $k - \varepsilon$**

Las principales diferencias entre este modelo y su modelo original radican en que, en primer lugar, este modelo contiene una formulación distinta para analizar la viscosidad turbulenta, y en segundo lugar, para hallar la disipación de ε , el modelo ha formulado una derivación de la raíz de la fluctuación en la vorticidad (ANSYS Inc., 2013).

Al igual que en el modelo standard la ecuación que está regida bajo k , es igual en este modelo, sin embargo, la ecuación de ε es diferente y no tiene en cuenta la producción de k (ANSYS Inc., 2013).

Dentro de las ventajas de este modelo se tiene que, es especialmente preciso en flujos planos, capas límite bajo gradientes de presión extremos o separación de la misma, rotación, recirculación, y una alta curvatura de las líneas de corriente.

– **Standard $k - \omega$**

Resulta ser un modelo un poco más simplificado que el $k-\varepsilon$ en términos de la ecuación de k . Se establece una ecuación de transporte para ω y se incluyen modificaciones para análisis en bajo número Reynolds, efectos de compresibilidad y flujo cortante. En este modelo encontramos la variable ω la cual representa la tasa específica de disipación de la turbulencia (ANSYS Inc., 2013).

Karthik (2011) expone también que su comportamiento numérico es similar a los modelos $k-\varepsilon$ e igualmente se ve afectado en la predicción de turbulencia debido a que se asume la viscosidad turbulenta isotrópica.

– **SST (*Shear Stress Transport*)**

Fue diseñado para sobreponerse a las deficiencias de los otros modelos de dos ecuaciones. Es un modelo que resulta tener características combinadas de los modelos $k-\varepsilon$ y $k-\omega$ para diferentes partes del flujo. En la capa límite interna se

desarrolla mediante $k-\omega$ mientras que en la región fuera de la capa límite se maneja como $k-\varepsilon$ (Fluent Inc., 2003).

– $k - kl - \omega$

ANSYS Inc. (2013) expone que, este modelo es usado para predecir desarrollo de la capa límite y entre sus ventajas este modelo puede predecir correctamente los fenómenos de transición entre flujo laminar y turbulento. Es considerado como un modelo de tres ecuaciones, que incluye ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta, la energía cinética laminar y la tasa específica de disipación de la turbulencia.

– **RSM (Reynolds Stress Model)**

Es el modelo más completo que puede ofrecer las formulaciones RANS, este modelo deja a un lado la viscosidad turbulenta isotrópica y cierra las ecuaciones promediadas de Navier – Stokes por medio de los esfuerzos de Reynolds, además de una ecuación para la tasa de disipación (ANSYS Inc., 2013).

ANSYS Inc. (2013) establece que el modelo RSM puede ejecutar de manera más rigurosa las simulaciones de flujos curvos, rotación y con grandes cambios en la tasa de deformación. Es recomendable para la simulación de fluidos complejos.

Por otro lado, dentro de las desventajas de este modelo, ANSYS Inc. (2013) expresa que el modelado de disipación de calor y el de altos gradientes de presión, representan un mayor gasto en la capacidad computacional con respecto a modelos más simples de dos ecuaciones. Este modelo se puede limitar a flujos circulares, fluidos altamente oscilantes, flujos en cámaras de combustión y esfuerzos inducidos en ductos (Fluent Inc., 2003).

Karthik (2011) expone los costos por los cuales este modelo es el más completo de RANS, y establece que requiere de dos a tres veces más los recursos

de procesamiento en comparación con los otros modelos, y además necesita de una buena interacción entre las ecuaciones de momento y de turbulencia.

En la Figura 36, se exponen recomendaciones para el uso de los modelos de turbulencia.

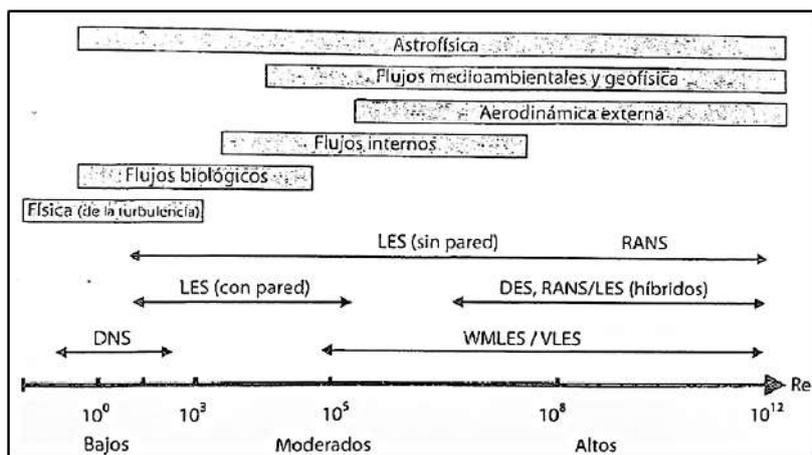


Figura 36. Recomendación en el uso de aproximaciones numéricas en relación con el número de Reynolds.

Fuente: Monge, 2017.

3.4 Ecuaciones Reynolds - Averaged Navier Stokes (RANS). Antes de trabajar con las ecuaciones de Navier-Stokes como lo hizo Reynolds para establecer ecuaciones que manejan los flujos turbulentos, se puede llegar a conclusiones de un modo más directo y obtener algunas de ellas referidas a la mecánica de este tipo de flujo utilizando el Teorema de la Cantidad de Movimiento.

Si las componentes de la velocidad y presión según el sistema de referencia cartesiano xyz son u , v , w y p respectivamente, y se está ante la presencia de un movimiento turbulento estacionario, ellas se pueden expresar como la suma de un valor medio y sus correspondientes fluctuantes en el tiempo del siguiente modo:

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.12)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (2.13)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.14)$$

$$p = \bar{p} + p' \quad (2.15)$$

Donde:

- \bar{u} : Velocidad media en dirección x [m/s]
- \bar{v} : Velocidad media en dirección y [m/s]
- \bar{w} : Velocidad media en dirección z [m/s]
- \bar{p} : Presión media [N/m²]
- u' : Velocidad de fluctuación en dirección x [m/s]
- v' : Velocidad de fluctuación en dirección y [m/s]
- w' : Velocidad de fluctuación en dirección z [m/s]
- p' : Presión de fluctuación [N/m²]

Las ecuaciones RANS son la aproximación más antigua para la modelación de la turbulencia. Un conjunto promediado de las ecuaciones de continuidad y momentum de Navier Stokes es resuelto evitando cada uno de los pequeños vórtices de turbulencia en todo el flujo; es decir, al considerar términos promediados en función del tiempo para el cálculo de las fluctuaciones turbulentas de un flujo incompresible en función de las velocidades medias, presiones medias, esfuerzos medios, etc., (descartando fluctuaciones instantáneas del flujo) se pueden calcular los procesos de turbulencia mediante las ecuaciones llamadas RANS:

- Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (2.16)$$

- Ecuaciones de cantidad de movimiento (momentum):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{u})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{u})}{\partial z} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p})}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) - \left(\frac{\partial \bar{u}'\bar{u}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'\bar{u}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'\bar{u}'}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{v})}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p})}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial \bar{u}'\bar{v}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'\bar{v}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'\bar{v}'}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}\bar{w})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{v}\bar{w})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{w}\bar{w})}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial(\bar{p})}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial \bar{u}'\bar{w}'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}'\bar{w}'}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}'\bar{w}'}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.19)$$

Las ecuaciones anteriores son similares a las de un flujo laminar, excepto por la presencia de los términos de la forma $\bar{a}'\bar{b}'$, que son términos conocidos como esfuerzos de Reynolds. Unido a ello, Boussinesq (1868) propuso que los esfuerzos de Reynolds pueden estar ligados a la tasa media de deformación.

Así se obtiene que:

$$-\rho \bar{u}'\bar{u}' = 2\mu_T \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \frac{2}{3} \rho k \quad (2.20)$$

$$-\rho \bar{v}'\bar{v}' = 2\mu_T \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \frac{2}{3} \rho k \quad (2.21)$$

$$-\rho \bar{w}'\bar{w}' = 2\mu_T \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \frac{2}{3} \rho k \quad (2.22)$$

$$-\rho \bar{u}'\bar{v}' = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right) \quad (2.23)$$

$$-\rho \bar{u}'\bar{w}' = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \quad (2.24)$$

$$-\rho \bar{v}'\bar{w}' = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} \right) \quad (2.25)$$

Donde:

μ_T : Viscosidad turbulenta [kg/m-s]

k : Energía cinética de turbulencia [J/kg]

De los términos expuestos, el lado derecho de cada ecuación es análogo a la Ley de Viscosidad de Newton, excepto por la aparición de los términos de turbulencia o viscosidad turbulenta μ_T y la energía cinética de turbulencia k .

Al igual que las ecuaciones RANS, es posible desarrollar unas ecuaciones de transporte para adaptar la cantidad de turbulencia k y otros términos de turbulencia como la tasa de disipación de la energía de turbulencia ϵ . A partir de ello, Launder y Spalding (1974) propusieron el modelo estándar de turbulencia k - ϵ , utilizado para el análisis del comportamiento de flujos turbulentos.

3.5 Modelo de turbulencia k - ϵ . Según López (2015), existen diversos modelos de turbulencia basados en dos ecuaciones. Los más populares son el modelo k - ϵ y k - ω (k -*épsilon* y k -*omega*). Para el modelo k - ϵ , ϵ representa la tasa de disipación de la energía cinética de turbulencia dentro del sistema. Para el modelo k - ω , ω representa la relación entre la tasa de disipación de la energía cinética de turbulencia y la energía cinética de turbulencia, k .

Por muchas décadas, el modelo k - ϵ Padrón ha sido empleado extensivamente para la descripción de las tensiones de Reynolds. Este modelo ofrece buenos resultados en flujos turbulentos en presencia de capas límite (i.e., placa plana, conducción circular, etc.)

Dentro de las ventajas de este modelo encontramos que es un modelo simple de implementar, baja demanda computacional y óptima convergencia para su solución, obteniendo resultados coherentes para distintos regímenes de fluidos. (Fluent Inc., 2003). Sin embargo, el modelo k - ϵ Padrón presenta dificultades de previsión de la turbulencia en flujos con elevadas tasas de deformación en media. Este puede ser el caso de algunas configuraciones de combustión turbulenta, en particular, las del tipo chorro, de expansión abrupta y zonas de recirculación.

El presente modelo ha sido seleccionado y aplicado en la presente investigación debido a su gran eficacia para la obtención de resultados, el cual consiste en las siguientes ecuaciones:

$$[k] \dots \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + (P - D) \quad (2.26)$$

$$[\varepsilon] \dots \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\varepsilon)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w\varepsilon)}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 P - C_2 D) \quad (2.27)$$

$$P = 2\mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu_T \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right]$$

$$- \frac{2}{3} \mu_T \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} \rho \mu_T k \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (2.28)$$

Donde:

$$D : \rho$$

$$k : \frac{1}{2} u''_i u''_i, \text{ con } i = 1, 2, 3$$

$$\varepsilon : \mu_T \overline{\left(\frac{\partial u_i}{\partial y_j} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial y_j} \right)}, \text{ con } i, j = 1, 2, 3; \text{ Tasa de disipación de la energía cinética.}$$

$$\mu_T : \frac{C_u \rho k^2}{\varepsilon}$$

$C_u, C_1, C_2, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$: Constantes del modelo estándar Launder and Spalding [adimensionales].

Los valores de las constantes del modelo estándar Launder and Spalding han sido alcanzados por numerosas iteraciones de ajuste de datos para una amplia gama de flujos turbulentos y son los siguientes (Mora, 2017):

$$C_u = 0.09 \quad C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad \sigma_k = 1.00 \quad \sigma_\varepsilon = 1.30$$

De las ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25; P y D son términos de producción y destrucción, respectivamente; σ y C son constantes ajustables, según datos experimentales propuestos por Launder y Spalding (1974). Este modelo se aplicó para predecir la energía cinética presente en el sistema y así garantizar su aportación a los campos de velocidad para que estos fuesen representativos del comportamiento del flujo.

3.6 Modelos multifásicos

3.6.1 Modelo Euleriano. Este modelo es conocido también como modelo multi-fluido o modelo continuo debido a que cada fase se describe de forma Euleriana, tratándose tanto a las fases fluidas (aire y agua) como a la fase dispersa (partículas) como fluidos continuos interpenetrantes, con interfases definidas adecuadamente para cada caso. Por cada fase Euleriana se requiere un juego de ecuaciones de conservación y los acoplamientos se resuelven mediante términos de transferencia de interfase (Calderon, 2013).

Este modelo es ideal para modelar fluidos con un amplio rango de concentración de partículas ya que permite capturar el efecto del acoplamiento fluido-partícula y la interacción entre las partículas, pero se limita solo a sistemas con una distribución granulométrica pequeña. Por cada tamaño de partícula es necesario incluir un juego de ecuaciones de conservación, lo que aumenta el costo computacional de manera rápida, y hace conveniente definir un tamaño representativo de partículas para utilizar este método.

3.6.2 Modelo Lagrangiano. En este modelo se mantiene una aproximación Euleriana para las fases fluidas y se resuelven las ecuaciones de movimiento de Newton para determinar la trayectoria de partículas individuales o grupos de partículas. A cada partícula se le puede dar diferentes propiedades (densidad, forma, tamaño, condiciones iniciales) y por esto este modelo es ideal para fluidos con una distribución granulométrica amplia o con diferentes tipos de partículas en suspensión a la vez.

La limitación de este modelo viene dada por sistemas con concentraciones de partículas demasiado altas, donde el acoplamiento partícula-fluido se vuelve significativo. Este efecto puede evaluarse resolviendo la fase de partículas de manera acoplada con la fase continua, pero para obtener un acoplamiento realista es necesario obtener una adecuada resolución de la distribución espacial de las partículas y la gran cantidad de trayectorias lo vuelve costoso. Además, este modelo no contempla la fracción volumétrica ocupada por las partículas para

resolver la fase continua, por lo que está limitada a fracciones de volumen menores a 10% para no perder confiabilidad de los resultados.

3.7 Modelo VOF. Según Mora (2017), la formulación VOF se basa en el hecho de que dos o más fluidos no son penetrantes. Para cada fase adicional que se agrega al modelo, se introduce una variable: la fracción de volumen de la fase en la celda computacional.

Según (ANSYS, Inc., 2013), el modelo de VOF puede modelar dos o más líquidos inmiscibles mediante la solución de un conjunto único de las 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 de chorros, 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 V.C. deben llenarse con una sola fase fluida o una combinación de fases. El modelo VOF no permite regiones vacías.
- 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. En cada volumen finito, las fracciones de volumen de todas las fases son igual

a uno. Adicionalmente los campos para todas las variables y propiedades son compartidos por las fases, los cuales representan el valor promedio, siempre y cuando la fracción de volumen de cada una de las fases se conozca. Por lo tanto, las variables y propiedades en cualquier celda dada son representativa de una de las fases, o de una mezcla de las fases, dependiendo de los valores de la fracción de volumen. Si se denota q^{th} como la fracción de volumen en una celda, es posible definir, tres condiciones que se podrían presentar en una celda.

$\alpha_q=0$ 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 las variables serán asignadas para cada volumen de control infinitesimal (celda). (Ver Figura 37)

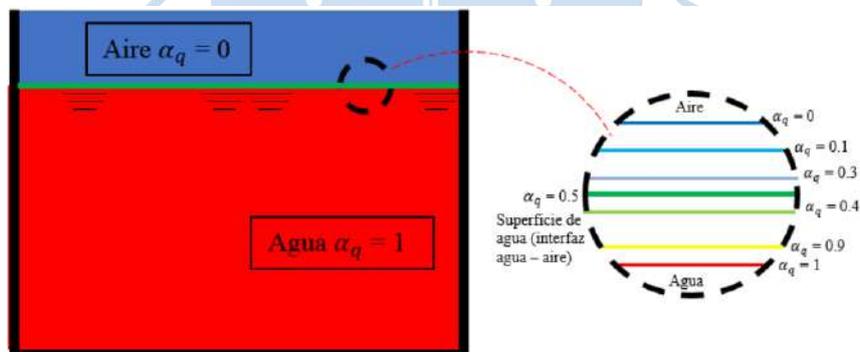


Figura 37. Distribución de la fracción de volumen en una sección transversal de un canal.

Fuente: Mora, 2017.

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

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \bar{V} \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{V}_q) \right] = S_{q_q} + \sum_{p=1}^n (m_{qp} - m_{pq}) \quad (2.29)$$

Ecuación 2.29. Ecuación para la determinación de la fracción de volumen de una celda.

Donde:

\dot{m}_{qp} : Transferencia de masa de la fase q a la fase p [kg/s]

\dot{m}_{pq} : Transferencia de masa de la fase p a la fase q [kg/s]

$\bar{\nabla}$: Operador “nabla”

\vec{V}_q : Velocidad media del flujo [m/s]

S_{qq} : Término de la fuente, usualmente es 0, pero puede ser una constante o una función definida por el usuario, la cual representa la masa extraída.

La fracción de volumen de fase primaria se calcula con base en la siguiente restricción:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2.30)$$

La ecuación de fracción de volumen se puede resolver, mediante la discretización implícita o explícita en cada iteración (para revisar las ecuaciones remítase a (ANSYS, Inc., 2013)):

- Esquema implícito: Para la discretización implícita están disponibles los esquemas de *First Order Upwind*, *Second Order Upwind*, *Compressive*, *HRIC Modificado*. Siendo uno más preciso que el otro. Pero es necesario aclarar, que a medida en que aumenta la precisión del modelo, aumenta considerablemente el costo computacional.
- Esquema explícito: Este modelo se considera apropiado cuando la modelación es dependiente 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* y *Donor-Aceptor*.

4 Modelo numérico computacional ANSYS CFX

ANSYS, Inc. (Swanson Analysis System, Inc.) crea en 1970 su primer software comercial, pero no fue hasta el 2006 que se convirtiera en unos de los líderes a nivel mundial en el desarrollo de software para simulaciones de fluidos con la compra de CFX-4 y FLUENT.

ANSYS, Inc. Se ha encargado de desarrollar y adquirir diversos códigos numéricos, de tal forma que hoy en día cuenta con la capacidad de realizar simulaciones numéricas de fluidos, estructurales, electromagnéticas, térmicas, químicas, etc.

ANSYS CFX es una herramienta usada para la modelación numérica de fluidos. Su amplia configuración permite dar una solución a diversos fenómenos naturales, entre ellos el flujo a superficie libre, advección agua-aire, flujo en tuberías, flujos Multifásicos, transferencias de calor, etc.

Además, cuenta con la plataforma de trabajo *Workbench*, la cual es bastante amigable con el usuario, allí se encuentran los diversos códigos que posee ANSYS, así como las herramientas necesarias para la creación de geometrías y mallados, necesarios previo a la configuración del CFX.

4.1 Módulo de ejecución. ANSYS CFX, así como otros códigos numéricos, se basa en un algoritmo que debe seguirse para su correcta ejecución, estos pasos se encuentran en las siguientes Figura 38 y Figura 39:

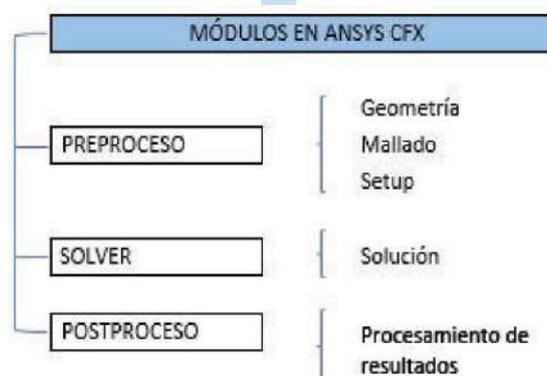


Figura 38. Algoritmo o módulos de ANSYS CFX

Fuente: Monge, 2017.

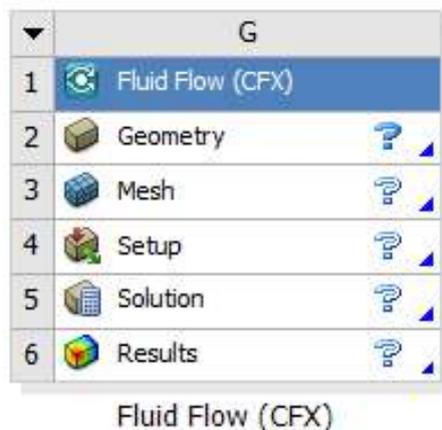


Figura 39. Esquema de módulos en ANSYS CFX
Fuente: Elaboración propia.

4.2 Pre-procesamiento. ANSYS CFX-Pre corresponde a la creación de la geometría concreta del sistema a simular; la discretización del dominio de cálculo (generación de malla); la definición de los aspectos físicos del problema (turbulencia, radiación, transferencia de materia y cantidad de movimiento, interacción entre fases, etc.); la definición de las condiciones iniciales y de contorno; y la definición de los parámetros del cálculo numérico (criterio de convergencia, intervalos de tiempo, etc).

En la Figura 39, se pueden observar los submódulos pertenecientes al Preproceso como son: *Geometry*, *Mesh* y *Setup*.

4.2.1 Geometría. La amplia variedad de códigos numéricos que posee ANSYS CFX permite realizar todo el trabajo en el mismo programa, aunque también permite importar geometrías 2D o 3D de otros programas afines, entre ellos uno de los más conocidos: AUTOCAD. El presente trabajo se realizó sólo con las herramientas disponibles de ANSYS CFX.

Las opciones disponibles de ANSYS CFX para crear geometrías son: ANSYS Desing Modeler y ANSYS Discovery Space Claim. Para el presente caso en estudio se usó el módulo Space Claim.

Discovery Space Claim es una aplicación de modelado 3D multipropósito que brinda soluciones eficientes para tareas de modelado comunes. Basado en la tecnología de modelado directo, elimina los problemas de geometría asociados

con varias operaciones de CAD en 3D, como el diseño o modelado de conceptos, la reparación de archivos CAD traducidos, la anulación general y edición completa del modelo. Con su premisa de facilidad de uso y simplicidad, es extremadamente valioso para abordar pequeños a grandes problemas de modelado.

La interfaz de usuario, la tecnología del modelado y el conjunto de herramientas versátiles de Discovery SpaceClaim permitirán crear y modificar la geometría fácilmente sin la complejidad asociada con los sistemas CAD tradicionales.

Cuando se trabaje con modelos CAD existentes, se podrá eliminar características y simplificar la geometría con herramientas automatizadas y fáciles de aprender. Discovery SpaceClaim es ideal para ingenieros que no tienen tiempo para herramientas CAD pesadas pero que desean y necesitan obtener respuestas rápidas usando 3D.

El software proporciona una única fuente de geometría para una gama completa de herramientas de simulación de ingeniería, el cual nos ayudará a crear la geometría detallada necesaria para la simulación de ingeniería, minimizar las revisiones geométricas y simplificar los análisis interdisciplinarios. El trabajo se vuelve rápido, fácil, flexible y gratificante.

4.2.2 Mallado. La malla se define como la representación discreta de la geometría que está involucrada en el problema. Asigna celdas o regiones más pequeñas en las cuales las ecuaciones que gobiernan el flujo serán solucionadas.

Las mallas se clasifican de la siguiente forma:

- **Malla estructurada:** Se identifica por su conexión regular, son muy eficientes desde que estén definidas por un arreglo de almacenamiento, no es posible implementarlas en geometrías complejas. Los posibles elementos para este tipo de malla son cuadriláteros para geometrías en 2D y hexaedros para geometrías en 3D (ver Figura 40).

- Malla no estructurada: Se identifica por su conexión irregular, las celdas que la componen están organizadas de forma arbitraria. Estas mallas generalmente emplean celdas triangulares en 2D y tetraedros en 3D (ver Figura 41)
- Malla híbrida: Contiene una mezcla de los tipos de mallas anteriormente mencionados de una forma eficiente, para las partes simples se utiliza la malla estructurada y para las partes complejas, la malla no estructurada.

En la Tabla 22 descrita a continuación se puede comparar las fortalezas y debilidades de las mallas estructuradas y no estructuradas.

Tabla 22. Fortalezas y debilidades de mallas estructuradas y no estructuradas.

Tipo de malla	Fortalezas	Debilidades
Estructurada	<ul style="list-style-type: none"> • Permite tener mayor grado de control. La malla puede ser diseñada precisamente a los requerimientos del usuario. • Las celdas hexaédricas son muy eficientes para llenar espacios, tolera un alto rango de oblicuidad y alargamiento antes de efectuar la solución • El alineamiento y organización de los elementos ayuda a obtener mejores resultados en la convergencia. Esto también ayuda a que la etapa de Post-Proceso sea más fácil. 	<ul style="list-style-type: none"> • El tiempo requerido para su elaboración es mucho mayor comparado con la malla no estructurada. • Es limitada al tipo de geometría debido a las particularidades que pueda presentar.
No Estructurada	<ul style="list-style-type: none"> • La generación automática de la malla requiere menos esfuerzo por parte del usuario. • Adecuada para aquellos usuarios con poca o sin experiencia. • Generará una malla válida para la mayoría de geometrías. • Se podrá obtener los resultados requeridos con mayor rapidez. 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de control del usuario, la malla puede no estar definida de manera adecuada en ciertas áreas de la geometría. • Los elementos tetraedrales no tienen una buena adaptación a los cambios cuando se varía su relación, lo que puede impactar en la precisión de los resultados. • La etapa de Post- Proceso requiere mayor cantidad de recursos computacionales.

Fuente: Garzón, 2014.

Teniendo en cuenta las características de la Tabla 22 se puede determinar qué tipo de malla se puede implementar en un modelo, se deben tener presentes factores como el tiempo y la calidad de los resultados que se requieren.

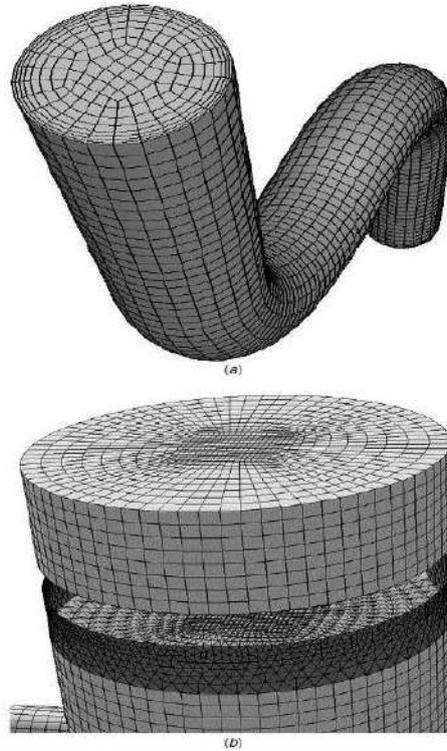


Figura 40. Tipos de estructura de mallado. (a) Malla estructurada (b) Malla no estructurada.

Fuente: Senk, 2017.

Ya identificados los tipos de mallas, se pueden distinguir los diferentes elementos que las componen y las diferencias para mallas bidimensionales y tridimensionales (ver Figura 41).

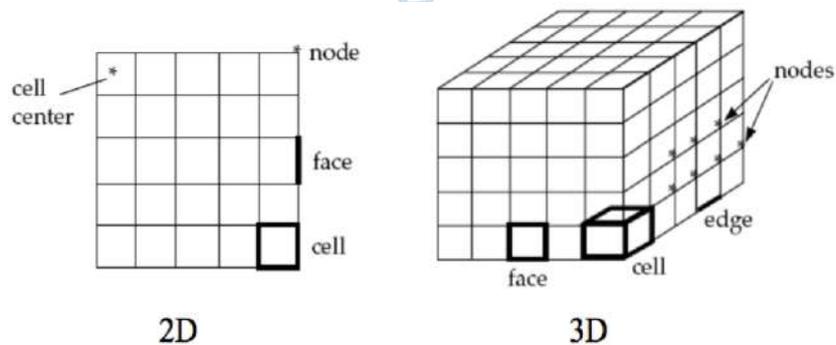


Figura 41. Identidades geométricas. (“User Programming ans Automation”)

Fuente: Garzón, 2014.

Como se puede observar en la Figura 41 una celda para un modelo 2D no es lo mismo que para un modelo 3D. Por lo que se debe tener en cuenta en la ejecución del modelo a que se hace referencia cuando aparezcan errores relacionados con el enmallado, posteriormente se podrá proceder a corregirlos.

El dominio computacional es definido por la malla que representa las regiones de interés. Una celda se puede definir como el volumen de control en el que se divide el dominio computacional. Una cara es igual a un contorno de una celda y un borde es el contorno de una cara (Aplica para geometrías 3D). Un nodo es un punto de la malla y una zona es un grupo de nodos, caras y/o celdas (Ahmadi and Nazridoust).

A continuación, se mencionan cuáles son los tipos de celdas más comunes para geometrías en 2D y 3D:

- **Para geometrías en 2D**, las formas usadas comúnmente son la triangular y la cuadrilátera. La celda triangular consiste de 3 lados y es una de los tipos de malla más simples, una malla triangular es siempre más rápida y fácil de crear. Es más común en mallas no estructuradas. La celda cuadrilátera consiste de 4 lados y es más común en mallas estructuradas (ver Figura 42).
- **Para geometrías en 3D**, las formas usadas comúnmente son las tetraédricas, hexaédricas, piramidales y prismáticas con base triangular. La celda tetraédrica se genera por defecto cuando se establece que es para una malla no estructurada, todas sus caras tienen forma triangular, generalmente tiene problemas en la convergencia. La hexaédrica tiene mayor precisión entre todos los tipos de celdas, la piramidal se usa como transición entre varios tipos de elementos que componen una malla híbrida; y la prismática con base triangular se usa para resolver la capa límite de manera más eficiente (ver Figura 42).

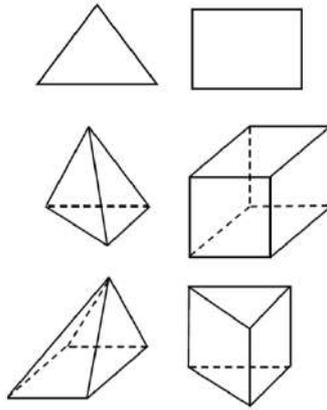


Figura 42. Celdas comunes para geometrías en 2D y 3D.

Fuente: Garzón, 2014.

Una vez obtenido el modelo geométrico (dominio computacional), se procede a discretizarlo mediante un enmallado compuesto por diferentes tipos de elementos (celdas).

Cuando se ha obtenido una solución inicial, es posible realizar un refinamiento adaptativo, ya sea a los valores de gradiente, a una región, en un volumen entre otros. Es importante mencionar que cada método divide cada celda de diferentes formas, lo que puede afectar la estabilidad y la convergencia del modelo. Para proporcionar resultados precisos CFD requiere tecnología de mallado bajo, medio y superior, para eso existen dos opciones para los requisitos de mallado CFD dentro de la solución, los productos MeshTM e ICEM.

El tamaño de mallado es importante para obtener un buen resultado, por tal razón se necesita que el refinado de la malla sea el idóneo en el área de estudio dependiendo de la precisión y la capacidad computacional del computador: A mayor número de celdas en la malla, más precisos serán los resultados de la modelación, pero a su vez, esto constituye un alto costo computacional debido a que el tiempo de cálculo aumenta con el refinamiento de la malla. La calidad de la malla puede ser determinante basada en los siguientes factores:

- **Precisión de la solución:** Una mejor calidad de la malla garantiza una solución más precisa. Para mejorar la calidad de la malla es posible que se deba refinar en ciertas áreas de la geometría donde los resultados de los gradientes se

presenten como valores altos. Esto también significa que, si la malla no está suficientemente refinada, la precisión de la solución es más limitada, de esta manera la precisión requerida va en función de la calidad de la malla.

- **Tiempo de cálculo:** Es un factor necesario e importante, pero a su vez no es deseable. Para una malla ampliamente refinada, el tiempo de cálculo será relativamente alto. Si el tiempo de cálculo es mayor indica que la solución que está siendo generada será de buena precisión, sin embargo, para la solución de una precisión y tasa de convergencia dada, mayor tiempo de cálculo requerido indica una calidad de la malla inferior.
- **Tasa de convergencia:** A una mejor tasa de convergencia, mejor calidad de la malla, esto quiere decir que la solución correcta se ha alcanzado más rápido.

Los criterios para determinar la calidad de mallado, utilizados en el presente estudio, se presentan en la siguiente Tabla 23:

Tabla 23. Criterios de evaluación de la calidad de mallado

Criterio	Descripción
Calidad Ortogonal (Orthogonal Quality)	El rango de calidad ortogonal media varía de 0 a 1, siendo el primer valor un índice de Baja Calidad y el segundo de Alta Calidad.
Calidad del elemento (Element Quality)	El rango de calidad del elemento varía de 0 a 1, siendo el primer valor un índice de Baja Calidad y el segundo de Alta Calidad.
Razón de Aspecto (Aspect Ratio)	El valor máximo de razón de aspecto media recomendada es de 5.
Asimetría (Skewness)	El rango de asimetría varía de 0 a 1, siendo el primer valor un índice de alta calidad y el segundo de baja calidad.

Fuente: ANSYS 18.0, 2016.

4.2.3 Parámetros de modelación. Todas las simulaciones se realizaron en estado estacionario, se seleccionó el modelo k- ϵ , debido a que es uno de los más comunes, implementa ecuaciones que representan correctamente las propiedades turbulentas del flujo, las cuales resuelven el término de viscosidad turbulenta.

Para el modelo multifase, se definió que iba a ser volumen de fluidos o (VOF) por sus siglas en inglés, puesto a que es el más apto para representar flujos estratificados o la superficie libre (Interacción agua y aire en el dominio de

estudio). Está diseñado para dos o más fluidos inmiscibles donde la posición de la interfaz entre estos es una zona de interés. Los parámetros de las propiedades del fluido multifásico agua-aire en un medio continuo se detallarán en el Capítulo 3.

Entre sus limitaciones se encuentra el *Solver*, el cual puede ser basado en la presión y no en la densidad y sólo hay una fase como gas ideal compresible. Al seleccionar este modelo, se deben definir cuáles son los fluidos que van a componer cada fase, hay que tener en cuenta que la segunda fase debe contener el fluido más denso. Es decir que la primera fase va a contener el aire y la segunda fase va a contener el agua.

El esquema en el que se desarrolló es el implícito porque se ajusta mejor cuando se realizan simulaciones en estado estacionario debido a que resuelve iterativamente las fracciones de volumen de la segunda fase.

4.2.4 Condiciones de contorno. Las condiciones de contorno son el punto de partida de una simulación, contienen valores preestablecidos de las variables que se solucionarán con las ecuaciones escogidas, y que se aplican en las fronteras del dominio computacional.

Las condiciones de borde se aplican al dominio físico y son absolutamente necesarias para describir el fenómeno. Al ser ingresadas de manera errónea se obtendrían resultados equivocados o es bastante probable que el programa no realice ninguna iteración. ANSYS CFX posee la ventaja de enviar mensajes de error cuando el ingreso de datos es incoherente. Los contornos en estudio necesarios para el modelo a superficie libre son: entrada, salida, paredes y superficie libre, las cuales serán detalladas en el Capítulo 3. Distintos tipos de condiciones de contorno se proponen en el código de CFD, tales como: velocidad de entrada, velocidad de salida, presión de entrada, presión de salida, rugosidad, viscosidad cinemática, energía cinética turbulenta, entre otras.

Para las condiciones de contorno declaradas como muros, se tiene en cuenta la altura de rugosidad y su coeficiente de rugosidad absoluta k [mm]. Se realizaron

variaciones en estos parámetros para que los resultados de los vectores de velocidad, fueran congruentes con los reales.

Los valores de coeficiente de rugosidad absoluta fueron elegidos en función del material encontrado en el Río Piura y el material de construcción elegido para el canal de bifurcación. Estos valores se presentan en la Tabla 24 y Tabla 25.

Tabla 24. Valores experimentales del coeficiente de rugosidad de Manning y el coeficiente de rugosidad absoluta k.

Valores experimentales <i>n</i> de Manning		
Material	Coef. Manning	Coef. Rugosidad absoluta (mm)
Canales artificiales		
Vidrio	0.010 ± 0.002	0.3
Latón	0.011 ± 0.002	0.6
Acero liso	0.012 ± 0.002	1.0
Acero pintado	0.014 ± 0.003	2.4
Acero ribeteado	0.015 ± 0.002	3.7
Hierro fundido	0.013 ± 0.003	1.6
Cemento pulido	0.012 ± 0.000	1.0
Cemento no pulido	0.014 ± 0.002	2.4
Madera cepillada	0.012 ± 0.002	1.0
Teja de arcilla	0.014 ± 0.003	2.4
Enladrillado	0.015 ± 0.002	3.7
Asfáltico	0.016 ± 0.003	5.4
Metal ondulado	0.022 ± 0.005	37
Mampostería cascotes	0.025 ± 0.005	80
Canales excavados en tierra		
Limpio	0.022 ± 0.004	37
Con guijarros	0.025 ± 0.005	80
Con maleza	0.030 ± 0.005	240
Cantos rodados	0.035 ± 0.010	500
Canales naturales		
Limpios y rectos	0.030 ± 0.005	240
Grandes ríos	0.035 ± 0.010	500

Fuente: Agüera, 2011.

Tabla 25. Valores típicos de coeficientes de rugosidad

Material	Coef. Manning	Coef. Hazen-Williams	Coef. Rugosidad absoluta (mm)
Asbesto	0.011	140	0.0015
Latón	0.011	135	0.0015
Tabique	0.015	100	0.6
Fierro fundido (nuevo)	0.012	130	0.26
Concreto (cimbra metálica)	0.011	140	0.18
Concreto (cimbra madera)	0.015	120	0.6
Concreto Simple	0.013	135	0.36
Cobre	0.011	135	0.0015
Acero corrugado	0.022	--	45
Acero galvanizado	0.016	120	0.15
Acero (esmaltado)	0.010	148	0.0048
Acero (nuevo, sin recubrimiento)	0.011	145	0.045
Acero (remachado)	0.019	110	0.9
Plomo	0.011	135	0.0015
Plástico (PVC)	0.009	150	0.0015
Madera (duelas)	0.012	120	0.18
Vidrio (laboratorio)	0.011	140	0.0015

Fuente: Heasted Methods Inc, 2002.

4.3 Procesamiento. En este módulo el programa se encarga de resolver las ecuaciones que describen el fenómeno natural mediante iteraciones, usando la configuración establecida en el Pre proceso. En la Figura 39, se puede observar el módulo *Solver o Solution*.

Mediante gráficos y tablas proporcionadas automáticamente se puede observar el avance de la solución en el transcurso del tiempo y por iteración. Por defecto se presentan tres monitores en los cuales se grafican los criterios de convergencia (Valores residuales promedio RMS o Valores residuales máximos MAX) que arrojan los resultados de las ecuaciones. También, de ser necesario el operador puede ingresar nuevos monitores a fin de observar el avance de la solución de otras variables de interés.

4.3.1 Simulación y control de convergencia. Según Villarroel (2015), cuando se definen las condiciones de contorno, se debe establecer un criterio de convergencia para todas las ecuaciones que se van a resolver, que son: Continuidad, momentum en X, Y y Z, energía cinética turbulenta y su tasa de disipación.

– Criterios para detener una simulación

La finalización de una simulación es el objetivo de la misma, considerando que se ha obtenido una malla adecuada y se han programado correctamente las condiciones iniciales y de frontera. Una simulación ha finalizado cuando ha cumplido con los requisitos impuestos por el usuario por lo que es necesario que este tenga el conocimiento adecuado sobre el tema. La finalización exige revisar la evolución de 3 parámetros fundamentales: los residuales, los imbalances y los puntos de monitoreo. Los residuales son propios de la simulación y siempre van a existir. Se originan al momento de restar los valores de las variables determinados en el tiempo anterior con sus valores en el tiempo presente. Como cada variable tiene un residuo distinto, se estudia el residuo máximo normalizado o el residuo promediado en toda la simulación.

En el programa ANSYS CFX se puede elegir entre dos tipos de finalización de la simulación mediante los residuos: finalización basada en el residuo máximo (MAX) y finalización basada en el residuo promedio de todos los volúmenes de control (RMS: Root Mean Square). Para una simulación estacionaria, el residuo MAX debe ser al menos 0.001 y el RMS de todas las variables debe ser al menos 0.0001.

Los imbalances evalúan la conservación de masa, momentum y energía a lo largo de todo el dominio de simulación. En un paso temporal se considera que la simulación es estacionaria por lo que el imbalance resulta de restar el flujo de entrada con el flujo de salida de la variable y dividirla entre el flujo máximo. En una simulación con convergencia ideal, se tiene que el flujo de entrada es igual que el flujo de salida por lo que el imbalance ideal sería 0%. Entonces, un criterio

de finalización para los imbalances de las variables de flujo es que se encuentren por debajo del 1%.

Por último, se debe evaluar la evolución de los puntos de monitoreo. En un punto de monitoreo se evalúa una variable de interés para el usuario. Puede ser la fuerza de arrastre sobre un cuerpo o la presión estática en un punto. El objetivo es reconocer una variable de interés para la simulación y monitorear su evolución en el tiempo. Si la variable de interés ha alcanzado un valor estable en el tiempo, puede concluirse que la simulación ha finalizado. Para una simulación estacionaria, de los 3 criterios de convergencia mencionados, se considerará a la evolución de los puntos de monitoreo como la más importante ya que pueden encontrarse casos donde los residuos RMS no disminuyen, pero las variables de interés ya alcanzaron una condición estable.

