

**MODELADO HIDRÁULICO Y TÉRMICO DEL SISTEMA
HIDROLÓGICO CIÉNAGA DE MIRAMAR Y CAÑO
ROSARIO AFECTADO POR LOS VERTIMIENTOS DE
AGUA RESIDUALES INDUSTRIALES EN
BARRANCABERMEJA**

WILLIAM SANTIAGO JAIMES ORTIZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2020

**MODELADO HIDRÁULICO Y TÉRMICO DEL SISTEMA
HIDROLÓGICO CIÉNAGA DE MIRAMAR Y CAÑO
ROSARIO AFECTADO POR LOS VERTIMIENTOS DE
AGUA RESIDUALES INDUSTRIALES EN
BARRANCABERMEJA**

WILLIAM SANTIAGO JAIMES ORTIZ

**Trabajo de investigación como requisito para optar al título de
magíster en Ingeniería Mecánica**

**Director: David Alfredo Fuentes Díaz.
Doctor en Ingeniería Energética.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2020

DEDICATORIA

*A Dios va el fruto de este proyecto
pues me ha permitido cumplir una etapa más en mi vida.*

A mi madre y mis hermanas.

*A mi esposa e hija. Ustedes son mi mayor motivación
a seguir día a día.*

William

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la UIS, a la escuela de ingeniería mecánica y a la coordinación de la maestría por la oportunidad que me ha brindado de seguirme preparando profesionalmente.

A cada uno de los docentes que hicieron parte de este proceso y que en sus valiosas enseñanzas tuve respuesta a muchas inquietudes.

Finalmente quiero agradecer a mi director Ph.D. David Alfredo Fuentes por toda la asesoría brindada, sabios consejos y paciencia durante todo el desarrollo de este importante proyecto. Esta fue una ardua tarea que por fin ha culminado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1 OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL:	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	16
2 METODOLOGÍA	17
2.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE:	17
2.2 DISEÑAR UNA ESTRATEGIA DE CÁLCULO:	17
2.3 REALIZAR SIMULACIÓN DEL SISTEMA:	18
3 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL EN LA CIÉNAGA MIRAMAR Y SUS ALREDEDORES	19
3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
3.2 JUSTIFICACIÓN	21
3.3 SOLUCIÓN ACTUAL	22
3.4 ALCANCES Y LIMITANTES	22
4 ESTADO DEL ARTE	24
4.1 MARCO TEÓRICO	24
4.2 SOLUCIONES PLANTEADAS	26
4.2.1 Modelamiento en QUAL2K	26
4.2.2 Modelamiento en TELEMAC 3D	29
4.2.3 Modelamiento en Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)	30
4.2.4 Modelamiento en ECOM	31
4.2.5 Modelamiento en SSIIM	31
4.2.6 Modelamiento en OpenFOAM	32
5 ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN	35
5.1 BANCO EXPERIMENTAL	35
5.1.1 Planteamiento de los experimentos	36

5.2	GEOMETRÍA DEL BANCO DE PRUEBAS	37
5.3	ECUACIONES GOBERNANTES PARA EL FLUJO	38
5.3.1	Ecuación de la conservación de la masa	39
5.3.2	Ecuación de la cantidad de movimiento	39
5.3.3	Ecuación de la conservación de la energía	40
5.3.4	Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation. (RANS)	40
5.3.5	Aproximación de Boussinesq	42
5.3.6	Modelo de turbulencia k-epsilon	43
5.4	CONDICIONES DE FRONTERA	44
5.4.1	Superficie libre	44
5.4.2	Entradas	46
5.4.3	Paredes y Fondo	46
5.4.4	Salida	46
5.5	RESULTADOS MODELO BANCO EXPERIMENTAL	47
5.5.1	Perfiles de velocidad	47
5.5.2	Campos Vectoriales	49
5.5.3	Perfiles de temperatura	49
5.5.4	Teoría de la razón de profundidad	52
6	APROXIMACIÓN A LA SOLUCIÓN DE LA CIÉNAGA	54
6.1	GEOMETRÍA PROPUESTA	54
6.2	CONDICIONES DE FRONTERA	54
6.3	RESULTADOS	54
6.3.1	Zona de mezcla por la velocidad	55
6.3.2	Zona de mezcla por la temperatura	58
7	ANÁLISIS CIÉNAGA MIRAMAR	61
7.1	CIÉNAGA Y SUS ALREDEDORES	61
7.2	MODELAMIENTO DE LA CIÉNAGA	61
7.3	DATOS DE ENTRADA DE LA CIÉNAGA	69
7.3.1	Zona cercana a las paredes	73
7.4	RESULTADOS	73
7.4.1	Perfiles de Velocidad	73
7.4.2	Zonas de mezcla por la velocidad	84

7.4.3	Velocidad de trayecto	87
7.4.4	Perfiles de Temperatura	90
8	CONCLUSIONES	97
9	TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES	99
	BIBLIOGRAFÍA	100
	ANEXOS	103

Índice de figuras

1	Basura y mortandad de peces en la ciénaga Miramar.	20
2	Tipo de cuencas hidrográficas.	24
3	Balance del flujo en un elemento.	27
4	Balance del energía en un elemento.	28
5	Vista aguas abajo de la unión a 90°	35
6	Configuración con punto de origen del banco experimental	37
7	Geometría diseñada en <i>Salome</i>	37
8	Mallado en <i>Salome</i> de la geometría diseñada	38
9	Aproximación polinómica de la temperatura	45
10	Velocidad al final del canal en el modelo	47
11	Comparativa del Patrón de velocidad transversal u^* y contornos a $x^* = -2.0$. Arriba modelo. Abajo experimento por Weber, Schumate y Mawer[29]	48
12	Comparativa del Patrón de velocidad superficial u^* a $z^* = 0.278$ para $q^* = 0.250$. Arriba modelo. Abajo experimento por Weber, Schumate y Mawer[29]	49
13	Campo Vector u^*-v^* para condiciones de flujo $q^* = 0.250$ a $z^* = 0.014$, cerca al fondo. Arriba modelo, abajo experimento por Weber, Schumate y Mawer [29]	50
14	Estado final del sistema con valores de temperatura de entrada $T_m=40^\circ\text{C}$ y $T_b=75^\circ\text{C}$	50
15	Valores de temperatura a la entrada. Izq: Entrada principal. Der: Brazo lateral.	51
16	Perfiles de temperatura. Izq: En $x^*=2.5$, Der: En $x^*=0$	51
17	Perfil de temperatura brazo lateral a $y^*=-1.5$	52
18	Perfil de temperatura canal de mezcla en $x^*=-2$. Izq: Perfil respecto a su altura. Der: Sección transversal	52
19	Comparación de datos de relación de profundiad con datos actuales . .	53
20	Geometría mallada propuesta aproximada a la ciénaga	55
21	Efectos de la velocidad sobre el cuerpo principal a los 10 minutos . . .	56
22	Efectos de la velocidad sobre el cuerpo principal a los 30 minutos . . .	57
23	Efectos de la velocidad sobre el cuerpo principal a los 60 minutos . . .	57
24	Campo vectorial sobre el cuerpo principal a los 60 minutos	58

25	Efectos de la temperatura sobre el cuerpo principal a los 10 minutos . .	59
26	Efectos de la temperatura sobre el cuerpo principal a los 30 minutos . .	59
27	Efectos de la temperatura sobre el cuerpo principal a los 60 minutos . .	60
28	Ciénaga Miramar y sus alrededores	61
29	Croquis de la ciénaga en SolidWorks	62
30	Dimensiones brazos ciénaga Miramar. Cardenozo, Orduz y Ospina [5] .	63
31	Geometría de la Ciénaga con dimensiones reales en el <i>work space</i> de Salome	63
32	Paso 1 en la creación de la malla para la geometría de la ciénaga. Habilitar la opción <i>Mesh</i>	64
33	Paso 2 en la creación de la malla para la geometría de la ciénaga. Seleccionar la geometría deseada	65
34	Paso 3 en la creación de la malla para la geometría de la ciénaga. Uso del algoritmo	65
35	Paso 4 en la creación de la malla para la geometría de la ciénaga. Selección de tamaño máximo o mínimo de la malla	66
36	Paso 5 en la creación de la malla para la geometría de la ciénaga. Computar los parámetros planteados	68
37	Mallado de la ciénaga en varias zonas	68
38	Aproximación polinómica de la temperatura	71
39	Imagen de la velocidad del flujo a los 15 minutos reales del modelamiento. Vista superior	74
40	Imagen de la velocidad del flujo a los 60 minutos reales del modelamiento. Vista superior	75
41	Velocidad total a la entrada del caño Rosario a los 5 minutos. Imagen tomada directamente de Paraview	76
42	Perfiles de velocidad Ux a la entrada del caño Rosario después de la Ciénaga	77
43	Perfiles de velocidad Uy a la entrada del caño Rosario después de la Ciénaga	77
44	Velocidad total sobre la superficie del caño Rosario a lo largo del tiempo	78
45	Líneas de corriente desde la ciénaga hacia el caño Rosario	78
46	Punto de monitoreo de velocidad a la salida del caño Camelias	79
47	Perfiles de velocidad en X en el punto de monitoreo a la salida del caño Camelias	80
48	Perfiles de velocidad en Y en el punto de monitoreo a la salida del caño Camelias	80

49	Magnitud de la velocidad saliendo del caño Camelias $t=140$ min. Imagen tomada del Paraview	81
50	Líneas de corriente entre el caño Camelias y la ciénaga	82
51	Imagen de punto de medición saliendo por caño Las Lavanderas	82
52	Perfiles de velocidad U_x en la Ciénaga después del caño Las Lavanderas	83
53	Perfiles de velocidad U_y en la Ciénaga después del caño Las Lavanderas	83
54	Magnitud de la velocidad saliendo del caño Lavanderas $t=170$ min. Imagen tomada del Paraview	84
55	Líneas de corriente entre el caño Las Lavanderas y la ciénaga. Imagen tomada del Paraview	85
56	Zona de influencia en el caño Las Lavanderas	86
57	Zona de influencia en el caño Las Camelias	86
58	Zona de influencia en el caño Rosario	87
59	Trayectoria desde el caño Camelias a la salida	88
60	Perfil de velocidad promedio entre el caño Camelias y el caño Rosario .	89
61	Trayectoria desde el caño Lavanderas a la salida	89
62	Perfil de velocidad promedio entre el caño Lavanderas y el caño Rosario	90
63	Perfil de tiempo para el trayecto Camelias - Rosario	91
64	Perfil de tiempo para el trayecto Lavanderas - Rosario	91
65	Cambio de la temperatura al interior de la ciénaga a través del tiempo	92
66	Cambios de temperatura entre el caño Camelias y la entrada de la ciénaga Miramar	94
67	Cambios de temperatura entre el caño Lavanderas y la entrada de la ciénaga Miramar	95
68	Cambios de temperatura desde la ciénaga al caño Rosario	96
69	Valores de caudal medido en el caño Rosario	104
70	Residuals en los cálculos del modelo de la ciénaga para $\Delta t = 0,05$. . .	105
71	Residuals en los cálculos del modelo de la ciénaga para $\Delta t = 0,1$. . .	106
72	Configuración de la velocidad en las diferentes fronteras de la ciénaga .	107
73	Configuración de la temperatura en las diferentes fronteras de la ciénaga	108
74	Configuración de la presión en las diferentes fronteras de la ciénaga . .	109
75	Configuración de la energía cinética turbulenta k en las diferentes fronteras de la ciénaga	110

76	Configuración de la tasa de disipación de energía turbulenta ε en las diferentes fronteras de la ciénaga	111
----	---	-----

Índice de tablas

1	Clasificación de las cuencas en el área	25
2	Condiciones de flujo experimentales	36
3	Temperatura de Bucaramanga en un día promedio (https://weather.com/) .	44
4	Condiciones de frontera para la aproximación de la ciénaga	54
5	Identificación de nombres para las fronteras en el modelo	67
6	Temperatura de Barrancabermeja en dos días promedio (https://weather.com/)	69
7	Cálculo de condiciones de entrada para el modelamiento de la ciénaga	72
8	Valores de velocidad y calculo del promedio total a lo largo del trayecto entre caño Camelias y Rosario	87
9	Valores de velocidad y calculo del promedio total a lo largo del trayecto entre caño Lavanderas y Rosario	87

RESUMEN

TÍTULO: MODELADO HIDRÁULICO Y TÉRMICO DEL SISTEMA HIDROLÓGICO CIÉNAGA DE MIRAMAR Y CAÑO ROSARIO AFECTADO POR LOS VERTI-MIENTOS DE AGUA RESIDUALES INDUSTRIALES EN BARRANCABERMEJA.*

AUTOR: WILLIAM SANTIAGO JAIMES ORTIZ.**

PALABRAS CLAVE: Estructuras hidráulicas, dinámica, fluido, zona de mezcla, perfiles, velocidad, temperatura.