En cuanto a los métodos de solución, para obtener mejores resultados se utilizaron discretizaciones espaciales de segundo orden con el objetivo de garantizar mayor certeza en los resultados. ANSYS CFX propone diferentes esquemas, entre los que se encuentran SIMPLE, SIMPLEC, PISO y COUPLED; estos se utilizan dependiendo el tipo de análisis y según el caso. Para el caso de estudio se utilizó el método SIMPLE debido a que arroja buenos resultados para simulaciones hechas en estado estacionario. En la Figura 43 se puede observar un diagrama de flujo en donde se muestra el procedimiento a seguir.

Cabe destacar que en caso que los métodos de solución no sean la causa de alcanzar buenos valores de convergencia, es muy probable que se deba a la calidad de la malla, por esta razón desde un principio se recaló su importancia y por cada modificación en el modelo ya sea en la geometría o en algún parámetro de modelación, se debe tener presente este paso para lograr buenos resultados en menor tiempo.

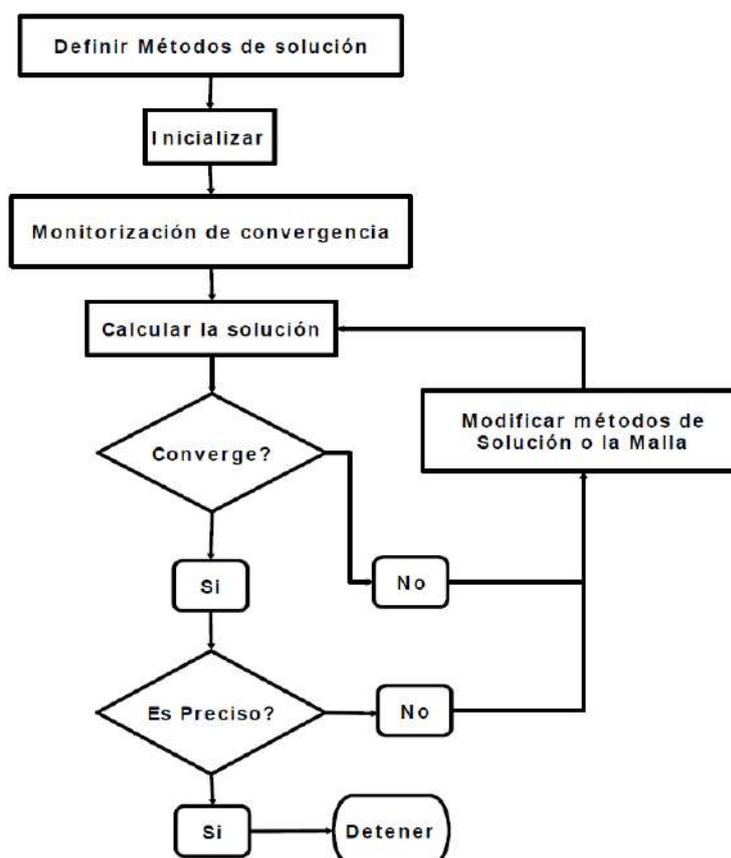


Figura 43. Diagrama de flujo de métodos de solución.

Fuente: Garzón, 2014.

4.4 Post-Procesamiento. Este módulo permite analizar los resultados de los cálculos realizados por el *Solver*, el análisis puede realizarse mediante gráficos o numéricamente de forma unidimensional, bidimensional o tridimensional según sea el caso.

En la Figura 39, se puede observar el módulo *Postproceso o Results*.

4.4.1 Análisis de resultados. Cuando se están ejecutando las simulaciones, el programa grafica el número de iteraciones contra los valores residuales; estos son las magnitudes de error para las ecuaciones mencionadas en líneas anteriores, estas se calculan mediante la diferencia entre el resultado anterior y el resultado recién calculado.

A medida que esos errores disminuyen, los resultados de las ecuaciones están cambiando cada vez menos, esto es lo que se conoce como convergencia. Si pasa lo contrario, es decir que los errores aumentan, se dice que la solución

diverge. Por este motivo, se debe corroborar que el error tenga una tendencia a disminuir hasta alcanzar valores aceptables de convergencia; cuando se cumpla esa condición, se proceden a ver los contornos de la superficie libre y los vectores de velocidad a lo largo del tramo del canal mediante gráficos presentados en el módulo *Results*. Así mismo se pueden obtener gráficos de otras variables de estudio como presiones o velocidades en cada una de las direcciones X, Y o Z.

Para los vectores de velocidad, los factores que más influyen son: la malla y los valores de coeficiente de fricción, ambos impuestos en las condiciones de contorno que se declararon como muros. Como se ha expuesto anteriormente, la malla tiene que tener una buena calidad, pero la rugosidad es un parámetro que necesita calibración.

A continuación, se presenta un esquema resumido de los pasos a seguir para desarrollar el modelo en el software ANSYS CFX, teniendo en cuenta los parámetros y herramientas utilizadas para el modelo desarrollado (ver Figura 44).

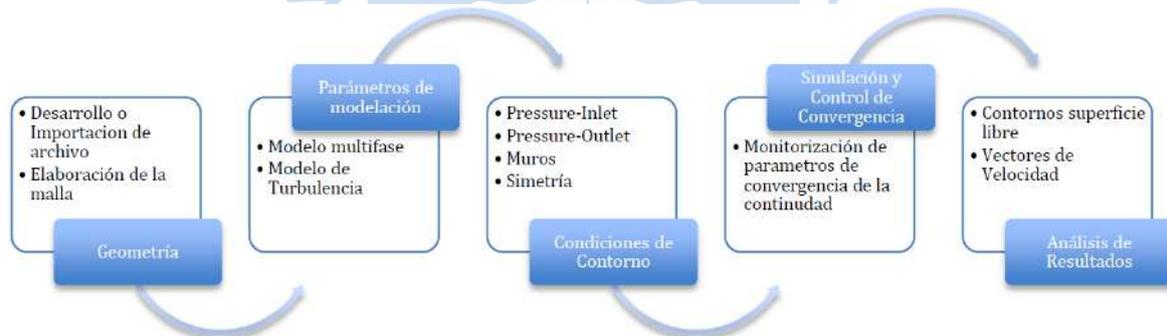


Figura 44. Esquema resumen para modelo ANSYS CFX.

Fuente: Garzón, 2014.

Capítulo 3

ANSYS CFX: Bifurcación en el tramo B del río Piura

1 Problema en estudio

1.1 Definición del problema. El problema en estudio es determinar la orientación de una bifurcación ubicada en el tramo B del Río Piura que garantice la mayor eficacia en la captación del recurso hídrico, basado en los resultados obtenidos mediante la simulación numérica en ANSYS CFX.

1.2 Objetivos. El objetivo principal del presente trabajo de tesis es determinar la orientación de una bifurcación en el Tramo B del Río Piura evaluando tres posibles alternativas de solución: perpendicular al flujo, aguas arriba y aguas abajo del río, que garantice la mejor captación y aprovechamiento del recurso hídrico para la población que, en su mayoría, no posee los recursos necesarios para la construcción de estructuras hidráulicas de gran envergadura que forman una bocatoma en su totalidad.

Así mismo, se puede exponer los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la calidad y el dimensionamiento de mallado que garantice mayor precisión en la obtención de resultados del caso en estudio.
- Evaluar las líneas de flujo, perfil de velocidades y zonas de estancamiento y depósito generadas en el volumen de control de una bifurcación.
- En el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (IHHS) se han realizado muchos trabajos bajo la modalidad de simulación numérica en programas como Open Telemac Mascared, SSIM o River 2D. El programa ANSYS ha sido utilizado para resolver una serie de trabajos relacionados a la transmisión de calor dentro del área de Ingeniería Mecánica Eléctrica, pero hasta hace poco era desconocido para el IHHS. Con el uso de este software se busca proporcionar una nueva herramienta de solución para los distintos problemas hidráulicos que se presentan en nuestra región.

2 Condiciones generales del proyecto

Las condiciones generales a tener en cuenta en la elaboración del proyecto son las siguientes:

- La bifurcación se localiza en el tramo recto del Río Piura.
- La bifurcación sólo presenta un canal de derivación en estudio que nace del río. No se ha considerado las demás estructuras de mayor envergadura que completan la bocatoma en su totalidad debido a que, en la actualidad, la mayor parte de la población no posee los recursos económicos necesarios para su construcción, por ello opta por esta medida de solución para obtener el recurso hídrico de los ríos.
- El dimensionamiento de la sección del río se realizó con medidas promedio del ancho y largo del río tomadas del tramo en estudio. Y la medida del tirante es correspondiente a uno de los caudales máximos transportados en el río Piura ($3000 \text{ m}^3/\text{s}$).
- Debido a que las dimensiones del río son muy grandes en comparación con el canal de toma, se simplificó la geometría como un gran canal rectangular de ancho y tirante constante en todo el largo.
- El canal de toma presenta una sección rectangular cuyo dimensionamiento es proporcional al caudal que se desea captar, tomando como tirante el mismo que presenta el río.
- Para nuestro caso en estudio se ha elegido un ancho típico de canales de toma construidos en las riberas de los ríos.
- No se ha tomado en cuenta la capacidad erosiva del Río Piura.
- No se ha considerado la capacidad de arrastre de sedimentos (suspensión y de fondo) del Río Piura.
- No se posee un modelo físico del proyecto a simular.
- El canal de toma en estudio es un canal artificial construido de concreto simple.

3 ANSYS Workbench

ANSYS Workbench es una herramienta de gestión de proyectos que se encarga de los archivos en el disco, además de verificar los proyectos gráficamente en una sola interface.

Workbench es una interfaz de nivel superior que une todas nuestras herramientas de software ANSYS y representa nuestra pantalla de inicio al abrir el programa desde nuestro escritorio (ver Figura 45).

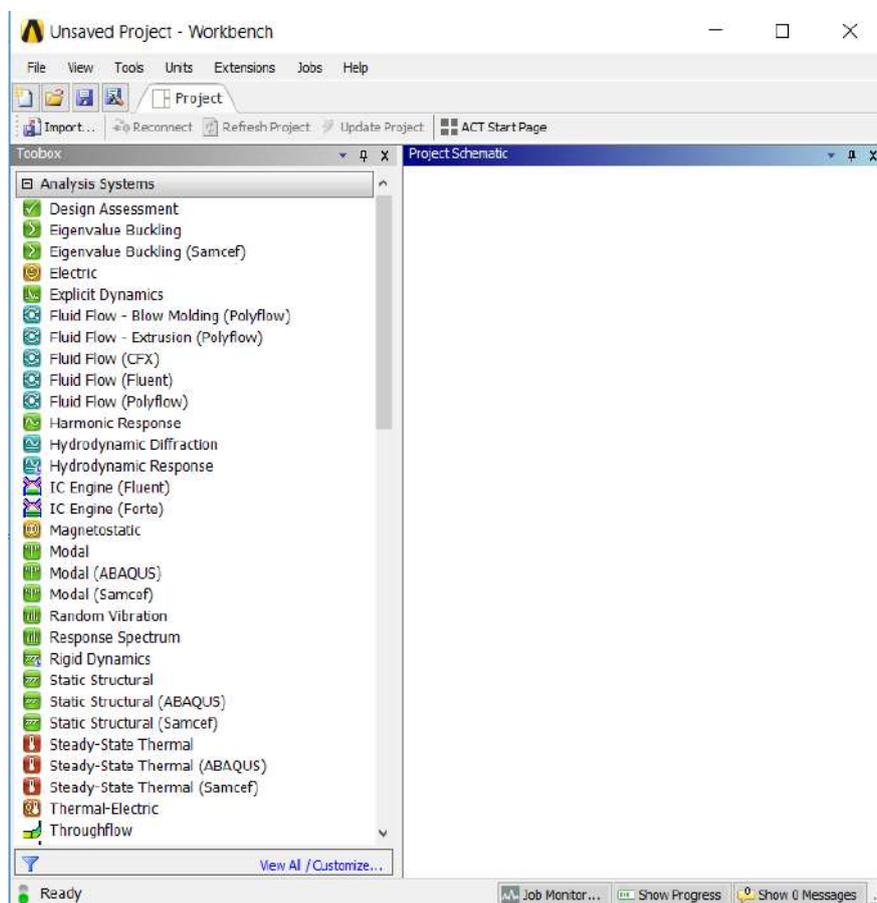


Figura 45. Interfaz Workbench de nuestro proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

Para obtener nuestro esquema de módulos en ANSYS CFX mostrado en la Figura 39 insertado en el escritorio de trabajo *Project Schematic* debemos seguir los siguientes pasos:

- En la barra de herramientas *Toolbox – Analysis System*, realizar un clic sostenido sobre la opción *Fluid Flow (CFX)* y arrastrarla hacia el escritorio *Project Schematic*. Como nuestro proyecto consta de tres alternativas de solución, se realiza este paso tres veces y así obtener módulo personalizado para cada situación.
- Para nombrar cada módulo como la alternativa a la que representa, se procede con doble clic sobre la frase *Fluid Flow (CFX)* que se encuentra debajo de cada uno de ellos, y se nombra a conveniencia. El resultado se muestra en la Figura 46 y determina el inicio de nuestro proyecto de tesis.



Figura 46. Interfaz Workbench de nuestro proyecto - Fluid Flow (CFX).
Fuente: Elaboración propia.

4 ANSYS CFX: Pre – Procesamiento

4.1 Geometría. La Figura 47, muestra el detallado del dimensionamiento de las tres alternativas de solución que serán objeto de estudio en el presente proyecto.

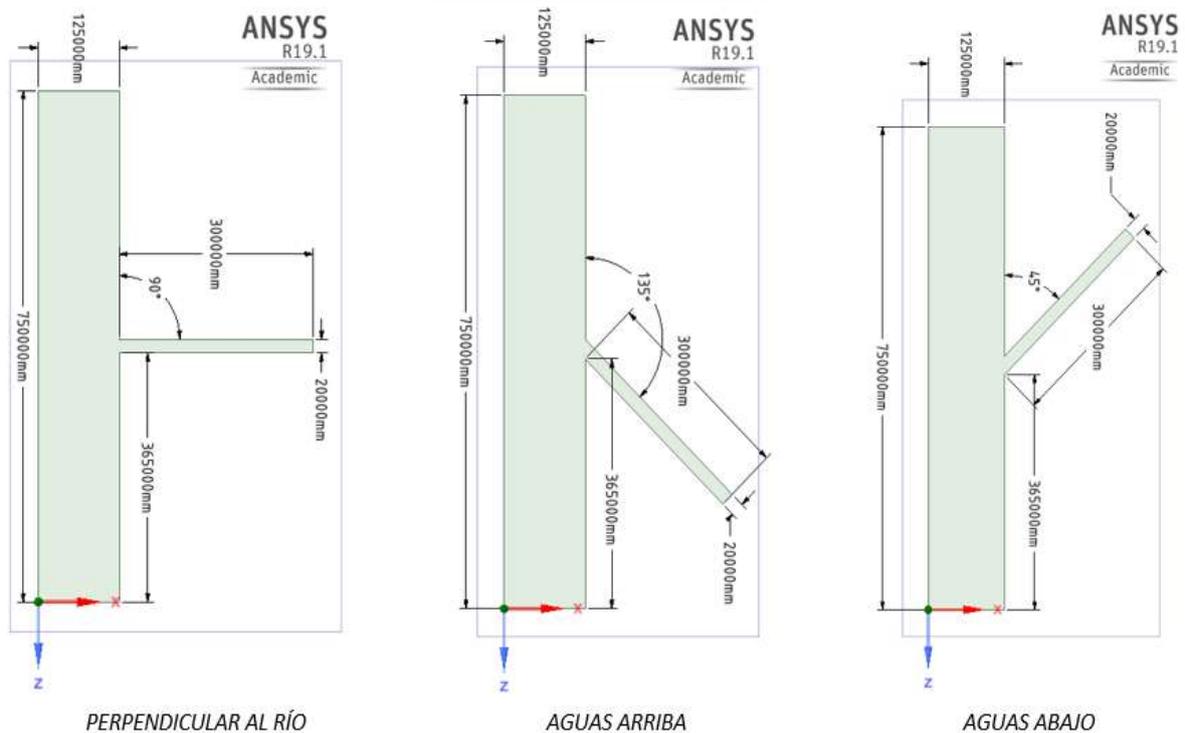


Figura 47. Geometría de las alternativas de solución del proyecto.
Fuente: Elaboración propia.

La Geometría se elaboró bajo las herramientas del ANSYS CFX mediante el siguiente procedimiento:

- En nuestro esquema de módulos en ANSYS CFX, al realizar clic derecho sobre la opción *Geometry* se obtienen las opciones de elaboración de la geometría (ver Figura 48):

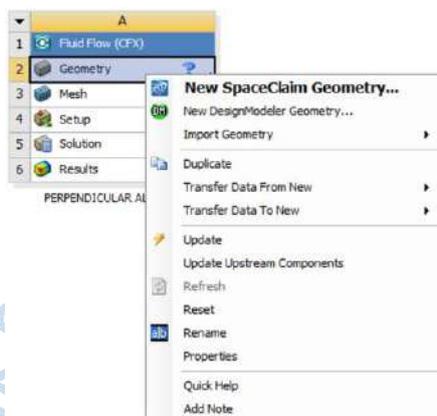


Figura 48. Opciones de la herramienta Geometry
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 48 aparecen dos programas de elaboración de la geometría: *Discovery SpaceClaim* y *DesignModeler*, de las cuales se escogió la primera para el proyecto, obteniendo la siguiente ventana de trabajo (ver Figura 49):

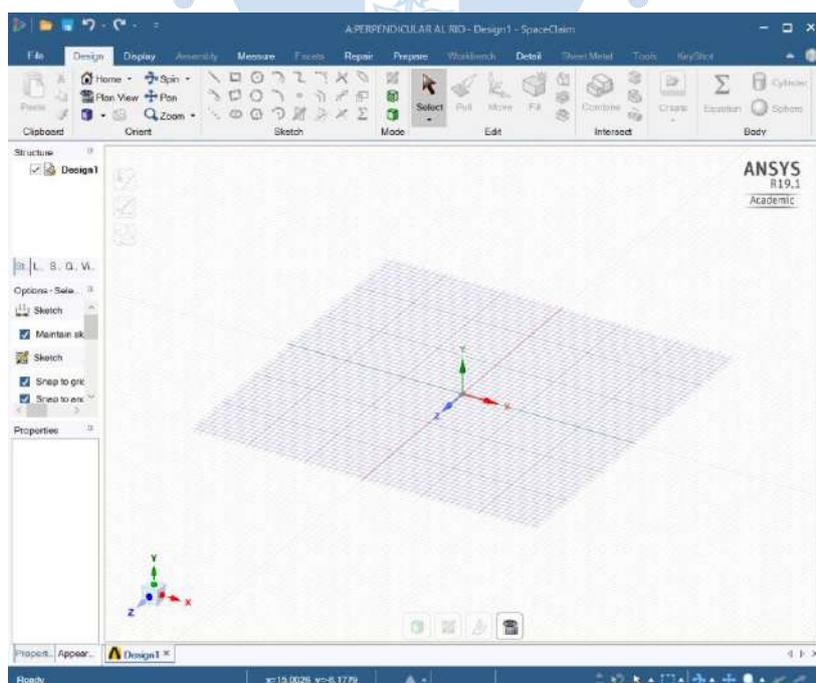


Figura 49. Vista preliminar Geometry – SpaceClaim
Fuente: Elaboración propia

- La ventana de trabajo del *Discovery SpaceClaim* posee herramientas similares al software AutoCAD para poder dibujar la geometría del proyecto, la cual una vez elaborada y para formar el 3D del cuerpo, se debe extruir mediante la herramienta *Pull* (ver Figura 50) una altura de 6000 mm (correspondiente a los 6 metros del tirante del río para un caudal de 3000 m³/s, ver Figura 51).
- Terminado el proceso y posterior al cierre de la ventana de trabajo, se verifica la correcta geometría con la presencia de un check verde al lado de la opción *Geometry* del módulo (ver Figura 52).
- Se repite el proceso para cada una de las alternativas de solución. Una vez terminado el trabajo, se procede a realizar el mallado del proyecto.

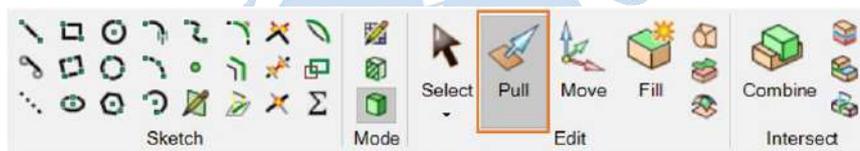


Figura 50. Herramientas de diseño de Geometría – SpaceClaim

Fuente: Elaboración propia

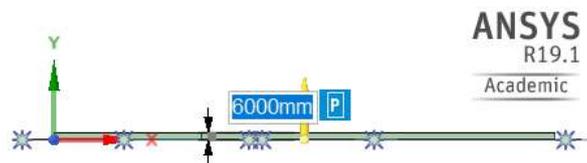
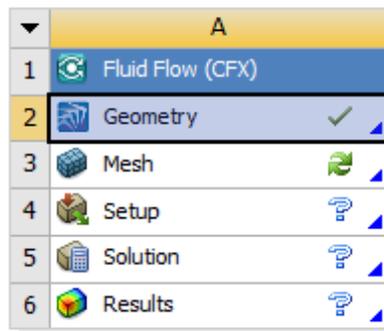


Figura 51. Generación del sólido – Herramienta Extruir (Pull).

Fuente: Elaboración propia



PERPENDICULAR AL RIO

Figura 52. Verificación de Geometría

Fuente: Elaboración propia

4.2 Mallado. Uno de los factores más importantes a la hora de realizar una simulación numérica es, sin duda alguna, el mallado de la geometría.

- En nuestro esquema de módulos en ANSYS CFX, se realiza clic derecho sobre la opción *Mesh* para el despliegue de las opciones de elaboración de la malla (ver Figura 53), seguido de clic en la opción *Edit* para ingresar a la ventana de trabajo *Meshing* (ver Figura 54):

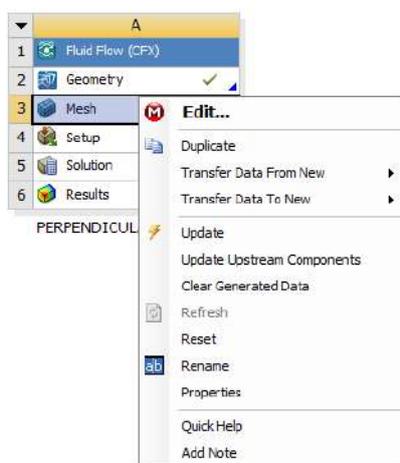


Figura 53. Opciones de la herramienta Mesh

Fuente: Elaboración propia

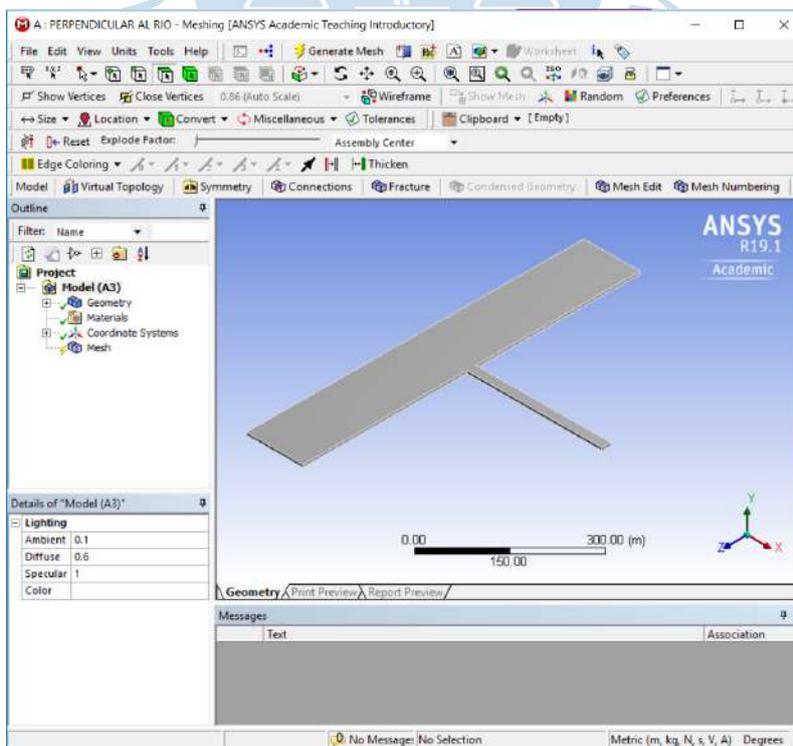


Figura 54. Vista preliminar Meshing

Fuente: Elaboración propia

Para poder continuar con el correcto mallado, se debe garantizar la elección del método, la calidad, el dimensionamiento y posterior afinamiento de la malla que mejor se ajuste al caso en estudio y que permita obtener mayor precisión de los resultados que reflejan la realidad:

– Método de mallado

El ANSYS CFX presenta varios métodos de mallado: tetraédrico, hexaédrico e híbrido (combinación de los dos primeros). En el presente caso estudio se evaluarán los dos métodos mencionados al inicio.

Para geometrías complejas o cuando el rango de longitudes de escala del flujo es grande se recomienda un mallado tetraédrico, debido al requerimiento de un menor número de celdas que un mallado hexaédrico; además permiten que las celdas sean agrupadas en regiones seleccionadas del dominio fluido. El método tetraédrico se presenta mayormente en geometrías de tramos curvos.

Para geometrías de un grado de complejidad medio, como la de estudio, las mallas no estructuradas de tipo hexaédricas ofrecen muchas ventajas, ya que permiten mayores relaciones de aspecto y minimiza el efecto de difusión numérica. El método hexaédrico se presenta mayormente en geometrías de tramos rectos.

Bentley et al. (1995) y *Blacker* (2001), mencionan que según las situaciones de investigación y aplicación actuales, las mallas de elementos hexaédricos presentan ventajas por sobre las mallas tetraédricas como resultados más precisos, así como mejores tiempos de remallado. Pero recomiendan que se haga una comparación de resultados para cada proyecto en estudio.

Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos de ambos métodos en estudio con las siguientes características: una misma geometría (Orientación Perpendicular al río), con las mismas propiedades de mallado (Dimensión del elemento de malla de 0.75 m, refinamiento en el fondo, variando sólo del método utilizado), e iguales condiciones en el *Setup* (Condiciones de frontera y parámetros de modelación).

Los pasos a seguir para conseguir este primer mallado y evaluar los métodos se presentan a continuación:

- Una vez abierto el escritorio del *Meshing*, se selecciona la opción *Mesh* de la barra *Outline*, seguido de un clic en la opción *Mesh control* de la barra de herramientas (ver Figura 55).

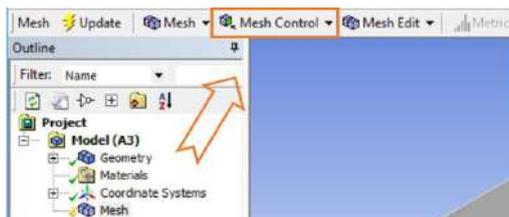


Figura 55. Mesh - Mesh Control

Fuente: Elaboración propia

- Se abrirá una ventana de opciones *Mesh Control* (ver Figura 56), donde se escogerá *Method*, obteniendo la ventana de detalles *Details of "Automatic Method" – Method*.
- En la opción *Geometry* se selecciona todo el sólido con la opción *Body* de la barra de herramientas de selección (ver Figura 57), luego clic en *Aply*. Finalmente, en la opción de *Method* elegir el método a utilizar: *Tetrahedrons* (para la elección del método tetraédrico) y *Hex Dominant* (para la elección del método hexaédrico en un nuevo módulo). Los detalles se muestran en la Figura 58.



Figura 56. Opciones del Mesh Control

Fuente: Elaboración propia



Figura 57. Herramientas de selección del Meshing

Fuente: Elaboración propia

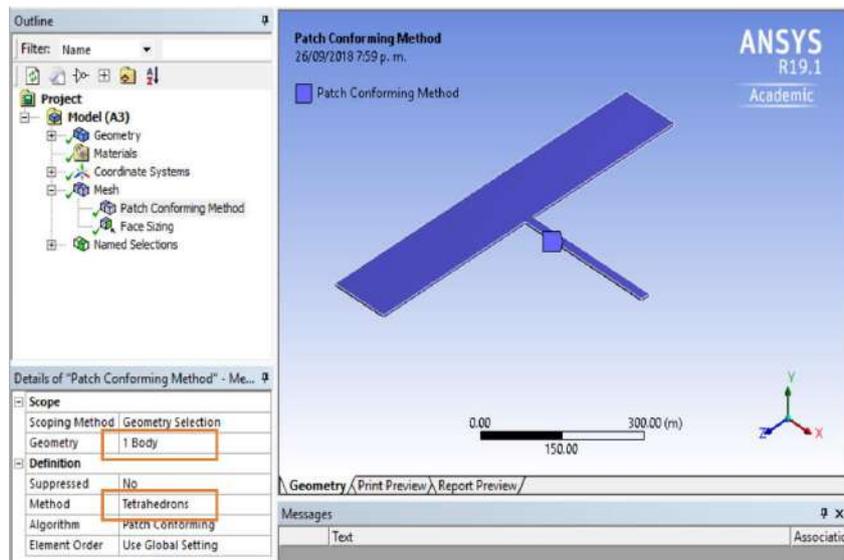


Figura 58. Detalles de la elección del método Tetraédrico.
Fuente: Elaboración propia

- Para continuar con el dimensionamiento y el refinamiento, se elige la opción de *Sizing* del *Mesh Control* (ver Figura 56). Debajo de *Outline*, quedará ubicada la ventana de detalles *Details of “Face Sizing” – Sizing*.
- En la opción de *Geometry* se selecciona la cara de fondo con la opción de *Face* de la barra de herramientas de selección (ver Figura 57), luego clic en *Aply*. Finalmente, en la opción de *Element Size* se escribe la dimensión del elemento de 0.75 m, elegida para dicho análisis. Los detalles se muestran en la Figura 59.

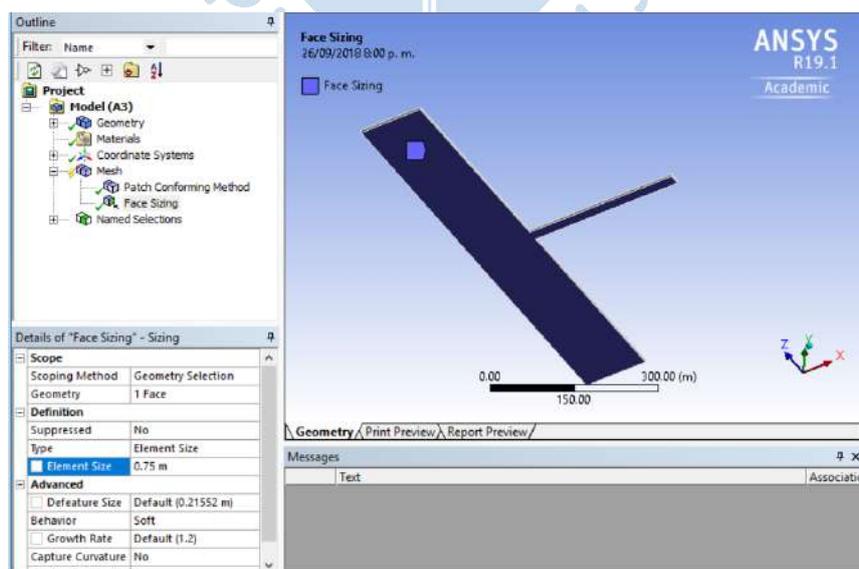


Figura 59. Detalles de dimensionamiento y refinado del método tetraédrico
Fuente: Elaboración propia

- Para generar la malla se realiza un clic derecho al *Mesh* de la ventana *Outline* y se escoge la opción *Generate Mesh*. Una vez terminada la generación de malla, se procede a grabar la malla seleccionando *Update* de las opciones del *Mesh* (ver Figura 60).

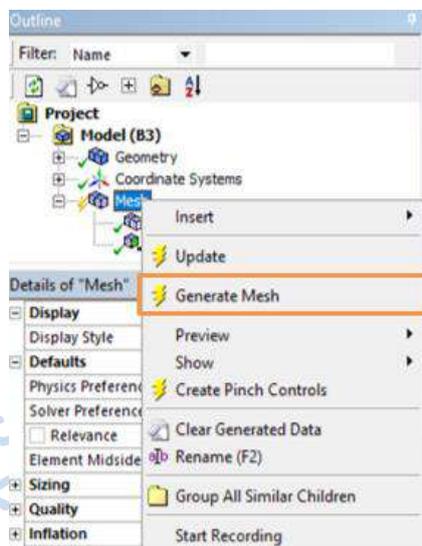
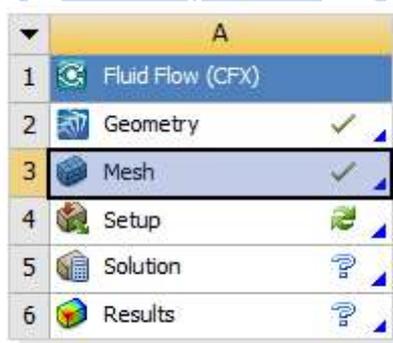


Figura 60. Mesh - Generate Mesh - Update

Fuente: Elaboración propia

- Terminado el proceso y posterior al cierre de la ventana de trabajo, se verifica la correcta malla con la presencia de un check verde al lado de la opción *Mesh* del módulo (ver Figura 5261).

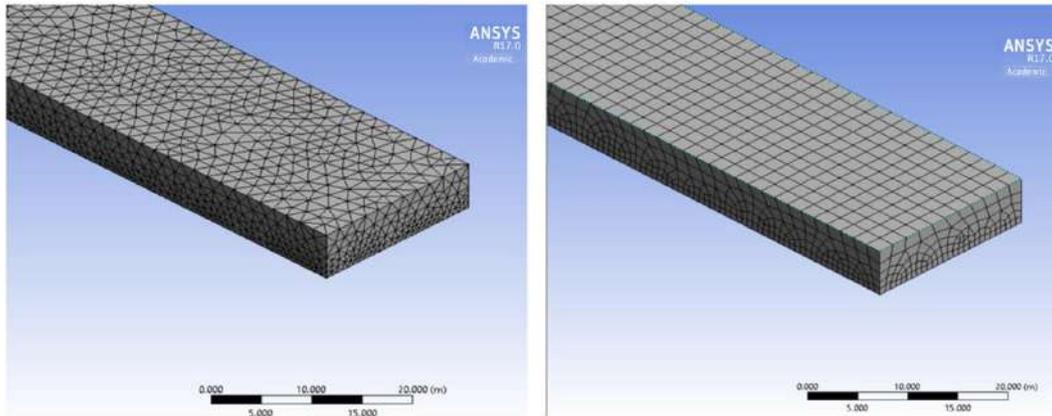


PERPENDICULAR AL RIO

Figura 61. Verificación de mallado

Fuente: Elaboración propia

El resultado final del mallado de ambos métodos se presenta en la Figura 62.



Mallado Tetraédrico

Mallado Hexaédrico

Figura 62. Métodos de mallado

Fuente: Elaboración propia

Los tiempos de elaboración de malla y simulación representan uno de los factores más importantes en la elección del método a utilizar. Debido a ello, se han calculado y se presentan en la siguiente Tabla 26. Es importante resaltar que los valores de tiempo son inversamente proporcionales a la capacidad computacional de la PC que se utilice, a mayor capacidad se obtienen menores tiempos y viceversa; por ende, estos datos pueden variar en su cálculo.

Tabla 26. Tiempos de elaboración de malla y simulación para la elección del método de mallado.

Método de Mallado	Tetraédrico	Hexaédrico
Tiempo de elaboración de malla	3.5 horas	1.5 horas
Tiempo de simulación (Número de iteraciones)	22 horas (más de 800 iteraciones)	14 horas (720 iteraciones)

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados de la Tabla 26, el mallado del método hexaédrico se elabora y obtiene la convergencia de datos en la simulación con mayor rapidez que el método tetraédrico.

Los resultados obtenidos en el procesamiento (simulación) y post procesamiento CFX se encuentran en el Apéndice A y se detallan a continuación:

- En el Apéndice A-1 y Apéndice A-2 se representan los residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de conservación de masa, momentum y del modelo de turbulencia $k - \epsilon$ para los distintos métodos de mallado: el método hexaédrico presenta menor efecto de difusión numérica de datos (menor variación) y genera con mayor rapidez, la tendencia a converger al límite escogido de los datos evaluados, que el método tetraédrico. Se deja claro que para el método tetraédrico se obtuvieron más de 800 iteraciones y aún no se alcanzaba la convergencia de datos al límite establecido.
- En el Apéndice A-3 se representa los Imbalances de ecuaciones y su estudio detallado a un rango más reciente de iteración (*Timestep Window Size 10*) para los distintos métodos de mallado. Ambos métodos presentan la convergencia de Imbalances al 0%. Pero en el detallado, se puede observar que hay dos Imbalances de Masa (Mass Imbalance) y Fracción de Volumen (P-Vol Imbalance) que divergen del 0% en la malla tetraédrica, mientras que en la malla hexaédrica las variables presentan la tendencia hacia la convergencia del 0%.
- En el Apéndice A-4 se presenta el perfil de velocidades en la superficie libre y sección del canal de toma para los distintos métodos de mallado. Donde la malla hexaédrica representa mejor la distribución de velocidades en el canal de toma. Asimismo, la malla tetraédrica obtiene valores de velocidad muy elevados.

Luego de lo expuesto, comparando cada uno de los resultados del Apéndice A y Tabla 26, se concluye que, para la geometría del proyecto, el método que mejor se adapta a nuestras condiciones de estudio es el método hexaédrico.

— Dimensionamiento y calidad de malla

El dimensionamiento de malla consiste en la elección de la dimensión del elemento de mallado que otorga mayor eficacia y precisión en la obtención de resultados. Para ello se realizó un pequeño estudio: manteniendo la alternativa de solución (orientación *Perpendicular al río*), las condiciones iniciales y parámetros, y una vez elegido el método hexaédrico para el proyecto, se evaluarán los resultados obtenidos variando las dimensiones del elemento de malla, cumpliendo los pasos:

- En los detalles de malla (*Details of Mesh*) se mantienen los valores de relevancia 100 y expansión de ángulo *Fine* en las opciones *Defaults* y *Sizing* respectivamente, con el objetivo de obtener elementos de mallado mucho más refinados y de mayor cantidad que una relevancia de 0, volviendo más preciso la obtención de resultados (ver Figura 63).

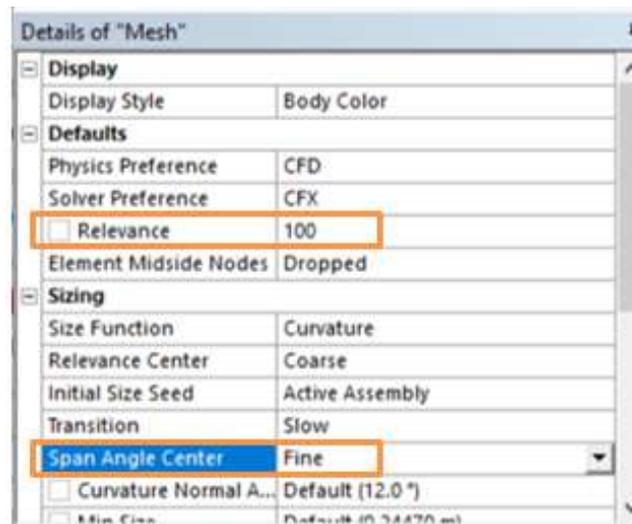


Figura 63. Detalles de mallado del estudio de dimensionamiento y calidad de malla.

Fuente: Elaboración propia

- Se otorga el método Hexaédrico siguiendo los pasos descritos en *Método de Mallado*.
- Para la opción de *Sizing* se realizarán los siguientes cambios:
 - Se seleccionarán 5 caras en la alternativa de *Geometry* (el fondo, las paredes laterales del canal y las dos paredes del río que convergen en la entrada del canal), este refinamiento permitirá localizar, enfocar y evaluar con mayor precisión la entrada del canal, la cual constituye el área de mayor interés para nuestro proyecto.
 - Se iniciará evaluando la dimensión de 1.0 m para el elemento diferencial (ver Figura 64), posteriormente se procede a generar la malla (ver Figura 65).

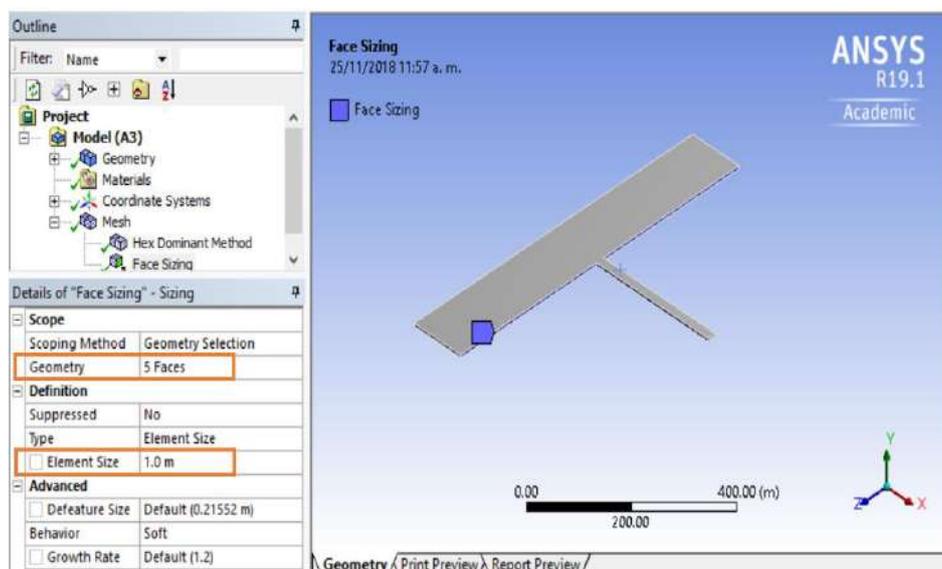


Figura 64. Face Sizing del estudio del dimensionamiento y calidad de malla.
Fuente: Elaboración propia

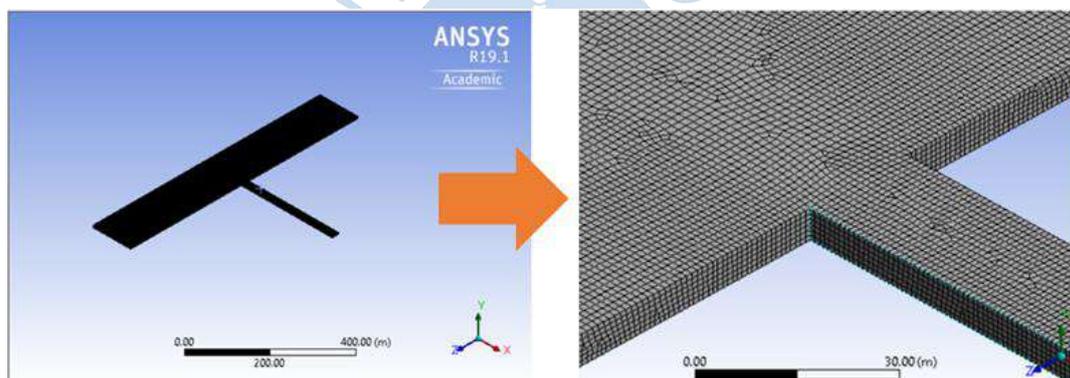


Figura 65. Mallado con dimensión del elemento de 1.0 m.
Fuente: Elaboración propia

- Para obtener los valores evaluados en la calidad de malla se debe regresar a la opción de *Details of Mesh*, y en la alternativa de *Mesh Metric* de la opción *Quality* elegir alternadamente los cuatro parámetros de estudio (*Orthogonal Quality*, *Element Quality*, *Aspect Ratio* y *Skewness*) y registrar los resultados:
 - a) *Orthogonal Quality*. Se recomienda que este valor este cercano a la unidad, esto indica que los ángulos en las celdas tienden a 90 grados, facilitando los cálculos del programa (ver Figura 66).

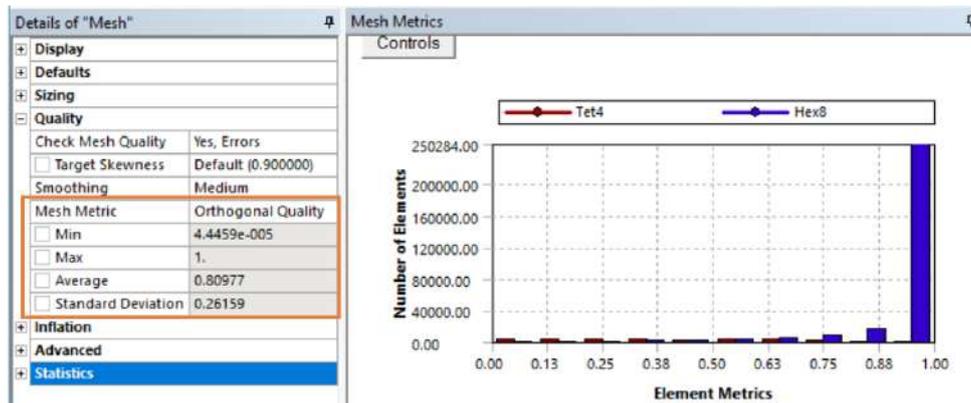


Figura 66. Orthogonal Quality de la dimensión de 1.0 m.

Fuente: Elaboración propia

- b) *Element Quality*. Se recomienda que este valor esté cercano a 1, ya que la unidad representa un cubo o cuadrado perfecto (ver Figura 67).

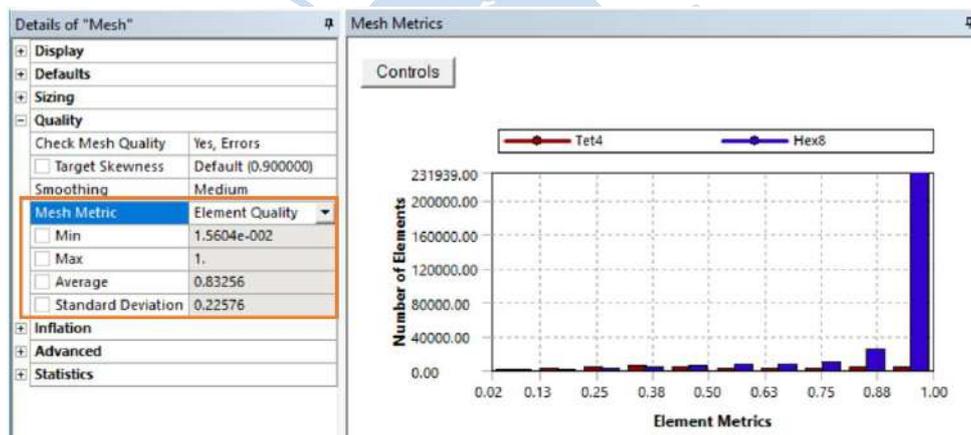


Figura 67. Element Quality de la dimensión de 1.0 m.

Fuente: Elaboración propia

- c) *Aspect Ratio*. En función a la Figura 68, la mejor relación de aspecto es la que tiende a la unidad. Se recomienda no supere el valor de 5 (ver Figura 69).

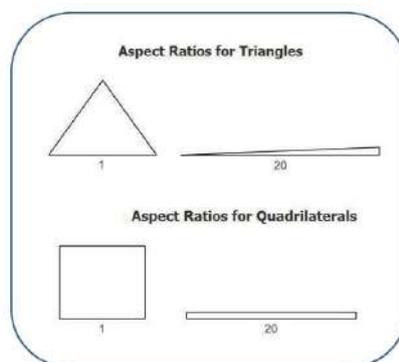


Figura 68. Relación de aspecto.

Fuente: (ANSYS 16.1, 2012).

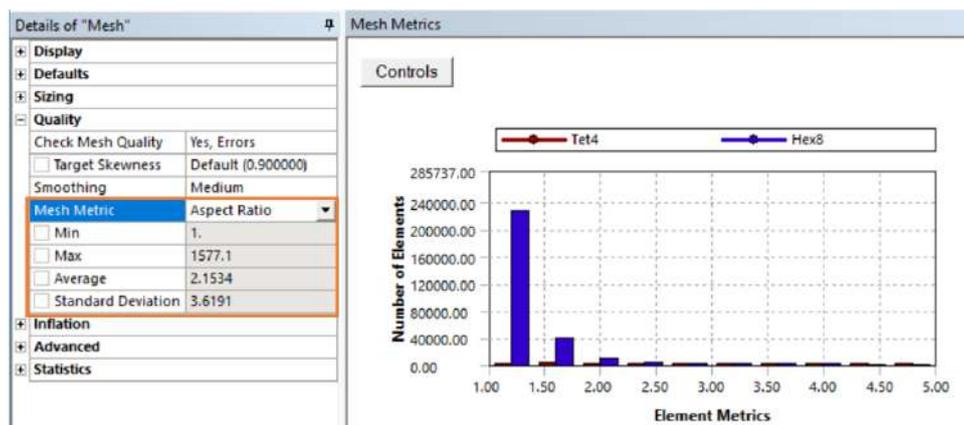


Figura 69. Aspect ratio de la dimensión de 1.0 m.

Fuente: Elaboración propia

- d) *Skewness*. Esta es una de las principales medidas de calidad que debe cumplirse al generar una malla. Los rangos de oblicuidad se les puede observar en la Tabla 27 (ver Figura 70).

Tabla 27. Rangos de oblicuidad y su correspondiente calidad.

Value of Skewness	Cell Quality
1	Degenerate
0.90 - <1.00	Bad (Silver)
0.75 - 0.90	Poor
0.50 - 0.75	Fair
0.25 - 0.50	Good
>0 - 0.25	Excellent
0	Equilateral

Fuente: ANSYS 16.1, 2012.

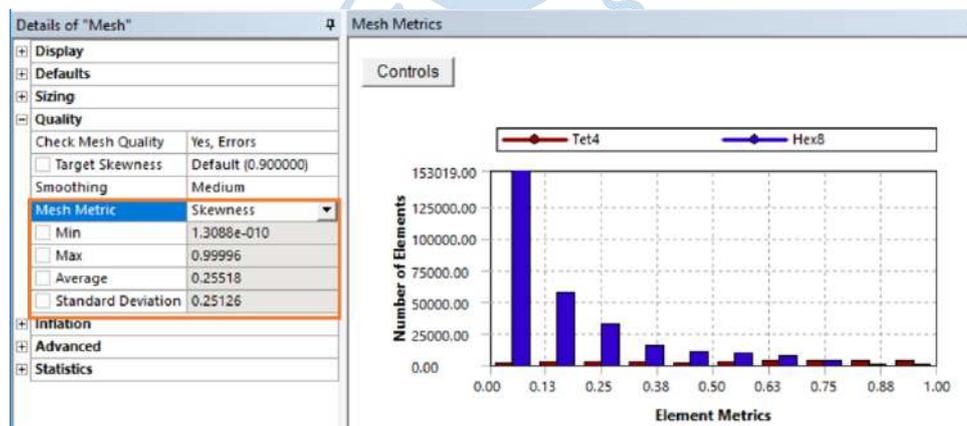


Figura 70. Skewness de la dimensión de 1.0 m.

Fuente: Elaboración propia

- Adicionalmente se debe registrar el número de elementos que se forman en el dominio, para ello nos mantenemos en *Details of Mesh*, y solo se despliega la opción de *Statistics* y se registra el dato (ver Figura 71).

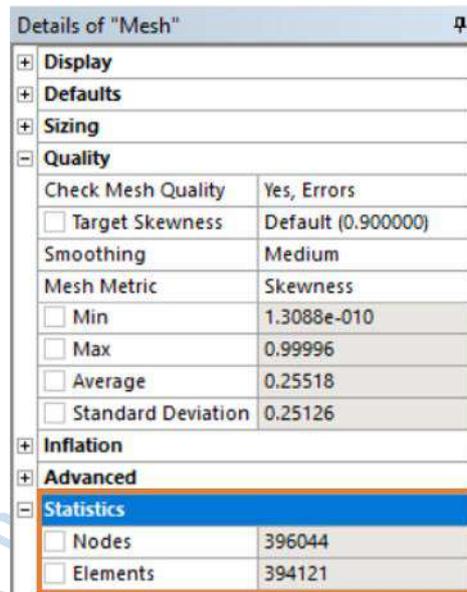


Figura 71. Número de elementos de la dimensión 1.0 m.

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento se repite para cada alternativa de dimensión de mallado, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 28. Dimensionamiento - Tiempo de elaboración de malla y simulación.

Dimensión del elemento de mallado [m]	Tiempo de elaboración de malla [horas]	Tiempo de simulación [Número de Iteraciones]
1.0	4 horas	12 horas (720 iteraciones)
0.75	7 horas	15 horas (720 iteraciones)
0.6	10 horas	14 horas (720 iteraciones)
0.5	12 horas	19 horas (720 iteraciones)
0.4	15 horas	22 horas (720 iteraciones)
0.3	17 horas	27 horas (720 iteraciones)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29. Estudio de calidad de malla.

Dimensión del Elemento [m]	Orthogonal Quality	Element Quality	Aspect Ratio	Skewness	Número de elementos	Clasificación
1.0	0.80977	0.83256	2.1534	0.25518	394121	Buena
0.75	0.71331	0.75258	3.6143	0.3566	816901	Aceptable
0.6	0.68828	0.72876	3.4847	0.38287	1316084	Aceptable
0.5	0.67132	0.69123	3.6202	0.43095	1952680	Aceptable
0.4	0.65348	0.67251	3.7951	0.45811	2648136	Aceptable
0.3	0.64482	0.66809	3.8515	0.48127	3215966	Aceptable

Fuente: Elaboración propia

- La Tabla 28 muestra los datos del tiempo de elaboración de malla y simulación obtenidos para cada uno de los datos evaluados. Es importante resaltar que los valores de tiempo son inversamente proporcionales a la capacidad computacional de la PC que se utilice, a mayor capacidad se obtienen menores tiempos y viceversa; por ende, estos datos pueden variar en su cálculo.
- La Tabla 29 muestra cada uno de los datos de evaluación de la Calidad de Malla obtenidos de cada alternativa de dimensionamiento de mallado y su posterior clasificación:

Los resultados obtenidos en el Procesamiento (Simulación) y Post Procesamiento CFX se encuentran en el Apéndice B y se detallan a continuación:

- En el Apéndice B-1 se representan los residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de conservación de masa, momentum y del modelo de turbulencia $k - \epsilon$ para todos los datos evaluados en el Dimensionamiento de Malla. Para nuestro caso en estudio, todas las alternativas evaluadas obtuvieron un mismo comportamiento adecuado de convergencia de cada una de las ecuaciones.
- En el Apéndice B-2 se representa el detallado a un rango más reciente para todos los datos evaluados en el Dimensionamiento de Malla. Todos los datos presentan convergencia de Imbalances al 0% pero con una pequeña diferencia en el detallado. Las opciones de 1.0 y 0.75 presentan claramente la tendencia a la convergencia de todas las ecuaciones, y en las otras opciones sólo se obtiene una divergencia en la

ecuación de Momento en la dirección X (U-Mom Imbalance). En general se puede aceptar como adecuado el comportamiento de Imbalances de todas las alternativas evaluadas.

- En el Apéndice B-3 se presenta el perfil de velocidades en la sección del canal de toma para todos los datos evaluados en el Dimensionamiento de Malla.

Los resultados obtenidos junto a los valores de tiempo de elaboración y simulación registrados y al estudio de calidad, constituyen los principales sustentos en la elección de la malla final para la realización del proyecto.

Se puede apreciar diferencias en el perfil de velocidades para las primeras alternativas evaluadas, pero una sección constante a partir del valor de 0.6.

Ven Te Chow, Ph. D (1994), en su libro “Hidráulica de canales abiertos” nos proporciona la distribución de velocidades en una sección de canal para diferentes geometrías, donde expone que la máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25m de profundidad (ver Figura 72):

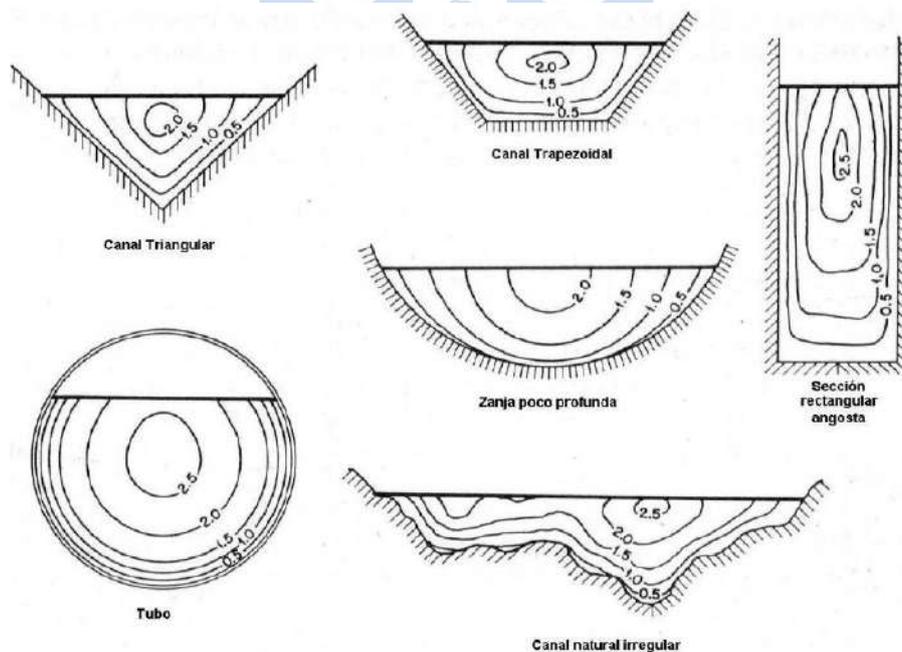


Figura 72. Distribución de velocidades en una sección de canal para diferentes geometrías.

Fuente: Chow, 1994.

Por lo expuesto por Ven Te Chow, podemos afirmar que la opción 1.0 m del dimensionamiento de malla en el Apéndice B-3, es la única alternativa que no cumple con la condición de ubicación de la máxima velocidad a partir de la superficie libre.

En conclusión, teniendo en cuenta las condiciones del perfil de velocidades y los datos registrados en las Tablas 28 y 29, que muestran claramente las diferencias entre las alternativas evaluadas, se escoge la opción de 0.6 m como la dimensión del mallado del proyecto por las siguientes razones:

- Constituye el inicio de convergencia de datos en el perfil de velocidades y cumple con la condición trazada por Ven Te Chow.
- Presenta mayor rapidez en la obtención del mallado y convergencia en la Simulación.
- Presenta una calidad de malla aceptable para el desarrollo del proyecto.

La Figura 73 muestra el mallado final del proyecto, para dar lugar al registro de datos del *Setup*.

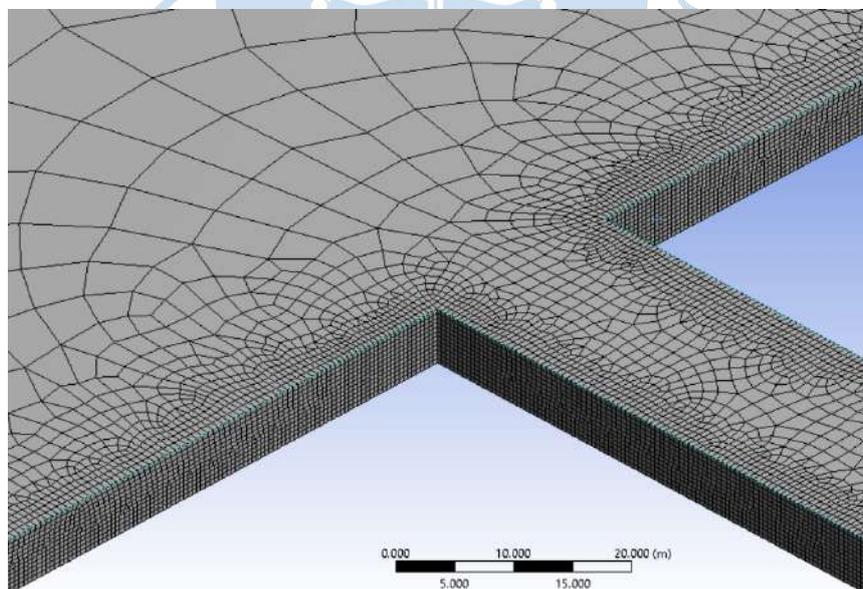


Figura 73. Mallado final del proyecto.

Fuente: Elaboración propia

Tener en cuenta que la zona de mayor importancia de estudio es la entrada al canal de captación, por ello se puede apreciar en la Figura 73, que en esa zona y a lo largo del canal de captación, se concentra con mayor intensidad el dimensionamiento escogido y,

por otro lado, en la zona central del río, la cual no presenta relevancia en nuestro estudio, encontramos elementos más grandes.

Además, se ha obtenido un dimensionamiento no tan pequeño en relación a la mayoría de trabajos realizados en el área de Energía de Ingeniería Mecánica – Eléctrica de la Universidad de Piura, esto se debe a que dichos trabajos realizan un estudio más exhaustivo de sus proyectos al considerar la transmisión de calor o energía durante su procedimiento; además de las grandes dimensiones consideradas en la geometría del río en comparación al área de evaluación localizada en la entrada del canal de captación.

Una vez creada la malla y antes de continuar con proceso de configuración *Setup*, es importante nombrar las secciones que forman nuestro dominio, para tener un orden y poder identificarlas con mayor facilidad al momento de designar sus propiedades.

Para ello debemos seguir los siguientes pasos:

- Se inicia con la selección del plano que será nombrado, mediante la herramienta *Face*.
- Una vez seleccionado el plano, se realiza un clic derecho y se selecciona la opción *Create Named Selection (N)* (ver Figura 74).
- Posteriormente, se procede a nombrar el plano a conveniencia, se empezará con la sección de *SUPERFICIE_LIBRE*, tal como se muestra en la Figura 75, y se continuará nombrando todas las demás secciones: *ENTRADA_RIO*, *SALIDA_RIO*, *SALIDA_CANAL*, *PAREDES_CONCRETO_CANAL*, y *PAREDES ARENA_RIO*.
Nota: Para seleccionar más de una cara, se tiene sostenido el botón 'Ctrl' mientras se seleccionan todas las caras de interés.

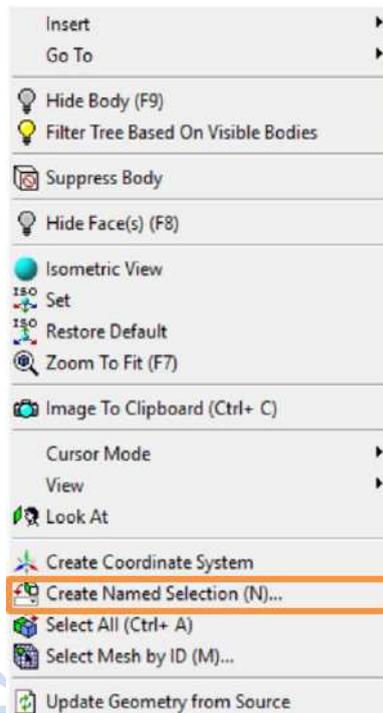


Figura 74. Create Named Selection (N)
Fuente: Elaboración propia

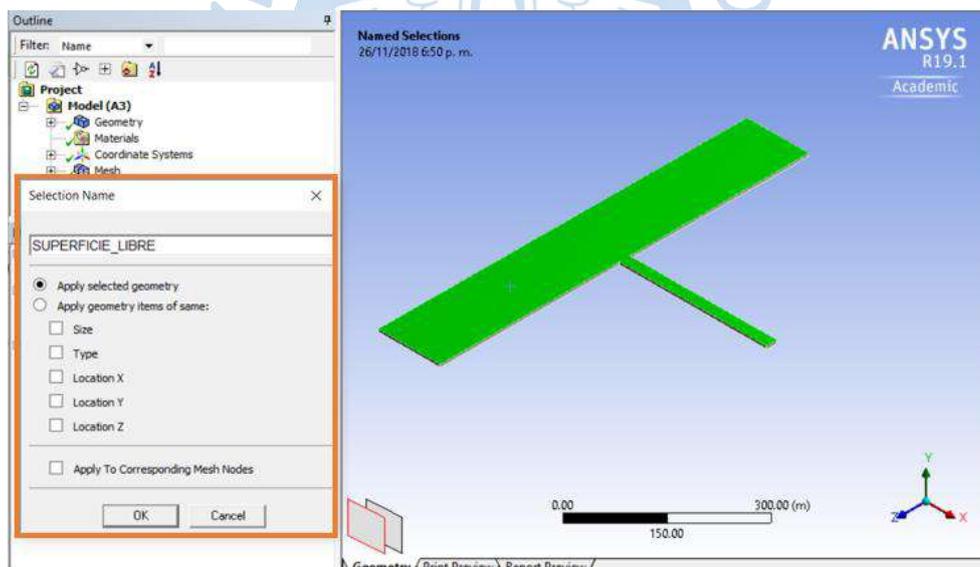
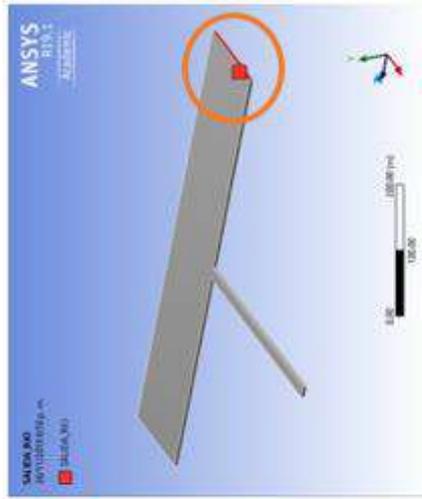
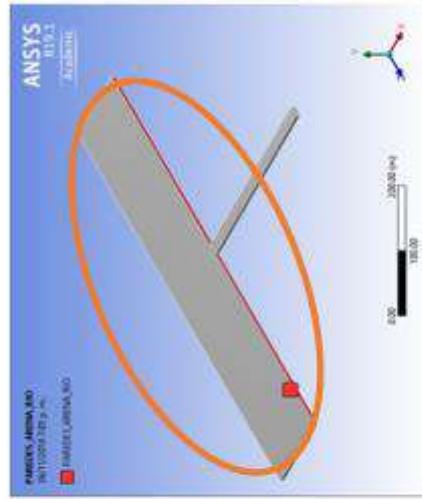


Figura 75. Creación de nombres de las secciones del dominio en el Meshing
Fuente: Elaboración propia

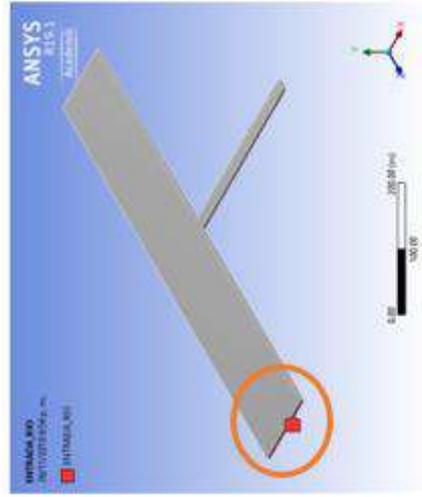
La Figura 76 muestra el resultado de todas las secciones nombradas.



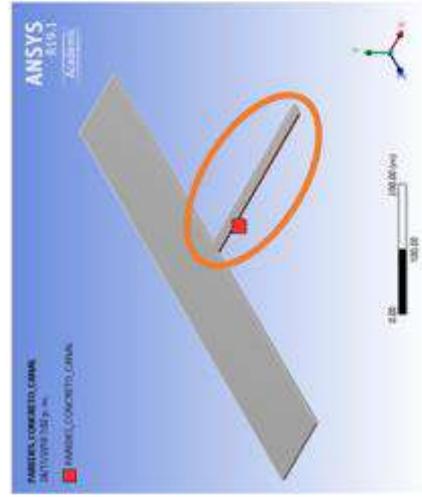
SALIDA_RIO



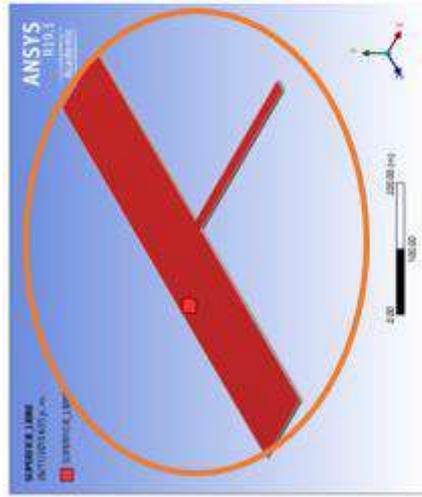
PAREDES_ARENA_RJO



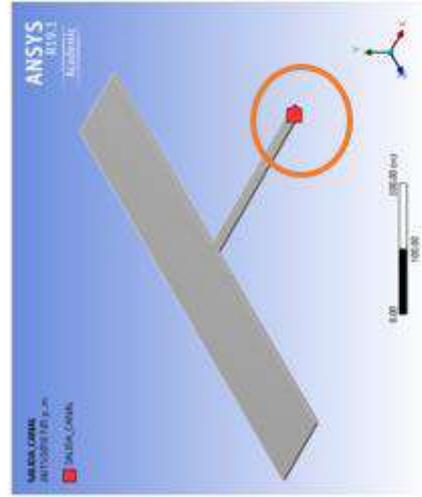
ENTRADA_RJO



PAREDES_CONCRETO_CANAL



SUPERFICIE_LIBRE



SALIDA_CANAL

Figura 76. Secciones de estudio
Fuente: Elaboración propia

- Luego de nombrar todas las secciones en estudio, estas se mostrarán en la opción de *Named Selections* de la carpeta *Model (A3)* de la pestaña *Outline* (ver Figura 77).

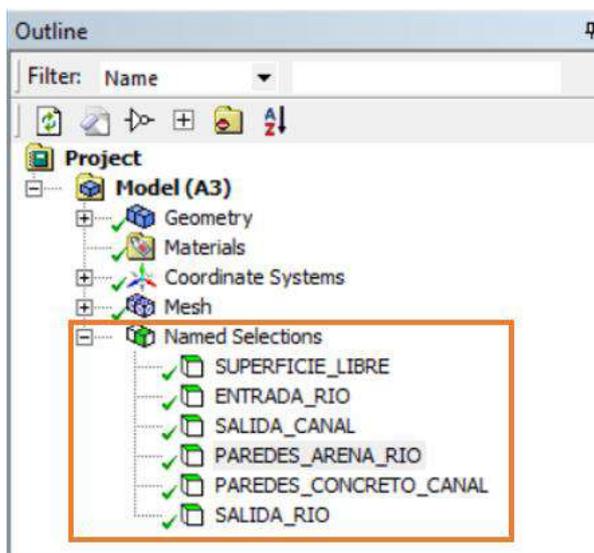


Figura 77. Model (A3) - Named Selections

Fuente: Elaboración propia

- Para terminar con el proceso, se vuelve a elegir la opción *Update* del *Mesh* y se verifica la elaboración de la malla en el módulo.
- Se repite el proceso para cada una de las alternativas de solución. Concluido el mallado, se procede a la introducción de las propiedades del fluido y las condiciones de frontera de nuestro proyecto en el *Setup*.

4.3 Propiedades del fluido y condiciones de frontera (Setup). En el módulo de *Setup* se establecen las características físicas de la estructura, propiedades de los fluidos y las condiciones de frontera (*boundaries*) para el dominio:

- Para ingresar a la ventana de trabajo (ver Figura 79), en nuestro esquema de módulos de ANSYS CFX, se realiza un clic derecho para presentar las opciones de elaboración y se selecciona la opción *Edit* (ver Figura 78).

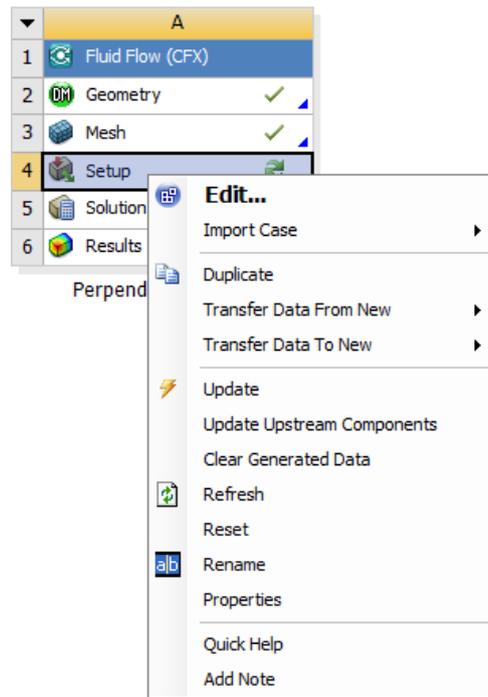


Figura 78. Opciones de la herramienta Setup
Fuente: Elaboración propia

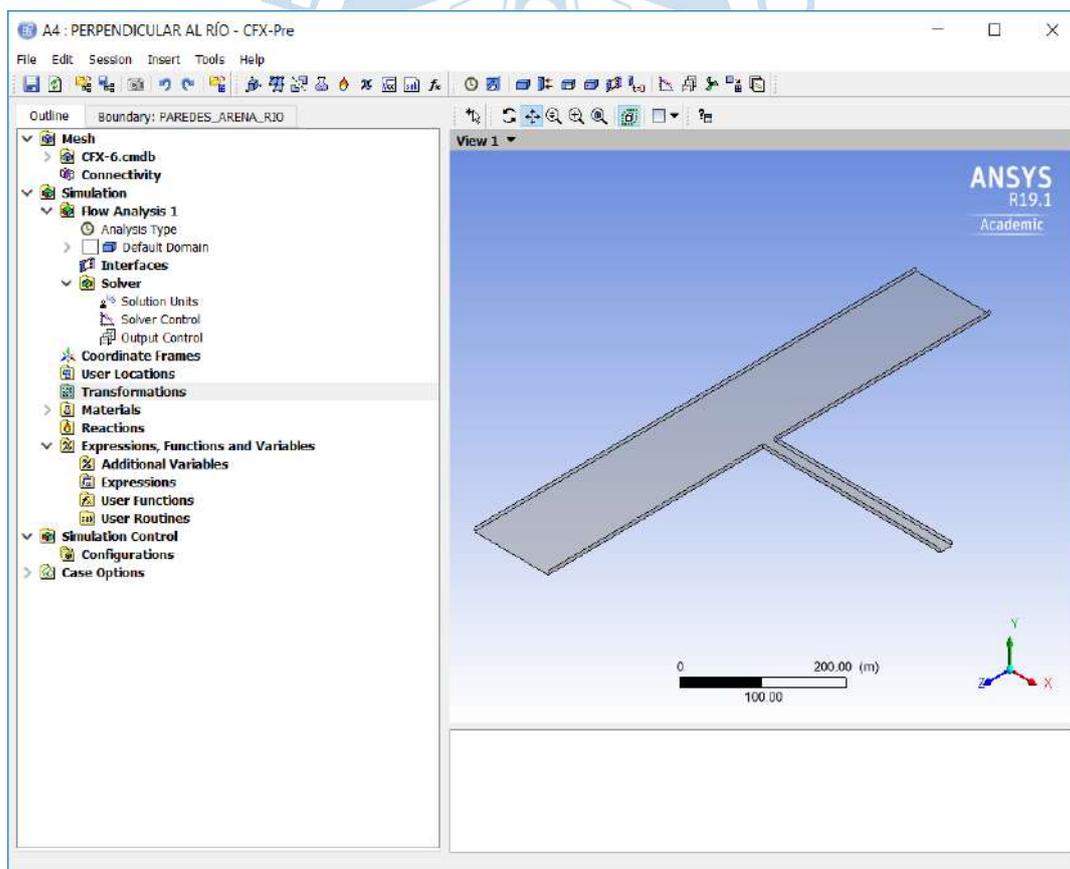


Figura 79. Vista preliminar Setup – CFX Pre
Fuente: Elaboración propia

- Para dar inicio a la configuración del proyecto, hacer clic derecho en la opción de *Default Domain* de la carpeta *Flow Analysis 1* de la simulación (*Simulation*), seguido de la selección de la opción *Edit* (ver Figura 80).

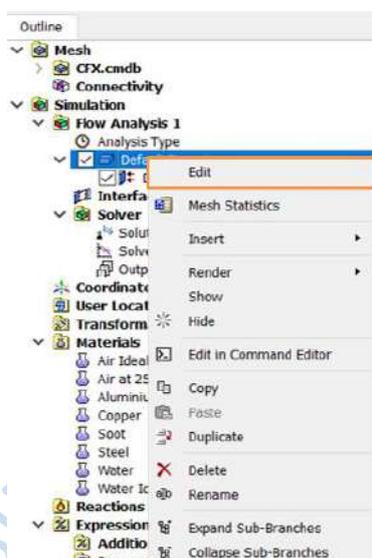


Figura 80. Inicio de la configuración Setup.
Fuente: Elaboración propia

4.3.1 Propiedades del fluido. Aquí se presentan las propiedades para los fluidos que se han establecido en el módulo del Setup:

Basic settings (ver Figura 81 y Tabla 30):

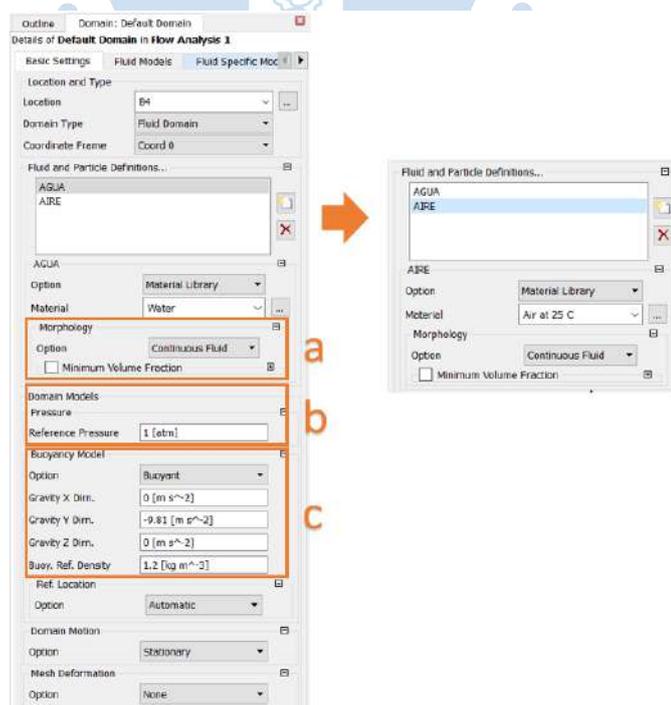


Figura 81. Basic settings de las propiedades del fluido
Fuente: Elaboración propia

Tabla 30. Basic settings de las propiedades del fluido.

Letra	Concepto
a	<ul style="list-style-type: none"> • Fluido multifásico agua – aire, para ello se asume al fluido como un medio continuo (<i>Continuous Fluid</i>) en la morfología del material (<i>Morphology</i>). • El programa calculará automáticamente el porcentaje de mezcla entre los dos fluidos.
b	<ul style="list-style-type: none"> • La presión (<i>Pressure</i>) que gobierna el dominio es la presión atmosférica, con un valor de 1 [atm] en la opción de <i>Reference Pressure</i>.
c	<ul style="list-style-type: none"> • Se asume un modelo de flotabilidad (<i>Buoyant</i>) en la opción de <i>Buoyancy Model</i>, con una fuerza gravitatoria de $-9.81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ en la dirección Y, según nuestros ejes coordenados establecidos en la geometría del proyecto. Se debe completar con valor de $0 \text{ [m/s}^2\text{]}$ en las direcciones donde no afecta la gravedad. • La densidad de flotabilidad de referencia (<i>Bouy. Ref. Density</i>) entre agua – aire tiene un valor de $1.185 \text{ [kg/m}^3\text{]}$.

Fuente: Elaboración propia

- Se definen dos fluidos: agua y aire en *Fluid and Particle Definitions* cada uno con su material correspondiente: *Water* y *Air at 25 C* respectivamente, mediante la herramienta de adición (*Add*).
- Si se comete un error se puede eliminar el material con la opción *Delete* de la Figura 82:

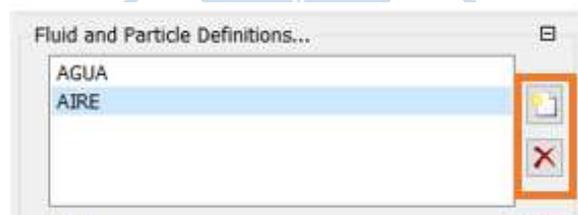


Figura 82. Add and delete fluid and particle definitions

Fuente: Elaboración propia

Fluid models (ver Figura 83 y Tabla 31):

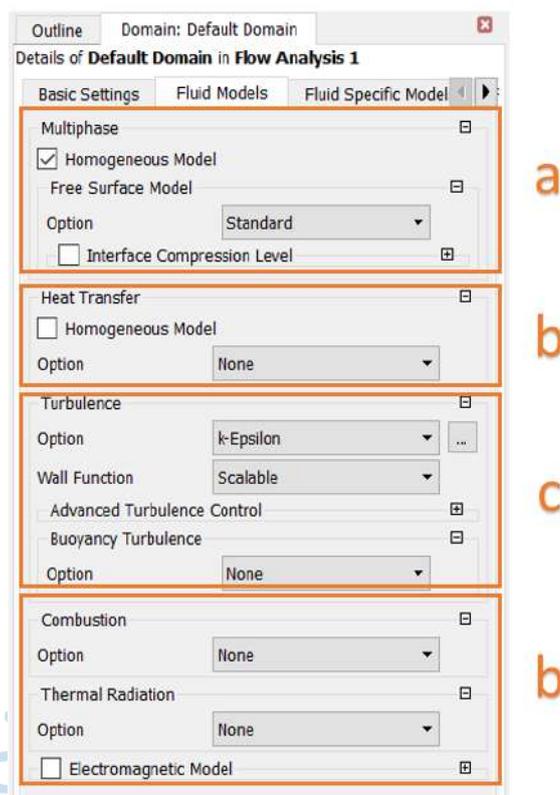


Figura 83. Fluid models de las propiedades del fluido
Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Fluid models de las propiedades del fluido.

Letra	Concepto
a	<ul style="list-style-type: none"> El modelo de fluido multifásico (<i>Multiphase</i>) es un modelo homogéneo (<i>Homogeneous Model</i>), donde el agua es el fluido primario.
b	<ul style="list-style-type: none"> No se tomará en cuenta la transferencia de calor (<i>Heat Transfer</i>), la combustión (<i>Combustion</i>), ni la radiación térmica (<i>Thermal Radiation</i>), puesto que no son de interés para el proyecto.
c	<ul style="list-style-type: none"> El modelo de turbulencia (<i>Turbulence</i>) usado es <i>k-Epsilon</i>.

Fuente: Elaboración propia

Fluid pair models (ver Figura 84 y Tabla 32):

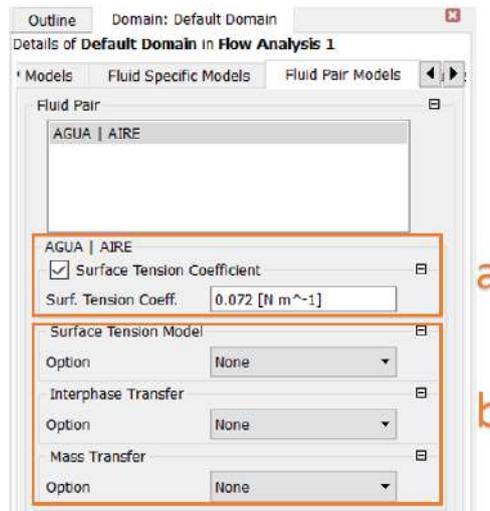


Figura 84. Fluid pair models de las propiedades del fluido

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Fluid pair models de las propiedades del fluido.