CONTENIDO:

En la naturaleza y nuestro entorno fácilmente se pueden observar estructuras hidráulicas donde los fluidos se unen y mezclan en algún punto de dicha estructura. El modelamiento numérico de estos sistemas permite observar y estudiar la dinámica del fluido cuando se somete a diferentes condiciones de geometría y velocidad de flujo y toma relevancia en la medida que se requiera analizar los efectos de la velocidad, zona de mezcla y desarrollo del fluido que afecten, en el caso de estructuras naturales, el ecosistema de una zona. Adicionalmente existen consecuencias sobre el comportamiento de un fluido debido a los cambios de temperatura que se somete; por ejemplo, se puede ver afectado el oxígeno disuelto OD lo que implicaría cambios drásticos del ecosistema dentro y alrededor de la estructura hidráulica. Así que se implementó en openFoam un modelo que permita analizar la dinámica, perfiles de velocidad y perfiles de temperatura de la ciénaga Miramar ubicada en la ciudad de Barrancabermeja cuando se somete a flujos de entrada con ciertas condiciones de velocidad o temperatura producto de los vertimientos provenientes de los caños principales Camelias y Lavanderas. Para comprobar la validez del modelo, primero se realiza una comparación del bechmarck experimental de Weber, Schumate y Mawer (2001) que calcula los campos vectoriales y perfiles de velocidad de flujos de agua en canales cruzados a 90° frente a los resultados entregados por el modelo en las mismas condiciones geométricas. De allí se observa la precisión del modelo para finalmente encontrar la solución en la ciénaga propuesta y corroborar la información del modelo con datos del caño Rosario a la salida de la ciénaga.

*Tesis de grado en Maestría en Ingeniería Mecánica

**Facultad: Fisicomecánicas. Escuela: Ingeniería Mecánica. Director: David A. Fuentes. Doctor en Ingeniería Energética.

ABSTRACT

TITLE: HYDRAULIC AND THERMAL NUMERICAL MODELING IN HYDROLOGICAL SYSTEM MIRAMAR SWAMP AND ROSARIO CHANNEL AFFECTED BY THE INDUSTRIAL WASTE WATER IN BARRANCABERMEJA.*

AUTHOR: WILLIAM SANTIAGO JAIMES ORTIZ.**

KEYWORDS: Hydraulic structure, dynamic, flow, mixing zone, profile, velocity, temperature.

CONTENT:

In our natural environment we can see easily different hydraulics structures where is evident that the flows junction and mixing in some places of the structure. Numerical modelling of these systems lets check and study the flows dynamics in different geometry conditions, velocity flow and its takes relevance if is necessary analyze the velocity effects, mixing zone and flow development that affect, in natural structures, the ecosystem around some zone. Additionally there are consequences over flow behavior cause by the temperature changes, e.g. the dissolved oxygen DO could be affected which would imply drastic changes to the ecosystem, inside or outside of the hydraulic structure. Then a OpenFOAM model was implemented to analyze the flows dynamics, velocity profile and temperature profile of the Miramar's swamp located in Barrancabermeja city when its is someted to different inside flows and temperature conditions caused by the waste water coming of the main channels Camelias and Lavanderas.

To check the validity of the model for Miramar's swamp, first a comparison is made of the Weber, Schumate and Mawer's (2001) experimental benchmark that calculate the vector fields and velocity profile of flows water in open channel junctions to 90° versus the results of a model developmented in the same conditions in geometry and velocity. In that comparison is possible check the model precision to later find the solutions for the swamp in this project and bear out the information of the model with Rosario channel data located at the swamp's exit.

*Master thesis project

**Faculty: Physical Mechanical Engineering. Program: Mechanical Engineering. Director: David A. Fuentes. David A. Fuentes. Energy Engineering Doctor.

INTRODUCCIÓN

La mecánica de fluidos es una de las ramas de la ingeniería que toma gran relevancia debido a sus numerosas aplicaciones en la vida cotidiana y en proyectos tecnológicos. Con el pasar de los años, una nueva herramienta de la ingeniería empieza a dar pasos importantes para los análisis matemáticos y la necesidad de resolver problemas tremendamente complejos y con diversas aplicaciones [13]. El modelamiento numérico comienza a ser una de las herramientas con las cuales se profundiza en los diseños experimentales, en los análisis de los fenómenos como lo es la dinámica de los fluidos en diferentes cuerpos de agua y sus comportamientos en la transferencia de energía. Este trabajo de investigación es producto del marco de cooperación UIS- Ecopetrol y financiado por el mismo, que busca generar nuevo conocimiento científico que beneficiará tanto a la universidad como a Ecopetrol.

Como parte de sus objetivos busca generar una primer herramienta que calcule, mediante un modelamiento numérico, la dinámica y los perfiles de velocidad y temperatura a un sistema hidrológico sometido a diferentes condiciones tanto de vertimientos como ambientales.

En la primera parte de este trabajo se presenta una descripción detallada del problema junto con la justificación para solucionarlo. En la segunda parte se presenta el estado del arte que muestra algunas de las soluciones planteadas por otros autores donde las investigaciones realizadas en la IIHR (Iowa Institute Hydroscience Research) de la universidad de Iowa respecto a flujos de agua en canales juega un papel importante. En la tercera parte se mostrará el modelo propuesto para solucionar el problema descrito anteriormente, comparando los resultados que ofrece el modelo respecto a los datos experimentales obtenidos en el IIHR. Finalmente se presentan los resultados obtenidos por las simulaciones hechas en la geometría del sistema hidrológico junto con algunos parámetros estimados de temperatura y velocidad de flujo y así presentar algunas conclusiones producto de este trabajo de investigación.

También se debe resaltar que como producto del desarrollo de este proyecto de investigación se presentaron 2 ponencias orales en congresos, una de estas ponencias trajo como producto un artículo parte de libro *Métodos numéricos y sus aplicaciones*, y son referenciados a lo largo del libro.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL:

Modelar la afectación hidráulica y térmica de los vertimientos de aguas industriales sobre el sistema hidrológico conformado por la Ciénaga de Miramar y Caño Rosario.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Realizar una revisión del estado del arte sobre la problemática planteada.
- Diseñar una estrategia de cálculo basada en OpenFOAM que permita realizar un diagnóstico de las condiciones hidráulicas y térmicas del agua en el sistema hidrológico Ciénaga Miramar y Caño Rosario.
- Realizar una simulación en estado transitorio y en 3D sobre los parámetros hidráulicos y térmicos en un cuerpo de agua mediante el software OpenFOAM.

2. METODOLOGÍA

Para el correcto desarrollo del proyecto, la metodología debe ir encaminada a cumplir con los objetivos propuestos.

2.1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE:

- Definir las palabras claves en la búsqueda: open channel, water quality, fluid dynamics, turbulence, channel flow, heat exchange.
- Seleccionar la literatura más acertada en relación al planteamiento de la solución.
- Identificación y caracterización de las soluciones encontradas.
- Filtrado de las soluciones que más aporten a nuestro problema: Revisar bibliografía.

2.2. DISEÑAR UNA ESTRATEGIA DE CÁLCULO:

- Diseñar el proceso de cálculo
 - Definir la geometría.
 - Selección del mallado a utilizar.
 - Establecer las ecuaciones de gobierno.
 - Establecer las condiciones de frontera.
 - Resolver.
 - Visualizar.
 - Validar.
- Realizar procesos benchmark
 - Identificación de los benchmark que aplican: Todo lo relacionado a "*3D Numerical Modelling Open Channel Junction*".

- Análisis de la solución planteada.
- **Implementar solución prototipo**
 - Realizar la simulación del benchmark: Construcción de la geometría, mallado y condiciones de frontera.
 - Tabular datos comparativos.
 - Realizar ajustes de ser necesario.

2.3. REALIZAR SIMULACIÓN DEL SISTEMA:

- Identificar la geometría: Planos o vistas de la ciénaga Miramar.
- Identificar los vertimientos: 2 caños de entrada y un caño de salida.
- Identificar las condiciones ambientales: Temperatura ambiente variable y velocidad del aire constante.
- Introducir el modelo: Modelo k-epsilon, aproximación de boussinesq y superficie libre con condición variable.
- Correr el cálculo.
- Validar los resultados.

3. PROBLEMÁTICA AMBIENTAL EN LA CIÉNAGA MIRAMAR Y SUS ALREDEDORES

Este proyecto surge de la necesidad de generar nuevas herramientas y estrategias que permitan analizar los impactos de los vertimientos sobre la ciénaga Miramar y evitar altas pérdidas sobre el ecosistema que lo rodea.

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La ciudad de Barrancabermeja es privilegiada por su ubicación, dando origen así a una de las ciudades con mayor riqueza ambiental y de minerales lo cuál la hace una ciudad importante para la industria del país.

Sin embargo, a pesar de los grandes beneficios que estos recursos ambientales traen a la ciudad, a lo largo de los años se ha ido manifestando con mayor fuerza una problemática ambiental sobre los espejos de agua aledaños que hacen que el abastacimiento de agua sea más escaso para la población.

Dado que es una circunstancia a nivel nacional, el ministerio del medio ambiente publicó la resolución 631 de 2015 por la cuál se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a sistemas de alcantarillado, con el propósito de mitigar los impactos de mayor perjuicio sobre lagos, lagunas, ciénagas, entre otros.

En el caso de Barrancabermeja, uno de los cuerpos de agua más afectados es la Ciénaga Miramar que está ubicada al norte de la ciudad y que tiene como principales caños de entrada *Las Camelias* y *Las Lavanderas**.

Toda la contaminación, registrada por diferentes medios, produce altos impactos negativos sobre este espejo de agua y se pone en riesgo todo ecosistema alrededor de la ciénaga.

Uno de los mayores impactos que se producen en los cuerpos de agua sucede cuando a través de vertimientos se cambia la temperatura del agua y se crea un diferencial entre esta temperatura y la temperatura ambiente, que produce un cambio en la calidad del

*Contraloría municipal de Barrancabermeja. Acción preventiva. Abril de 2012.

agua en las inmediaciones del productor de estas afluentes. Adicional a ello, el aumento de temperatura podría ser causa del poco caudal entrante sobre el cuerpo principal lo que lo haría estabilizarse durante tiempos prolongados y así generar un calentamiento sobre la superficie de este cuerpo principal. Ese incremento de temperatura puede significar un cambio a la baja de la demanda de oxígeno disuelto (DO) en el agua; lo que produciría una grave afectación al ecosistema y a la vida acuática en sus inmediaciones.

Figura 1: Basura y mortandad de peces en la ciénaga Miramar.



Fuente:<http://www.lafm.com.co-nacional-noticias-mortandad-de-peces-en-una-cien-184572>.

Otro de los problemas que se puede presentar es la sedimentación de partículas bajo los cuerpos de agua. Toda corriente de agua tiene la capacidad de transportar cierta cantidad de material sólido debido a sus características de caudal, fuerza y velocidad. En el caso de la ciénaga, puede generar cambios en la capacidad volumétrica de agua que soporta; ya que al ser un sistema léntico que no puede transportar material sólido en cantidades, mucho de su volumen se ocupa por los sedimentos desplazando cantidades de agua necesaria para el equilibrio del ecosistema. Adicionalmente, estas cantidades de agua desplazadas pueden llevar pequeñas partes del material sólido y transmitir el mismo problema aguas arriba.

Ahora, como se mencionaba anteriormente, en el caso de la ciénaga Miramar estos desechos no reposan totalmente sobre ella si no que además son transportados a través

de sus caños; el problema se transmite por varias secciones del sistema hidrológico hasta llegar finalmente a reposar sobre las corrientes de otro sistema hídrico.

Finalmente, existe un efecto de sobrecarga de nutrientes, como fósforo y nitrógeno al medio ambiente a través de los medios acuáticos. Esta carga excesiva de nutrientes puede dar lugar a la eutrofización acelerada, que es una condición natural que se caracteriza por los altos niveles de producción de algas, formando grandes floraciones y la introducción de materia orgánica adicional en el medio ambiente. A medida que la demanda biológica de oxígeno de la descomposición de materia orgánica aumenta en grandes proporciones, se puede superar su potencial de equilibrio en el ecosistema y causar que los niveles de oxígeno disuelto disminuyan [15].

Para poder analizar todo lo anterior se debe incluir el término zona de mezcla, que es el área donde un vertimiento de alto impacto contaminante interactúa con agua limpia de la zona. Se debe procurar que esta zona de mezcla está limitada a un área controlable para minimizar el impacto sobre el ecosistema y de ser posible evitar la alta migración de vida acuática a otros lugares[10].

Debido a todo lo anterior se hace importante estudiar y entender el comportamiento de la dinámica del agua en la ciénaga de manera que a partir de estudios adicionales se analicen los efectos de la sedimentación y encontrar los posibles perfiles de temperatura y predecir cambios en el DO de la ciénaga y sus alrededores.

3.2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad es indispensable para la industria, los entes gubernamentales, la academia y para la comunidad en general conocer el impacto de los diferentes vertimientos, además que por ley los productores de estos, deben generar estudios sobre la prevención y mitigación de los desechos post-producción. Se debe contar con herramientas para el control y aplicación de las leyes en materia de la calidad del agua.

Conocer el comportamiento de los vertimientos de agua le permitirá a la industria buscar un método eficaz para verificar la zona de mezcla o diseñar equipos que prevengan el impacto generado y que a su vez permita evaluar los efectos de estos vertimientos en cuencas y ríos del país.

Mediante este proyecto se busca generar una herramienta y una metodología que a fu-

turo permita evaluar los efectos de los vertimientos. Aplicar una técnica para el cálculo de fluidos en cuerpos de aguas lóticos y lénticos con lo que se podrá conocer la hidráulica de sistemas hídricos complejos, la dinámica del vertimiento y sus efectos para las condiciones locales propias del sistema.

Las zonas de mezcla, anteriormente mencionadas, se hallan realizando un modelamiento de los campos de velocidad y de la transferencia de calor en dichas zonas del sistema hidrológico.

Este proyecto toma importancia ya que es la base principal del modelo que calcula los efectos de la sedimentación, eutrofización y contaminantes.

3.3. SOLUCIÓN ACTUAL

En la actualidad una de las herramientas usadas por Ecopetrol en el análisis de las condiciones del agua en las cuencas y ríos que interviene es el software QUAL2K. Este es un software en 2D que mide la calidad de agua de ríos y caudales en estado estacionario con flujo constante no uniforme.

Tiene como limitante que para la medición de los parámetros se debe hacer por fragmentos, es decir, se debe tomar un punto de partida en el canal al cual se van a medir los parámetros y a cierta distancia aguas arriba se toman otros valores a medir, luego de nuevo se toman más parámetros a cierta distancia aguas arriba y así sucesivamente hasta obtener los perfiles que se requieren.

3.4. ALCANCES Y LIMITANTES

Dado que la solución completa de un modelo que pronostique la calidad del agua es bastante compleja, el modelo que se desarrolla en este proyecto se limita sólo a la solución de la dinámica y de los perfiles de temperatura en la ciénaga por lo cuál se debe tener presente lo siguiente:

- Delimitar la geometría exacta del sistema y aproximarla debido a que valores de profundidades en la ciénaga y caño no se tienen en su totalidad.

- Realizar un diagnóstico del efecto de los vertimientos en las corrientes hidráulicas de los cuerpos de agua mediante la obtención de los perfiles de velocidad y líneas de corriente.
- Realizar una simulación en estado transitorio en 3D sobre la evolución de los parámetros hidráulicos y térmicos en un cuerpo de agua receptor usando OpenFOAM.
- Diseñar una metodología para el análisis de los vertimientos en cuerpos de agua.
- Diseñar una herramienta para el análisis de los vertimientos en cuerpos de agua mediante el software OpenFOAM.
- Modelar el sistema con tiempos de cálculos proporcionales a los efectos. Al ser un sistema en su mayoría léntico, cualquier cambio en sus reacciones o niveles, no se hace en segundos sino por el contrario tarda días. Por lo tanto se hace importante el uso de Δt grandes.

4. ESTADO DEL ARTE

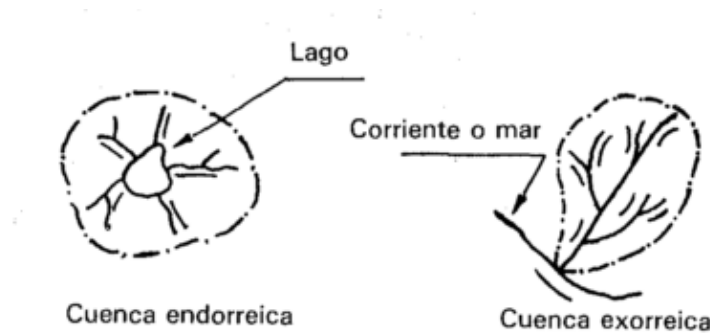
4.1. MARCO TEÓRICO

Los sistemas hidrológicos hacen parte de lo que científicamente se conoce como cuencas hidrológicas. Las cuencas son unas zonas de la superficie terrestre en donde las gotas que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un punto de salida. Desde el punto de vista de la salida existen principalmente dos tipos de cuencas: Endorreicas y Exorreicas.

En las cuencas endorreicas el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y por lo general este tipo de cuencas son lagos.

Las cuencas exorreicas tienen el punto de salida en los límites de cuenca y está en otra corriente.

Figura 2: Tipo de cuencas hidrográficas.



Fuente: Fundamentos de hidrología de superficie. [3, pág 20]

Dentro de las corrientes que se observan en las diferentes cuencas terrestres, una manera de caracterizar dichas corrientes son por ecosistemas lóticos y ecosistemas lénticos.

Los ecosistemas lóticos están compuestos por arroyos, ríos o corrientes. El movimiento del agua puede deberse a descargas de lagos o estanques, al escurrimiento o a partir de manantiales en los que fluye un caudal considerable y que puede ser como consecuencia de aguas subterráneas[24].

Los ecosistemas lénticos son caracterizados por aguas estancadas y se representan por lagos, estanques o charcos que por lo general no poseen corrientes de agua con un sentido definido[24].

Para este caso, el municipio de Barrancabermeja hace parte de la denominada cuenca de los humedales del Magdalena Medio Santandereano junto con los municipios de Bolívar, Cimitarra, Puerto Parra, Puerto Wilches, Sabana de Torres, San Vicente de Chucurí y Simacota Bajo. Dentro de la cuenca media del Río Magdalena, se tienen principalmente las cuencas que forman las corrientes de los ríos Opón, Carare, Chicamocha y Lebrija.

En la tabla 1 se puede ver parte de la composición de la cuenca del Río Magdalena en inmediaciones de la ciénaga.

Tabla 1: Clasificación de las cuencas en el área

Cuenca	Subcuenca / Microcuenca
Río Magdalena	Río Sogamoso
	Ciénaga San Silvestre/Llanito, Zarzal, Peroles, Vizcaina
	Caño La Cira
	Río Oponcito

La red hídrica del municipio puede clasificarse en sistemas de la siguiente manera[21]:

- Sistemas lénticos: Ciénagas, pantanos, lagunas de desborde. En el área urbana se encuentran las ciénagas Miramar y Juan Esteban; en el área rural se encuentra un gran número de ciénagas entre ellas San Silvestre, El Llanito, Brava, Zarzal, Zapatero, Salado, Guadalito, Tierradentro, Sábalo, El Tigre, El Castillo, La Cira, Chucurí.
- Sistemas lóticos: Ríos, quebradas, caños. Los principales ríos del Municipio, son: Magdalena, Sogamoso, La Colorada y el Oponcito. Existe un gran número de caños y quebradas ubicadas en el área urbana, entre estos están: Quebradas Lavanderas y las Camelias; y los caños: Cardales, Rosario, Palmira, entre otros.

Estos cuerpos de agua son capaces de absorber o no diferentes efluentes externos, dependiendo de su característica lótica o léntica y composición.

Para el caso de este proyecto se cuenta con un sistema léntico que vendría siendo la

ciénaga y unos sistemas que en ciertas ocasiones cumplen su función como lóticos y serían los caños Las Lavanderas, Las Camelias y el caño Rosario.

4.2. SOLUCIONES PLANTEADAS

En esta sección se presentará una revisión de algunos de los proyectos desarrollados a nivel mundial y que están en el estado del arte para la solución de modelamientos de flujos, la obtención de la dinámica y los efectos de la temperatura.

Lo primero fue construir una ecuación de búsqueda que permitiera encontrar información que ayudará a la construcción de la solución de este proyecto. Las palabras que inicialmente se usaron fueron *free surface, open channel, confluence, fluid dynamics, turbulence, heat exchange, channel flow, water quality, numerical simulation y computational*.

Luego de realizar un primer filtro y buscando resultados más precisos al desarrollo del proyecto se terminaron utilizaron las palabras *free surface, confluence, heat exchange, flow, numerical simulation, dynamics and mixing zone*.

Dentro de los artículos se encontraron varios proyectos desarrollados que buscaban calcular la calidad del agua en términos de cantidad de oxígeno disuelto y capacidad de asimilación de contaminantes. Cabe aclarar que para realizar esos cálculos se deben conocer tanto la hidrodinámica como el comportamiento de la temperatura en el cuerpo de agua. Parte de los proyectos encontrados centran su solución con aplicaciones ya desarrolladas como lo son MIKE11, QUAL2K, WASP, NIWA o proyectos que desarrollan sus aplicaciones con software tipo MATLAB, ANSYS, FLOW 3D y OpenFOAM. Lo claro del tema es que resolver la calidad del agua, la hidrodinámica y el perfilamiento térmico en 3D combinados en un solo proyecto no es sencillo de encontrar.

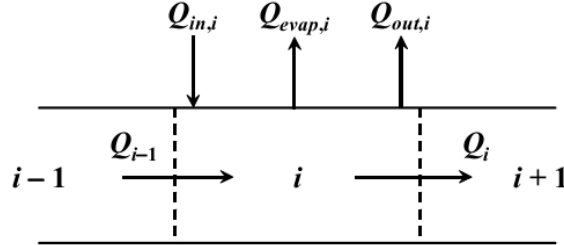
Una manera práctica de presentar los resultados es a través del software o solución planteada como se puede observar a continuación:

4.2.1. Modelamiento en QUAL2K

El QUAL2K es un modelo uno-dimensional de calidad de agua para ríos o corrientes de agua que se puede utilizar en flujos en estado estacionario con ramificaciones. Los pronósticos de temperatura se dan como función de las condiciones meteorológicas. Para

el balance de masa se utiliza el principio de elementos finitos. Para un flujo en estado estacionario se aplica un balance en cada elemento como:

Figura 3: Balance del flujo en un elemento.



Fuente: QUAL2K Documentation

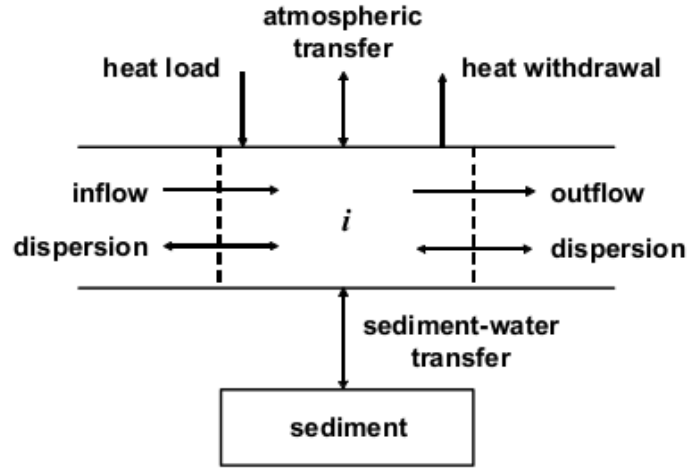
$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{out,i} - Q_{evap,i} \quad (1)$$

donde Q_i = flujo de salida desde el elemento i hacia el elemento aguas abajo $i + 1$ [m^3/d], Q_{i-1} = entrada desde el elemento aguas arriba $i - 1$ [m^3/d], $Q_{in,i}$ es la entrada total en el elemento desde fuentes puntuales o no puntuales [m^3/d], $Q_{out,i}$ es el flujo total de salida del elemento debido a pérdidas puntuales o no puntuales [m^3/d] y $Q_{evap,i}$ es el flujo de salida debido a la evaporación [m^3/d]. Así, la corriente aguas abajo del flujo de salida es simplemente la diferencia entre las ganancias de entrada y ganancia por las fuentes menos las pérdidas y las pérdidas por evaporación[19].

Un análisis realizado en el modelo QUAL2K, fue hecho por El-Ghorab [10], quién desarrolló un proyecto en Egipto donde se buscaba analizar los efectos de las descargas con consecuencias térmicas desde una planta de energía en la zona de mezcla a orillas del río Nilo.

Para dar esta solución el modelo QUAL2K desarrolla la ecuación de la energía teniendo presente la transferencia desde elementos adyacentes, la atmosfera y posibles sedimentos, de la siguiente manera:

Figura 4: Balance del energía en un elemento.