Letra	Concepto
a	<ul style="list-style-type: none"> El coeficiente de tensión superficial usado es de 0.072 [N/m], el cual permite situar el aire por encima del agua dentro del dominio en estudio.
b	<ul style="list-style-type: none"> No se tomará en cuenta el modelo de tensión superficial (<i>Surface Tension Model</i>), la interfase de transferencia (<i>Interphase Transfer</i>), ni la transferencia de masa (<i>Mass Transfer</i>), puesto que no son de interés para el proyecto.

Fuente: Elaboración propia

Para culminar el procedimiento, se realiza un clic en la opción *Apply*, seguido de un clic en la opción *OK*.

4.3.2 Condiciones de borde. Las condiciones de borde se aplican al dominio físico y son absolutamente necesarias para describir correctamente el fenómeno.

Tiene un alto nivel de importancia dentro de las etapas de la modelación numérica, ya que, al ser ingresadas de manera errónea, se obtendrían resultados equivocados, muy alejados de la realidad, o es probable que el programa no realice ninguna iteración durante la etapa del Procesamiento. ANSYS CFX posee la gran ventaja de enviar mensajes de error cuando el ingreso de datos al programa es incoherente.

A continuación, se detallan los pasos necesarios para el ingreso de las condiciones deseadas:

- Se realiza un clic derecho en la opción de *Default Domain*, seguido de la selección de la opción *Insert*: Se desplegarán 3 alternativas, de las cuáles se elegirá *Boundary* para establecer las condiciones de frontera (ver Figura 85). Como consecuencia se obtiene la ventana de creación de la Figura 86, donde se nombrará la frontera a configurar, en este caso se iniciará con la *SUPERFICIE_LIBRE*, acorde el orden establecido por las secciones de estudio de la Figura 76.

Para terminar el ingreso, se culmina con un clic en la opción *OK*.

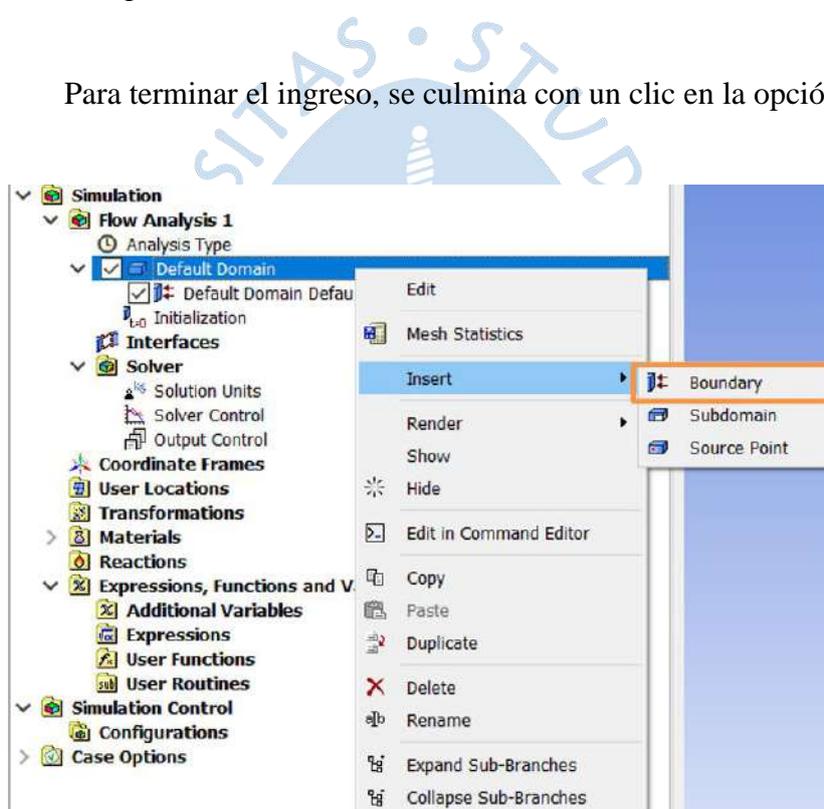


Figura 85. Opción de insertar frontera para su configuración
Fuente: Elaboración propia

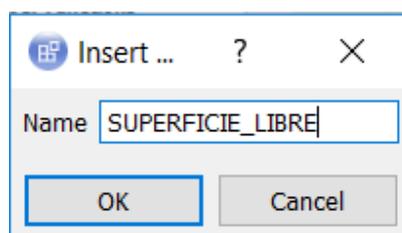


Figura 86. Creación de nombres de las fronteras en el Setup
Fuente: Elaboración propia

A. Primera frontera: *SUPERFICIE_LIBRE*

Los datos utilizados en la frontera *SUPERFICIE_LIBRE* se presentan en la siguiente Tabla 33:

Tabla 33. Datos sobre la frontera *SUPERFICIE_LIBRE*

Frontera <i>SUPERFICIE_LIBRE</i>	
Tipo de límite	<i>Opening</i>
Régimen de flujo	<i>Subsonic</i>
Masa y momento	<i>Opening pressure and direction</i>
Presión relativa	0 [Pa]
Dirección del flujo	<i>Normal to boundary condition</i>
Turbulencia	<i>Low intensity 1%</i>
Fracción volumétrica del aire	1
Fracción volumétrica del agua	0

Fuente: Elaboración propia

Basic settings (ver Figura 87):

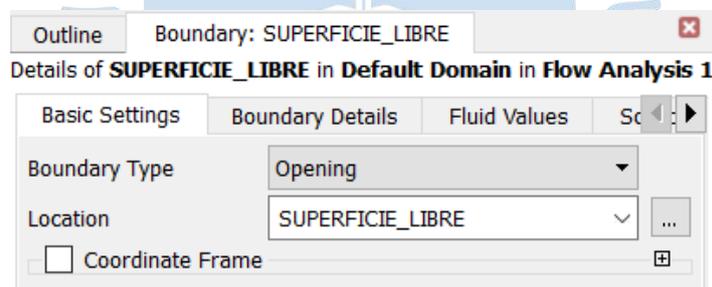


Figura 87. Basic settings de la frontera *SUPERFICIE_LIBRE*.

Fuente: Elaboración propia

- El tipo de límite *Opening* representa la posibilidad de entrada y salida del flujo simultáneamente.

Boundary details (ver Figura 88 y Tabla 34):

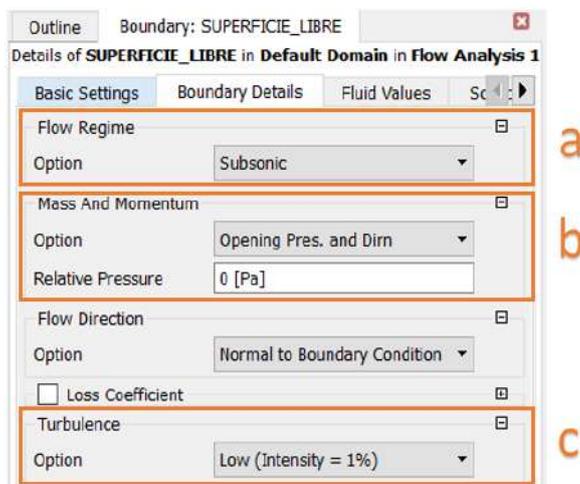


Figura 88. Boundary details de la frontera SUPERFICIE_LIBRE
Fuente: Elaboración propia

Tabla 34. Boundary details de la frontera SUPERFICIE_LIBRE.

Letra	Concepto
a	<ul style="list-style-type: none"> El régimen de flujo subsónico (<i>Subsonic</i>) ya está establecido por <i>default</i> debido a la naturaleza de la simulación.
b	<ul style="list-style-type: none"> La masa y momento de <i>Opening pressure and direction</i> permite que la presión estática en ese límite varíe dependiendo del flujo. La presión relativa (Relative Pressure) a 1 [atm] del dominio es 0 [Pa].
c	<ul style="list-style-type: none"> La intensidad de turbulencia baja del 1% (<i>Low Intensity</i>) se escoge cuando no es necesario un cálculo intenso de turbulencia en la sección libre, puesto que allí no hay presencia de flujo de agua.

Fuente: Elaboración propia

Fluid values (ver Figura 89):

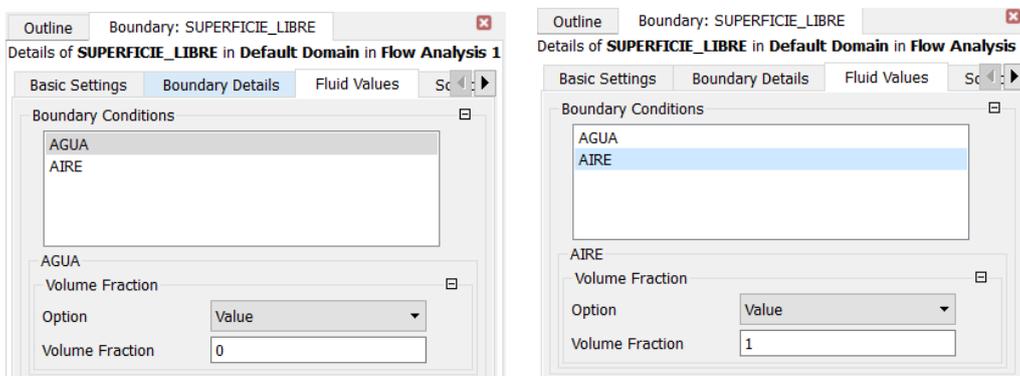


Figura 89. Fluid values de la frontera SUPERFICIE_LIBRE
Fuente: Elaboración propia

- La fracción volumétrica del aire presente en la sección es de 1, por ende, en el agua es de 0, lo que representa un canal abierto con superficie libre.

Para finalizar se realiza un clic en la opción *Apply*, seguido de un clic en *OK*. Inmediatamente se obtiene la gráfica de la frontera *SUPERFICIE_LIBRE* (ver Figura 90).

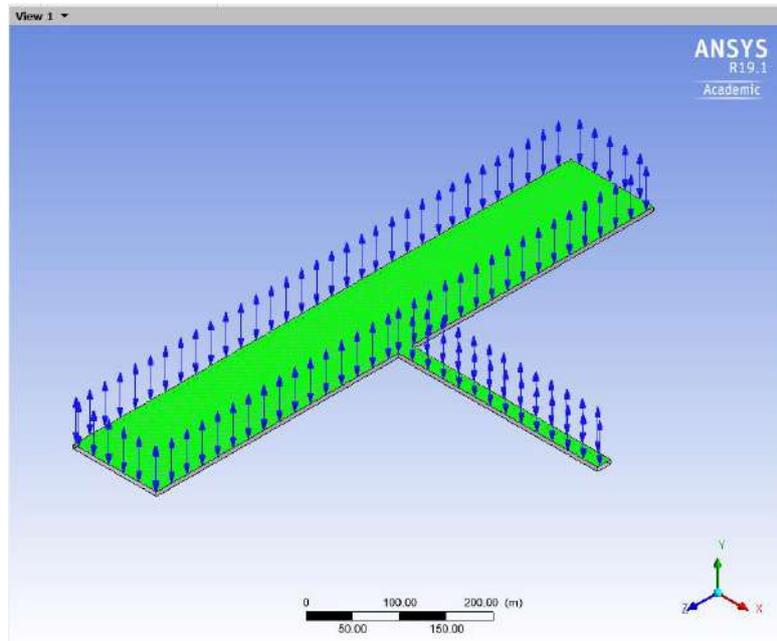


Figura 90. Configuración completa y gráfico de la frontera *SUPERFICIE_LIBRE*
Fuente: Elaboración propia

B. Segunda frontera: *ENTRADA_RIO*

Para dar inicio a la configuración de la frontera *ENTRADA_RIO*, se repite el procedimiento aplicado a la frontera *SUPERFICIE_LIBRE* hasta nombrarla.

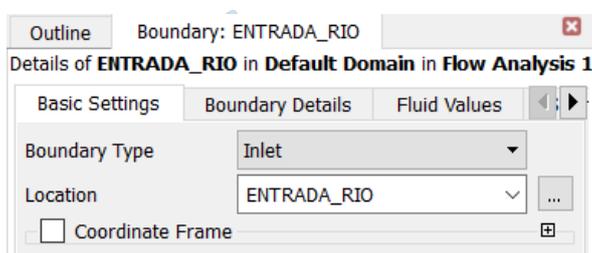
Los datos utilizados en la frontera *ENTRADA_RÍO* se presentan en la siguiente Tabla 35:

Tabla 35. Datos sobre la frontera *ENTRADA_RIO*

Frontera <i>ENTRADA_RIO</i>	
Tipo de límite	<i>Inlet</i>
Régimen de flujo	<i>Subsonic</i>
Masa y momento	<i>Normal Speed</i>
Turbulencia	<i>Medium intensity 5%</i>
Fracción volumétrica del aire	0
Fracción volumétrica del agua	1

Fuente: Elaboración propia

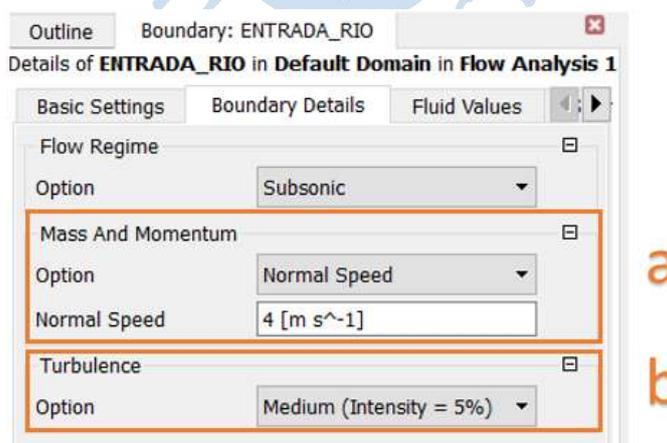
Basic settings (ver Figura 91):

**Figura 91. Basic settings de la frontera *ENTRADA_RIO*.**

Fuente: Elaboración propia

- El tipo de límite *Inlet* se usa cuando se condiciona que por esa sección solamente pueda ingresar fluido.

Boundary details (ver Figura 92 y Tabla 36):

**Figura 92. Boundary details de la frontera *ENTRADA_RIO*.**

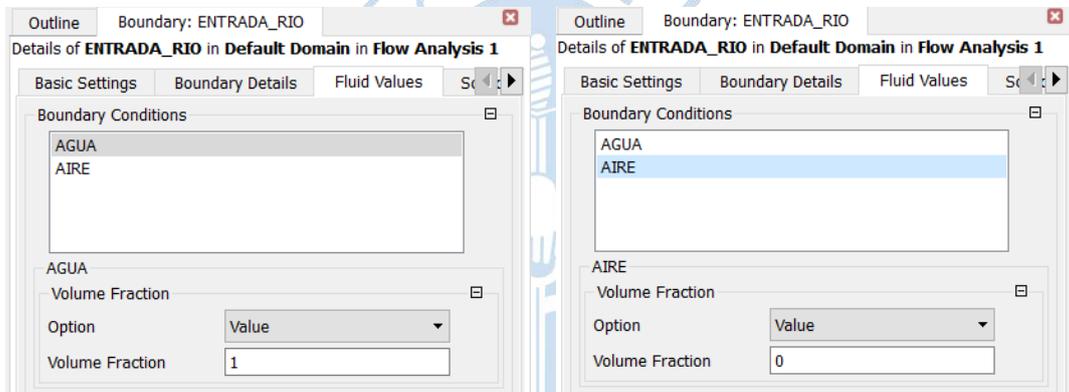
Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Boundary details de la frontera ENTRADA_RIO.

Letra	Concepto
a	<ul style="list-style-type: none"> La masa y momento de <i>Normal Speed</i> permite el ingreso del flujo al dominio en la dirección normal con una velocidad de entrada de 4 m/s correspondiente al caudal de diseño de 3000 m³/s que actúa en la sección transversal del río de 125x6 m².
b	<ul style="list-style-type: none"> La intensidad de turbulencia media del 5% (<i>Medium Intensity</i>) es la recomendada por ANSYS cuando se requiere realizar simulaciones numéricas industriales e ingenieriles, al no contar con datos de laboratorio para calcular la intensidad.

Fuente: Elaboración propia

Fluid values (ver Figura 93):

**Figura 93. Fluid values de la frontera ENTRADA_RIO.**

Fuente: Elaboración propia

- La fracción volumétrica del agua se toma como 1 al requerir únicamente el ingreso de caudal másico de agua, y la fracción volumétrica del aire en este caso es de 0 debido a la condición anterior.

Para finalizar se realiza un clic en la opción *Apply*, seguido de un clic en *OK*. Su gráfico correspondiente se muestra en la Figura 94.

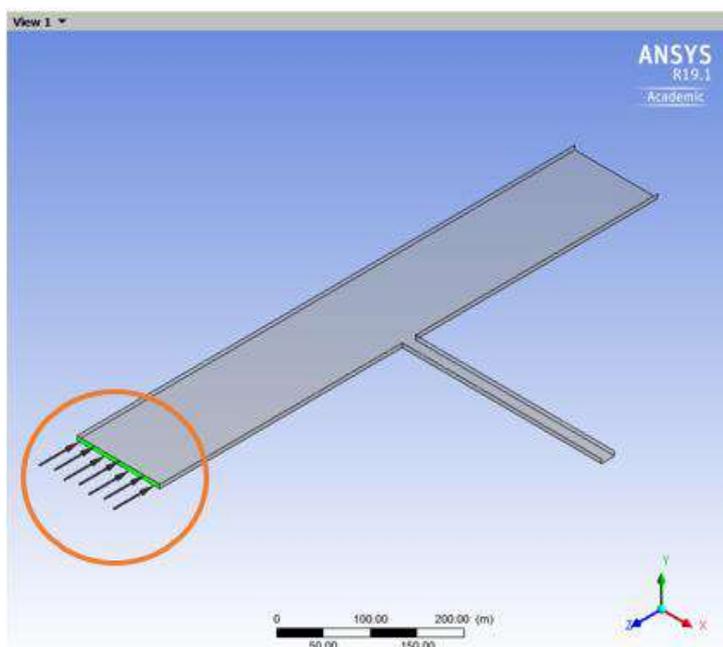


Figura 94. Configuración completa y gráfico de la frontera ENTRADA_RIO

Fuente: Elaboración propia

C. Tercera frontera: SALIDA_RIO

Para dar inicio a la configuración de la frontera *SALIDA_RIO*, se repite el procedimiento aplicado a la frontera *SUPERFICIE_LIBRE* hasta nombrarla. Los datos utilizados en la frontera *SALIDA_RIO* se presentan en la siguiente Tabla 37:

Tabla 37. Datos sobre la frontera SALIDA_RIO.

Frontera SALIDA_RIO	
Tipo de límite	<i>Outlet</i>
Régimen de flujo	<i>Subsonic</i>
Masa y momento	<i>Average Static Pressure</i>
Presión relativa	0 [Pa]

Fuente: Elaboración propia

Basic settings (ver Figura 95):

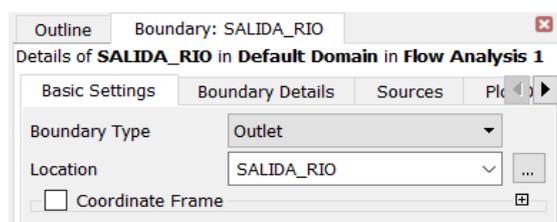


Figura 95. Basic settings de la frontera SALIDA_RIO.

Fuente: Elaboración propia

- El tipo de límite *Outlet* se usa cuando se condiciona que por esa sección solamente pueda salir fluido.

Boundary details (ver Figura 96):

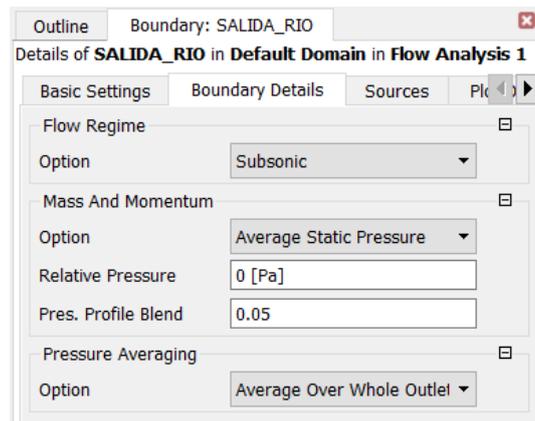


Figura 96. Boundary details de la frontera SALIDA_RIO

Fuente: Elaboración propia

- La presión relativa (Relative Pressure) a 1 [atm] del dominio es 0 [Pa].

Para finalizar se realiza un clic en la opción *Apply*, seguido de un clic en *OK*. Su gráfico correspondiente se muestra en la Figura 97.

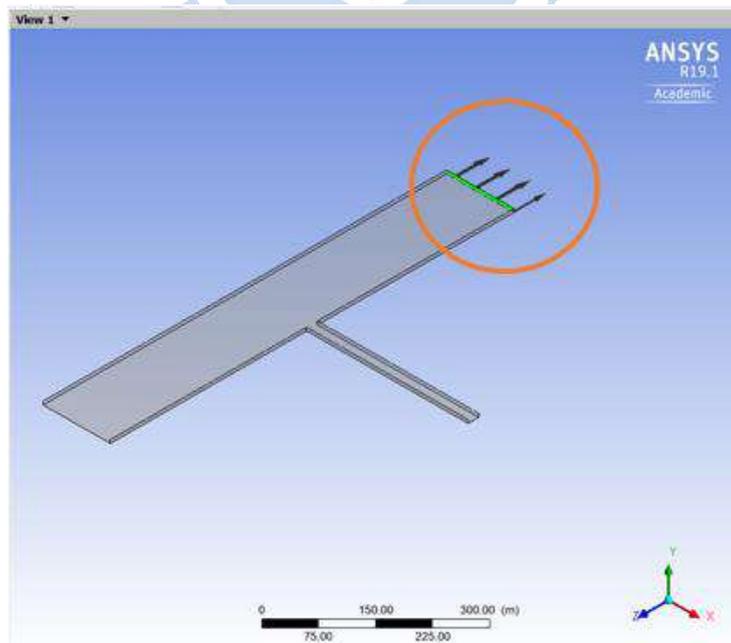


Figura 97. Configuración completa y gráfico de la frontera SALIDA_RIO

Fuente: Elaboración propia

D. Cuarta frontera: *SALIDA_CANAL*

La configuración de la frontera *SALIDA_CANAL* es idéntica a la utilizada en la tercera frontera *SALIDA_RIO*.

Los datos utilizados en la frontera *SALIDA_CANAL* se presentan en la siguiente Tabla 38:

Tabla 38. Datos sobre la frontera *SALIDA_CANAL*

Frontera <i>SALIDA_CANAL</i>	
Tipo de límite	<i>Outlet</i>
Régimen de flujo	<i>Subsonic</i>
Masa y momento	<i>Average Static Pressure</i>
Presión relativa	0 [Pa]

Fuente: Elaboración propia

Basic settings (ver Figura 98):

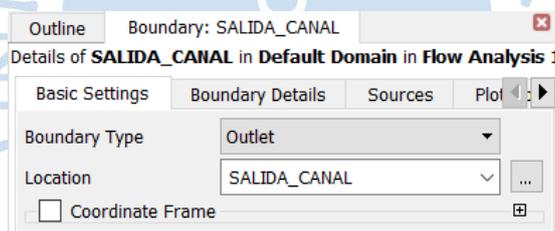


Figura 98. Basic settings de la frontera *SALIDA_CANAL*.

Fuente: Elaboración propia

Boundary details (ver Figura 99):

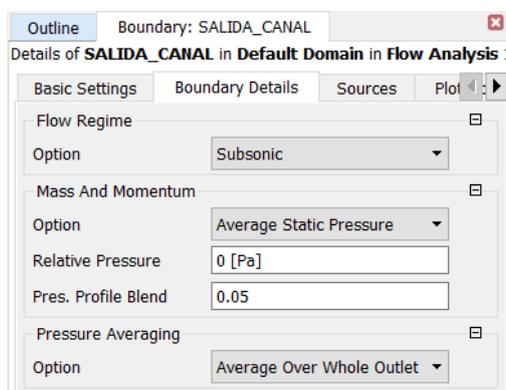


Figura 99. Boundary details de la frontera *SALIDA_CANAL*.

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar se realiza un clic en la opción *Apply*, seguido de un clic en *OK*. Su gráfico correspondiente se muestra en la Figura 100.

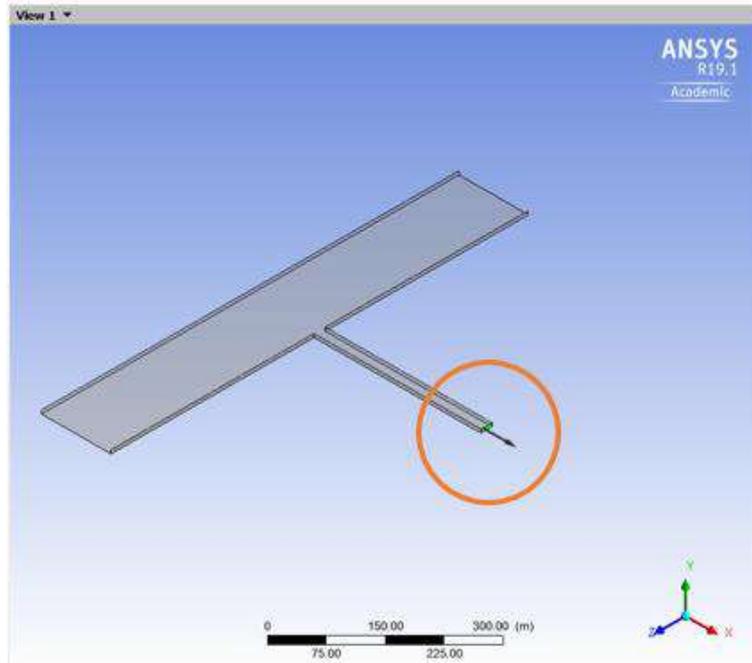


Figura 100. Configuración completa y Gráfico de la frontera *SALIDA_CANAL*.
Fuente: Elaboración propia

E. Quinta frontera: *PAREDES_CONCRETO_CANAL*

Para dar inicio a la configuración de la frontera *PAREDES_CONCRETO_CANAL*, se repite el procedimiento aplicado a la frontera *SUPERFICIE_LIBRE* hasta nombrarla.

Los datos utilizados en la frontera *PAREDES_CONCRETO_CANAL* se presentan en la siguiente Tabla 39:

Tabla 39. Datos sobre la frontera *PAREDES_CONCRETO_CANAL*

Frontera <i>PAREDES_CONCRETO_CANAL</i>	
Tipo de límite	<i>Wall</i>
Masa y momento	<i>No slip wall</i>
Rugosidad de pared	<i>Rough wall</i>
Grano de arena	0.36 [mm]

Fuente: Elaboración propia

Basic settings (ver Figura 101):



Figura 101. Basic settings de la frontera *PAREDES_CONCRETO_CANAL*.
Fuente: Elaboración propia

– *Wall* como condición límite representa una pared con o sin rugosidad.

Boundary details (ver Figura 102 y Tabla 40):



Figura 102. Boundary details de la frontera *PAREDES_CONCRETO_CANAL*.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 40. Boundary details de la frontera *PAREDES_CONCRETO_CANAL*.

Letra	Concepto
a	<ul style="list-style-type: none"> • <i>No slip wall</i> condiciona a la pared a no tener libre deslizamiento, una condición de libre deslizamiento sería demasiado ideal y no representaría la realidad.
b	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Rough Wall</i> se selecciona con el propósito de ingresar un valor de rugosidad (absoluta) como dato. • El dato de rugosidad absoluta (k) o grano de arena (<i>Sand Grain Roughness</i>) para las paredes de concreto simple que forman el canal artificial se obtiene de la Tabla 25 y es de 0.36 [mm].

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar se realiza un clic en la opción *Apply*, seguido de un clic en *OK*. Su gráfico correspondiente se muestra en la Figura 103.

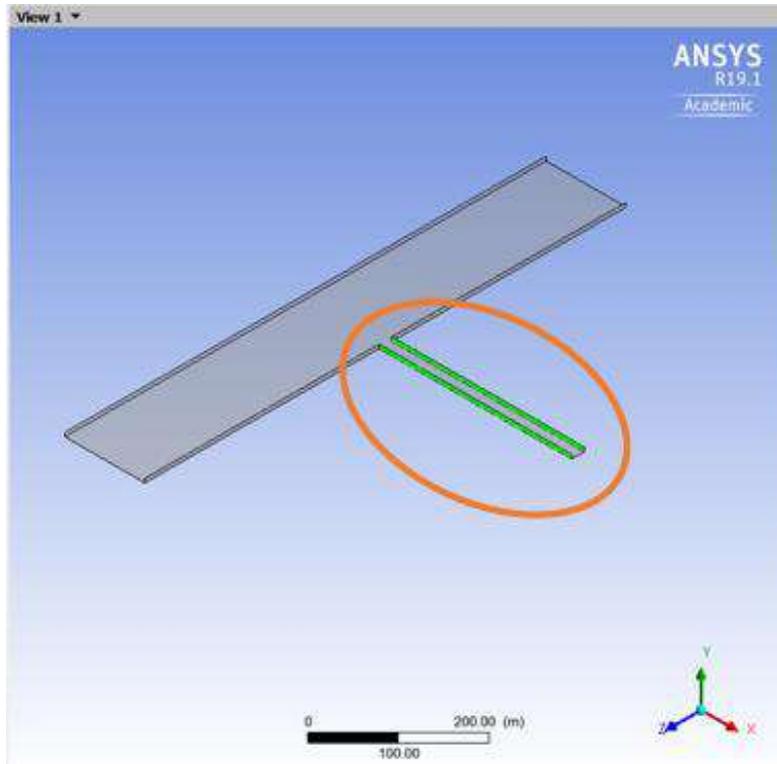


Figura 103. Configuración completa y gráfico de la frontera *PAREDES_CONCRETO_CANAL*.
Fuente: Elaboración propia

F. Sexta frontera: *PAREDES_ARENA_RIO*

La configuración de la frontera *PAREDES_ARENA_RIO* es idéntica a la utilizada en la quinta frontera *PAREDES_CONCRETO_CANAL*.

Los datos utilizados en la frontera *PAREDES_ARENA_RIO* se presentan en la siguiente Tabla 41:

Tabla 41. Datos sobre la frontera *PAREDES_ARENA_RIO*.

Frontera <i>PAREDES_ARENA_RIO</i>	
Tipo de límite	<i>Wall</i>
Masa y momento	<i>No slip wall</i>
Rugosidad de pared	<i>Rough wall</i>
Grano de arena	500 [mm]

Fuente: Elaboración propia

Basic settings (ver Figura 104):

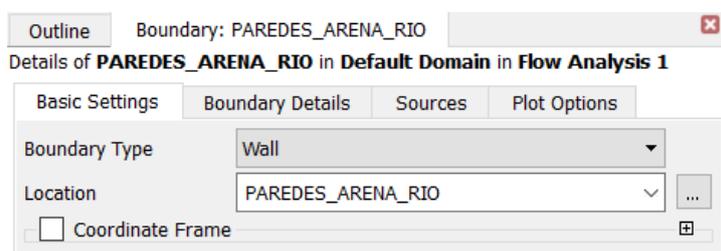


Figura 104. Basic settings de la frontera *PAREDES_ARENA_RIO*.
Fuente: Elaboración propia

Boundary details (ver Figura 105):

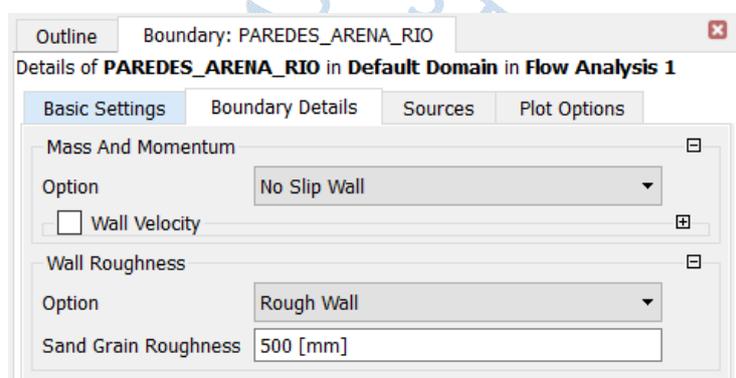


Figura 105. Boundary details de la frontera *PAREDES_ARENA_RIO*.
Fuente: Elaboración propia

- La configuración de las variables de la frontera *PAREDES_ARENA_RIO* es similar a la establecida en el límite *PAREDES_CONCRETO_CANAL*, con la excepción del grano de arena, el cual toma el valor de 500 [mm] correspondiente a la rugosidad absoluta de grandes ríos establecida en la Tabla 24.

Para finalizar se realiza un clic en la opción *Apply*, seguido de un clic en *OK*. Su gráfico correspondiente se muestra en la Figura 106.

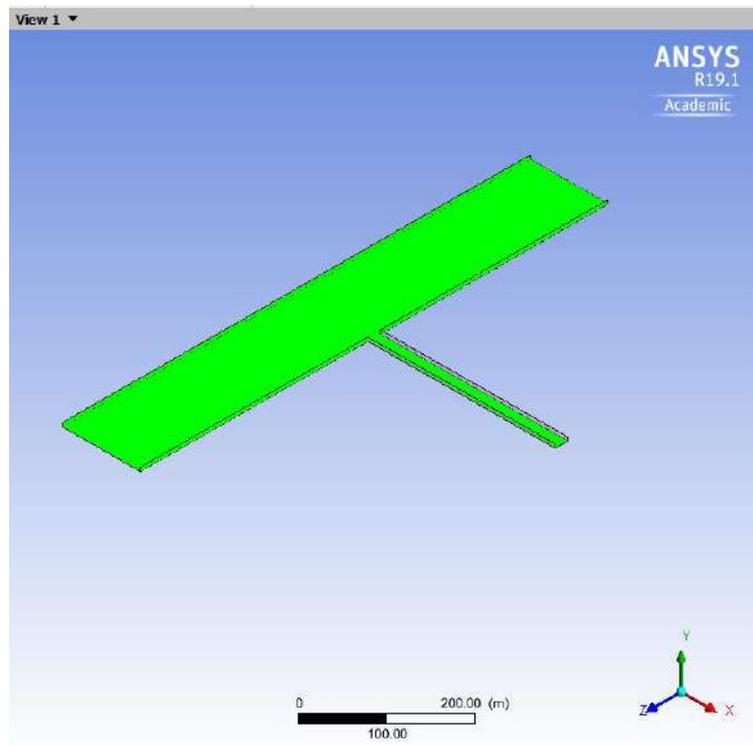


Figura 106. Configuración completa y gráfico de la frontera PAREDES_ARENA_RIO.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 107 muestra el gráfico completo de la configuración de todas las fronteras estudiadas en el presente proyecto:

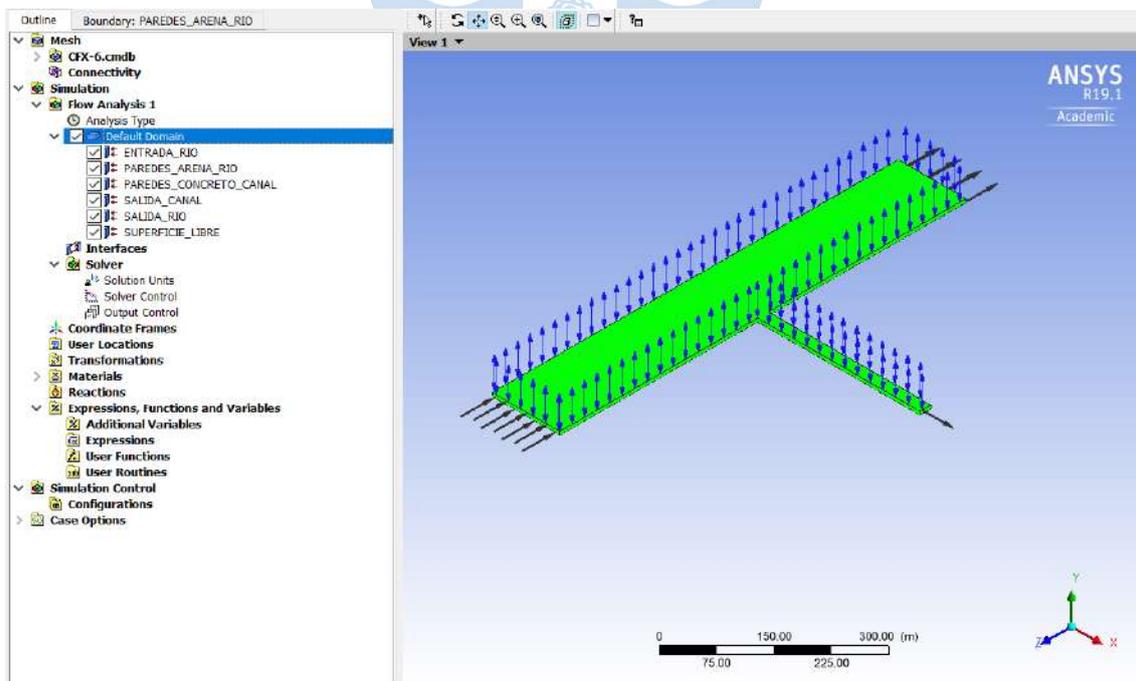


Figura 107. Gráfico completo de la configuración de las fronteras del proyecto.

Fuente: Elaboración propia

4.4 Configuración del tipo de análisis y control del solucionador (Setup)

4.4.1 Configuración del tipo de análisis. El tipo de análisis requerido en el proyecto es un análisis de flujo estacionario o estable.

A continuación, se detallan los pasos necesarios para el ingreso de las condiciones deseadas:

- Se realiza un clic derecho en la opción de *Analysis Type*, y se selecciona la opción *Edit*. (ver Figura 108).

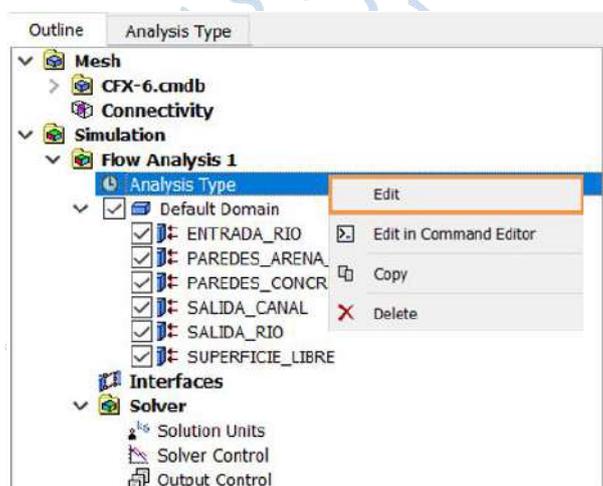


Figura 108. Opción de edición de las condiciones del tipo de análisis.

Fuente: Elaboración propia

Basic Settings (ver Figura 109):

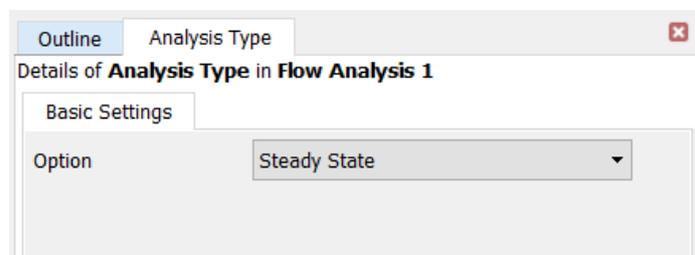


Figura 109. Configuración de las condiciones del tipo de análisis.

Fuente: Elaboración propia

4.4.2 Configuración del control del solucionador. A fin de optimizar el tiempo de simulación y la calidad de los resultados se deben determinar algunas opciones de configuración del Control del Solucionador. El procedimiento para ello, será el siguiente:

- Se realiza un clic derecho en la opción de *Solver Control*, y se selecciona la opción *Edit* (ver Figura 110).

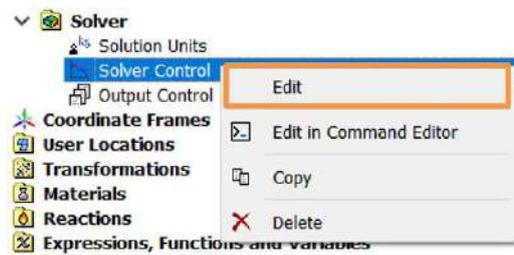


Figura 110. Opción de edición de las condiciones del Solver control.

Fuente: Elaboración propia

Basic Settings (ver Figura 111 y Tabla 42):

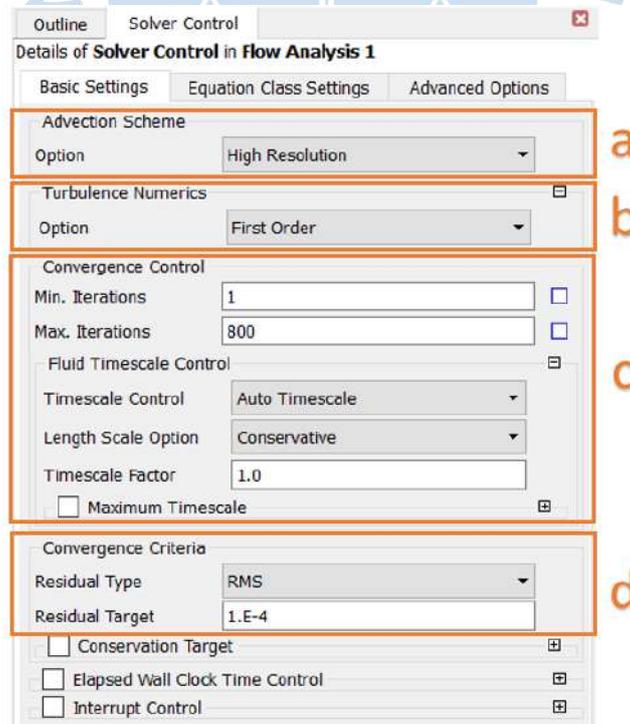


Figura 111. Configuración de las condiciones del Solver control.

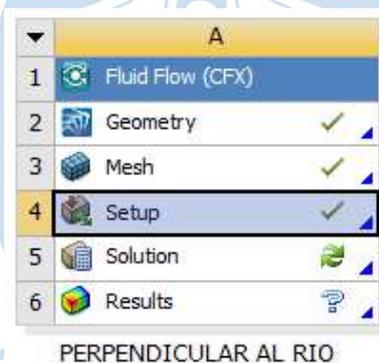
Fuente: Elaboración propia

Tabla 42. Configuración de las condiciones del Solver control.

Letra	Concepto
a	<ul style="list-style-type: none"> El esquema fijado de advección en <i>High Resolution</i> permite mejorar la resolución numérica de las ecuaciones.
b	<ul style="list-style-type: none"> El modelo de turbulencia fijado en <i>First Order</i> permite reducir el costo computacional, puesto que, para fines prácticos, la intensidad al 5% es suficiente.
c	<ul style="list-style-type: none"> El control de convergencia se realizará entre 1 y 800 iteraciones como máximo por cada <i>timestep</i> con el fin de reducir los valores residuales de las ecuaciones.
d	<ul style="list-style-type: none"> Se escogió el valor residual de convergencia de 10^{-4} para los RMS como criterio para detener la simulación.

Fuente: Elaboración propia

- Se cierra la ventana del *Setup* y se verifica con el check verde al lado de la opción *Setup* del módulo (ver Figura 112).

**Figura 112. Verificación del Setup.**

Fuente: Elaboración propia

- Se repite el proceso de configuración para cada una de las alternativas de solución. Concluida la configuración del *Setup*, se procederá a la simulación (Procesamiento) y vista posterior de los resultados del proyecto.

5 ANSYS CFX: Procesamiento

5.1 Solución numérica. Hace referencia al módulo *Solution* en el cual el ordenador de ANSYS realiza los cálculos de las ecuaciones establecidas mediante iteraciones consecutivas, hasta llegar a la convergencia o condiciones estables.

La solución numérica presenta en gráficos y tablas, los valores residuales RMS o MAX de los resultados de las variables, según el criterio de convergencia elegido en el *Setup*. Estos se obtienen debido al error de cierre de turbulencia, ya que las ecuaciones no tienen solución analítica única, motivo por el cual se usa matemática estadística mediante las iteraciones.

El procedimiento a seguir para dar inicio al procesamiento del proyecto se presenta a continuación:

- Para ingresar a la ventana de trabajo (ver Figura 114), se procede con clic derecho en la opción *Solution* del módulo, y se selecciona la alternativa *Edit* (ver Figura 113).

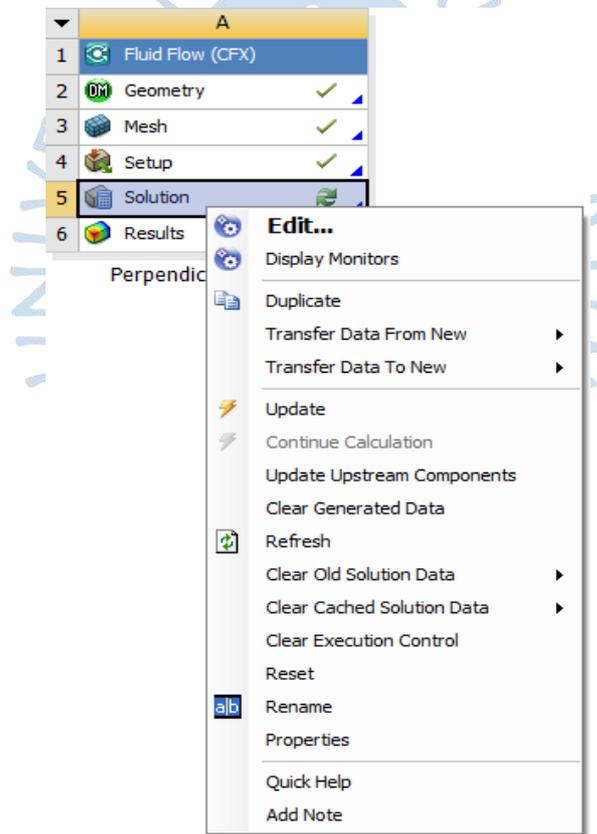


Figura 113. Opciones de la herramienta *Solution*.
Fuente: Elaboración propia

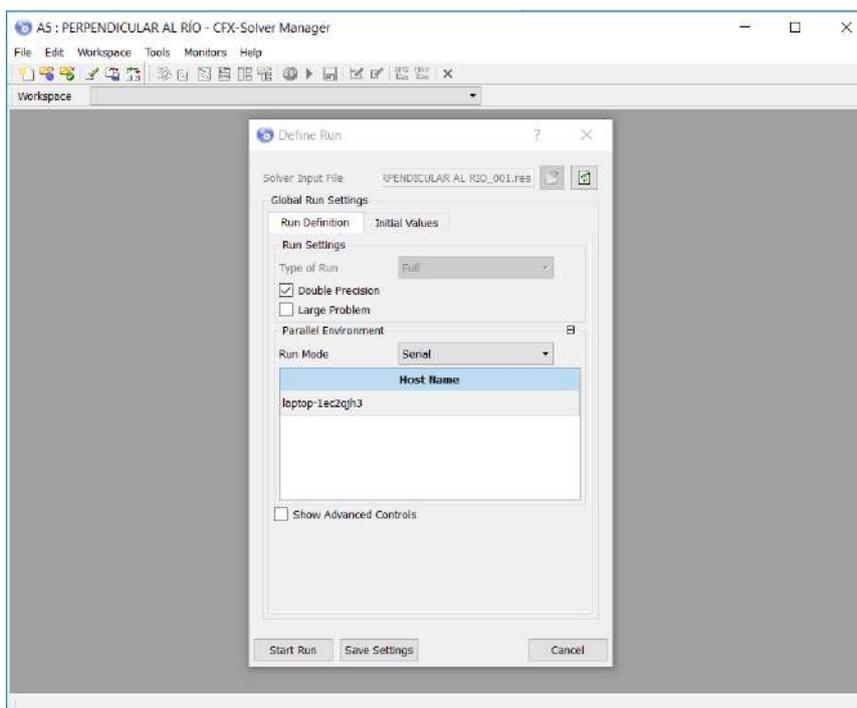


Figura 114. Vista preliminar Solution – Configuración de Define Run.
Fuente: Elaboración propia

La Figura 114 muestra la ventana de trabajo *Define Run*, de la cual se elige la opción de *Double Precision* para mayor precisión y velocidad en la obtención de resultados, seguido de un clic en *Star Run* para dar inicio al Procesamiento.

Una vez iniciado el procesamiento del proyecto, la ventana del *Solution* queda dividida en dos zonas (ver Figura 115):

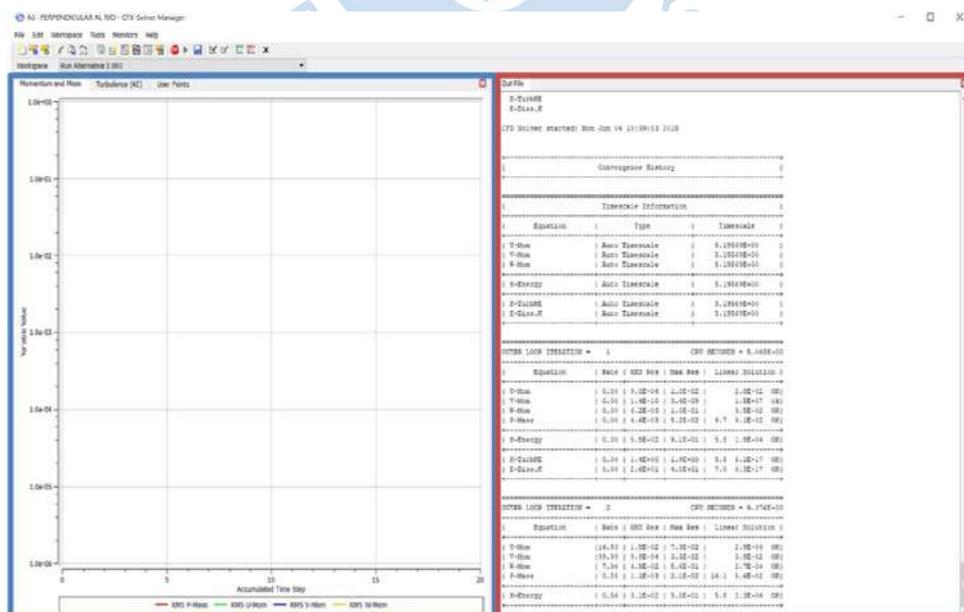


Figura 115. Zonas del CFX Solution.
Fuente: Elaboración propia

La primera zona (azul) presenta el progreso gráfico de los valores residuales RMS de las ecuaciones de Momentum y Masa (*Momentum and Mass*), de Turbulencia (*Turbulence (KE)*) y Fracción de Volumen (*Volume Fractions*). Finalmente, se puede añadir un nuevo monitor que muestre los Imbalances de las ecuaciones antes mencionadas, cuyos pasos serán descritos más adelante. La segunda zona (guinda) muestra los valores residuales RMS de las ecuaciones en estudio, además de brindar información sobre los rangos de valores de las propiedades y características del fluido obtenidas con cada iteración. Los gráficos finales se muestran en las Figuras 116, 117 y 118.

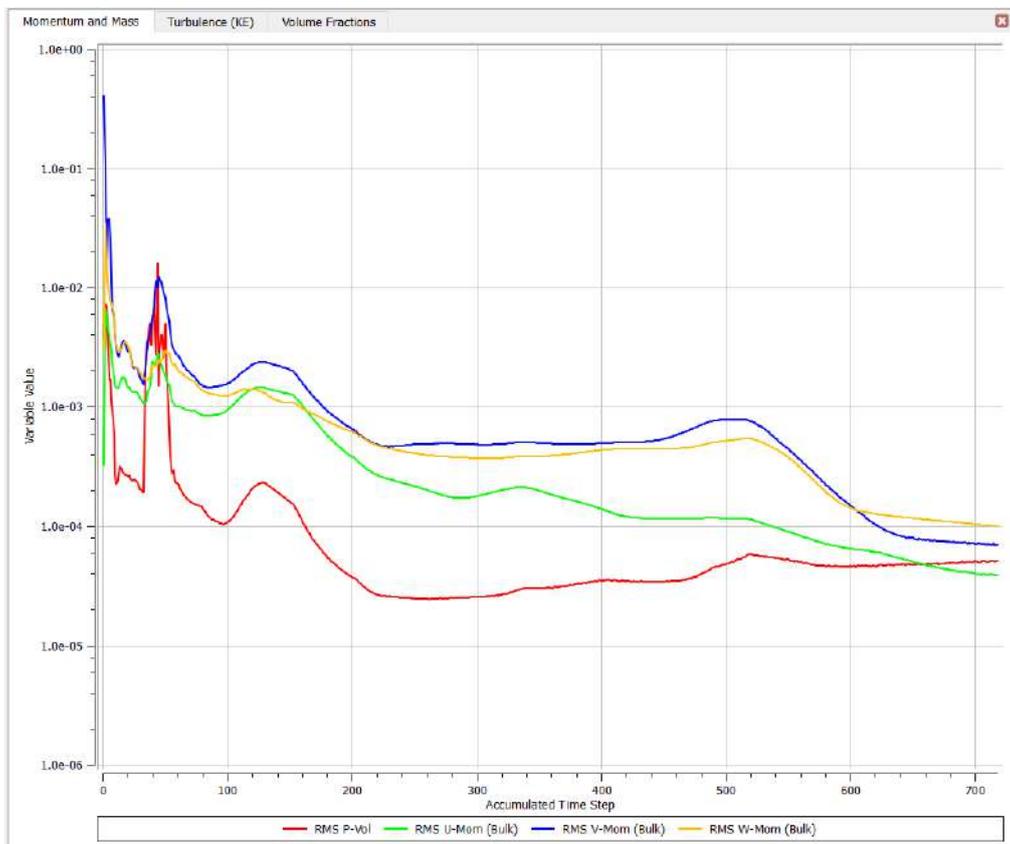


Figura 116. Residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de conservación de Momentum y masa.

Fuente: Elaboración propia

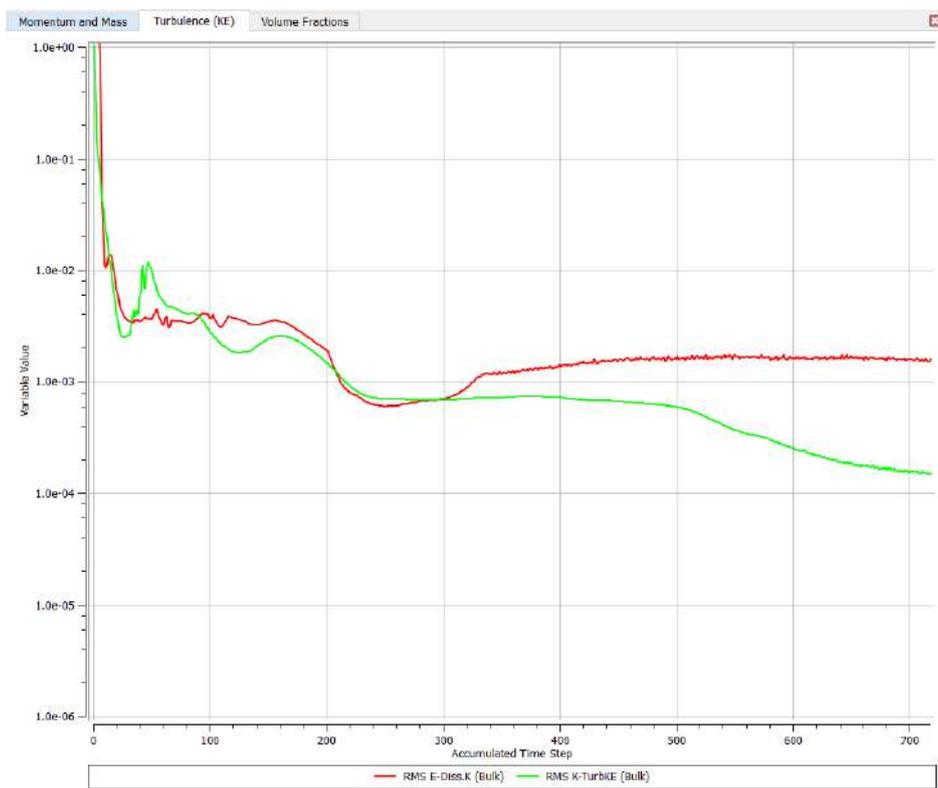


Figura 117. Residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de turbulencia.
Fuente: Elaboración propia

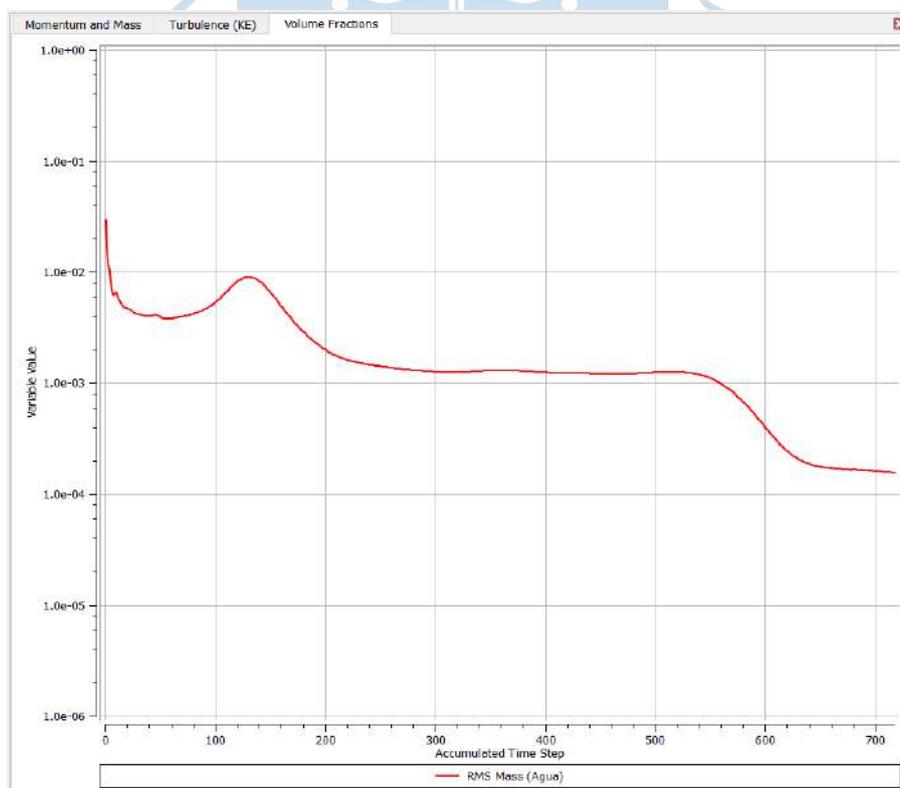


Figura 118. Residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de fracción de volumen.
Fuente: Elaboración propia

Para obtener la gráfica de los Imbalances se debe hacer clic en la opción de *New Monitor* de la barra de herramientas del *Solution* (ver Figura 119) y posteriormente, nombrar el nuevo monitor como Imbalances, seguido de un clic en *OK* (ver Figura 120).



Figura 119. Opción New Monitor del Solution.

Fuente: Elaboración propia

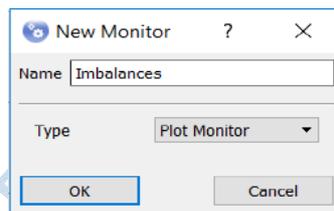


Figura 120. Opción para nombrar el nuevo monitor de Imbalances.

Fuente: Elaboración propia

En el monitor de propiedades de los Imbalances se debe seleccionar todas las ecuaciones que son objeto de estudio en el proyecto, presentes en la opción *Default Domain* de la región de *IMBALANCE* de la ventana *Plot Lines*. Continuar con un clic en la opción *Apply*, seguido de un clic en *OK* (ver Figura 121).

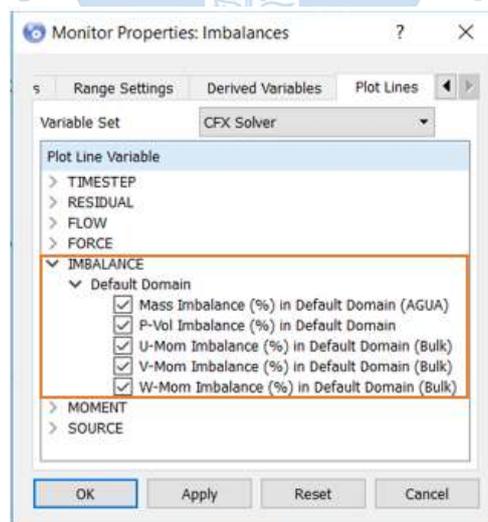


Figura 121. Configuración del monitor Imbalances.

Fuente: Elaboración propia

De este modo obtenemos un nuevo gráfico de Imbalances en la primera zona del *Solution* (ver Figura 122). Si se requiere ver el gráfico al final de las iteraciones con mayor detalle, se debe seguir los siguientes pasos:

- Para regresar a las propiedades del monitor, se realiza un clic derecho sobre el nuevo monitor de Imbalances y se selecciona la opción de *Monitor Properties*.
- Se elige la ventana *Range Settings* y se procede a configurar la opción *Timestep Range Mode* en *Most Recent* y el *Timestep Window Size* de 10 (ver Figura 123). Finalmente se realiza un clic en la opción *Apply* seguido de un clic en *OK*. De este modo, se obtiene un nuevo monitor que muestra a detalle el comportamiento de los Imbalances de las ecuaciones en estudio, en un rango último de 10 iteraciones (ver Figura 124).

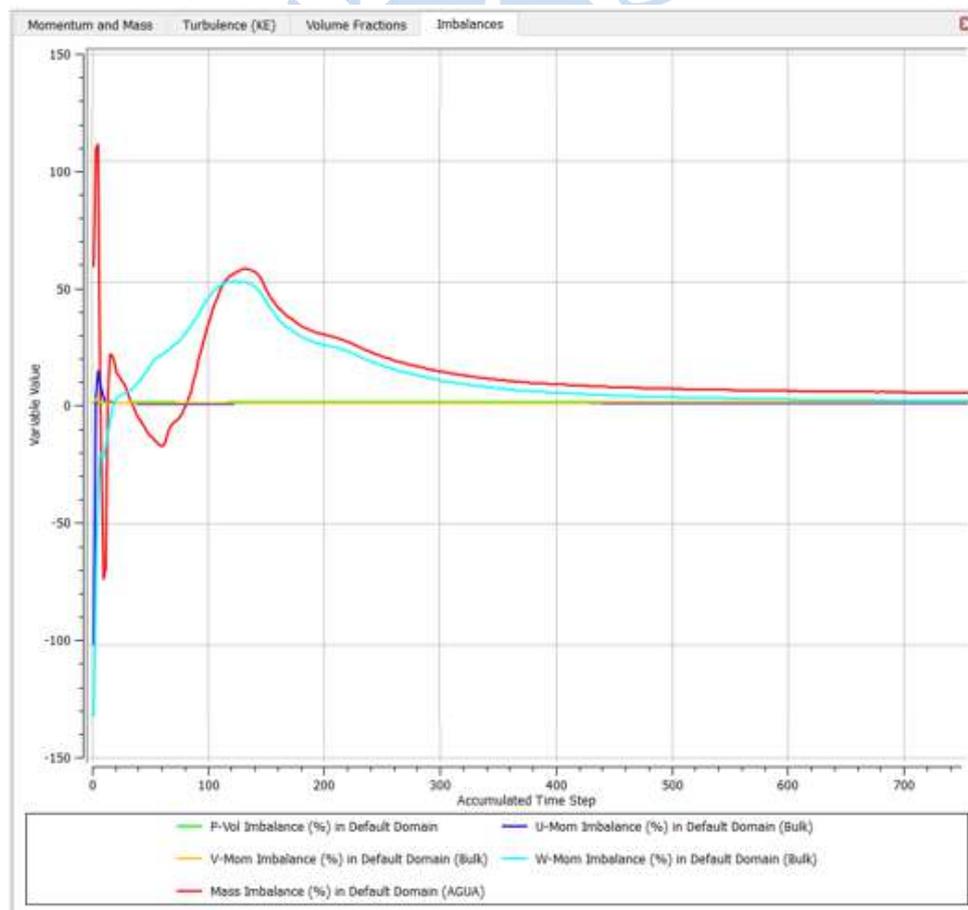


Figura 122. Imbalances de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido.
Fuente: Elaboración propia

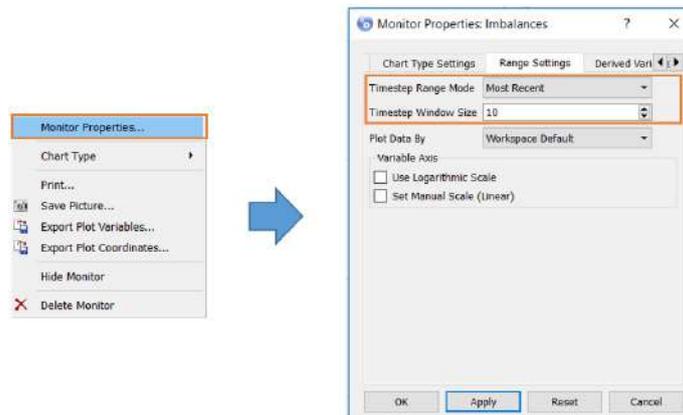


Figura 123. Configuración de las propiedades del monitor.

Fuente: Elaboración propia

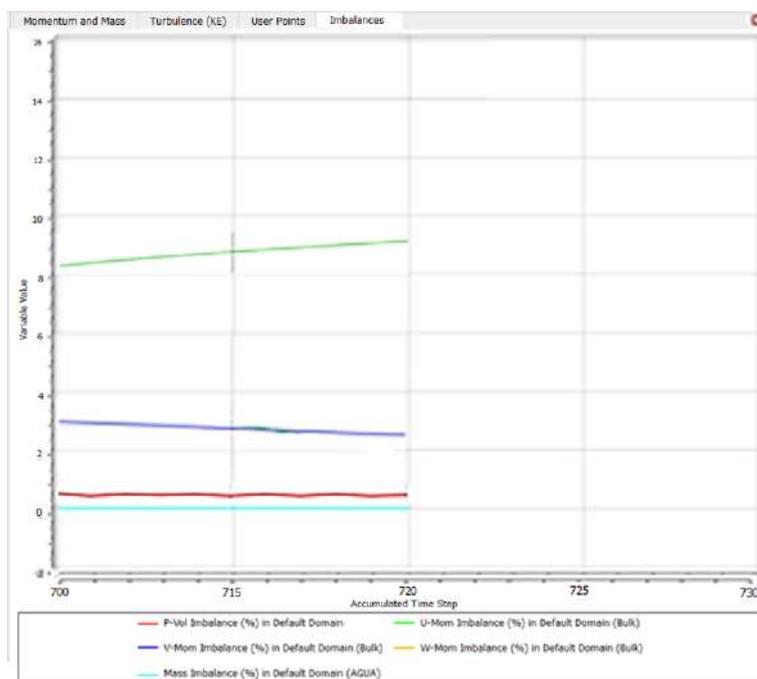


Figura 124. Detallado de Imbalances en un rango de estudio más reciente.

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar con la configuración del *Solution*, en la Figura 125 se muestra los resultados obtenidos en la segunda zona sobre los rangos de valores de las propiedades y características del fluido obtenidas al final de la convergencia.

Average Scale Information		
Domain Name : Default Domain		
Global Length	=	8.3131E+01
Minimum Extent	=	6.0000E+00
Maximum Extent	=	7.5000E+02
Aire.Density	=	1.1850E+00
Aire.Dynamic Viscosity	=	1.8310E-05
Aire.Velocity	=	3.6570E+00
Aire.Advection Time	=	2.2732E+01
Aire.Reynolds Number	=	1.9675E+07
Aire.Mass (Conservative)	=	1.8141E+05
Aire.Mass (Normalised)	=	1.8141E+05
Aire.Volume	=	1.5309E+05
Aire.Volume Fraction	=	2.6647E-01
Agua.Density	=	9.9700E+02
Agua.Dynamic Viscosity	=	8.8990E-04
Agua.Velocity	=	3.6570E+00
Agua.Advection Time	=	2.2732E+01
Agua.Reynolds Number	=	3.4060E+08
Agua.Mass (Conservative)	=	4.2015E+08
Agua.Mass (Normalised)	=	4.2015E+08
Agua.Volume	=	4.2141E+05
Agua.Volume Fraction	=	7.3353E-01
Wave Speed	=	2.8557E+01
Froude Number	=	1.2806E-01

Variable Range Information		
Domain Name : Default Domain		
Variable Name	min	max
Aire.Density	1.19E+00	1.19E+00
Aire.Dynamic Viscosity	1.83E-05	1.83E-05
Agua.Density	9.97E+02	9.97E+02
Agua.Dynamic Viscosity	8.90E-04	8.90E-04
Agua.Velocity u	-3.67E+00	9.87E+00
Agua.Velocity v	-8.63E+00	4.07E+00
Agua.Velocity w	-9.96E+00	5.47E+00
Pressure	-4.49E+03	5.40E+04
Agua.Conservative Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
Aire.Volume Fraction	1.11E-15	1.00E+00
Agua.Volume Fraction	1.00E-15	1.00E+00
Agua.Turbulence Kinetic Energy	1.43E-09	7.94E+00
Agua.Turbulence Eddy Dissipation	9.19E-08	5.59E+00
Aire.Eddy Viscosity	2.38E-12	2.05E+00
Agua.Eddy Viscosity	2.00E-09	1.72E+03
Eddy Viscosity	3.77E-10	1.34E+03

Figura 125. Propiedades y características del fluido al final de la convergencia.

Fuente: Elaboración propia

Se debe tener presente, que todos los gráficos y tablas del *Solution* se obtienen una vez alcanzada la convergencia (en nuestro caso: $RMS 10^{-4}$) o llegando al máximo número de iteraciones establecidas en el *Setup* (800).

Al culminar, se cierra la ventana general y se verifica con el check verde al lado de la opción *Solution* de nuestro módulo (ver Figura 126). Se repite el proceso para cada una de las alternativas de solución. Concluida la configuración del *Solution*, se procederá a la obtención de los resultados finales del proyecto.

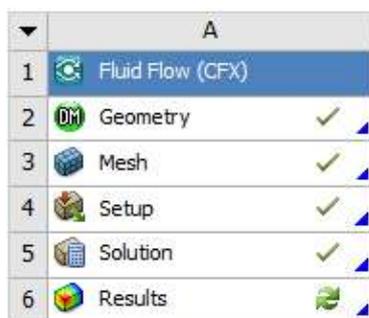


Figura 126. Verificación del Solution.

Fuente: Elaboración propia



Capítulo 4 Resultados del modelo

En el presente capítulo se muestra el procedimiento para obtener los resultados (*Results*) del programa ANSYS CFX y su comparación entre las diferentes alternativas de solución.

Para el presente caso estudio, se iniciará evaluando y comparando los resultados de Líneas de Corriente, cuyos gráficos permitirán evaluar tres nuevos factores de estudio (ancho de captación del caudal del río, zona de estancamiento y depósito; y ancho efectivo), seguido del Perfil de Velocidades en vista de planta (*SUPERFICIE LIBRE*) y en secciones estratégicas del canal de captación (*ENTRADA Y SALIDA DEL CANAL*); y se culminará con el cálculo de las velocidades promedio en la captación del canal de cada alternativa de solución, este último permitirá establecer el volumen captado del recurso hídrico.

Asimismo, se evaluará el comportamiento del flujo para diferentes ángulos de bifurcación y se establecerán relaciones determinantes en el diseño de obras hidráulicas.

Para ingresar a la ventana de trabajo (ver Figura 128) se realiza un clic derecho en la opción *Results* del módulo, seguido de la selección de la alternativa *Edit* (ver Figura 127).

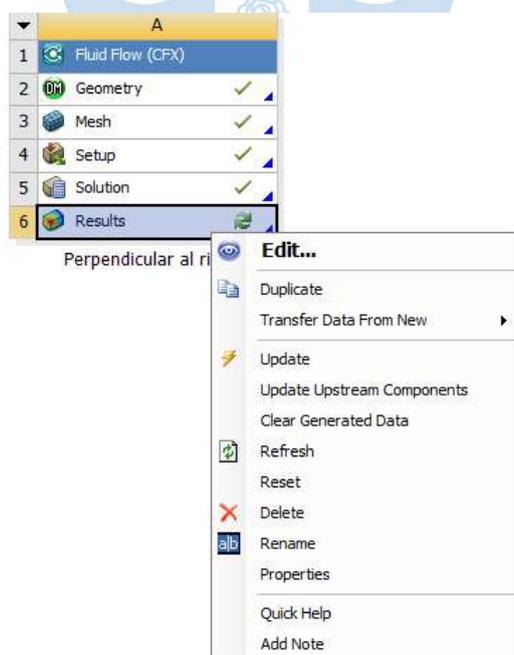


Figura 127. Opciones de la herramienta *Results*.
Fuente: Elaboración propia

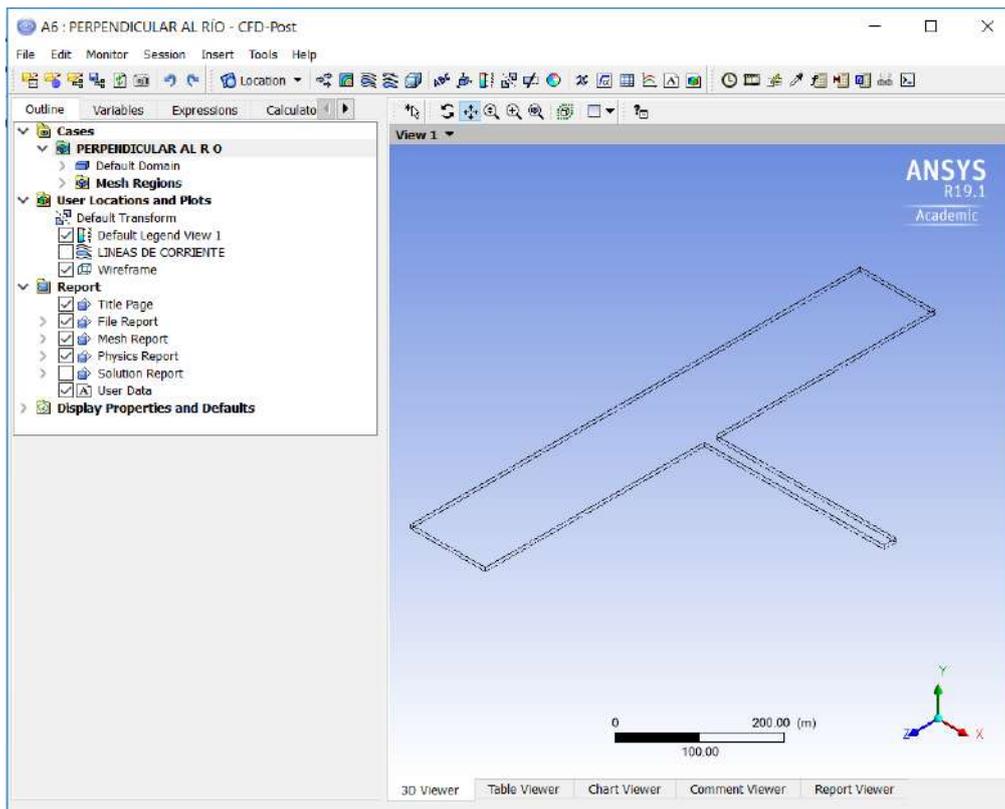


Figura 128. Vista preliminar Results – CFD Post.

Fuente: Elaboración propia

1 Líneas de corriente

El estudio del movimiento de los fluidos es, en general, un problema muy complejo. Las moléculas de un fluido, además de ejercer entre sí acciones mutuas de gran importancia, pueden tener diferentes velocidades y estar sujetas a distintas aceleraciones. Por esta razón es necesario tener en cuenta conceptos adicionales al aplicar las leyes de la dinámica de los fluidos en movimiento (Adrián, 2008).

El movimiento de un fluido está definido por un campo vectorial de velocidades correspondientes a las partículas del flujo, y un campo escalar de presiones en función de la posición y el tiempo, correspondientes a los distintos puntos del mismo.

Se denomina Línea de Flujo a la trayectoria seguida por un elemento de un fluido móvil. En general, a lo largo de la línea de flujo, la velocidad del elemento varía tanto en magnitud como en dirección. Si todo elemento que pasa por un punto dado sigue la trayectoria que los elementos precedentes, se dice que el flujo es estacionario.

Las líneas de corriente son curvas imaginarias dibujadas a través de un fluido en movimiento y que indican la dirección de éste en los diversos puntos del flujo del fluido. La tangente en un punto de la curva representa la dirección instantánea de la velocidad de las partículas fluidas en dicho punto. Las tangentes a las líneas de corriente pueden representar de esta forma la dirección media de la velocidad. Como la componente de la velocidad normal a la línea de corriente es nula, queda claro que no existe en ninguno de sus puntos flujo perpendicular a la línea de corriente.

Si se consideran todas las líneas de corriente que pasan por un contorno cerrado, estas líneas encierran un volumen denominado Tubo de corriente. De la definición de la línea de corriente se deduce que no pasa fluido a través de las paredes laterales de un tubo de corriente (ver Figura 129).

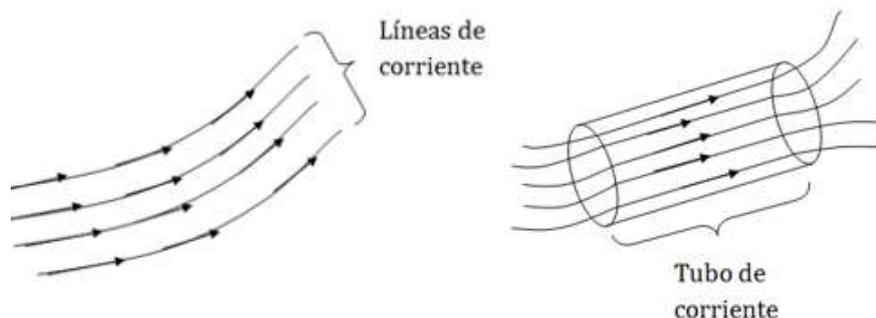


Figura 129. Líneas de corriente y tubo de corriente.
Fuente: Física práctica, 2007.

Para visualizar los gráficos de líneas de corriente de nuestro proyecto se debe cumplir con el siguiente procedimiento:

- Se elige la opción *Streamline* de la barra de herramientas (ver Figura 130) y se procede a nombrar nuestro gráfico como *LÍNEAS DE CORRIENTE* (ver Figura 131), seguido de un clic en *OK* para dar lugar a la configuración de los detalles del mismo.



Figura 130. Opción Streamline – CFD Post.
Fuente: Elaboración propia

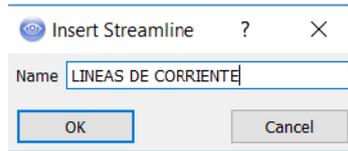


Figura 131. Opción para nombrar el gráfico Streamline de *LÍNEAS DE CORRIENTE*.
Fuente: Elaboración propia

Los detalles del gráfico de *LÍNEAS DE CORRIENTE* se presentan en la Figura 132 y Tabla 43:

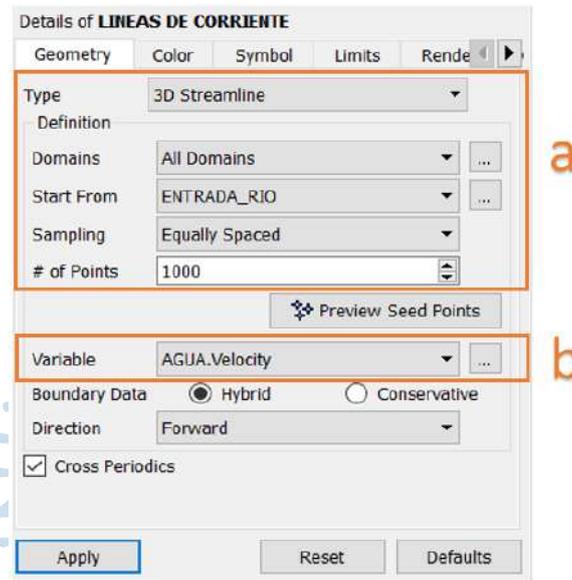


Figura 132. Detalles del gráfico *LÍNEAS DE CORRIENTE*.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 43. Detalles del gráfico *LÍNEAS DE CORRIENTE*.

Letra	Concepto
a	<ul style="list-style-type: none"> • El tipo de línea en 3D permite mejor visualización del recorrido del flujo dentro del cuerpo (<i>3D Streamline</i>) y abarcará todos los dominios del proyecto (<i>All Domains</i>), es decir recorrerá todo el cuerpo en estudio. • El inicio del gráfico será el mismo inicio del recorrido del flujo dentro del dominio, es decir, tendrá como frontera de partida a <i>ENTRADA_RIO</i>. • El número de puntos establece la cantidad de líneas que describirán el comportamiento del flujo, por ende, mientras más puntos de estudio se considere, mejor proyección del gráfico en el cuerpo. Se consideró 1000 puntos.
b	<ul style="list-style-type: none"> • La variable que será descrita en el gráfico será la velocidad del agua (<i>AGUA.Velocity</i>).

Fuente: Elaboración propia

Finalizada la configuración de los detalles del gráfico *LÍNEAS DE CORRIENTE*, se procede a dar clic en *Apply*. En ese momento obtenemos el gráfico correspondiente en la ventana *View* de la derecha y aparece su ícono correspondiente en la ventana *Outline* (ver Figura 133).

Para obtener una mejor proyección del gráfico, se escogió la vista de planta del cuerpo en estudio, para ello se realiza un clic en el eje perpendicular a la base del cuerpo: para el caso estudio corresponde el eje “y”.

Se repite el proceso para cada alternativa, obteniéndose los gráficos de la Figura 134.