Fuente: QUAL2K Documentation

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_i}{\partial t} = & \frac{Q_{i-1}}{V_i} T_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} T_i - \frac{Q_{out,i}}{V_i} T_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i} (T_{i-1} - T_i) + \frac{E'_i}{V_i} (T_{i+1} - T_i) + \frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{pw} V_i} \left(\frac{m^3}{10^6 cm^3} \right) + \\ & \frac{J_{a,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 cm} \right) + \frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{pw} H_i} \left(\frac{m}{100 cm} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

donde T_i es la temperatura en el elemento i [$^{\circ}C$], t es tiempo [d], E'_i es el coeficiente de dispersión entre los elementos i e $i + 1$ [m^3/d], $W_{h,i}$ es el calor neto por las fuentes puntuales y no puntuales en el elemento i [cal/d], ρ_w es la densidad del agua [g/cm^3], C_{pw} es el calor específico del agua [cal/g $^{\circ}$], $J_{a,i}$ es el flujo de calor entre el aire y el agua [cal/ cm^2 d] y $J_{s,i}$ es el flujo de calor entre el sedimento y el agua [cal/ cm^2 d].

El mayor interés en ese proyecto era encontrar las condiciones para que la temperatura en la zona de mezcla no superara el diferencial de $5^{\circ}C$ sobre la temperatura ambiente del medio para no generar un impacto grave sobre los niveles de oxígeno disuelto (DO) en el agua.

Otro de los trabajos desarrollados usando el modelo QUAL2K es el realizado por Diaz [8] que buscaba realizar un diagnóstico de la calidad del agua que será entregada por el Interceptor Río Bogotá (IRB) en los tramos Fucha – Tunjuelo y Tunjuelo - Canoas al

Río Bogotá. Este proyecto evidencia lo importante de la caracterización de la hidráulica del interceptor para la obtención de los valores de la calidad del agua abajo. Sin embargo el análisis que se realiza se limita a la obtención de los valores puntuales en algún tramo de los trayectos descritos y no tiene en cuenta ni el ancho ni la profundidad de la sección del río analizada.

4.2.2. Modelamiento en TELEMAC 3D

Es un software en 3D que resuelve las ecuaciones de transporte de fluidos, campos de velocidad en 3D y tiene presente si se trata de corrientes en canales abiertos o de superficie libre. También permite la solución de la ecuación de la energía donde determina la influencia de la temperatura en uno o varios flujos, la salinidad o la densidad y resuelve ecuaciones de concentración para determinar la calidad del agua. Usa como estándar el modelo de turbulencia k-epsilon ($k - \epsilon$) que es el mayormente utilizado para cálculos en flujos de agua.

El planteamiento de las ecuaciones en TELEMAC 3D tiene las siguientes consideraciones [†]:

- Solucionar las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos con superficie libre.
- Aplica para flujos incompresibles.
- Hipótesis de presión hidrostática (Presión de aire más la presión de la columna de agua).
- Aplica la aproximación de Boussinesq para la ecuación de momento.

De acuerdo a las consideraciones anteriores las ecuaciones que se solucionan en el TELEMAC 3D son:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

[†]Telemac Modelling System: Operating Manual

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial x} + v \Delta(U) + F_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -g \frac{\partial Z_s}{\partial y} + v \Delta(V) + F_y \quad (5)$$

$$p = p_{atm} + \rho_0 g (Z_s - z) + \rho_0 g \int_z^{Z_s} \frac{\Delta \rho}{\rho_0} dz' \quad (6)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \text{div}(v \text{grad} T) + Q \quad (7)$$

Una de las aplicaciones realizadas fue hecha por Bedri, Bruen, Dowley y Masterson [4] donde desarrollaron un proyecto que busca dimensionar las consecuencias del apagado de una planta de energía en la bahía de Dublin. Se buscaba hacer el análisis de 2 posibles escenarios para el impacto del agua usada por la planta frente al cuerpo de agua. Como punto de partida tenían un modelo calibrado de antiguas soluciones propuestas y querían analizar el impacto de continuar con la extracción de agua hacia la planta para diluir los efluentes producidos de aguas residuales antes de vertirlas en el cuerpo de agua limpia, o enviar efluentes de aguas residuales directamente en el estuario. Su punto de análisis era la distribución de la bacteria *Escherichia Coli*. Al final se pudo concluir mediante el uso del modelo TELEMAC 3D que es mejor tomar agua y diluir las efluentes antes de ingresarlas en el cuerpo de agua limpio.

4.2.3. Modelamiento en Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)

Código de modelado desarrollado por Hamrick y Wu *Environment Fluid Dynamics Code (EFDC)* y bajo el soporte de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Tiene como principales características que se puede solucionar la hidrodinámica del sistema, la sedimentación contaminante y los componenets de la eutrofización.

Una aplicación similar de este modelo respecto al proyecto es la dada por Jin, Hamrick y Tisdale [16] donde se busca el desarrollo de un modelamiento hidrodinámico para observar el comportamiento del lago Okeechobee no solo determinando la dinámica del

lago a diferentes condiciones sino que además se soluciona la ecuación de la energía para mostrar así los cambios que se generan debido al ambiente circundante en el lago, los efectos del viento y los patrones de temperatura para hacer los cálculos del intercambio de energía.

EFCD permite resolver en 3D sistemas de superficie libre y flujos en estado transitorio. Dinámicamente acopla las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta y la escala de longitud turbulenta y resuelve una ecuación de transporte para la temperatura. La densidad se expresa en función de la presión y la temperatura.

4.2.4. Modelamiento en ECOM

ECOM es un modelo de simulación oceánica 3D desarrollado principalmente por Alan Blumberg. Este modelo soluciona las ecuaciones de momento y de conservación de la masa para un fluido. Pero adicionalmente a ello postula la ecuación para la solución de la energía del sistema. También incluye el término de salinidad del fluido, la difusión y el término de radiación.

Uno de los proyectos desarrollados usando este código se da en Ahsan y Blumberg [23] donde se busca el desarrollo de un modelamiento donde no solamente se solucionen las ecuaciones de momento y conservación de la masa sino que adicionalmente tiene en cuenta la radiación y flujos de calor sensible y latente en el cuerpo de agua. Este modelamiento se realizó usando los códigos *ECOM* desarrollados por el mismo Ahsan.

El modelo incorpora las condiciones de turbulencia para proporcionar una parametrización realista de la mezcla vertical de efluentes y una superficie libre para simular los cambios en el nivel del agua. Se utiliza un sistema de coordenadas curvilíneas sobre el plano horizontal que permite una representación suave de la geometría variable de la línea de costa.

4.2.5. Modelamiento en SSIIM

Sediment Simulation In Intakes with Multiblock (SSIIM) es un modelo que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando el método de volúmenes de control con el

algoritmo SIMPLE y el modelo de turbulencia k-epsilon. También resuelve la ecuación de convección-difusión para el transporte de sedimentos, utilizando la fórmula de van Rijn[‡] para el límite del lecho. Además, se incluye un módulo de calidad del agua.

El programa no está hecho para el ambiente marino, y no puede computar ningún efecto de la estratificación debido a los gradientes de salinidad.

Zinke, Olsen y Nogen [31] realizaron un análisis en el delta del lago Øyeren en Noruega. Dicho lago ha sufrido deposición de sedimentos por muchos años, alrededor de 100 años y con mayor impacto en la inundación de 1995 sobre los deltas de esa zona. Usando la solución mediante Reynolds promedio Navier-Stokes (RANS) y un modelo de turbulencia k-epsilon. Resuelve el transporte de sedimentos y los resultados fueron comparados con datos de campo tomados previamente en forma cualitativa.

4.2.6. Modelamiento en OpenFOAM

OpenFOAM (*OpenFieldOperationandManipulation*) es una herramienta para trabajos en CFD desarrollada por OpenCFD ltd. OpenFOAM cuenta con una serie de características para resolver cualquier flujo de fluidos complejos que involucren reacciones químicas, turbulencia, transferencia de calor, dinámica de sólidos y electromagnetismo. Puede acoplarse a herramientas CAD para la generación de mallas ya sean complejas o no. OpenFOAM ofrece a los usuarios total libertad para personalizar y ajustar su funcionalidad a los requerimientos que el usuario necesite. Tiene un diseño de códigos en el que las colecciones de funcionalidad (i. e. métodos numéricos, mallado, modelos físicos) están cada uno compilados en su propia biblioteca compartida. La herramienta OpenFOAM puede resolver problemas que presenta las siguientes características:

- Flujos incompresible.
- Flujos multifase.
- Combustión.
- Transferencia de calor.

[‡]Van Rijn, L.C., 1984b. Sediment transport, Part III: bed forms and alluvial roughness. Journal of Hydraulic Engineering ASCE 110 (12), 1733– 1753.

- Flujos compresibles.
- Método de partículas.

Tambien consta con una amplia biblioteca de funciones que permite modelar:

- Modelos de turbulencia.
- Modelos de transporte.
- Modelos termofísicos.
- Cinética y reacciones química.

Nguyen [18] realizó algunas simulaciones numéricas usando OpenFOAM para comparar los resultados obtenidos frente a un modelo desarrollado por el autor. Dentro de las comparaciones que se realizaron se buscaba analizar el comportamiento de corrientes de agua sobre estructuras hidráulicas en canales naturales y ríos. Para esto utilizó el método de volúmenes finitos y solucionó las ecuaciones de gobierno mediante RANS.

$$\int_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_S \rho\phi(\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot dS = \int_S \Gamma_\phi \nabla \cdot dS + \int_S q_{\phi s} \cdot dS + \int_V q_{\phi V} dV \quad (8)$$

Para las condiciones del problema en específico la ecuación de continuidad se resume en:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho(\vec{v} - \vec{v}_s) \cdot dS = 0 \quad (9)$$

Posterior a la solución de las ecuaciones se realizaron varias validaciones para comprobar el modelo desarrollado. Por ejemplo flujo en un canal a 180° para verificar concentraciones de corriente de agua en el movimiento en U propuesto, el rompimiento de la columna de agua o *Dam break* con el comportamiento de su perfil de flujo y los cambios en el perfil de profundidad de un tramo de canal abierto del río Main en Alemania.

Hernandez [15] desarrolló un modelo en 3D para aplicaciones de calidad de agua y ecosistemas. El objetivo principal era modelar el comportamiento de los vertimientos

en las orillas de granjas que introducen nutrientes como nitrógeno y fósforo, a menudo en niveles altos, en el medio ambiente a través de arroyos y ríos. Para esta solución se utilizó OpenFOAM con un modelo bioquímico detallado como BioChemFOAM que usa la solución mediante RANS y el modelo de turbulencia k-épsilon.

Abbasi, Annor y Van de Giesen [1] realizaron el modelamiento del lago Binaba ubicado en Ghana. El enfoque de este proyecto era analizar mediante la solución de las ecuaciones RANS para flujos y la aproximación de Boussinesq los diferentes perfiles de temperatura del lago. Tuvieron presente los efectos de radiación, velocidad del viento y temperatura ambiente para su modelo.

Dentro de los estudios de hidrología en diferentes sistemas utilizan el patrón de la dinámica del flujo como punto de partida para estudios más profundos. Como por ejemplo la capacidad de sedimentación de unas corrientes o los efectos de la zona de mezcla se pueden calcular a partir de la dinámica del fluido. Esta dinámica tiene como base matemática las ecuaciones de la conservación de la masa y de momento las cuales se definen como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (10)$$

Por lo mencionado anteriormente, OpenFOAM se postula como la herramienta más adecuada para desarrollar la solución de este proyecto. Su capacidad por realizar este tipo de análisis y la variedad en sus librerías, permitiría resolver no sólo la dinámica sino adicionalmente las ecuaciones de la energía que se suceden sobre el cuerpo de agua, teniendo en cuenta que es un software de libre acceso. En OpenFOAM se deben crear archivos en los que se programa el modelo a implementar definiendo la geometría, las condiciones de frontera, entradas, salidas y solvers para el cálculo, todo ello organizado en carpetas. Esto también permite que cualquiera adapte una application ya creada y la modifique para que realice otro trabajo. Una de sus ventajas es que ofrece posibilidades para entornos de preproceso y entornos de postproceso, como el visor ParaView, usado en este proyecto.

5. ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN

El objetivo final de este proyecto consiste en realizar el modelado de una ciénaga entregando los resultados de la dinámica del fluido y los perfiles de temperatura en el estuario. Para encontrar un punto de validación al modelo propuesto, se toma como referencia un banco experimental utilizado en la universidad de Iowa.

5.1. BANCO EXPERIMENTAL

Debido a que la unión de canales abiertos es común encontrarla ya sea en la naturaleza o en el desarrollo de muchas industrias de tratamientos de aguas residuales o procesamiento de alimentos, es de interés investigativo conocer información del comportamiento de los flujos cuando llegan a la unión.

Los experimentos que se realizaron y que se tomarán en cuenta para modelar numéricamente son basados en unos canales a 90° ubicado en el IIDH de la Universidad de Iowa[§].