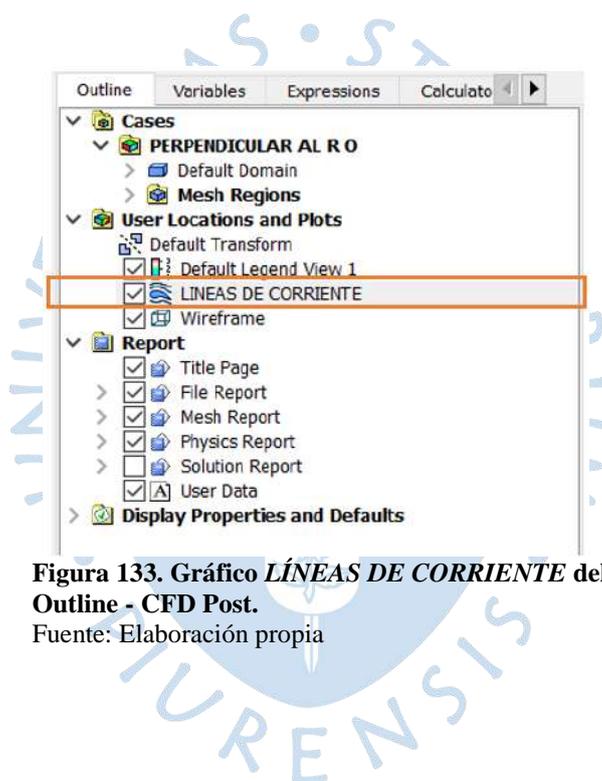


Figura 133. Gráfico *LÍNEAS DE CORRIENTE* del Outline - CFD Post.
Fuente: Elaboración propia

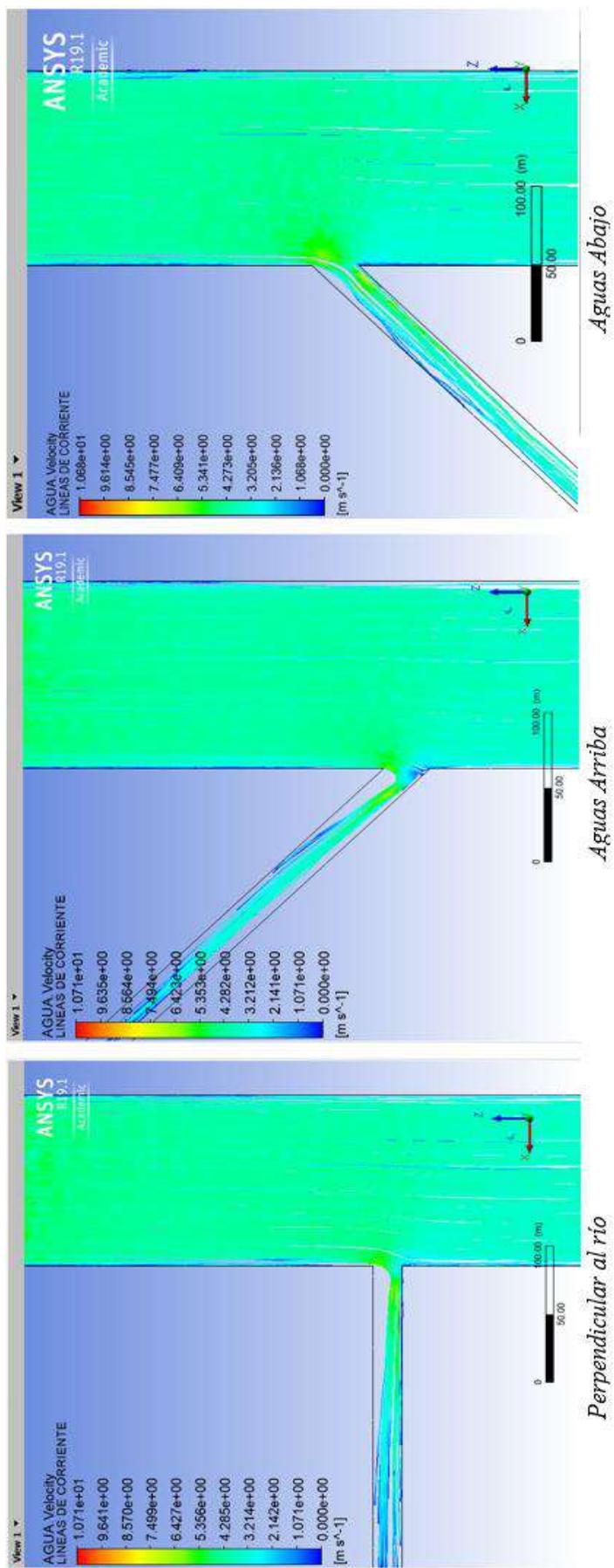


Figura 134. Líneas de corriente de las alternativas de solución del proyecto.
Fuente: Elaboración propia

1.1 Ancho de captación del caudal del río (c). Una estructura hidráulica de captación de gran envergadura está constituida principalmente por una Bocatoma, la cual está destinada a derivar parte del agua disponible de una fuente. En ocasiones es utilizada en grandes ríos, pero su costo es bastante elevado. Las bocatomas construidas técnicamente constan en general de compuertas de control (Barreras móviles y fijas) (ver Figura 135).

Cada tipo de compuerta se diseña según especificaciones del cliente, dimensiones del conducto y necesidades de carga o caudal; este último, representa el criterio con mayor importancia en el dimensionamiento de las compuertas. A partir del caudal de entrada del río, se puede establecer e identificar un ancho de captación del caudal del río originado por el canal de toma; el cual representa el rango de captación de la obra hidráulica. Muchos especialistas utilizan dicho valor para establecer el dimensionamiento del ancho de compuerta.

Por esta razón, se ha creído conveniente identificar el ancho de captación del caudal del río para cada alternativa en evaluación. Este proceso tiene lugar en el Post-procesamiento del proyecto.

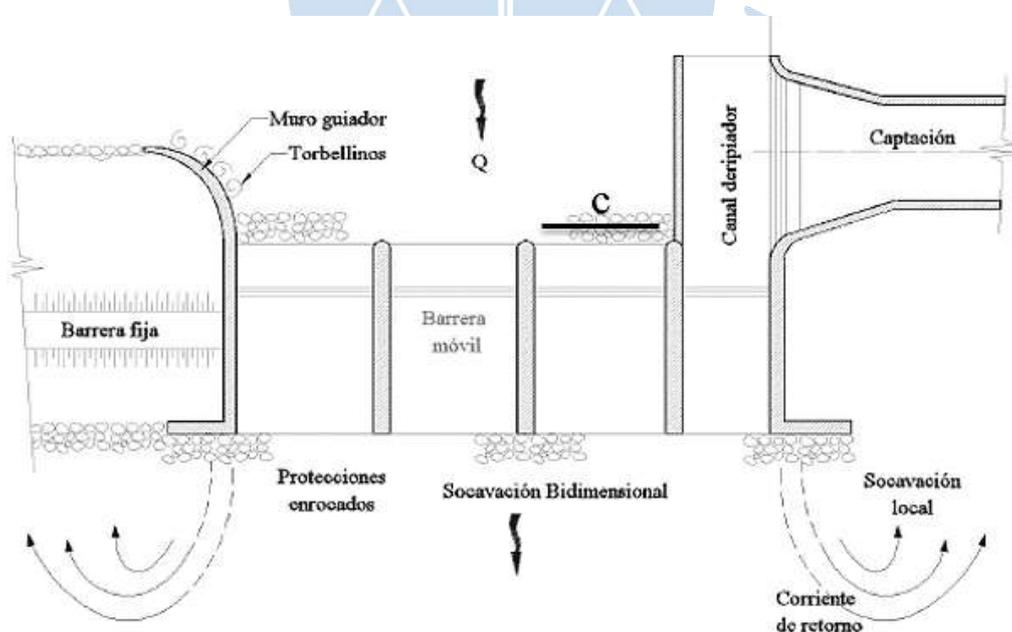


Figura 135. Vista de planta de una Bocatoma.
Fuente: González, 2011.

Para obtener el ancho de captación del caudal del río en el gráfico de resultados del CFD-Post, se utilizó la herramienta de animación con la finalidad de captar el conjunto de líneas del *Streamline* que ingresa al canal de captación:

- Se escoge opción *Animation* de la barra de herramientas (ver Figura 136), para continuar con la configuración del mismo (ver Figura 137 y Tabla 44).



Figura 136. Opción Animation – CFD Post.
Fuente: Elaboración propia

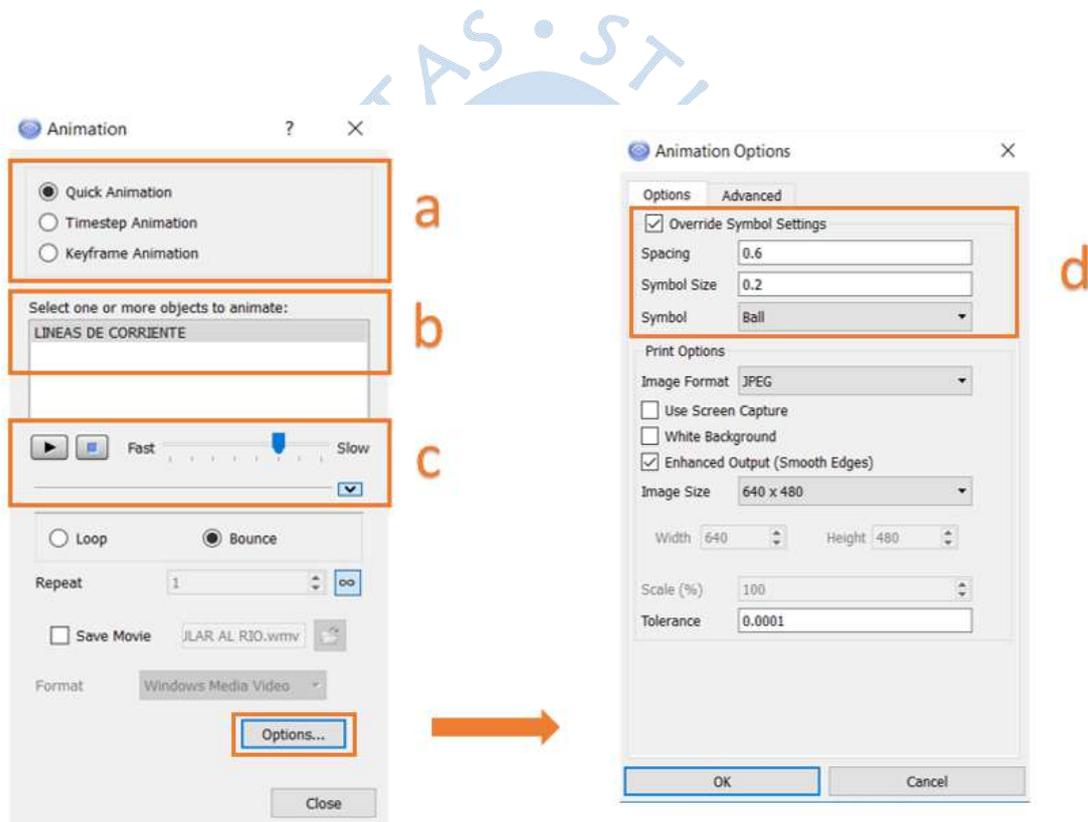


Figura 137. Detalles de animación.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 44. Detalles de animación.

Letra	Concepto
a	<ul style="list-style-type: none"> Se selecciona <i>Quick Animation</i> por defecto, debido a que no se necesitan rigurosas configuraciones en el tiempo.
b	<ul style="list-style-type: none"> Se selecciona el gráfico de <i>LÍNEAS DE CORRIENTE</i> como objeto de animación. De esta forma, la animación seguirá el patrón establecido por el <i>Streamline</i> de <i>LINEAS DE CORRIENTE</i>, es decir iniciará en la frontera <i>ENTRADA_RÍO</i> y continuará el recorrido descrito por las líneas del gráfico.
c	<ul style="list-style-type: none"> Se regula la velocidad de animación y se establece que tan rápido (<i>Fast</i>) o lento (<i>Slow</i>) tendrá su comportamiento
d	<ul style="list-style-type: none"> Se procede a cambiar el tamaño del símbolo de animación, dado que aparecen símbolos de gran tamaño por defecto y no se logra obtener una visión adecuada del fenómeno: se escoge las opciones de animación (<i>Options</i>) y se procede a cambiar el tamaño del símbolo (<i>Symbol Size</i>), para el proyecto en 0.2.

Fuente: Elaboración propia

- Una vez determinada la configuración de animación, se realiza un clic en *OK* y se inicia la misma mediante un clic en el símbolo *Play* (sección c).
- Una vez iniciada la nueva animación del *Streamline*, se procede a medir el ancho de captación 11 cercano a la entrada del canal de toma. Se repite el proceso para cada una de las alternativas de solución obteniéndose los gráficos y resultados de la Figura 138.

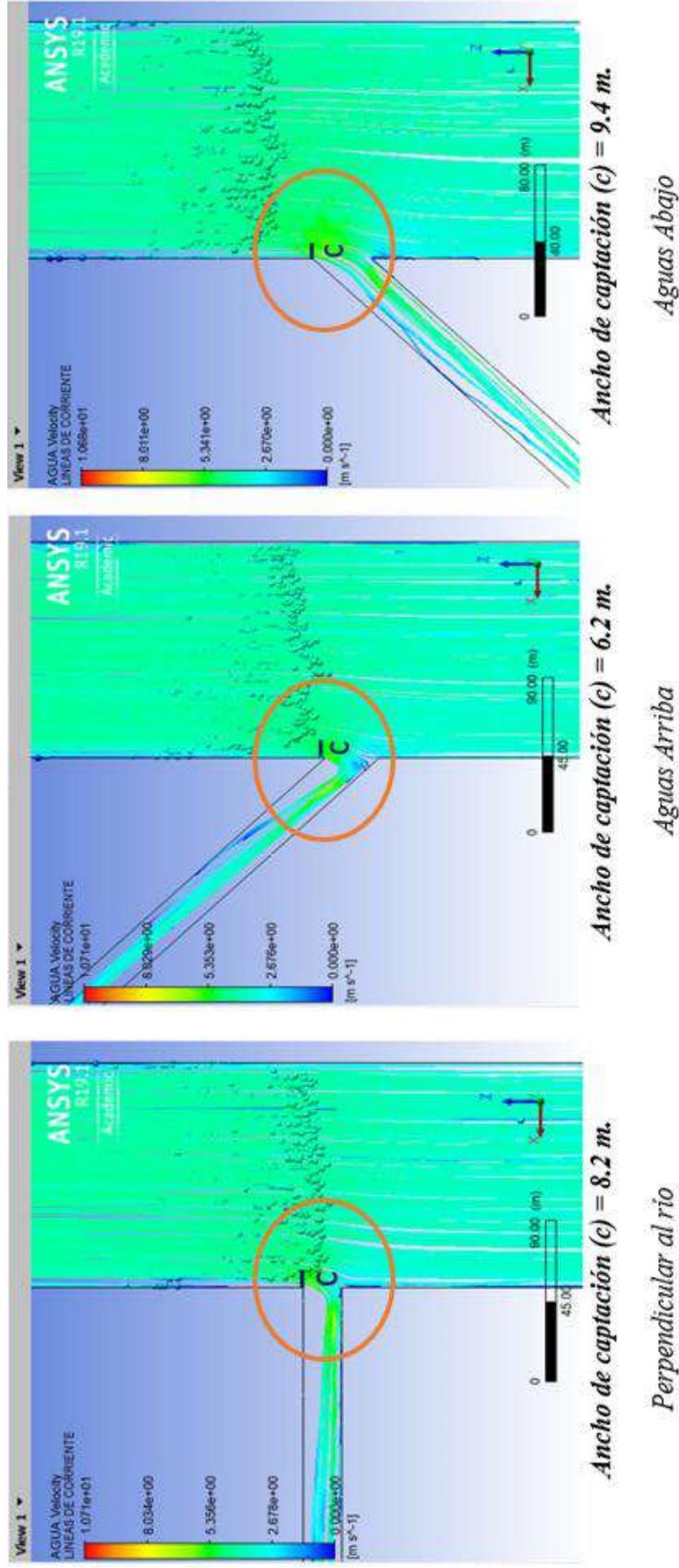


Figura 138. Ancho de captación del caudal del río de las alternativas de solución del proyecto.
Fuente: Elaboración propia

La fabricación de una compuerta con el ancho exacto coincidente con la medida del ancho de captación del caudal del río, presenta un costo demasiado elevado.

En la actualidad existen compuertas elaboradas con anchos comerciales establecidos con previos estudios y experiencia, presentando un costo menor al caso antes expuesto.

A partir de los resultados obtenidos en la Figura 138 y escogiendo un ancho comercial de compuerta de 10 metros, se concluye lo siguiente:

- El ancho comercial escogido abarca los anchos de captación del caudal del río obtenidos de todas las alternativas de solución, sin problemas de pérdidas de caudal.
- Sin embargo, los anchos de captación de las alternativas *perpendicular al río* y *aguas arriba* distan en gran medida (1.8 y 3.8 metros respectivamente) del ancho de compuerta, en relación a la alternativa *aguas abajo* (0.6 metros) presentando los siguientes posibles inconvenientes: problemas constructivos en la entrada del canal de toma ocasionando una posible inundación y destrucción de la misma, gasto innecesario en la compra de una compuerta que no será aprovechada al máximo.

2 Zonas de estancamiento y depósito

Las zonas de estancamiento y depósito de sedimentos en un canal hidráulico son aquellas zonas donde se desarrolla el proceso de sedimentación, el cual constituye el principal factor problemático del proyecto pues disminuye el volumen útil del canal dando lugar a la reducción de su capacidad de captación. Se ubican generalmente cerca de la entrada del canal de captación.

La Figura 12, expuesta en el primer capítulo, proporciona una vista de planta de las zonas de estancamiento y depósito dentro de un canal de captación.

Dentro de estas zonas no hay presencia de flujo o presenta un perfil de velocidades menores a la velocidad de arrastre de los sedimentos depositados en el canal.

Las obras hidráulicas de captación que presentan grandes zonas de estancamiento y depósito, además de sufrir la excesiva reducción en su capacidad de captación, generan otros problemas considerables como la reducción de su ciclo de vida debido al desgaste y el aumento de costos no presupuestados de mantenimiento e inversiones de obra (ver Figura 139).

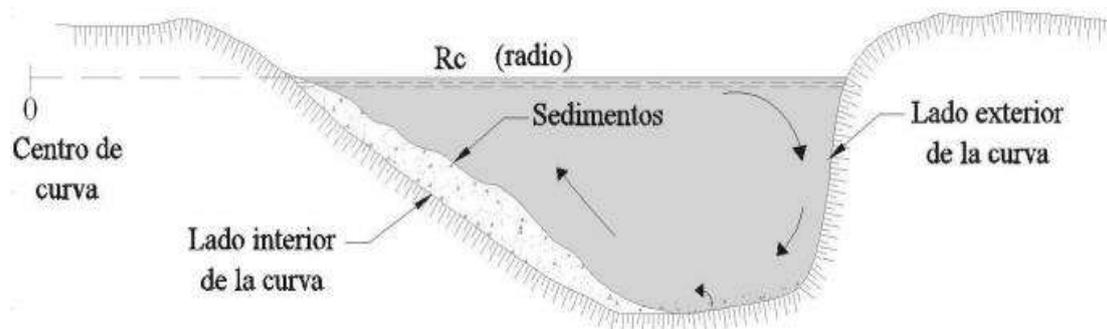
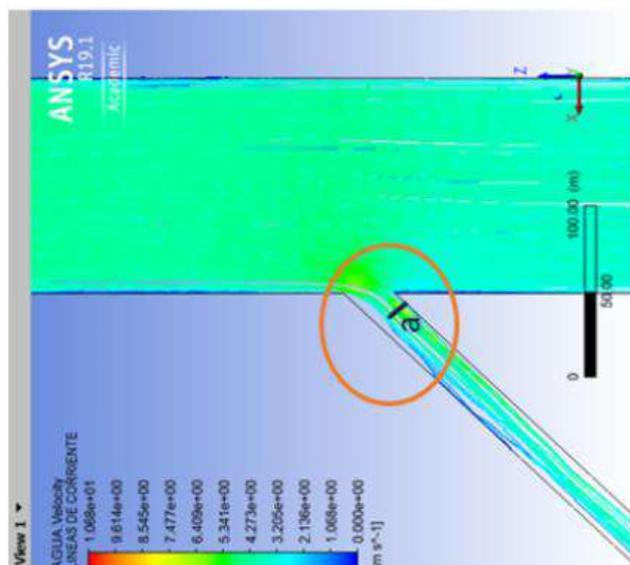


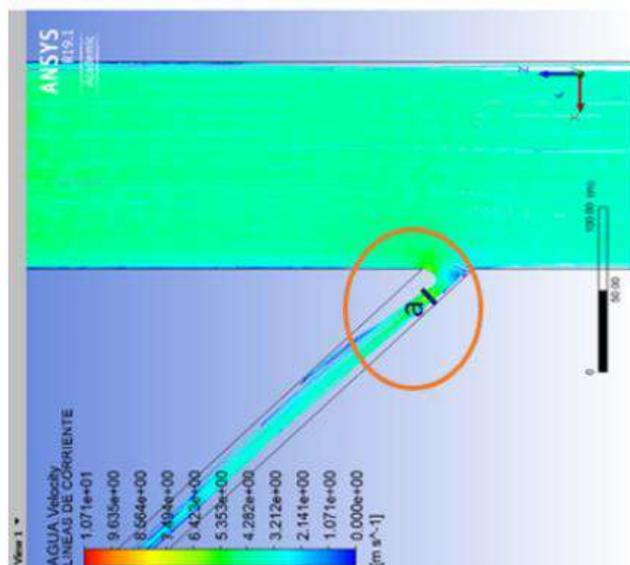
Figura 139. Perfil detallado de una zona de estancamiento y depósito en un canal hidráulico.

Fuente: González, 2011.

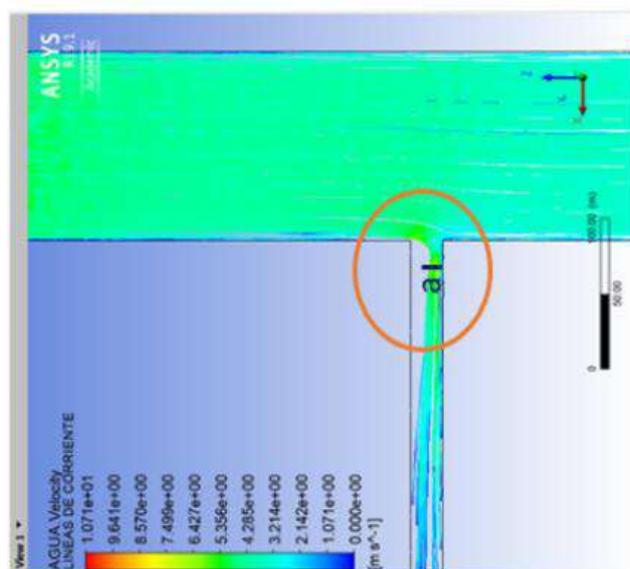
Un indicador de la magnitud de la zona de estancamiento y depósito es el *ancho efectivo* (a). Este se encuentra en el interior del canal de captación y junto a la zona de estancamiento y depósito; estableciendo el área de paso del flujo (ver Figura 140).



Ancho efectivo (a) = 14.1 m
 Aguas Abajo



Ancho efectivo (a) = 5.8 m
 Aguas Arriba



Ancho efectivo (a) = 9.2 m
 Perpendicular al río

Figura 140. Ancho efectivo y Zonas de estancamiento y depósito de las alternativas de solución del proyecto.
 Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos en la Figura 140 se concluye lo siguiente:

- El ancho efectivo (a) es inversamente proporcional a la magnitud de la zona de estancamiento y depósito: a mayor ancho efectivo dentro del canal de captación menor zona de estancamiento y depósito; y viceversa.
- Realizando una comparación entre las alternativas de solución: las opciones de *perpendicular al río* y *aguas arriba* tienen valores menores de ancho efectivo que la opción *aguas abajo*, por ende, ésta última presenta una zona de estancamiento y depósito de menor magnitud que las primeras.
- A partir de ello, la alternativa *aguas abajo* realiza su mejor funcionamiento, operación y eficacia en la captación del recurso y minimiza sus costos no presupuestados de mantenimiento e inversión frente a las demás.

3 Velocidades

El caudal o flujo se define como la cantidad de agua que pasa a través de una sección del canal por unidad de tiempo y se calcula multiplicando la velocidad del agua por el área de la sección. Por ello, se puede afirmar que el caudal es directamente proporcional a la velocidad del agua.

A partir de ello, sabiendo que las alternativas de solución planteadas en el presente proyecto presentan la misma sección transversal en el canal de captación, se concluye que a mayores velocidades en la sección se captará mayor caudal y viceversa.

Los gráficos de los perfiles de velocidades en cualquier plano perteneciente al cuerpo en estudio tienen lugar en el CFD-Post. Para ello se debe cumplir con los siguientes pasos:

- Se elige la opción contorno (*Contour*) de la barra de herramientas (ver Figura 141) y se procede nombrar nuestro gráfico como *PERFIL DE VELOCIDADES* (ver Figura 142), seguido de un clic en *OK* para dar lugar a la configuración de los detalles del mismo (ver Figura 143 y Tabla 45).



Figura 141. Opción Contour – CFD Post.
Fuente: Elaboración propia

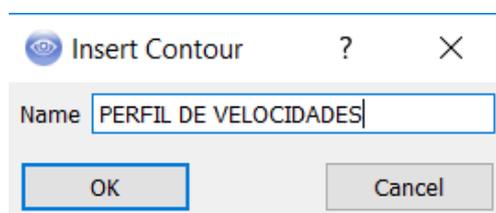


Figura 142. Opción para nombrar el gráfico Contour de PERFIL DE VELOCIDADES.
Fuente: Elaboración propia

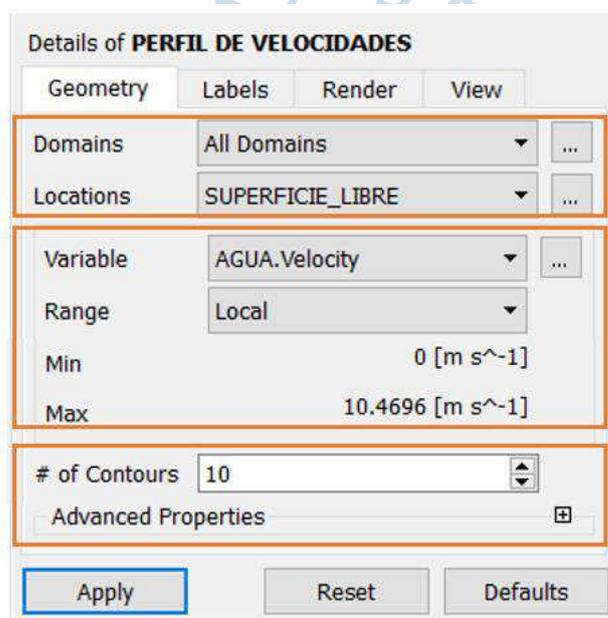


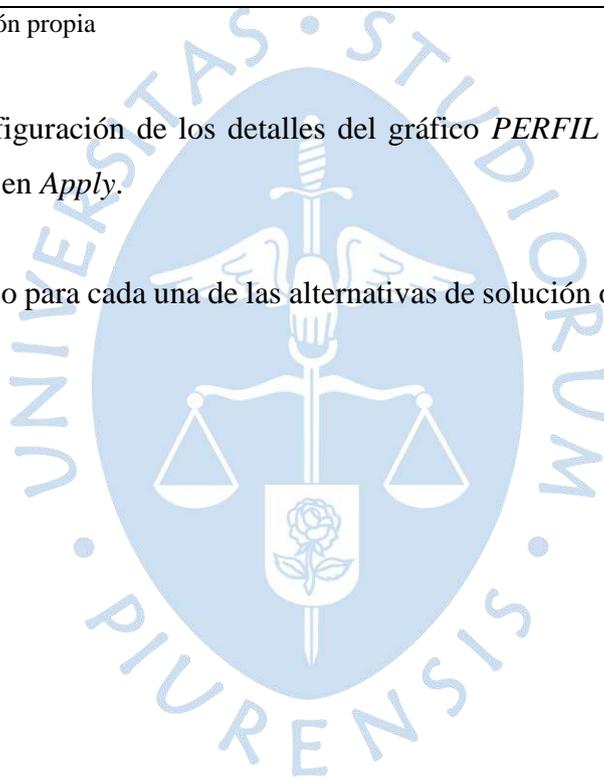
Figura 143. Detalles del gráfico PERFIL DE VELOCIDADES.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 45. Detalles del gráfico *PERFIL DE VELOCIDADES*.

Letra	Concepto
A	<ul style="list-style-type: none"> El tipo de gráfico de contorno de velocidades abarcará todos los dominios del proyecto (<i>All Domains</i>), y se ubican en la frontera <i>SUPERFICIE_LIBRE</i>, la cual permitirá una vista de planta de la distribución de velocidades.
B	<ul style="list-style-type: none"> La variable de estudio del gráfico será la velocidad del agua (<i>AGUA.Velocity</i>) en un rango <i>Local</i>. Debajo de ello, aparecerá el valor de la velocidad mínima y máxima presente en el dominio.
C	<ul style="list-style-type: none"> El número de contornos (<i># of Contours</i>) determina la cantidad de colores que aparecerán en el gráfico y, que a su vez, cada uno de ellos representan los niveles de velocidades presentes en cada zona del cuerpo. A mayor cantidad de contornos, mayor detallado del perfil de velocidades.

Fuente: Elaboración propia

- Finalizada la configuración de los detalles del gráfico *PERFIL DE VELOCIDADES*, se procede a dar clic en *Apply*.
- Se repite el proceso para cada una de las alternativas de solución obteniéndose los gráficos de la Figura 144.



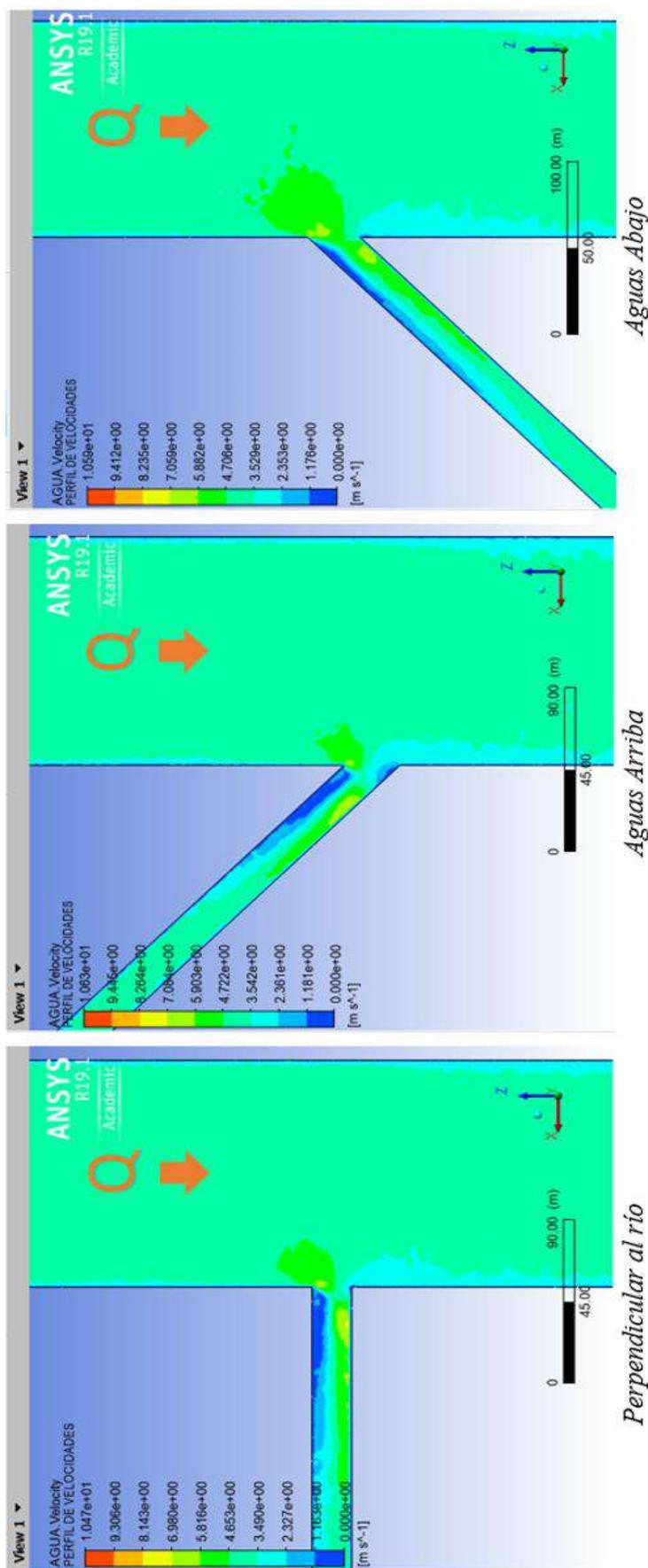


Figura 144. Perfil de velocidades en vista de planta de las alternativas de solución del proyecto.
Fuente: Elaboración propia

Dentro del proyecto, se logró obtener las velocidades en la sección de entrada y salida del canal de captación. Para obtener los gráficos correspondientes se procede con los siguientes pasos:

- **Entrada del canal de captación**

Dentro de las opciones de *Locations* de la ventana de detalles del gráfico Perfil de velocidades, no se encuentra una alternativa correcta que refleje la ubicación exacta de la entrada del canal de captación, por ello, se debe crear una nueva opción (plano) de localización que permita ubicarnos correctamente en el lugar de entrada para la obtención de los resultados:

- Para la creación de un nuevo plano se escoge la opción *Location* de la barra de herramientas, y se selecciona la alternativa *Plane* (ver Figura 145).
- Se procede a nombrar nuestro plano como *ENTRADACANAL* (ver Figura 146), seguido de un clic en *OK* para dar lugar a la configuración de los detalles del mismo.

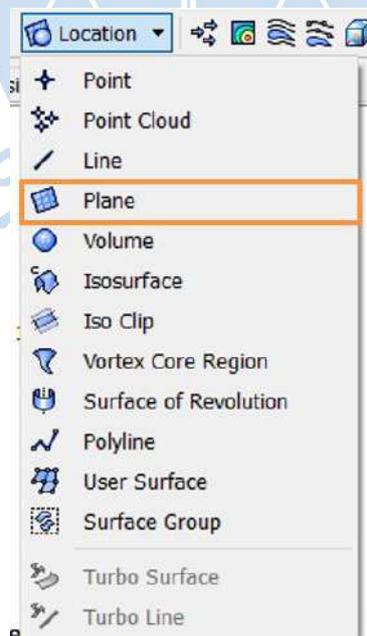


Figura 145. Creación de un nuevo plano de estudio.

Fuente: Elaboración propia

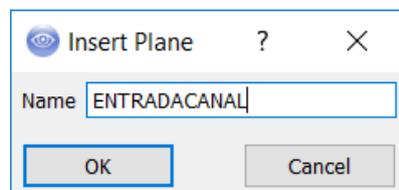


Figura 146. Opción para nombrar el plano entradacanal.

Fuente: Elaboración propia

Los detalles de la configuración del nuevo plano creado se presentan en la Figura 147 y Tabla 46:

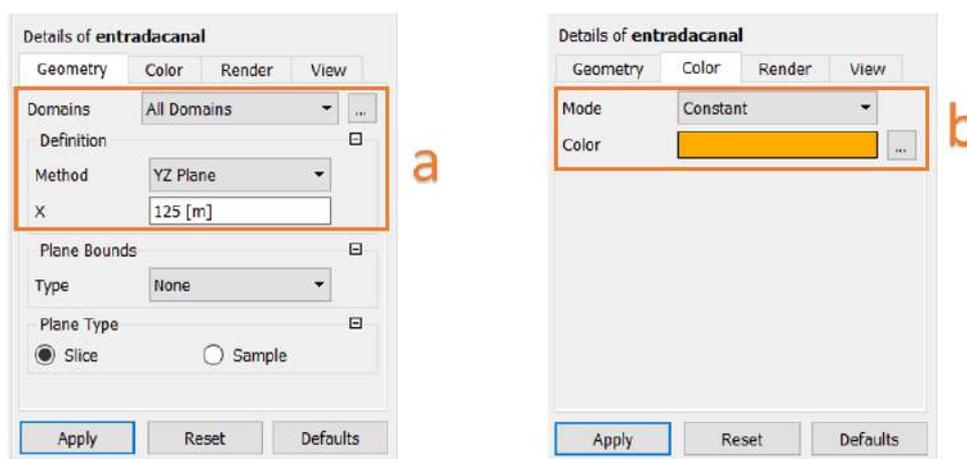


Figura 147. Configuración del plano entradacanal.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 46. Configuración del plano *entradacanal*.

Letra	Concepto
a	<ul style="list-style-type: none"> Se encontrará en todos los dominios del proyecto (<i>All Domains</i>), es decir se ubicará dentro del cuerpo en estudio. Según la geometría del proyecto, la entrada del canal de captación se ubica en el plano YZ con coordenada X de 125 [m].
b	<ul style="list-style-type: none"> Para comprobar la ubicación del plano dentro de la ventana <i>View</i>, se le asignará un color resaltante en su detallado.

Fuente: Elaboración propia

Finalizada la configuración de los detalles del plano, se procede a dar clic en *Apply*. En ese momento obtenemos el gráfico correspondiente en la ventana *View* (ver Figura 148).

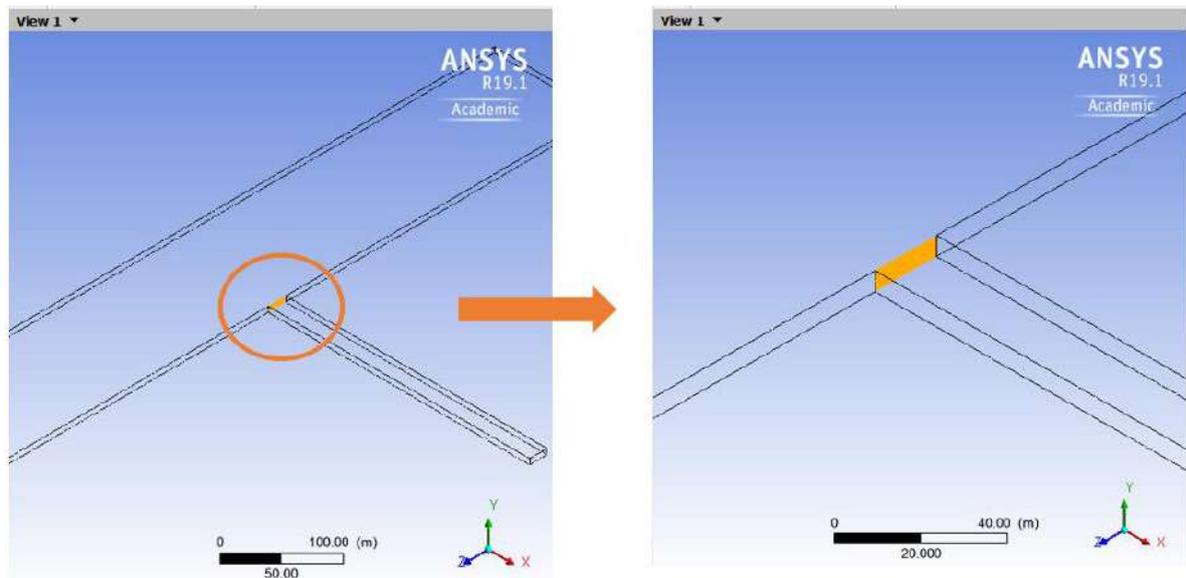


Figura 148. Gráfico del plano *entradacanal* del Outline - CFD Post.

Fuente: Elaboración propia

Una vez creado el nuevo plano, se procede a la obtención del gráfico de perfil de velocidades:

- Se realiza doble clic en la opción de *PERFIL DE VELOCIDADES* del *Outline*, de esta forma se retorna a la configuración antes realizada. Para obtener el gráfico correspondiente, sólo se procede a seleccionar el nuevo plano creado *ENTRADACANAL* (ver Figura 149) entre las opciones de localización (*Locations*), seguido de un clic en *Apply*.

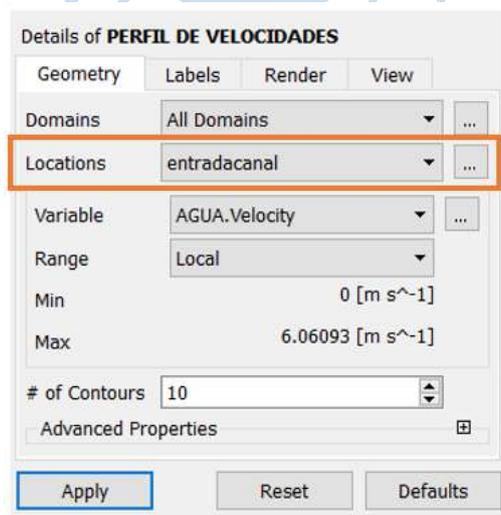


Figura 149. Detalles del *PERFIL DE VELOCIDADES* - Localización: *entradacanal*.

Fuente: Elaboración propia

- Salida del canal de captación

Para obtener los gráficos de *PERFIL DE VELOCIDADES* en la salida del canal de captación no será necesario crear un nuevo plano de ubicación, debido a que este se encuentra en la frontera *SALIDA_CANAL*. Por ello, sólo se cambia la localización a *SALIDA_CANAL* dentro de los detalles del *PERFIL DE VELOCIDADES* (Ver Figura 150), seguido de un clic en *Apply*.

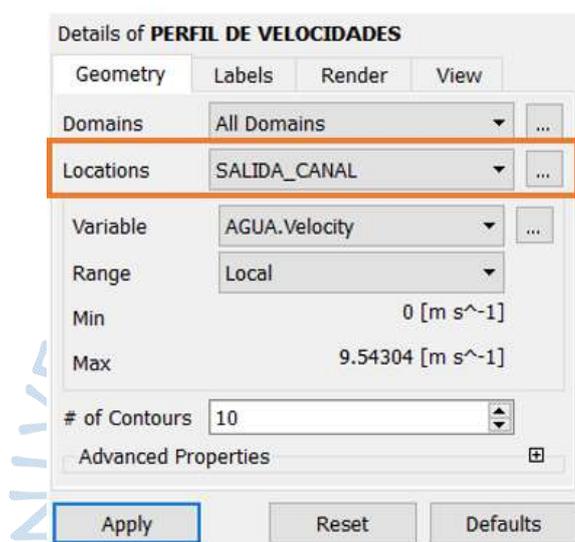


Figura 150. Detalles del PERFIL DE VELOCIDADES - Localización: SALIDA_CANAL.
Fuente: Elaboración propia

Se repite el proceso para cada una de las alternativas de solución obteniéndose los gráficos de la Figura 151.

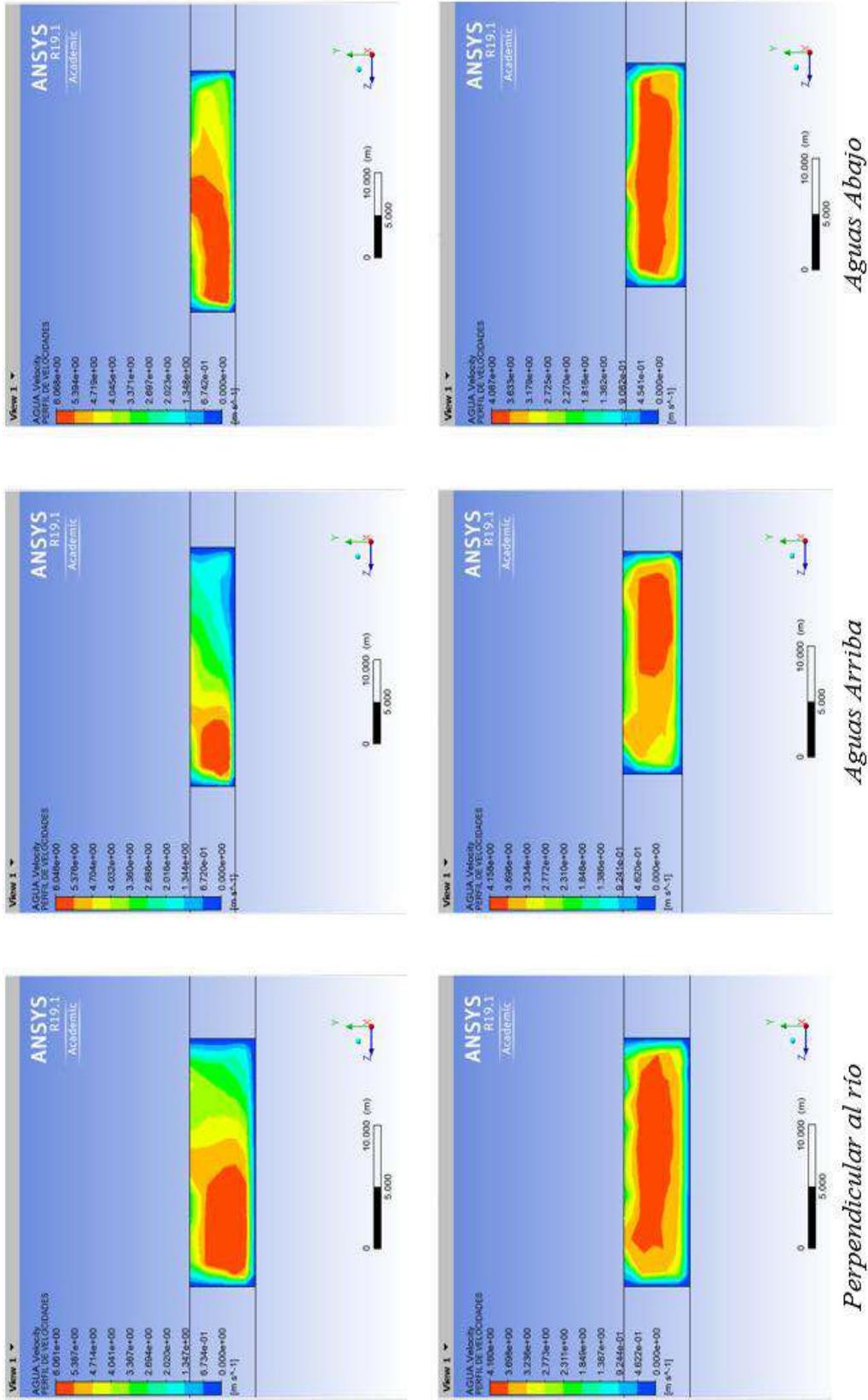


Figura 151. Perfil de velocidades en las secciones de entrada (arriba) y salida (debajo) del canal de captación de las alternativas de solución del proyecto.

Fuente: Elaboración propia

3.1 CFD Post: Velocidad promedio. Las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas.

Esto se explica por los efectos que la resistencia cortante del fluido en movimiento tiene en distintos puntos del canal. Ven Te Chow, Ph. D (1994), en su libro “Hidráulica de canales abiertos” nos proporciona la distribución de velocidades en una sección de canal para diferentes geometrías, como se muestra en la Figura 72.

Debido a ello, es conveniente conocer la velocidad promedio en cada una de las secciones transversales del canal de captación de cada alternativa de solución, con la finalidad de obtener los caudales captados posteriormente.

El cálculo numérico de la velocidad promedio en la salida del canal es un factor importante en la toma de decisión de la mejor orientación del canal de captación; debido a que, al ser multiplicada por el área de la sección transversal del canal en la salida, nos proporciona el caudal promedio de captación de cada alternativa de solución, el cual debe ser eficaz para cubrir la necesidad del recurso de la población.

Para el cálculo numérico de la velocidad promedio en la salida del canal, vamos a utilizar las expresiones de cálculo que nos brinda el programa ANSYS, cumpliendo los siguientes pasos a seguir:

- Se selecciona la opción de expresiones (*Expression*) de la barra de herramientas (ver Figura 152), y se procede a nombrar como *Velocidad promedio* (ver Figura 153), seguido de un clic en *OK* para dar lugar a la configuración de los detalles de la misma.



Figura 152. Opción *Expression* – CFD Post.

Fuente: Elaboración propia

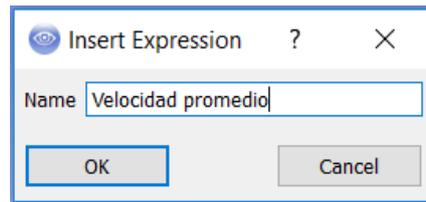


Figura 153. Opción para nombrar la ventana de cálculo de la velocidad promedio.

Fuente: Elaboración propia

Para configurar la ventana de cálculo de la velocidad promedio se utilizarán las expresiones del programa ANSYS (*Expression*) presentadas a continuación:

- La expresión *areaAve* es una función basada en el localizador y se obtiene haciendo clic derecho en el cuadro de *Definition* y realizando el siguiente recorrido de opciones: *Functions > CFD-Post > areaAve* (ver Figura 154).

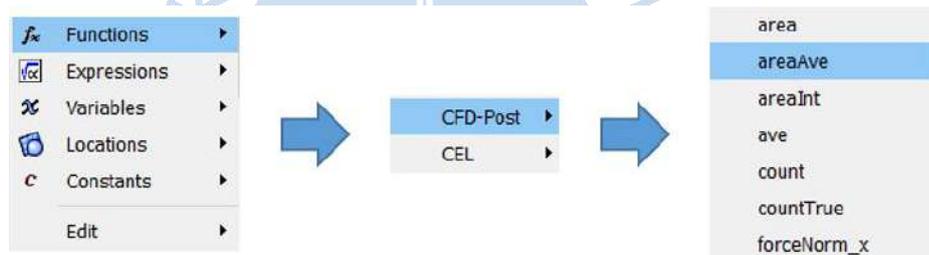


Figura 154. Configuración de la ventana de cálculo velocidad promedio: Expresión *areaAve*.

Fuente: Elaboración propia

- La expresión *Velocity* es una variable y se obtiene haciendo clic derecho entre los paréntesis que genera la expresión *areaAve* en el cuadro de *Definition* y realizando el siguiente recorrido de opciones: *Variables > Velocity* (ver Figura 155).

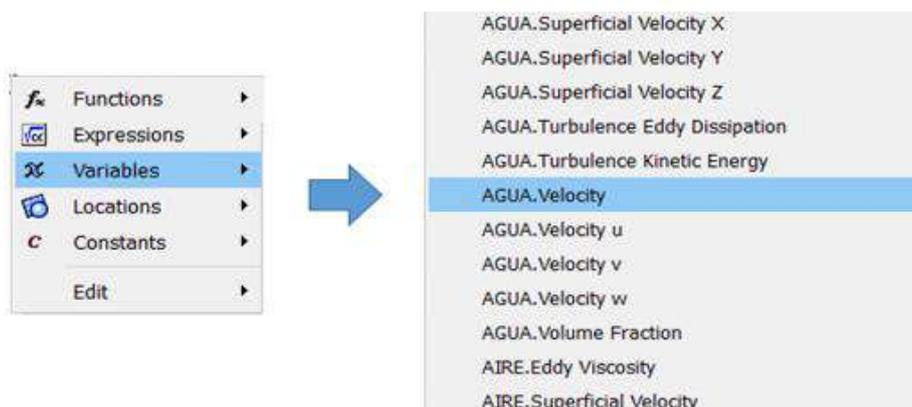


Figura 155. Configuración de la ventana de cálculo velocidad promedio: Expresión *AGUA.Velocity*.

Fuente: Elaboración propia

- La expresión *salida_canal* es un localizador físico y se obtiene haciendo clic derecho después del signo arroba “@” que genera la expresión *areaAve* en el cuadro de *Definition* y realizando el siguiente recorrido de opciones: *Locations* > *SALIDA_CANAL* (ver Figura 156).

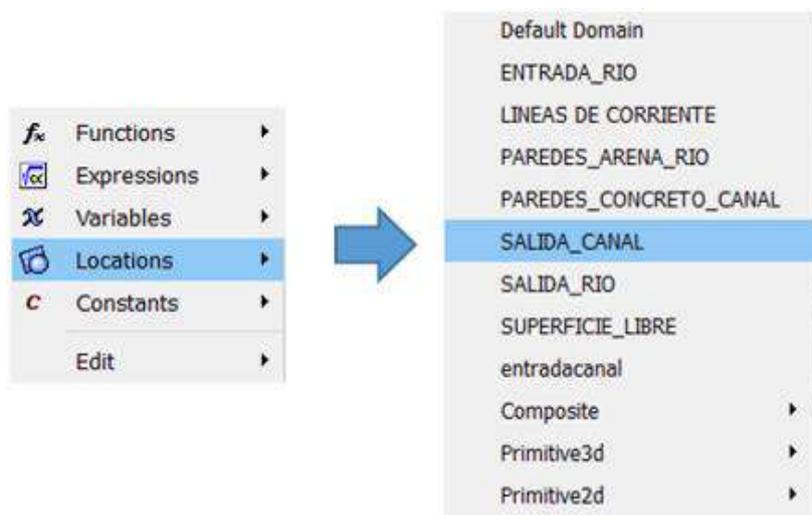


Figura 156. Configuración de la ventana de cálculo velocidad promedio: Expresión *SALIDA_CANAL*.
Fuente: Elaboración propia

Para finalizar el proceso se realiza un clic en *Apply*, y se obtiene el resultado en la opción *Value*. Se repite el proceso para cada una de las alternativas de solución obteniéndose las ventanas de cálculo de *Velocidad promedio* de la Figura 157.

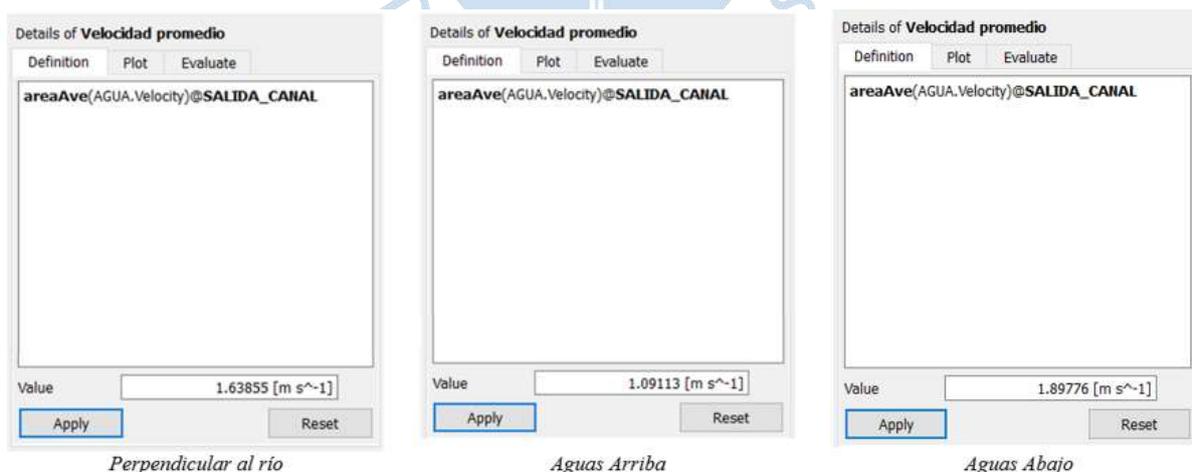


Figura 157. Cálculo de la velocidad promedio a la salida del canal de captación.
Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos y expuestos en la Figura 157, se concluye que la alternativa *aguas abajo* se manifiesta como la mejor y la más eficaz en la captación del recurso en el río, ya que se obtiene la mayor velocidad promedio del flujo (1.89776 m/s) frente a las menores velocidades (1.63855 m/s y 1.09113 m/s) obtenidas de las alternativas *perpendicular al río* y *aguas arriba* respectivamente.

4 Ángulo de Bifurcación Θ

En esta sección se busca encontrar el ángulo de bifurcación de mayor eficacia en la obtención del recurso hídrico a partir de los resultados obtenidos para los ángulos de 15°, 30°, 45° (orientación *aguas abajo*), 60°, 75° y 90° (orientación *perpendicular al río*), aplicando el procedimiento antes descrito.

Cabe resaltar que para los resultados obtenidos se mantuvo la configuración de propiedades del fluido y condiciones de frontera descritas en el Capítulo 3.

La geometría, las líneas de corriente y zonas de estancamiento y depósito, perfil de velocidades y cálculo de la velocidad promedio a la salida del canal de cada uno de los ángulos de bifurcación evaluados, se presentan en las Figuras 158, 159, 160 y 161 respectivamente.

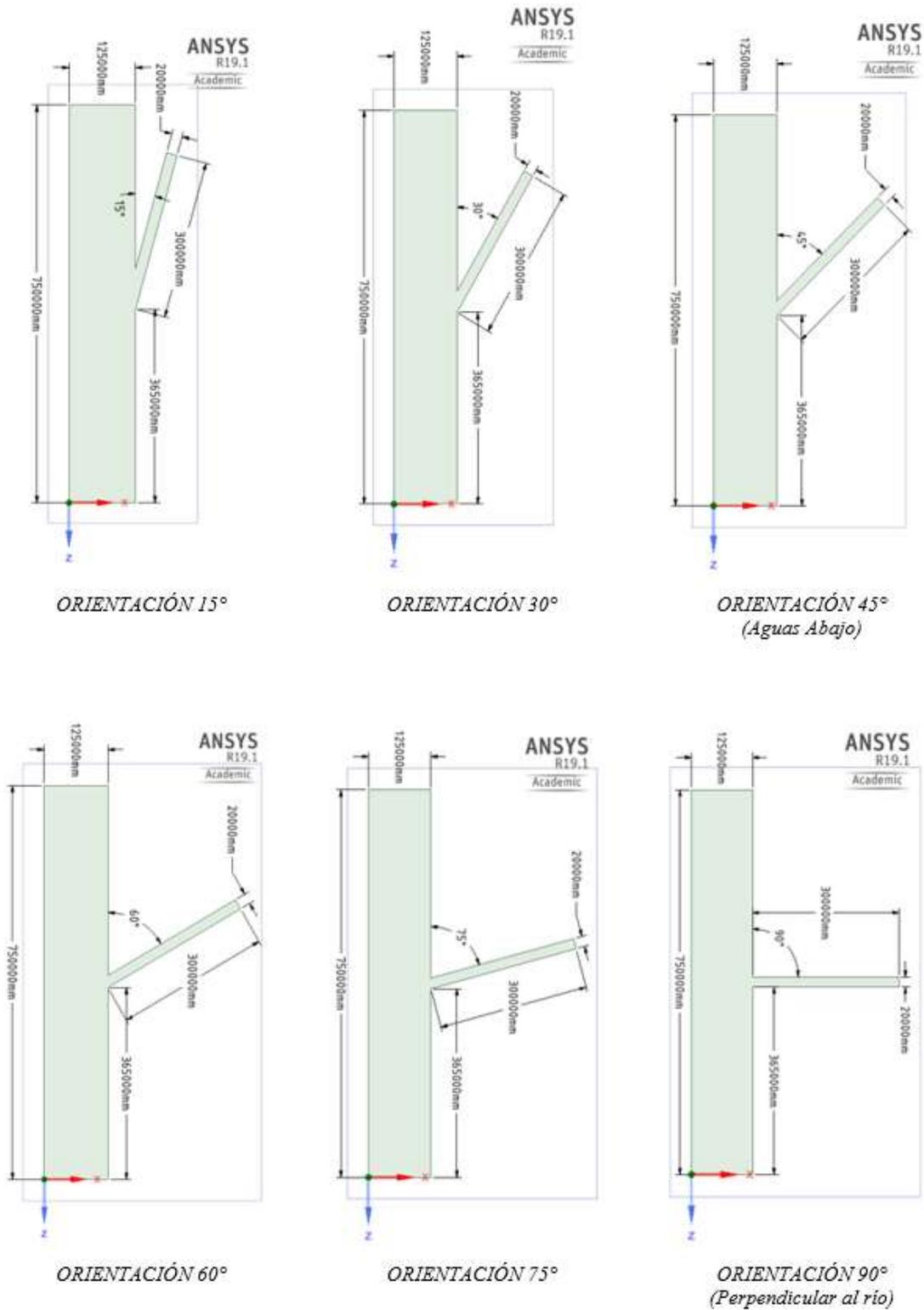


Figura 158. Geometría para los ángulos de bifurcación θ de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°. Fuente: Elaboración propia

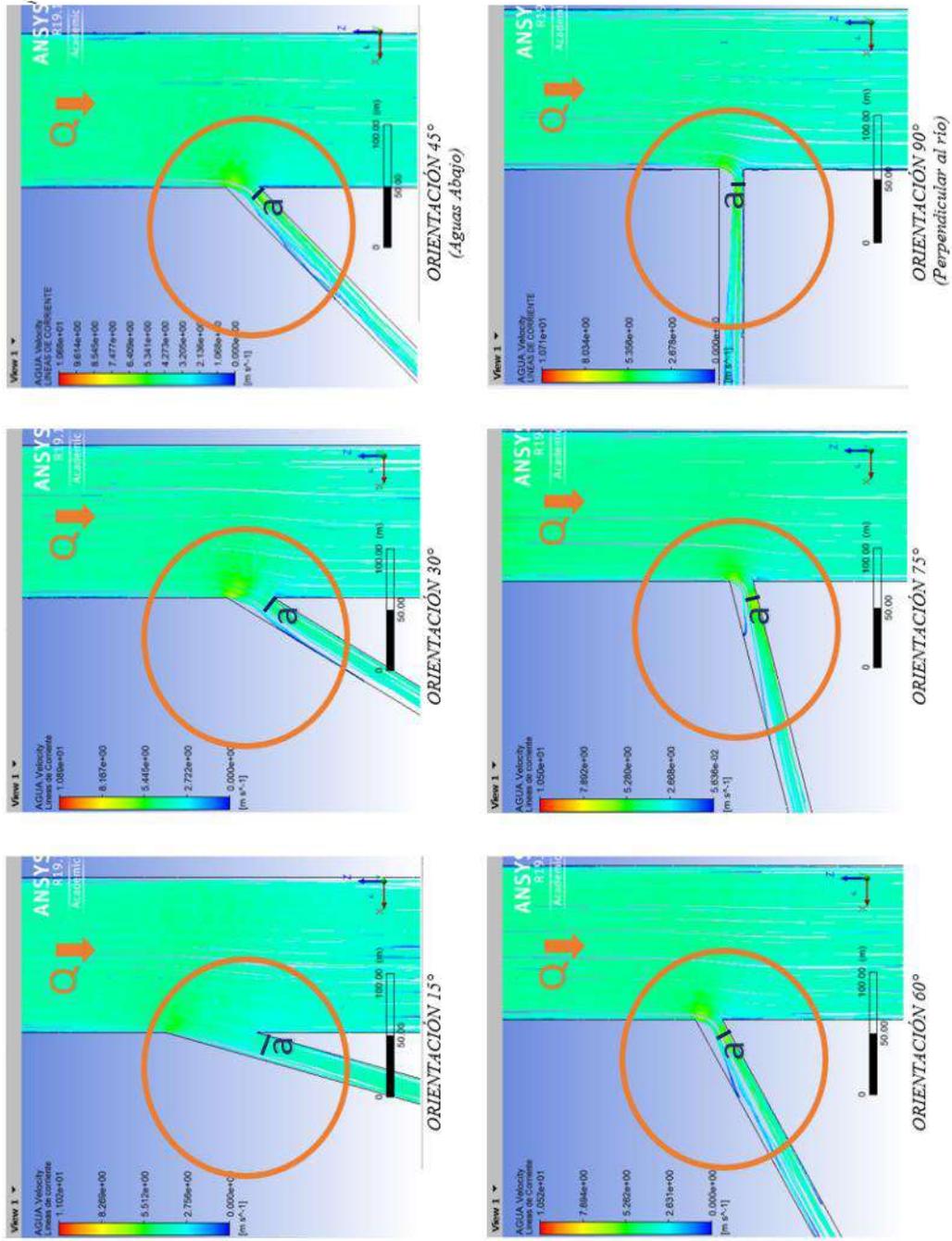


Figura 159. Líneas de corriente y zonas de estancamiento y depósito para los ángulos de bifurcación θ de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°.

Fuente: Elaboración propia

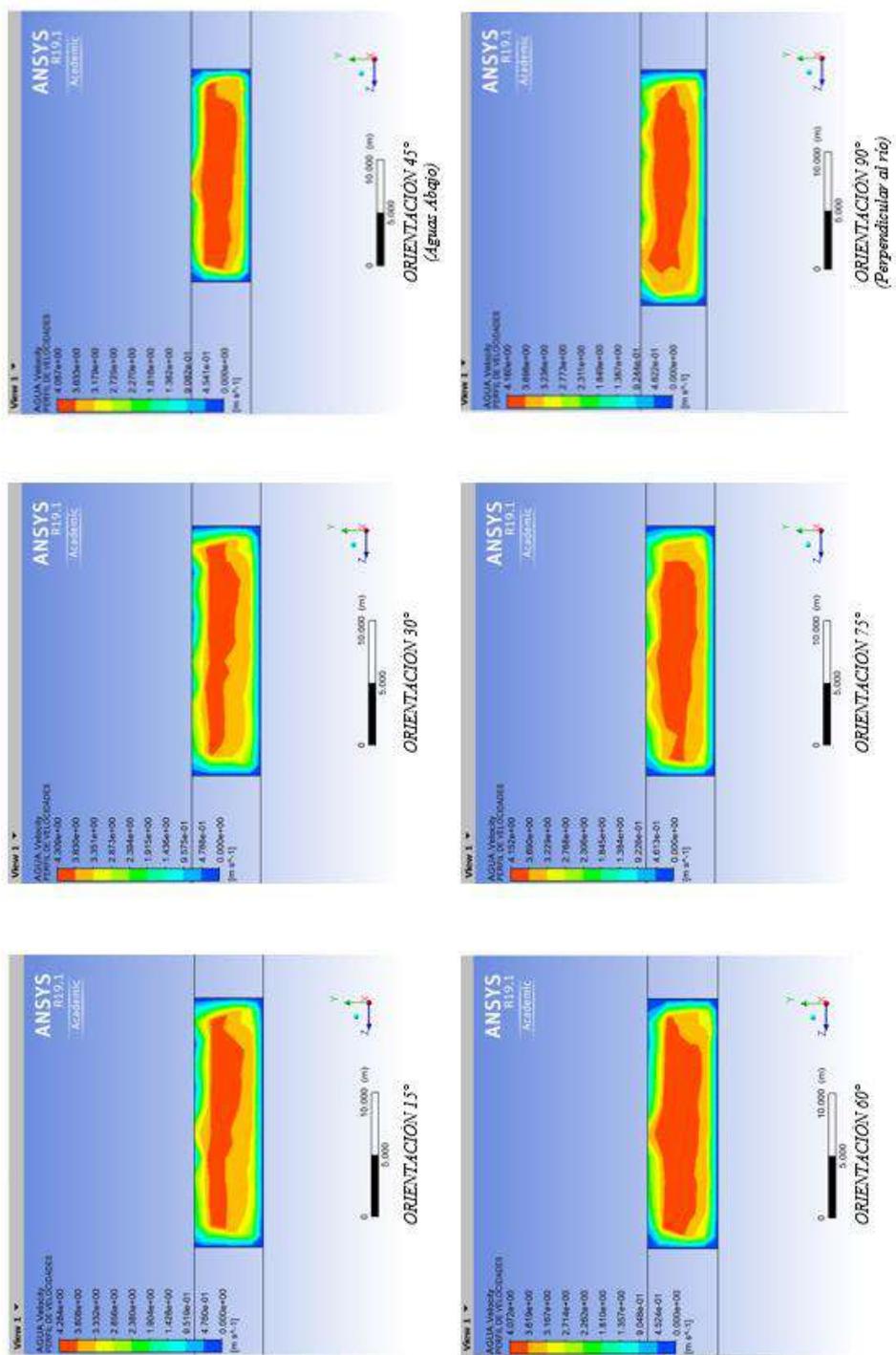


Figura 160. Perfil de velocidades a la salida del canal de captación para los ángulos de bifurcación θ de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°.

Fuente: Elaboración propia

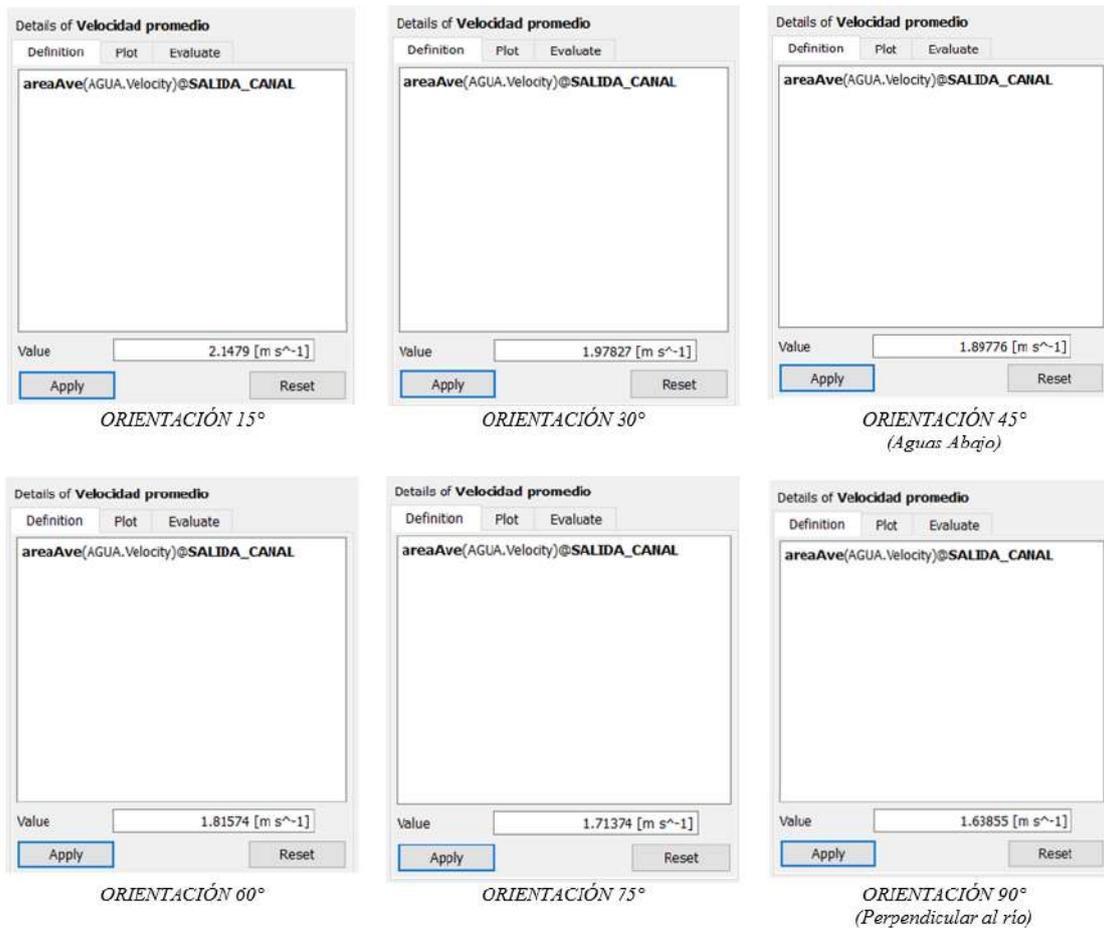


Figura 161. Velocidad promedio a la salida del canal de captación para los ángulos de bifurcación Θ de 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90°.
Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos en las Figuras 159, 160 y 161 se concluye que:

- A medida que el ángulo de bifurcación del canal de captación va incrementando, las líneas de corriente se alejan del patrón de dirección del flujo del río e incrementa el área de las zonas de estancamiento y depósito, lo que origina una reducción del ancho efectivo y, a consecuencia, menores velocidades y caudales a la salida del canal.
- No se podrá afirmar que existe un determinado ángulo eficaz de bifurcación, puesto que son muchos los factores y condiciones que intervienen en la construcción de un canal de captación tanto geométricas como hidráulicas, entre las que destacan: forma y pendiente del canal, régimen y propiedades del flujo, transporte de sólidos en suspensión, erosión y sedimentación, estudio geológico y topográfico de la zona, y el caudal de captación requerido por la población beneficiada.

Debido a ello, se logró determinar relaciones de ancho, velocidad y razón de descarga entre las condiciones del río y del canal de captación, en función al ángulo de bifurcación para un mismo número de Froude del río Piura. Estas constituyen un alcance muy relevante para el diseñador hidráulico del proyecto en la toma de decisiones.

- *Número de Froude en canales abiertos (Fr)*

El número de Froude en canales abiertos determina el estado del flujo hidráulico en supercrítico ($Fr > 1$), crítico ($Fr = 1$) y subcrítico ($Fr < 1$). Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Fr = \frac{V_{río}}{\sqrt{gY_{río}}} \quad (4.1)$$

Donde:

Fr : Número de Froude [Adimensional]

$V_{río}$: Velocidad del río [m/s]

$Y_{río}$: Tirante del río [m]

El número de Froude del caso estudio queda determinado como:

$$Fr = \frac{4 \left[\frac{m}{s} \right]}{\sqrt{9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 6[m]}} = 0.52$$

Para un $Fr = 0.52$ del río Piura y en base a los resultados obtenidos en las Figuras 159, 160 y 161, se establecen las siguientes relaciones:

- *Relación de Ancho (A_1)*

Expresa la relación entre el ancho efectivo (a) localizado junto a la zona de estancamiento y depósito, y el ancho total del canal de captación (B). Los resultados se presentan en la Tabla 47 y Figura 162:

Tabla 47. Ancho efectivo de captación y Relación de ancho A_1 para cada ángulo de bifurcación.

Ángulo de Bifurcación Θ [°]	Ancho efectivo de Captación "a" [m]	Ancho del canal de captación "B" [m]	Relación de Ancho ($A_1 = a/B$) [adimensional]
15	18.3	20	0.92
30	15.9		0.80
45	14.1		0.71
60	12.3		0.62
75	10.7		0.54
90	9.2		0.46

Fuente: Elaboración propia

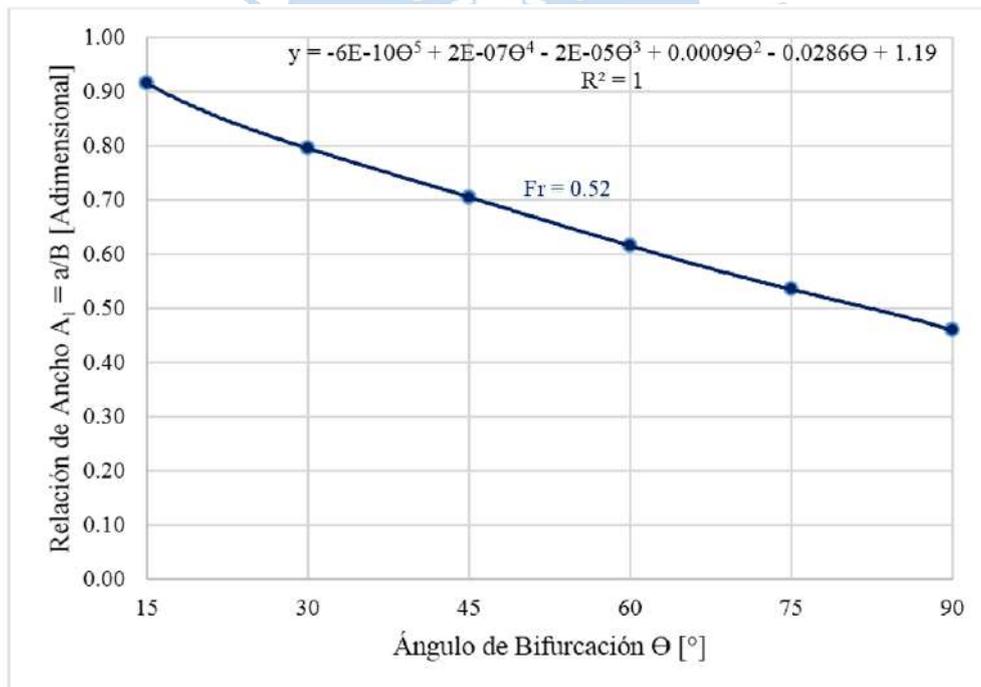


Figura 162. Relación de ancho A_1 en función del ángulo de bifurcación para un $Fr = 0.52$.

Fuente: Elaboración propia

A partir del gráfico de la Figura 162 el diseñador hidráulico puede establecer:

- *El ángulo de bifurcación del canal de captación*, conociendo los valores del ancho efectivo y ancho total del canal de captación.
- *El ancho efectivo del canal de captación*, conociendo los valores del ángulo de bifurcación y el ancho total del canal de captación.
- *El ancho del canal de captación*, conociendo los valores del ángulo de bifurcación y el ancho efectivo.
- *Relación de Velocidad (A_2)*

Expresa la relación entre la velocidad promedio de captación del canal (V_c) y la velocidad promedio del río del caso estudio (V_r). Los resultados se presentan en la Tabla 48 y Figura 163:

Tabla 48. Velocidad promedio y Relación de velocidad A_2 para cada ángulo de bifurcación.

Ángulo de Bifurcación Θ [°]	Velocidad promedio de captación " V_c " [m/s]	Velocidad promedio del río " V_r " [m/s]	Relación de Velocidad ($A_2 = V_c/V_r$) [adimensional]
15	2.15	4 m/s	0.54
30	1.98		0.50
45	1.9		0.48
60	1.82		0.46
75	1.71		0.43
90	1.64		0.41

Fuente: Elaboración propia

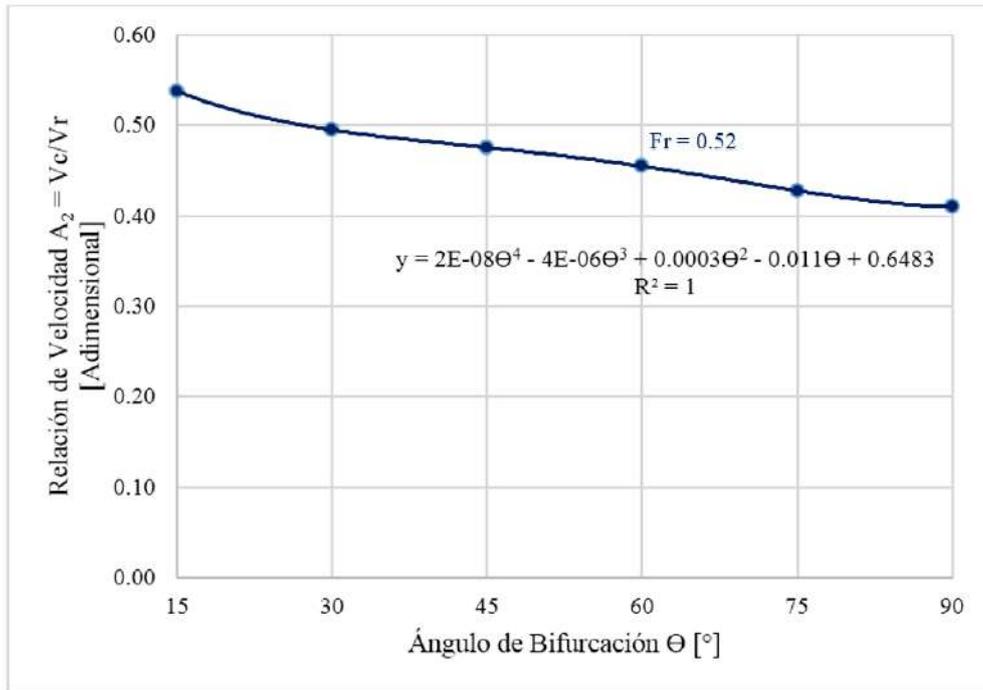


Figura 163. Relación de velocidad A_2 en función del ángulo de bifurcación para un $Fr = 0.52$.
Fuente: Elaboración propia

A partir del gráfico de la Figura 163 el diseñador hidráulico puede establecer:

- *El ángulo de bifurcación del canal de captación*, conociendo los valores de velocidad de captación a la salida del canal y velocidad del río.
- *La velocidad de captación a la salida del canal*, conociendo los valores del ángulo de bifurcación y la velocidad del río.
- *La velocidad del río*, conociendo los valores del ángulo de bifurcación y la velocidad de captación a la salida del canal.
- *Razón de descarga (A_3)*

Expresa la relación entre el caudal de captación en el canal (Q_c) y el caudal transportado en el río (Q_r). Los resultados se presentan en la Tabla 49 y Figura 164:

Tabla 49. Caudal de captación y Razón de descarga A_3 para cada ángulo de bifurcación.

Ángulo de Bifurcación Θ [°]	V_c [m/s]	B (m)	Tirante del canal de captación (m)	Área (m ²)	Caudal de captación "Qc" [m ³ /s]	Caudal del río "Qr" [m ³ /s]	Razón de descarga ($A_3 = Qc/Qr$) [adimensional]
15	2.15	20	6	120	257.75	3000 m ³ /s	0.086
30	1.98				237.39		0.079
45	1.9				227.73		0.076
60	1.82				217.89		0.073
75	1.71				205.65		0.069
90	1.64				196.63		0.066

Fuente: Elaboración propia

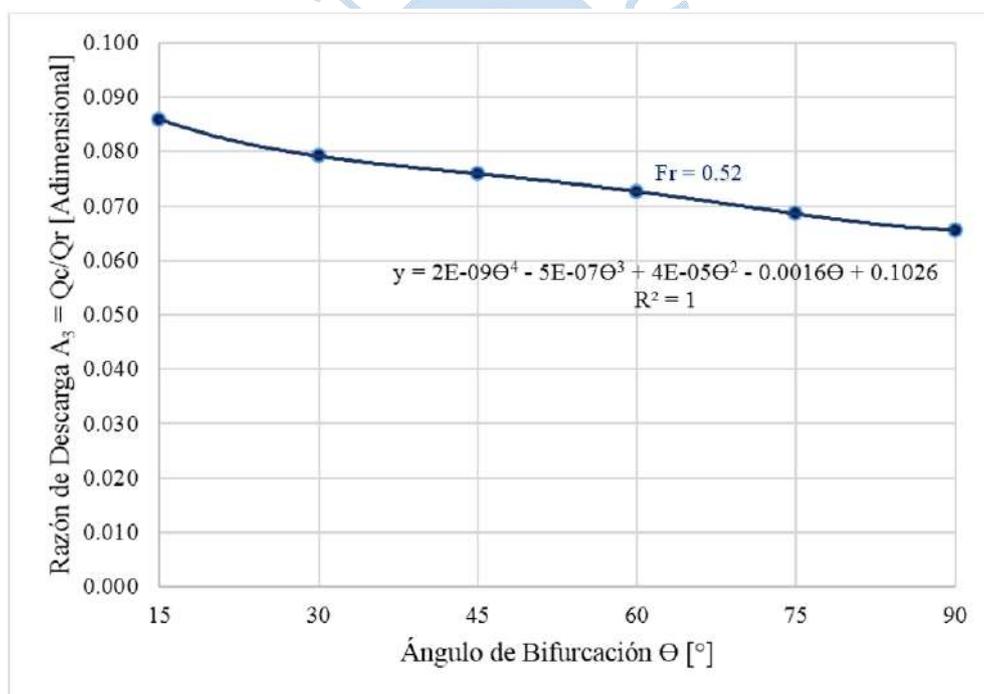


Figura 164. Razón de descarga A_3 en función del ángulo de bifurcación para un $Fr = 0.52$.

Fuente: Elaboración propia

A partir del gráfico de la Figura 164 el diseñador hidráulico puede establecer:

- *El ángulo de bifurcación del canal de captación, conociendo los valores del caudal de captación a la salida del canal y el caudal transportado por el río.*

- *El caudal de captación a la salida del canal*, conociendo los valores del ángulo de bifurcación y el caudal transportado por el río.
- *El caudal transportado por el río*, conociendo los valores del ángulo de bifurcación y el caudal de captación a la salida del canal.

Al concluir la obtención de resultados, se concluye el estudio con el cierre de la ventana de trabajo de *Results* y se procede a verificar el proyecto en el *Project Schematic* con la presencia del check verde a la derecha de la opción *Results* (ver Figura 165).