Figura 5: Vista aguas abajo de la unión a 90° .



Fuente: Hydrosience Engineering – University of Iowa

Como el objetivo de realizar este experimento era encontrar datos que permitieran entender el comportamiento de los flujos al cruzarse, se usaron sensores de alta precisión para el cálculo de los perfiles en diferentes puntos y de esta manera obtener la información suficiente para modelar el experimento.

[§]IIHR:<http://www.iihr.uiowa.edu/research/other-research-initiatives/combining-flows-at-an-open-channel-junction/>

5.1.1. Planteamiento de los experimentos

Weber, Schumate y Mawer [29] publicaron un artículo donde muestran los resultado obtenidos del banco de pruebas para ciertas condiciones de caudal tanto del canal principal como del brazo lateral. Todas las distancias usadas para los resultados fueron adimensionalizadas por el valor del ancho del canal, $W=0,914$ m, donde los parámetros usados son $x^* = x/W$, $y^* = y/W$, $z^* = z/W$. De la misma manera, las mediciones de velocidad fueron adimensionalizadas por la velocidad media del flujo aguas abajo de la unión entre el canal principal y el brazo lateral, $V_t = 0,628$ m/s.

El caudal que va por el canal principal antes de la zona de mezcla se nombra mediante Q_m , el caudal por el brazo lateral Q_b y aguas abajo de la zona de mezcla Q_t .

Uno de los parámetros usados para relacionar los valores de caudal en las entradas y salida del experimento es q^* que es la razón de flujo. Para calcularla se debe tomar el caudal del brazo principal antes de la unión Q_m y dividirla por el caudal aguas abajo de la unión Q_t el cual tiene un valor de $0,170$ m³/s.

La siguiente tabla muestra las condiciones de flujo para distintas mediciones que se realizaron:

Tabla 2: Condiciones de flujo experimentales

$Q_m(m^3/s)$	$Q_m(m^3/s)$	q^*
0,014	0,156	0,083
0,042	0,127	0,250
0,071	0,099	0,417
0,099	0,071	0,583
0,127	0,042	0,750
0,156	0,014	0,917

Para el caso de Weber, Schumate y Mawer [29] los valores de q^* que han utilizado para el proyecto fueron 0,25 y 0,75.

Los resultados de este proyecto serán mostrados más adelante cuando sean comparados con los resultados del modelo numérico propuesto que se utilizará después en el modelamiento del sistema hidrológico.

5.2. GEOMETRÍA DEL BANCO DE PRUEBAS

Lo primero que se desea hacer es construir un primer modelamiento con el cuál se puedan comparar los resultados de ese modelo frente a los resultados obtenidos por Weber, Schumate y Mawer [29]. De esta manera se procede a la construcción de la geometría que asemeje al banco de pruebas experimental. Para la construcción de esta geometría se usará el software *SALOME*, que opera en plataforma libre en base linux. Para ello se ubica el punto de origen de acuerdo a las referencias dadas por Weber, Schumate y Mawer [29] y como se puede observar en la figura, el origen está en el punto rojo, figura 6.

Figura 6: Configuración con punto de origen del banco experimental

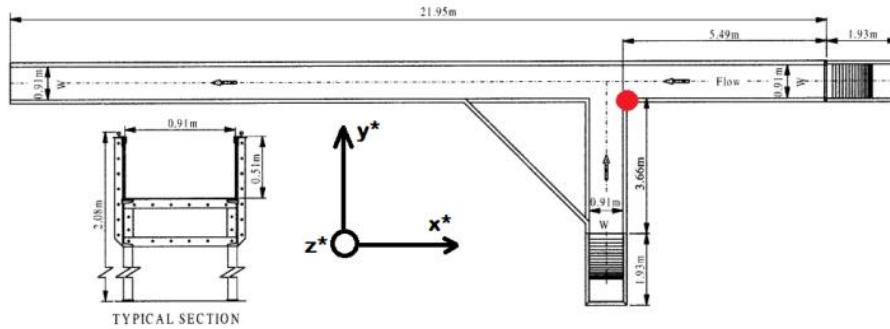
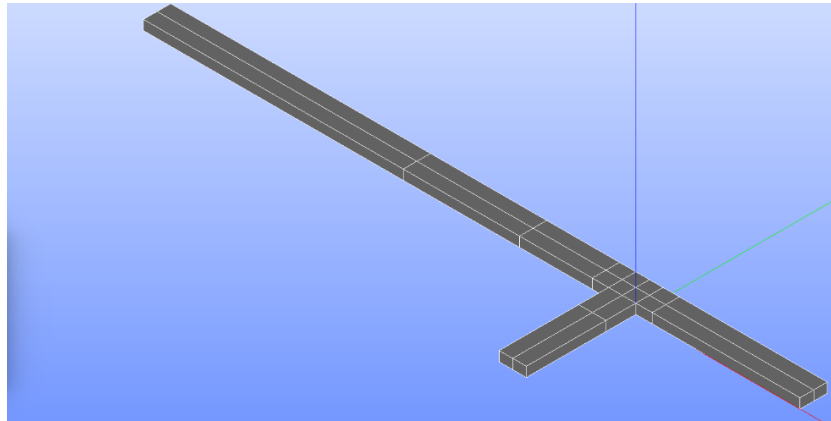


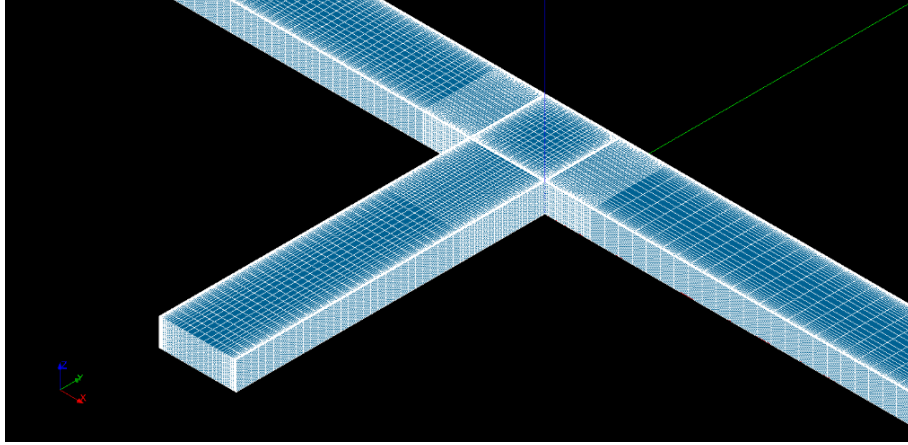
Figura 7: Geometría diseñada en *Salome*



Bajo esta información y ubicando los puntos extremos del banco experimental se crea la geometría final y se procede a realizar el mallado de la misma. Para ello es importante

entender que para la solución mediante volúmenes finitos, se requiere que en zonas con altos gradientes de velocidad la densidad del mallado sea superior. La cantidad de volúmenes que debe tener la geometría depende de un estudio de independencia de malla que se realice. En este caso, se comparó la velocidad del canal aguas abajo hasta obtener un valor de velocidad similar cuando la malla varió de 282000 volúmenes a 336000 volúmenes. Así que se deja como mallado final una cantidad de 336000 volúmenes en la geometría diseñada, figura 8.

Figura 8: Mallado en *Salome* de la geometría diseñada



5.3. ECUACIONES GOBERNANTES PARA EL FLUJO

Las ecuaciones de gobierno para el flujo, la transferencia de calor y masa se pueden enunciar de forma conservativa como en la siguiente ecuación:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{Temporal} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\vec{v}\phi)}_{Convectivo} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma\phi)}_{Difusivo} + \underbrace{S}_{Fuente} \quad (11)$$

Donde se observa que aparecen 4 términos diferentes:

- Término temporal: Representa la variación local con el tiempo en el interior del volumen de control.

- Término convectivo: Representa el transporte de la variable de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad de flujo.
- Término difusivo: Corresponde a alguno de los fenómenos de transporte que ocurren a nivel molecular.
- Término fuente: Fuentes de generación o destrucción de la variable transportada.

Donde ϕ adopta formas diferentes dependiendo de la variable específica que se quiera calcular.

5.3.1. Ecuación de la conservación de la masa

Establece de forma general que el incremento de masa en el interior de un elemento fluido es consecuencia del flujo neto de masa hacia dicho elemento. La expresión no estacionaria, tridimensional, en un punto es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (12)$$

Para el caso particular de tener un flujo incompresible, la densidad del fluido no cambia ni en el espacio ni en el tiempo. Esto hace que la divergencia de la velocidad debe ser nula: $\nabla \cdot \vec{v} = 0$.

5.3.2. Ecuación de la cantidad de movimiento

La expresión general de la ecuación de momento para un fluido newtoniano[¶] e incompresible es:

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla(\mu \nabla \vec{v}) \quad (13)$$

[¶]Fluido newtoniano: Aquellos fluidos donde su viscosidad dinámica permanece constante todo el tiempo. Representa una relación lineal entre las tensiones cortantes y las deformaciones resultantes[7]

Reordenando el término convectivo y teniendo en cuenta que se trata de un flujo incompresible, se habla de un flujo en convección difusión ($\nabla \cdot \vec{v} = 0$)

$$\frac{\partial(\rho\vec{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\vec{v}\vec{v}) = \nabla(\mu\nabla\vec{v}) - \nabla p + \rho\vec{g} \quad (14)$$

La ecuación (14) es una ecuación vectorial según las 3 direcciones del espacio, la velocidad es la variable intensiva, es decir, $\phi = \vec{v} = (u, v, w)$, el coeficiente de difusión sea la viscosidad $\Gamma = \mu$ y el término fuente incorpora el gradiente de presiones y otras fuerzas másicas como el campo gravitatorio.

5.3.3. Ecuación de la conservación de la energía

Esta expresión se puede obtener en términos conservativos según la ecuación (11). Se considera un flujo a baja velocidad, incompresible y sin disipación viscosa.

Para este caso particular, la ecuación se formula en términos de la entalpía específica (h):

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{v}h) = \nabla \cdot (k\nabla T) + S_h \quad (15)$$

donde k representa la conductividad térmica del fluido y T es la temperatura.

5.3.4. Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation. (RANS)

Para un fluido incompresible como el agua, las ecuaciones de Navier-Stokes en su forma conservativa son:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (16)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu s_{ij}) \quad (17)$$

Y el tensor de deformaciones s_{ij} está dado por:

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (18)$$

Si se aplica la ecuación (16) a la ecuación de movimiento (17), entonces puede ser descrita como:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + \rho g \quad (19)$$

Para flujos turbulentos, el campo de las propiedades se comportan de manera fluctuante y aleatoria en espacio y tiempo, esto permite tomar las variables (u_i y p) y expresarlas como la suma de sus partes media y fluctuante:

$$u_i = \bar{u}_i + u_i' \quad p = \bar{p} + p' \quad (20)$$

Si se hace el arreglo referenciado en Chalmers[7, pág 76]:

$$\bar{u}_i = \bar{\bar{u}}_i + \bar{u}_i' \quad \bar{p} = \bar{\bar{p}} + \bar{p}' \quad (21)$$

Si por definición en Chalmers[7, pág 76] se toma que $\bar{\bar{u}}_i = \bar{u}_i$ entonces se obtiene que:

$$\bar{u}_i' = 0 \quad (22)$$

$$\bar{p}' = 0 \quad (23)$$

A partir de este punto se obtienen las ecuaciones de RANS tomando la ecuación (20) e insertándola en las ecuaciones (16) y (17):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (24)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (25)$$

Donde el tensor de deformaciones medio será:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (26)$$

La cantidad $\tau_{ij} = -\overline{u'_i u'_j}$ es conocida como el tensor de esfuerzos de Reynolds, el cual es simétrico, por tanto posee seis componentes. Si se reemplaza la ecuación (24) en la ecuación (25) puede ser escrita como:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (27)$$

Por el hecho de descomponer las propiedades instantaneas en partes medias y fluctuantes, se han introducido tres cantidades desconocidas. Desafortunadamente, no se cuenta con más ecuaciones. Por lo tanto el sistema no ha sido aun cerrado. Para cerrarlo, se deben encontrar suficientes ecuaciones para resolver las cantidades desconocidas.

5.3.5. Aproximación de Boussinesq

Para solución de este proyecto y aplicación al modelado del banco de pruebas, se usa la aproximación de Boussinesq como una de las estrategias de cierre de las ecuaciones RANS. El flujo de canales cruzados se puede representar usando la hipótesis de Boussinesq como:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (28)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_{eff} (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho g [1 - \beta (T - T_a)] \quad (29)$$

donde μ_{eff} es la viscosidad efectiva, p es la presión, T es la temperatura del agua, g es la aceleración de la gravedad, β el coeficiente de expansión térmica y T_a la temperatura del exterior o ambiente.

Al principio se desea modelar el flujo de canales cruzados expuestos al ambiente en condiciones normales, es decir con temperatura ambiente aproximada de 25°C. Para efectos de hallar algunas constantes que se necesiten para la solución del modelo se tomará esa temperatura de referencia.

5.3.6. Modelo de turbulencia k-épsilon

Resuelve ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta k y para la tasa de disipación viscosa ϵ que se relacionan con μ_t según la función:

$$\mu_t = f \left(\frac{\rho k^2}{\epsilon} \right) \quad (30)$$

Para completar la solución del problema se utiliza el modelo estandar k-epsilon con *wall functions*. En este modelo la energía cinética turbulenta k y la tasa de disipación turbulenta ϵ se obtienen a partir de:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho U k) = \nabla \cdot (\mu_{eff,k} \nabla k) + P_k - \rho \epsilon \quad (31)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho U \epsilon) = \nabla \cdot (\mu_{eff,\epsilon} \nabla \epsilon) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (32)$$

dónde los valores de $\mu_{eff,k}$ y $\mu_{eff,\epsilon}$ se determinan a partir de:

$$\mu_{eff,k} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad \mu_{eff,\epsilon} = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \quad (33)$$

μ_t hace referencia a la viscosidad turbulenta, P_k es la producción por la energía cinética turbulenta y las constantes asignadas al modelo de la siguiente manera: $C_\mu=0.09$, $C_{\epsilon 1}=1.44$, $C_{\epsilon 2}=1.92$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\epsilon=1.3$.

5.4. CONDICIONES DE FRONTERA

5.4.1. Superficie libre

Como ya se ha mencionado anteriormente se desea hacer el modelamiento del banco experimental creado en el IIDH de la Universidad de Iowa. Ya se ha modelado la geometría y como la finalidad de modelar el flujo en canales cruzados es crear una primer herramienta que pueda ser usada más adelante para modelar la ciénaga propósito de este proyecto, se debe tomar una desición respecto a la condición de frontera en la superficie libre del modelo en el flujo de canales cruzados.

Cualquier espejo de agua siempre sobre su superficie libre será sometido a cambios de temperatura que depende de las condiciones ambientales. Para solución de este proyeto se asume la superficie libre como una superficie rígida plana que produce un intercambio de calor por conducción o un flujo de calor sensible hacia el exterior. Según Edinger y Brady [9] este tipo de intercambio de energía se puede describir mediante:

$$q = h(T - T_a) \quad (34)$$

donde h es el coeficiente de transferencia que depende de la velocidad del viento que rodea el sistema y que se puede calcular mediante $h = C * f(W)$ donde $f(W)$ representa la función velocidad del viento ($W \text{ m}^{-2} \text{ mbar}^{-1}$) y C es el coeficiente de Bowen, $0.62 \text{ mbar}/^\circ\text{C}$. Dado que son muchas las opiniones sobre como calcular $f(W)$, para efectos de este proyecto se toma la sugerencia dada por Ahsan y Blumerg [23] para el calculo de esta función:

$$f(W) = 6,9 + 0,345W^2 \quad (35)$$

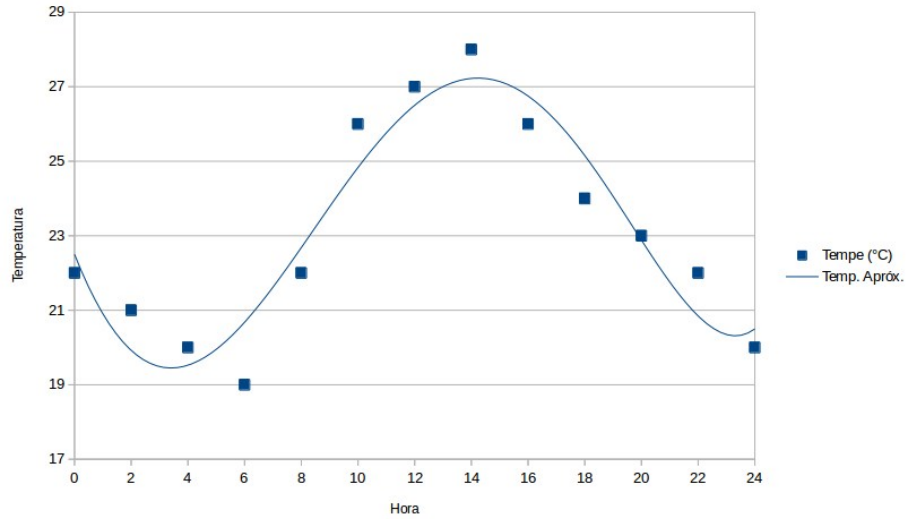
Donde W es la velocidad del viento en m/s. Como se sabe, la temperatura del aire o del ambiente no es constante durante un día completo. Entonces, si se modela el banco experimental en condiciones ambientales, como por ejemplo Bucaramanga en un día promedio, es necesario saber como se comporta la temperatura del aire. Así de <https://weather.com> se pueden obtener los siguientes datos de temperatura:

Tabla 3: Temperatura de Bucaramanga en un día promedio (<https://weather.com/>)

Hora	Temperatura °C
00:00	22
02:00	21
04:00	20
06:00	19
08:00	22
10:00	26
12:00	27
14:00	28
16:00	26
18:00	24
20:00	23
22:00	22
24:00	20

Tomando estos datos se puede encontrar una función que aproxime los puntos y que se pueda utilizar en el cálculo del modelo. La función se encuentra y se grafica junto con los puntos como se observa en la figura siguiente.

Figura 9: Aproximación polinómica de la temperatura



$$T_a(t) = 0,00064t^5 - 0,0128t^4 - 0,0177t^3 + 1,458t^2 - 6,655t + 27,72 \quad (36)$$

donde t está dado en horas.

Es necesario darle un valor a la velocidad del viento que se utilizaría en la ecuación (35). Revisando en diferentes fuentes se puede evidenciar que en Bucaramanga hay una velocidad promedio diaria de 2.57 m/s. Este será el valor de referencia que se usará para la solución de los cálculos.

5.4.2. Entradas

Los valores de caudal en las entradas por el canal principal y el brazo lateral se determinan según Weber, Schumate y Mawer [29] para distintos valores de q^* mediante la relación $q^*=Q_m/Q_t$. En el caso del modelamiento del banco experimental se toma como valor de referencia $q^*=0,25$ y $q^*=0,75$ por lo que se tiene $Q_m=0,042 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_b=0,127 \text{ m}^3/\text{s}$, donde Q_m es caudal por brazo principal, Q_b brazo lateral y Q_t es canal de mezcla aguas abajo.

Para la solución de la ecuación de la energía, la temperatura de entrada se determina de manera aleatoria y para efectos de este modelamiento se le da valores a cada canal. De manera que sea sencillo evidenciar los cambios, se asumen unos valores de entrada de fluidos a una temperatura $T_m=40^\circ\text{C}$ y $T_b=75^\circ\text{C}$.

5.4.3. Paredes y Fondo

Para este modelamiento se asume una condición de frontera con velocidad cero en las paredes y el fondo de los canales como un flujo que se va desarrollando. De la misma manera se toma un flujo de calor cero a través de ellas.

5.4.4. Salida

Como se evidencia en el reporte de resultados hechos por Weber, Schumate y Mawer [29], el valor de caudal de salida depende de la suma de flujos en los canales. Para el modelo que se está planteando en este caso la velocidad del flujo de salida será de $V_t = 0,628 \text{ m/s}$.

El valor de presión a la salida se toma como cero.

5.5. RESULTADOS MODELO BANCO EXPERIMENTAL

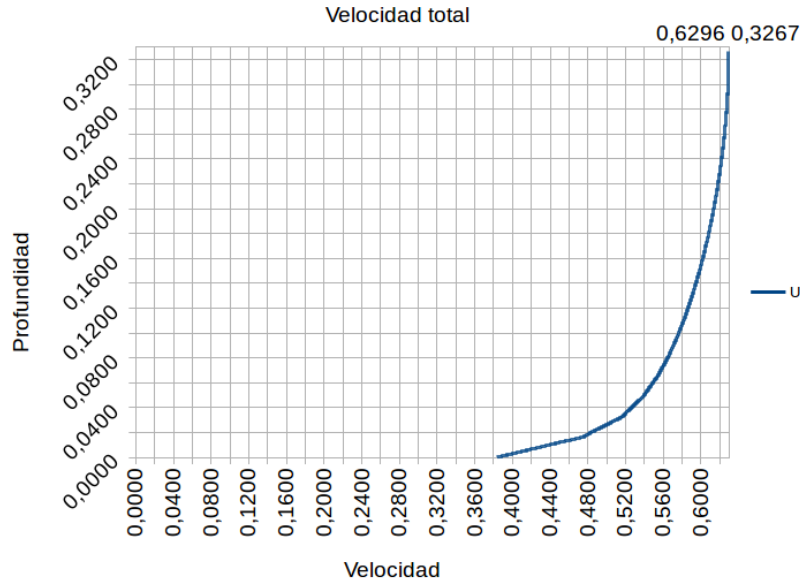
El siguiente paso es configurar las diferentes condiciones de frontera para la geometría realizada en el modelo de OpenFoam.

En este punto lo que se quiere es encontrar una solución numérica donde se puedan comparar los experimentos realizados por Weber, Schumate y Mawer [29] a la dinámica del flujo, pero adicional a ello comenzar a construir la interpretación de la energía que puede transferirse en un sistema flujos cruzados. Así que el parámetro de comparación serán los perfiles y vectores de velocidad que el modelo entregue frente a los dados en el experimento.

5.5.1. Perfiles de velocidad

Para encontrar los perfiles de velocidad se necesita determinar la velocidad al final del canal de mezcla. Esta velocidad se conoce por V_t . Se debe recordar que experimentalmente esa velocidad es $V_t=0,628$ m/s.

Figura 10: Velocidad al final del canal en el modelo



Mediante la figura 10 se puede observar que la velocidad al final del canal de mezcla es

$V_t=0.6296$ m/s. En la gráfica la profundidad se representa en el eje y . Esta velocidad será con la que se adimensionalice los valores de velocidad en x y y donde se obtienen los valores de $u^*=u/V_t$ y $v^*=v/V_t$.

Los perfiles de velocidad hallados están modelados bajo los parámetros de $q^*=0.25$ y medidos a diferentes distancias adimensionales de x^* y y^* . En las figuras 11 y 12 se puede observar cómo cambia la velocidad adimensional u^* en su sección transversal y a lo largo del canal como y su respectiva comparación con los resultados obtenidos en el experimento de Weber, Schumate y Mawer [29]. Cabe resaltar que de la zona de color rojo que se observa en la figura 12 se conoce en el estado del arte de canales cruzados como la zona de separación o recirculación, y a partir de la franja de color verde la se conoce como la zona de flujo comprimido.