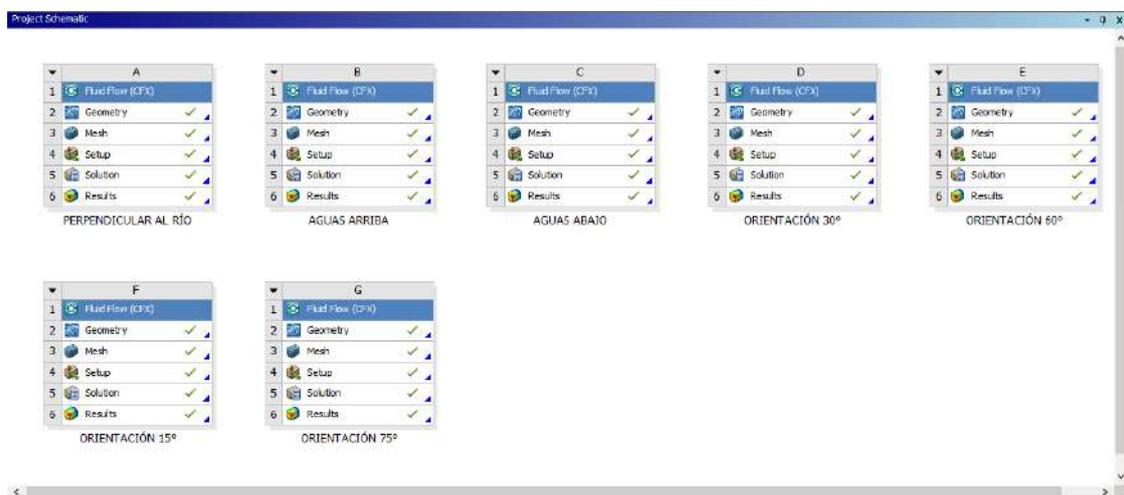
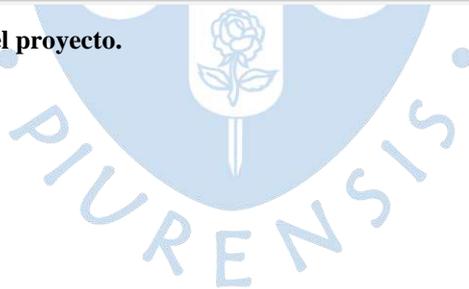


Figura 165. Verificación del proyecto.

Fuente: Elaboración propia



Conclusiones

El presente proyecto denominado “Modelación numérica para determinar la orientación de una bifurcación en el Tramo B del Río Piura”, tiene como objetivo principal determinar la orientación de una bifurcación en un tramo recto del Río Piura que garantice la mejor captación y aprovechamiento del recurso hídrico para la población, que, en su mayoría, no posee los recursos necesarios para la construcción de estructuras hidráulicas de gran envergadura que forman una bocatoma en su totalidad. Para lograrlo se evaluaron tres posibles alternativas de solución: *perpendicular al flujo*, *aguas arriba* y *aguas abajo* del río utilizando las herramientas y técnicas de la dinámica de fluido computacional, con la finalidad de obtener con mayor nivel de sofisticación y precisión los parámetros involucrados en el comportamiento del fluido en la zona de captación. A partir de los resultados obtenidos del presente trabajo se llegaron a las siguientes conclusiones:

- En relación a los gráficos de las líneas de flujo (*Streamline*) se consiguió localizar las zonas de estancamiento y depósito dentro del canal de captación de cada una de las alternativas de solución. La mayor extensión de esta zona significará un mal funcionamiento, mayores pérdidas y menor eficacia en la captación del recurso de la obra hidráulica, lo cual concluye que la alternativa *aguas abajo* obtiene mejores resultados en relación a las demás opciones por su corta extensión de la zona de estancamiento y depósito.
- Así mismo, a partir de los mismos gráficos de líneas de flujo, se logró identificar dos nuevos parámetros de selección denominados *ancho de captación del caudal del río (c)* y *ancho efectivo (a)*.

El primer parámetro en relación a una posible construcción de bocatoma y colocación de compuertas comerciales, establece que la alternativa *aguas abajo* presenta menores problemas constructivos y gastos innecesarios, un mayor aprovechamiento del sistema de compuertas y una excelente vida útil en la ejecución de dicha obra hidráulica.

El segundo parámetro posee una relación directamente proporcional al caudal captado e inversamente proporcional a la extensión de la zona de estancamiento y depósito del canal de captación. El mayor ancho efectivo se obtuvo también en la alternativa antes mencionada,

lo cual realiza su mejor funcionamiento, operación y eficacia en la captación del recurso y minimiza sus costos no presupuestados de mantenimiento e inversión frente a las demás.

- En relación a los gráficos de los perfiles de velocidades en distintos planos de estudio (vista de planta, entrada del canal y salida del canal), la proporcionalidad directa entre el caudal de captación y la velocidad actuante en la sección transversal del canal, y el cálculo de la velocidad promedio debido a la no uniformidad del perfil de velocidades en la sección transversal del canal, se concluye que la alternativa *aguas abajo* se manifiesta como la mejor y la más eficaz en la captación del recurso en el río, ya que se obtiene la mayor velocidad actuante en el canal.

En el desarrollo del proyecto se establecieron unos objetivos específicos, de los cuales se obtuvieron conclusiones relevantes expuestas a continuación:

- En el análisis de la calidad y el dimensionamiento de mallado que garantice mayor precisión en la obtención de resultados del caso en estudio se consiguió establecer las siguientes conclusiones:
 - Se consiguió determinar al método hexaédrico como el mejor método de mallado adaptado a la geometría y condiciones de estudio de nuestro proyecto. Cabe resaltar que ante algún cambio en la complejidad de la geometría esta elección puede modificarse y emigrar al método tetraédrico o a una combinación de ambos métodos de mallado.
 - La evaluación del tiempo de elaboración de malla y simulación y el estudio de la Calidad de malla mediante los parámetros de Calidad Ortogonal (*Orthogonal Quality*), Calidad de Elemento (*Element Quality*), Relación de Aspecto (*Aspect Ratio*), Oblicuidad (*Skewness*) y Número de Elementos; lograron establecer la dimensión del mallado del proyecto en 0.6 m en base a la convergencia de datos en el perfil de velocidades y cumplimiento de la condición trazada por Ven Te Chow, a su mayor rapidez en la obtención del mallado y convergencia en la Simulación, y a su aceptabilidad en la clasificación de la calidad de malla.

- A partir del gráfico del mallado final se estableció la entrada del canal como la zona de mayor importancia en el presente estudio, debido a que en esa zona se concentra con mayor intensidad el dimensionamiento escogido y, por otro lado, en la zona central del río, la cual no presenta relevancia en nuestro estudio, encontramos elementos más grandes. Así mismo, se ha obtenido un dimensionamiento no tan pequeño en relación a la mayoría de trabajos realizados en el área de Energía de Ingeniería Mecánica – Eléctrica de la Universidad de Piura, esto se debe a que dichos trabajos realizan un estudio más exhaustivo de sus proyectos al considerar la transmisión de calor o energía durante su procedimiento; además de las grandes dimensiones consideradas en la geometría del río en comparación al área de evaluación localizada en la entrada del canal de captación.
- Es importante concluir que los cambios realizados en la geometría, en las condiciones de contorno o parámetro de estudio para un mismo proyecto originan resultados diferentes a los obtenidos en la presente tesis. Así mismo, cabe resaltar que los resultados de tiempo están fuertemente influenciados por el tipo y capacidad de máquina utilizada para la modelación: los valores son inversamente proporcional a la capacidad computacional de la PC que se utilice, a mayor capacidad se obtienen menores tiempos y viceversa.
- En relación al estudio aplicado a las distintas posiciones del ángulo de bifurcación del canal de captación en relación al río se concluye lo siguiente:
 - A medida que el ángulo de bifurcación del canal de captación va incrementando, las líneas de corriente se alejan del patrón de dirección del flujo del río e incrementa el área de las zonas de estancamiento y depósito, lo que origina una reducción del ancho efectivo y, a consecuencia, menores velocidades y caudales a la salida del canal.
 - No se podrá afirmar que existe un determinado ángulo eficaz de bifurcación, puesto que son muchos los factores y condiciones que intervienen en la construcción de un canal de captación tanto geométricas como hidráulicas, entre las que destacan: forma y pendiente del canal, régimen y propiedades del flujo, transporte de sólidos en suspensión, erosión y sedimentación, estudio geológico y topográfico de la zona, y el caudal de captación requerido por la población beneficiada.

– En el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura (IHHS) se han realizado muchos trabajos bajo la modalidad de simulación numérica en programas como Open Telemac Mascared, SSIM o River 2D. El programa ANSYS ha sido utilizado para resolver una serie de trabajos relacionados a la transmisión de calor dentro del área de Ingeniería Mecánica Eléctrica, pero hasta hace poco era desconocido para el IHHS. Durante el presente proyecto se ha realizado un modelo completo para el estudio de bifurcaciones utilizándose el programa ANSYS CFX, esto con el objetivo de que se convierta en una herramienta importante para futuras investigaciones de problemas hidráulicos o proyectos de tesis que incluyan variantes del presente tema, como por ejemplo:

- Bifurcaciones localizadas en el tramo curvo del río.
- Construcción de una obra hidráulica de gran envergadura (Bocatoma).
- Modelación de la geometría real (no simplificada) del río.
- Estudio de la capacidad erosiva del río.
- Estudio del transporte de sedimentos.
- Resultados de relación de ancho, relación de velocidad y razón de descarga para distintos números de Froude, etc.

Se hace especial hincapié en realizar en cada proyecto un estudio de malla, seguido de la elaboración de la geometría, con el objetivo de obtener datos más precisos y cercanos al comportamiento real del fluido.

Referencias Bibliográficas

- Adrián. (2008). *Dinámica de fluidos: línea de flujo, líneas y tubo de corriente, ecuación de continuidad, ecuación general del movimiento de un fluido o de Euler, ecuación de Daniel Bernoulli y aplicaciones: teorema de Torricelli y tubo de Venturi*. Obtenido de <https://estudiarfisica.com/2008/12/22/fisica-general-12-dinamica-de-fluidos-linea-de-flujo-lineas-y-tubo-de-corriente-ecuacion-de-continuidad-ecuacion-general-del->
- Agüera, J. (2011). *Pérdida de carga en conducciones*. Obtenido de <https://es.scribd.com/presentation/290056677/fluidos-6-Perdidas-de-carga-en-conducciones-ppt>
- ANSYS 16.1. (2012). *Meshing Help*.
- ANSYS 18.0. (2016). *ANSYS Help - Evaluating Mesh Quality*.
- ANSYS Inc. (2013). *Theory Guide*.
- Bayona, C., Londoño, L., & Nieto, E. (2015). *Identificación del modelo de turbulencia más adecuado, utilizando software de dinámica de fluidos computacional, para el diseño de vehículo urbano de la competencia Shell Eco Marathon*. (Tesis de Pregrado). Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia.
- Calderon, W. (2013). *Análisis mediante simulación fluidodinámica computacional del flujo de relaves de minería en desgaste de cajones disipadores*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá, Colombia: Nomos S.A.
- Davoudabadi, P. (2012). *The Most Accurate and Advanced Turbulence Capabilities*. Chicago, Estados Unidos.
- Elera, G. (2005). *Modelación Numérica del Río Piura utilizando River 2D entre los puentes Cáceres e Integración*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Piura, Piura, Perú.
- FAO. (2007). *Estructuras para la toma de agua principal*. Obtenido de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6708s/x6708s07.htm
- Física Práctica. (2007). *Líneas y Tubos de corriente*. Obtenido de <https://www.fisicapractica.com/lineas-y-tubos-de-corriente.php>
- Fluent Inc. (2003). *Release 6.1 User Manual*.
- Garzón, S. (2014). *Modelación en CFD de un tramo del Río Arzobispo (Bogotá D.C.)*. (Tesis de Pregrado). Universidad de San Buenaventura, Bogotá, Colombia.

- González, R. (2011). *Bocatomas*. Obtenido de Hidráulica aplicada al diseño de obras 2011, Primavera U-Cursos: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/2/CI5104/1/material_docente/bajar?id_material=404156
- Heasted Methods Inc. (2002). *Computer Applications in Hydraulic Engineering (CAIHE)*. Fifth Edition. Hardcover. Miami, Estados Unidos.
- IGP, I. G. (2015). *Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño*. Boletín Técnico. Lima, Perú.
- INEI. (2015). *Mapa del Departamento de Piura*. Obtenido de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1201/cuadros/piura/piura_20_1.pdf
- Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura. (2000). *Estudio para el Tratamiento Integral del Río Piura*. Piura, Perú.
- La Madrid, R. (2015). *Modelación Numérica del proceso de transferencia de calor en intercambiadores de calor abiertos utilizados en la industria panelera*. (Tesis Doctoral). Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Launder, B.E., & Spalding, D. B. (1974). *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press. Londres, Inglaterra.
- López, B. (2015). *Aplicación de CFD ANSYS FLUENT en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura*. (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, México.
- Marín, J., & Cedillo, J. (2015). *Estudio experimental y computacional mediante CFD ANSYS del flujo de aire a través de techos de edificaciones usando un túnel de viento*. (Tesis de Pregrado). Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Quito, Ecuador.
- Menter, F., Schütze, J., & Kurbatskii, K. A. (2011). *Scale-Resolving Simulation Techniques in Industrial CFD*. 6th AIAA Theoretical Fluid Mechanics Conference. Honolulu, Hawaii.
- Monge, C. (2017). *Modelo numérico de un canal de fuerte pendiente con rugosidad variable aplicando el software ANSYS CFX y comparación con los resultados obtenidos en el paquete computacional OpenFOAM*. (Tesis de Pregrado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Mora, J. (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 de Maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, Colombia.
- Moreno, J. (2004). *Especificaciones Técnicas para el diseño de captaciones por gravedad de aguas superficiales*. Lima, Perú.
- NAVIERS.XYZ. (2017). *Enfoque Lagrangiano vs Euleriano*. Obtenido de <https://naviers.xyz/cfd/enfoque-lagrangiano-vs-euleriano/>

- Rocha, A. (2005). Análisis del comportamiento de los sólidos en una bifurcación. *Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI*, 3.
- Sánchez, I. (2014). *Central hidroeléctrica y de bombeo*. Obtenido de Cuadernos de derecho para ingenieros, IX entrega: <http://cuadernosdederechoparaingenieros.com/central-hidroeléctrica-y-de-bombeo/>
- SENAMHI, S. N. (2014). *El Fenómeno El Niño en el Perú*. Lima, Perú: Impresiones y Servicios Generales TAWA.
- Senk, B. (2017). *Estudio hidrodinámico de propulsores mediante el uso de herramientas numérico - computacional*. (Tesis de Pregrado). Universidad de Piura, Piura, Perú.
- SNIRH. (2017). *Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos. Módulo para el Monitoreo del Fenómeno El Niño*. Obtenido de http://snirh.ana.gob.pe/fen/EFEN_Compara.aspx
- TECNUN, C. T. (2007). *Conceptos Introductorios. Enfoques Lagrangiano y Euleriano*. Apuntes de clase del curso Mecánica de Fluidos. Universidad de Navarra, España.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational FLuid Dynamics - The Finite Volume Method*. Pearson Prentice Hall, 2 edition.
- Villarroel, L. (2015). *Simulación numérica de un flujo de agua a través de una válvula tipo mariposa de doble excentricidad*. (Tesis de Maestría). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Wilcox, D. (1993). *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries Inc. La Cañada Flintridge, California, Estados Unidos.



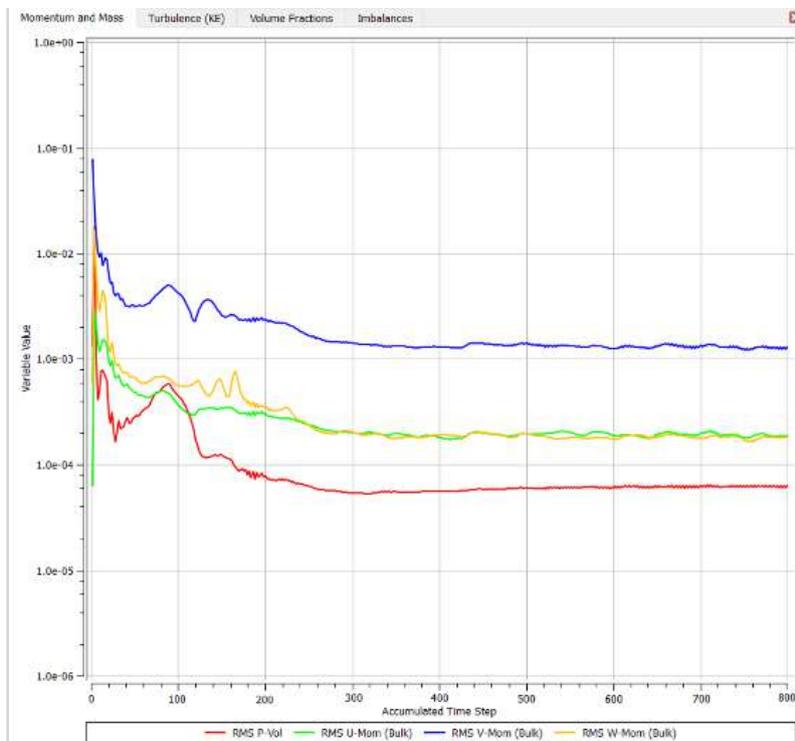
Apéndices



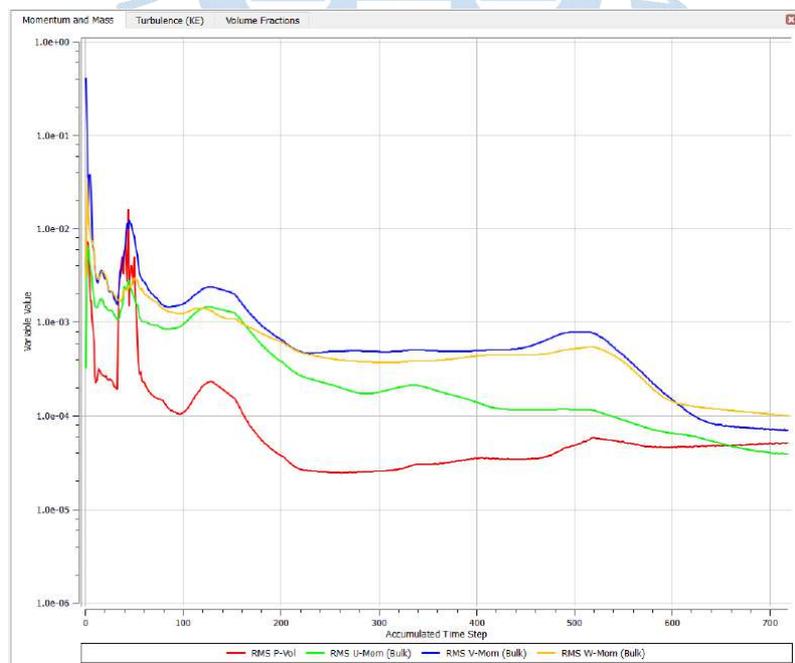


Apéndice A. Resultados de la comparación de los métodos de mado

Apéndice A-1. Residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones de conservación de masa y momentum para los distintos métodos de mado.



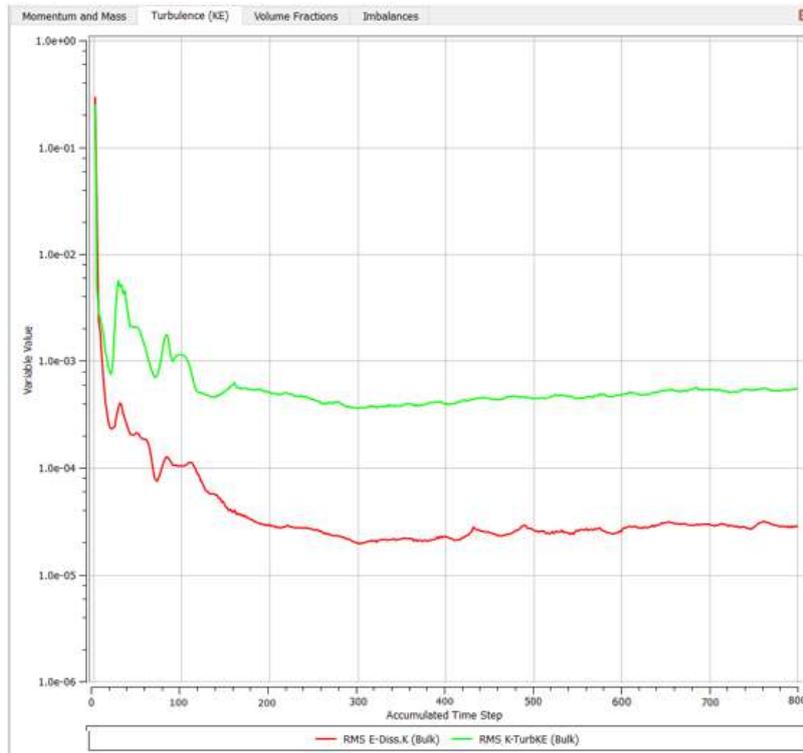
Método Tetraédrico



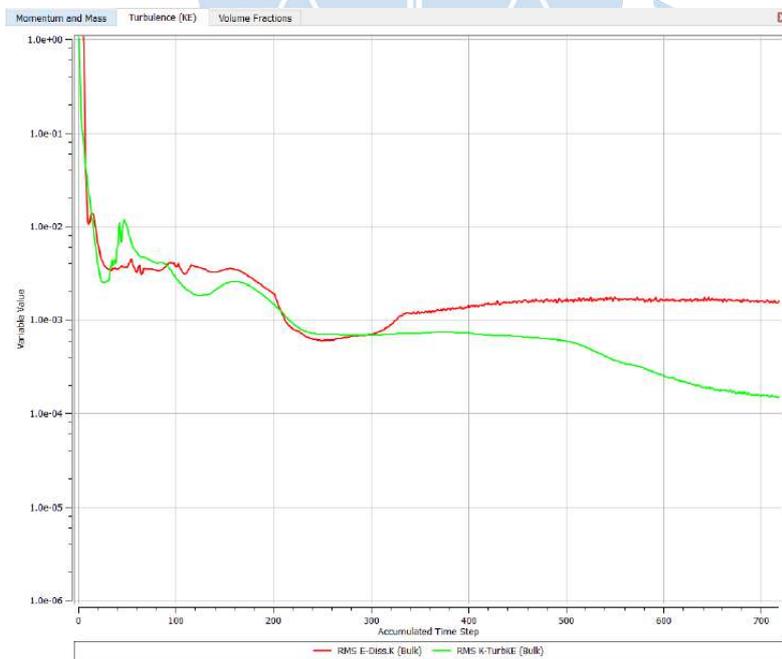
Método Hexaédrico

Fuente: Elaboración propia

Apéndice A-2. Residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones del modelo de turbulencia $k - \epsilon$ para los distintos métodos de malla.



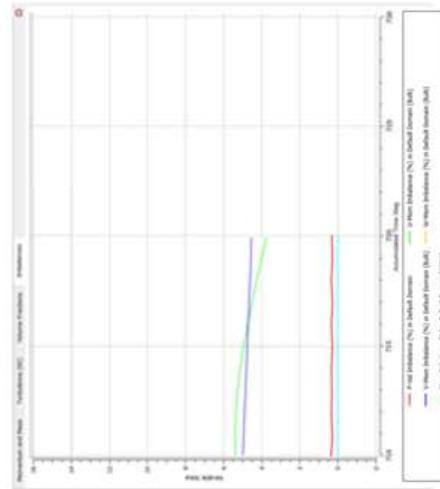
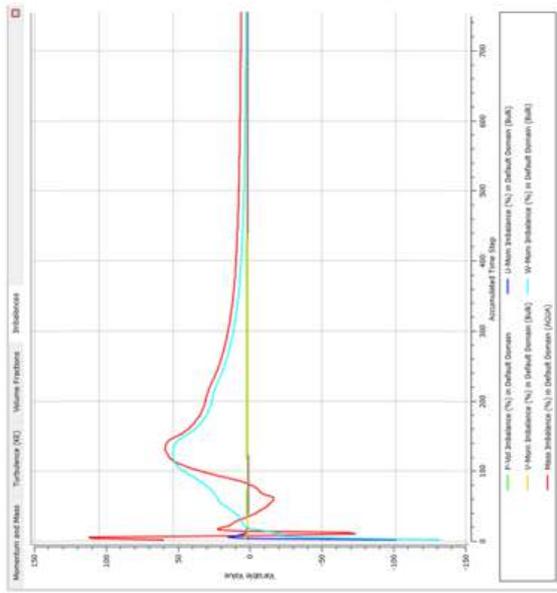
Método Tetraédrico



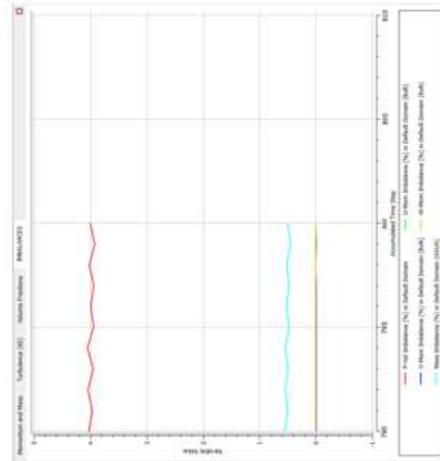
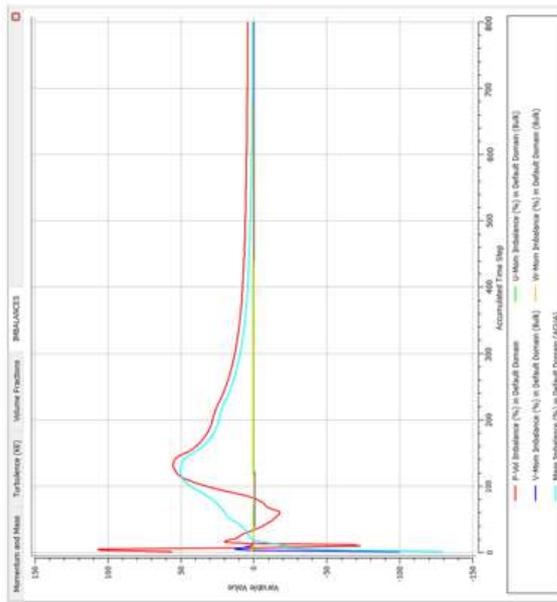
Método Hexaédrico

Fuente: Elaboración propia

Apéndice A-3. (a) Imbalances y (b) detallado de Imbalances en un rango de estudio más reciente para los distintos métodos de malla.



Método Hexaédrico



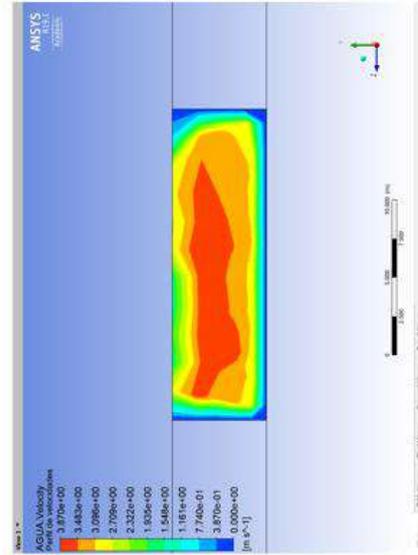
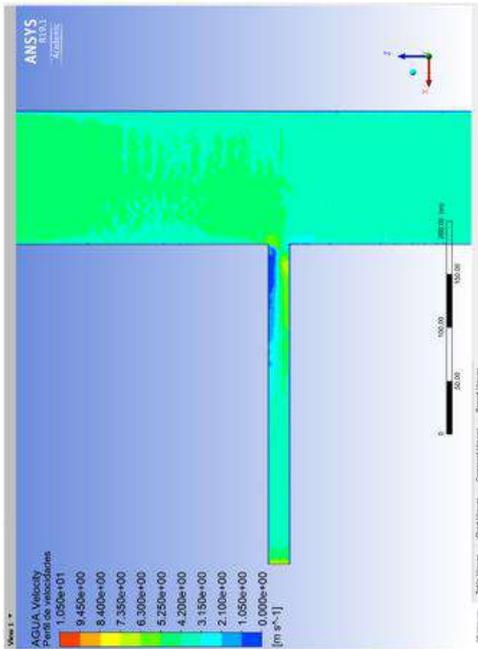
Método Tetraédrico

(a)

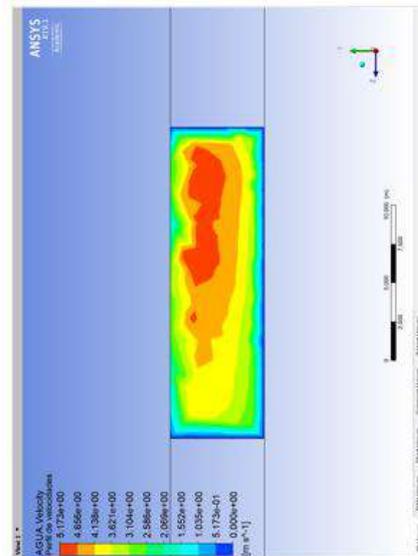
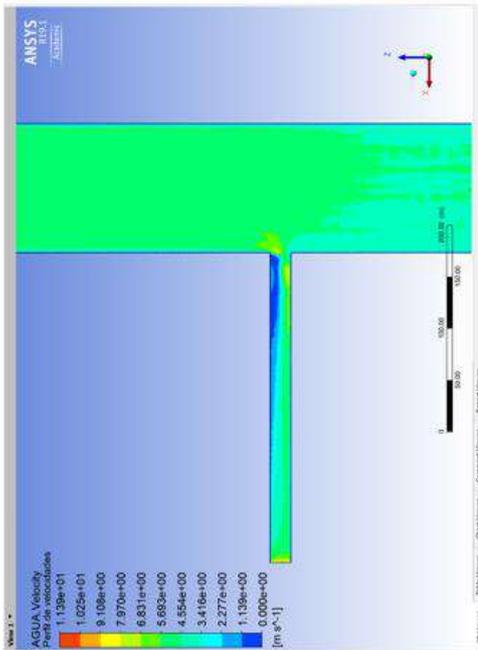
(b)

Fuente: Elaboración propia

Apéndice A-4. Perfil de velocidades en (a) la superficie libre y (b) sección del canal de toma para los distintos métodos de malla.



Método Hexaédrico



Método Tetraédrico

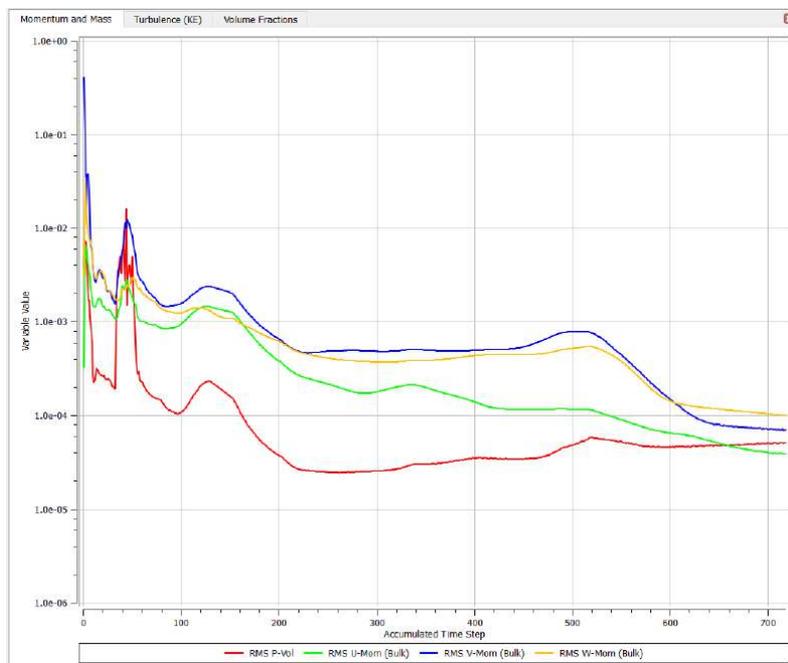
(a)

(b)

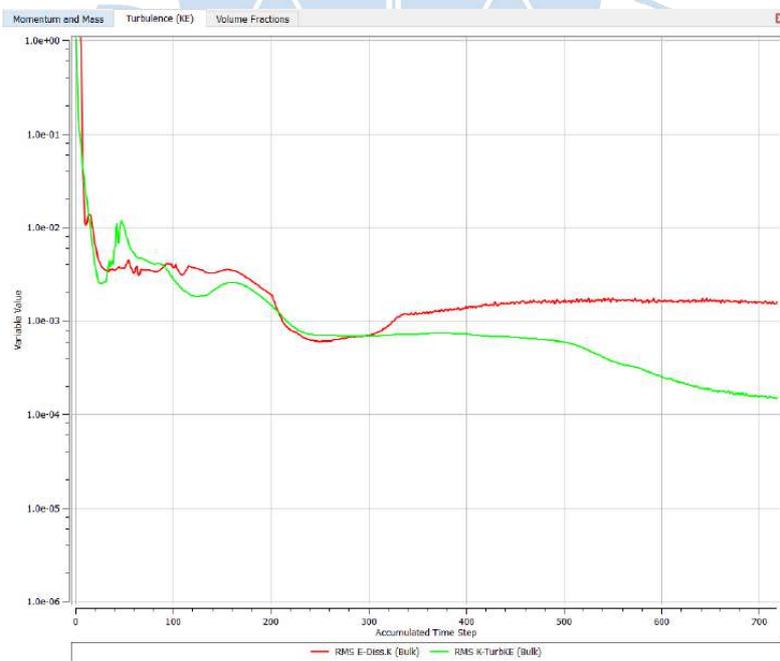
Fuente: Elaboración propia

Apéndice B. Resultados del dimensionamiento de malla

Apéndice B-1. Residuos promedios de todos los volúmenes de control RMS de las ecuaciones (a) de conservación de masa y momentum y (b) del modelo de turbulencia $k - \epsilon$ de las distintas alternativas evaluadas para el Dimensionamiento de Malla.



(a) Conservación de masa y momentum

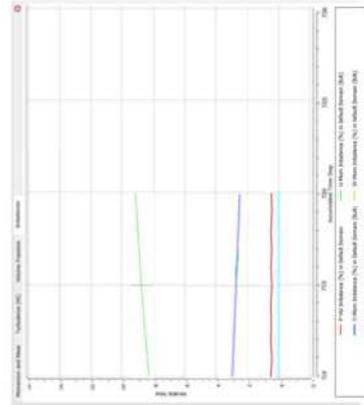
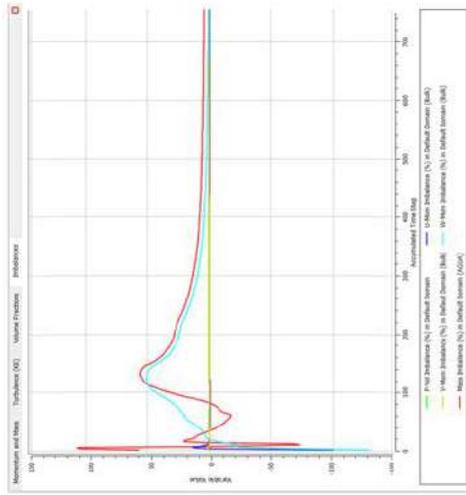


(b) Modelo de turbulencia $k - \epsilon$

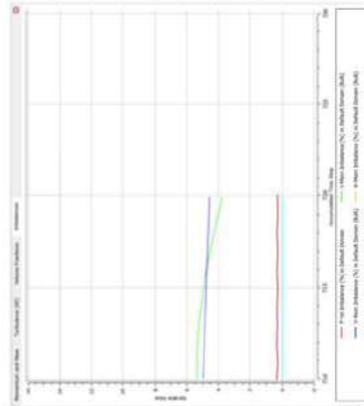
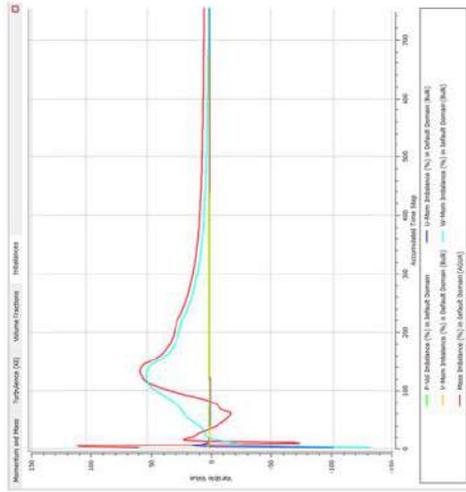
Dimensiones 1.0, 0.75, 0.6, 0.5, 0.4 y 0.3

Fuente: Elaboración propia

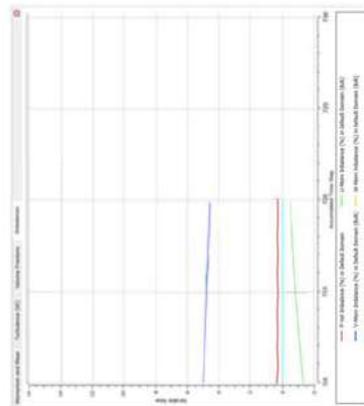
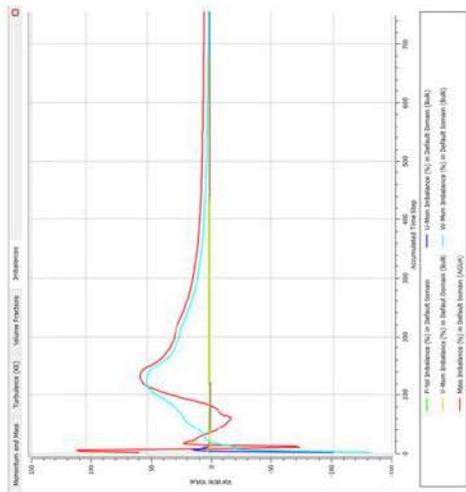
Apéndice B-2. (a) Imbalances y (b) detallado de Imbalances en un rango de estudio más reciente para el Dimensionamiento de Malla.



Dimensiones 0.6, 0.5, 0.4 y 0.3



Dimensión 0.75



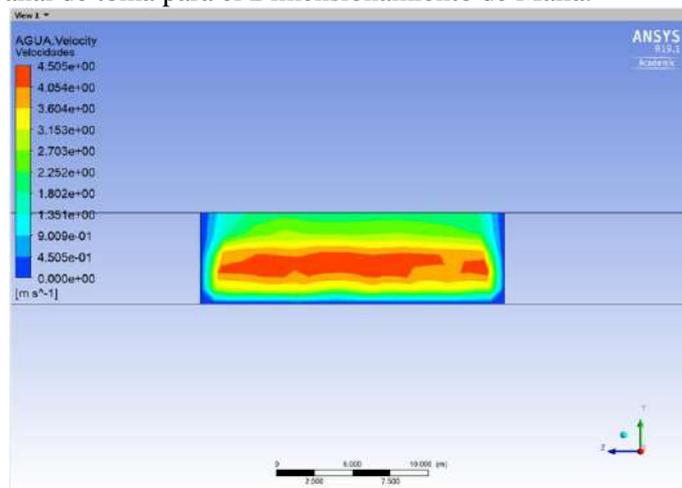
Dimensión 1.0

(a)

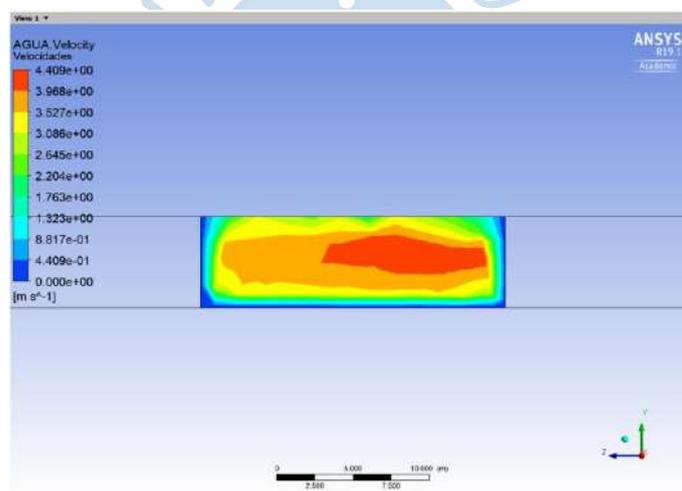
(b)

Fuente: Elaboración propia

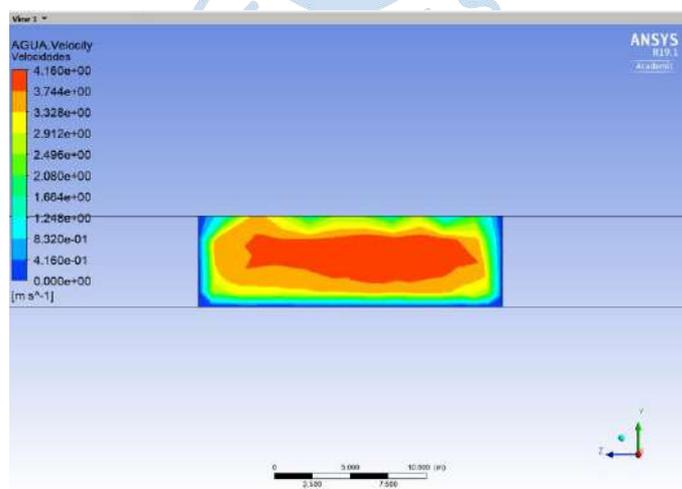
Apéndice B-3. Perfil de velocidades en la sección del canal de toma para el Dimensionamiento de Malla.



Dimensión 1.0



Dimensión 0.75



Dimensiones 0.6, 0.5, 0.4 y 0.3

Fuente: Elaboración propia