Figura 11: Comparativa del Patrón de velocidad transversal u^* y contornos a $x^* = -2.0$. Arriba modelo. Abajo experimento por Weber, Schumate y Mawer[29]

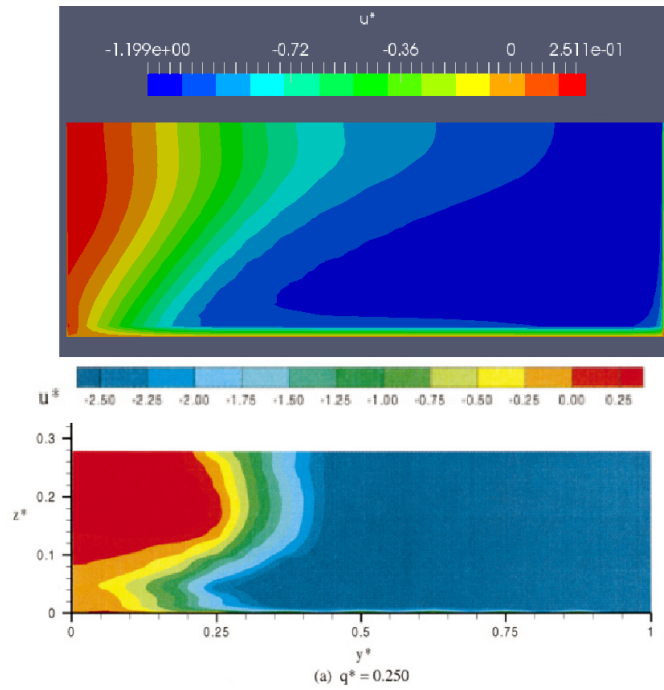
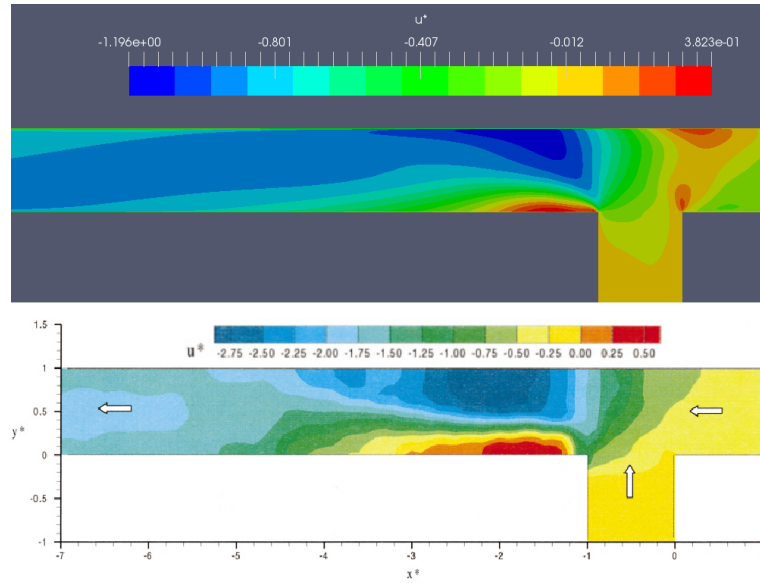


Figura 12: Comparativa del Patrón de velocidad superficial u^* a $z^* = 0.278$ para $q^* = 0.250$. Arriba modelo. Abajo experimento por Weber, Schumate y Mawer[29]



5.5.2. Campos Vectoriales

Como se busca comparar la dinámica del flujo, una muestra importante es realizar la comparativa de los campos vectoriales en diferentes puntos del modelo y comparar los resultados con el experimento. Weber, Schumate y Mawer [29] realizan un mapeo de vectores en 2D lo que será nuestro punto de referencia. Mediante la herramienta ParaView se hace un trazo de vectores 2D del modelo y se compara. En este caso se realizó una comparación para un valor de $z^*=0.014$ que es una distancia muy cercana al fondo del canal, figura 13.

5.5.3. Perfiles de temperatura

Uno de los principales objetivos de este proyecto brindar información de cómo se comporta la temperatura del sistema teniendo en cuenta los diferentes parámetros que lo afectan. Así que para el modelamiento del banco experimental se tendrá en cuenta la solución de la ecuación de la energía. La figura 14 muestra como se comporta el sistema respecto a los valores de su temperatura en el estado final.

Figura 13: Campo Vector u^*-v^* para condiciones de flujo $q^* = 0.250$ a $z^* = 0.014$, cerca al fondo. Arriba modelo, abajo experimento por Weber, Schumate y Mawer [29]

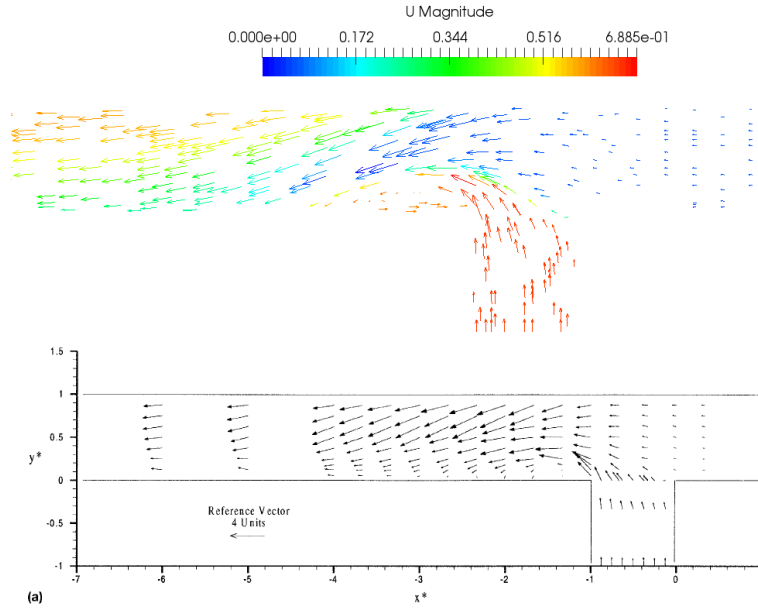
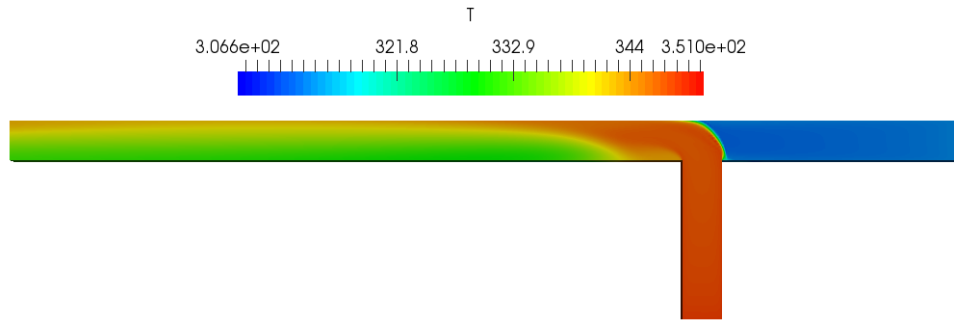


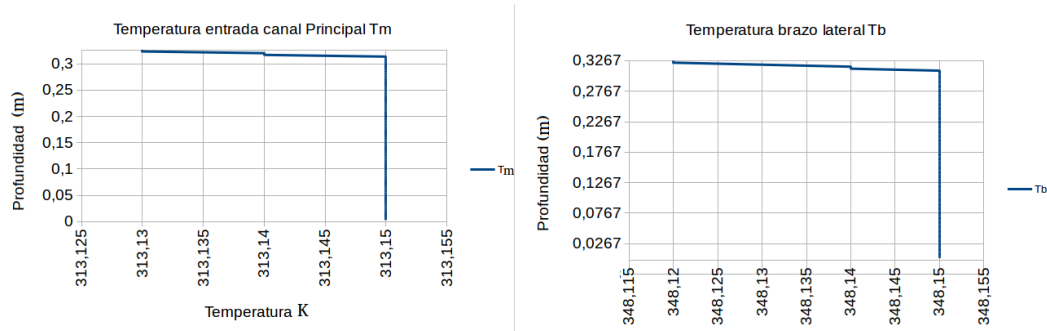
Figura 14: Estado final del sistema con valores de temperatura de entrada $T_m=40^\circ\text{C}$ y $T_b=75^\circ\text{C}$



Es de interés saber cómo son los perfiles de temperatura a lo largo de los canales y si interactúa con el exterior. Lo primero es observar los valores de entrada tanto en el canal principal como en el brazo lateral. En la figura 15 se ve a la izquierda el valor de entrada del canal principal en 313,15 K y a la derecha el valor del brazo lateral con 348.15 K ambas como un valor constante en toda la altura del canal.

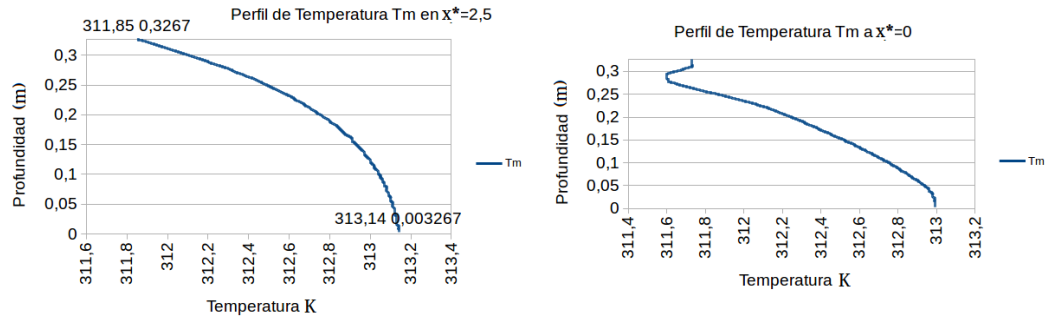
Tanto en el canal principal como en el brazo lateral se debe observar que a lo largo del

Figura 15: Valores de temperatura a la entrada. Izq: Entrada principal. Der: Brazo lateral.



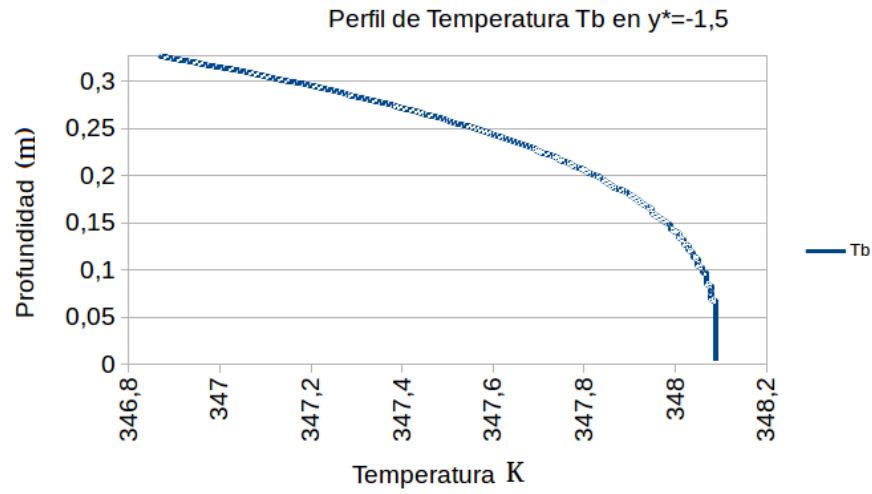
flujo de agua la superficie está sometida a un intercambio de energía al exterior. Así, se obtienen los perfiles de temperatura a lo largo de los canales. Las figuras 16 y 17 muestran cómo es el comportamiento de la temperatura en ambos canales. El valor de la temperatura disminuye conforme se acerca a la superficie debido a la transferencia de energía latente que se tiene como condición de frontera en la superficie. En $x^*=0$ se observa un cambio brusco de la temperatura cerca a la superficie debido a que ese punto está muy próximo a la zona de mezcla y se afecta por la entrada del brazo lateral.

Figura 16: Perfiles de temperatura. Izq: En $x^*=2.5$, Der: En $x^*=0$



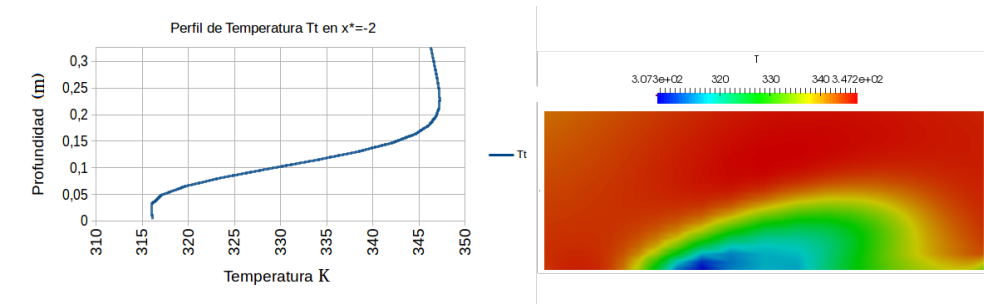
De la misma manera, se pueden obtener los perfiles de temperatura aguas abajo de la unión. En la figura 18 se observa que en el punto $x^*=-2$ existe una mezcla de los flujos de ambos canales lo que produce que en la parte baja del canal haya una temperatura baja y que se incremente a medida que se sube hasta la superficie por la superposición del flujo del brazo sobre el canal principal. Cerca a la superficie baja un poco de nuevo

Figura 17: Perfil de temperatura brazo lateral a $y^*=-1.5$



el valor de la temperatura por el efecto realizado de la transferencia por calor latente en la superficie.

Figura 18: Perfil de temperatura canal de mezcla en $x^*=-2$. Izq: Perfil respecto a su altura. Der: Sección transversal



5.5.4. Teoría de la razón de profundidad

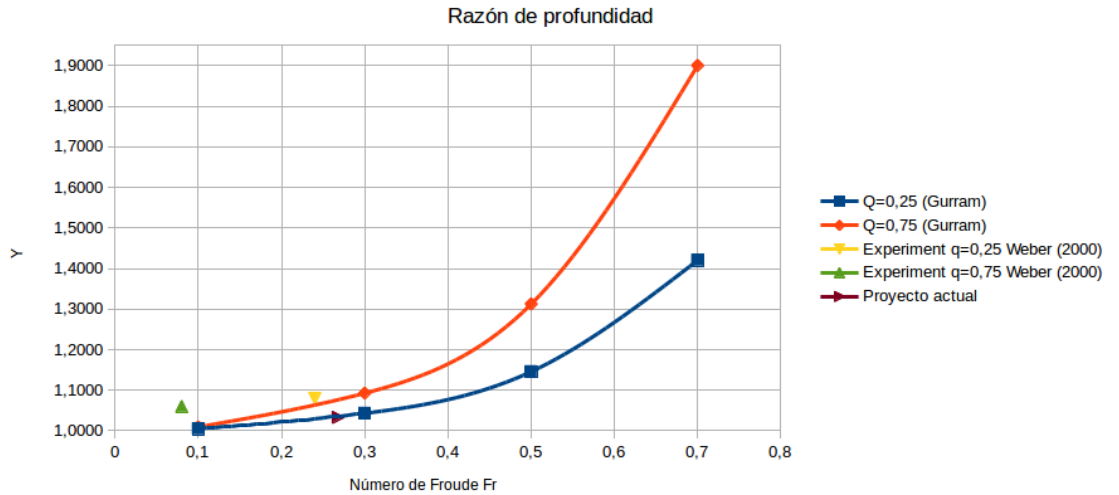
Una de los métodos que se usa para comprobar la precisión de un modelo es la propuesta por Gurram y Karki [14] donde compara el comportamiento del número de Froude frente a la relación de profundidad. Esta busca encontrar que tan preciso puede ser un modelo frente a un experimento real observando como cambia la profundidad del flujo a

medida que avanza cuando la relación q^* es variada por cada experimento. Para el caso de este proyecto se tomará un punto a $x^*=-8$ al igual que Weber, Schumate y Mawer [29] y a una relación de $q^*=0.25$. De esta manera se puede comparar los resultados obtenidos por Gurram y Karki [14], los obtenidos por Weber, Schumate y Mawer [29] y los obtenidos en este proyecto. En este punto, $x^*=-8$, se tiene una velocidad en el modelo de $V_t=0.5822$ m/s y mediante la relación $Fr = U/\sqrt{g * L}$ se calcula el número de Froude, $Fr=0.268$. Usando la relación dada por Gurram y Karki [14]:

$$Y = 1 + \frac{qF_r^2(2 - q - \cos\gamma)}{1 - F_r^2} \quad (37)$$

Se calcula el valor de Y que representa la relación de profundidad, $Y=1.033$.

Figura 19: Comparación de datos de relación de profundidad con datos actuales



Como se puede observar en la figura 19 el punto de relación de este proyecto es muy cercano a los valores obtenidos por Gurram [14] y Weber, Schumate y Mawer [29] lo que permite asumir buena precisión del modelo que se usa para comparar los resultados con el banco experimental.

6. APROXIMACIÓN A LA SOLUCIÓN DE LA CIÉNAGA

Ya se ha realizado un análisis del modelo a través de los canales cruzados a 90 basados en el experimento de la Universidad de Iowa. Sin embargo, la geometría de la ciénaga es mucho mayor, por lo que se debería realizar una evaluación preliminar con una geometría más grande. Este motivo lleva a proponer una solución con una geometría que permita evidenciar fácilmente efectos como lo son la zona de influencia por la velocidad y por la temperatura.

6.1. GEOMETRÍA PROPUESTA

Se construye una geometría con un área intermedia mayor, dos canales de entrada y un canal de salida; algo similar a lo que se considerará en la geometría real de la ciénaga. Se desea observar los efectos de los canales de entrada sobre el cuerpo principal y del cuerpo principal sobre el canal de salida.

De manera similar a como se realizó el proceso anterior en los canales cruzados, lo primero es establecer una malla. Debido a la geometría recta que se tiene se puede aplicar una malla estructurada. En este caso se obtiene una malla con un total de 1.700.352 elementos.

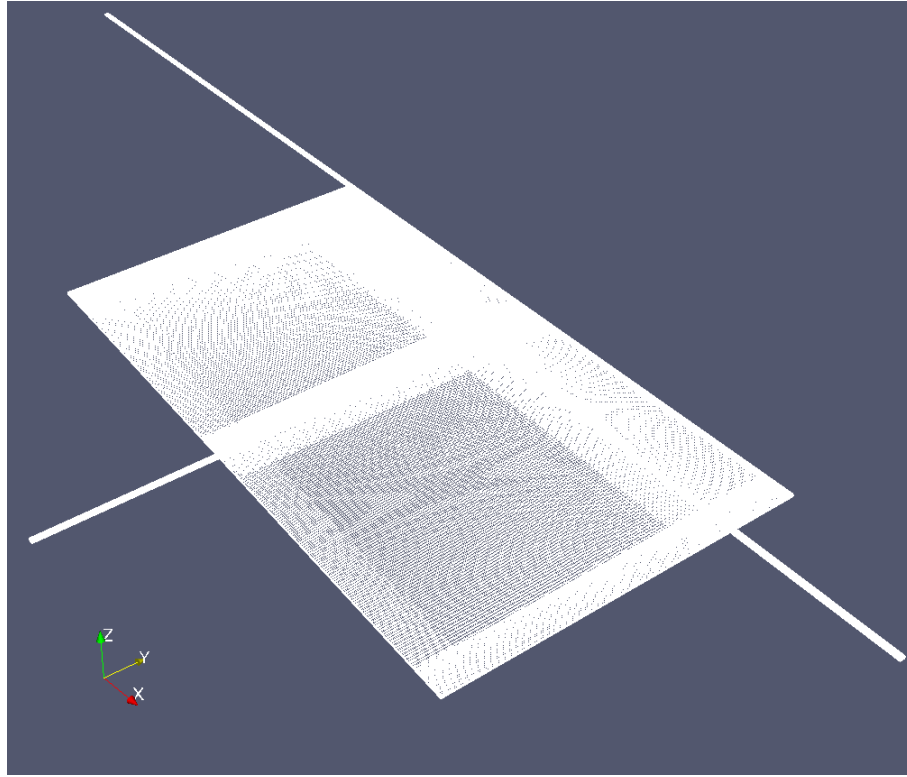
6.2. CONDICIONES DE FRONTERA

Los valores y condiciones de frontera para esta sección son los adoptados para el ejercicio de canales cruzados y basados en los experimentos de la Universidad de Iowa. Los resultados en este caso se particulariza debido al cambio de geometría. Las condiciones de frontera se exponen en la tabla 4.

6.3. RESULTADOS

Una vez que las condiciones de fronteras son adaptadas a la geometría propuesta, se procede a correr el modelo y verificar los resultados. Esto se hace, como se mencionó

Figura 20: Geometría mallada propuesta aproximada a la ciénaga



anteriormente, para evidenciar los efectos de las descargas sobre el cuerpo principal mediante el uso de la misma configuración usada para los canales cruzados.

6.3.1. Zona de mezcla por la velocidad

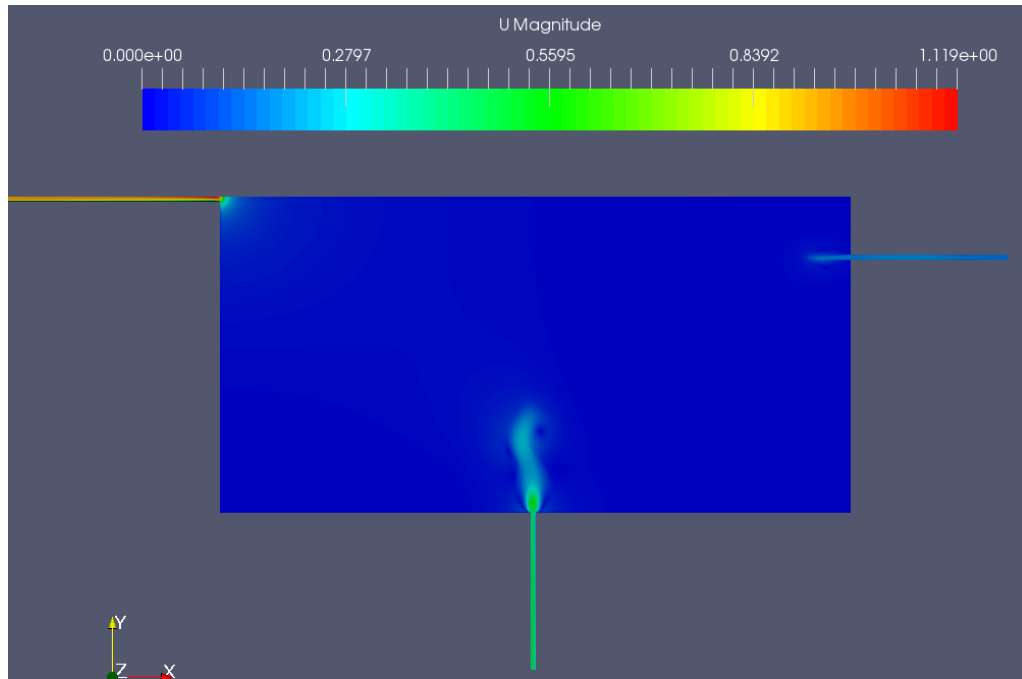
Como se mencionó en la sección de *PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA*, la importancia de observar los efectos de la velocidad parte de identificar la zona de mezcla y sus posibles efectos en la sedimentación. La zona de mezcla es el área donde un vertimiento de alto impacto interactúa con agua limpia de la zona. Cuando esta área se identifica y se limita entonces es controlable para minimizar el impacto sobre el ecosistema del cuerpo de agua principal [10].

En esta sección, y en concordancia con el tema de este proyecto, lo que nos interesa es determinar la zona creada por los efectos de la velocidad causado por los dos caños de entrada y si visualmente se observa algún efecto antes del caño de salida.

Tabla 4: Condiciones de frontera para la aproximación de la ciénaga

Frontera	Condición
Superficie libre	$q=h(T-T_a)$ $f(W)=6.9+0.345W^2$ Misma función $T_a(t)$
Entradas	Superior: -0.1412 m/s, 310 K Inferior: 0.4271 m/s, 350 K
Paredes y Fondo	Velocidad cero
Salida	$p_{rgh} : fixedvalue0$ Velocidad: InletOutlet

Figura 21: Efectos de la velocidad sobre el cuerpo principal a los 10 minutos



Como se puede observar en las figuras 21 a 23 existe una zona de influencia dentro del cuerpo principal. Esta zona de influencia es más evidente cuando la diferencia de velocidad del fluido con la que se hace la descarga de los vertimiento respecto al cuerpo receptor es alta.

Figura 22: Efectos de la velocidad sobre el cuerpo principal a los 30 minutos

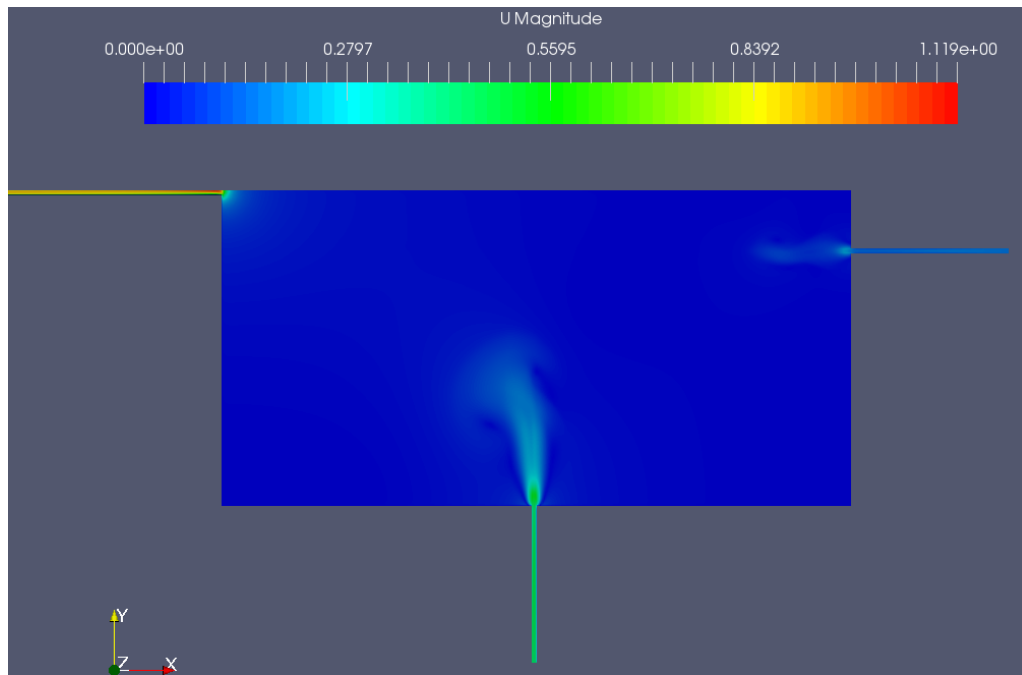


Figura 23: Efectos de la velocidad sobre el cuerpo principal a los 60 minutos

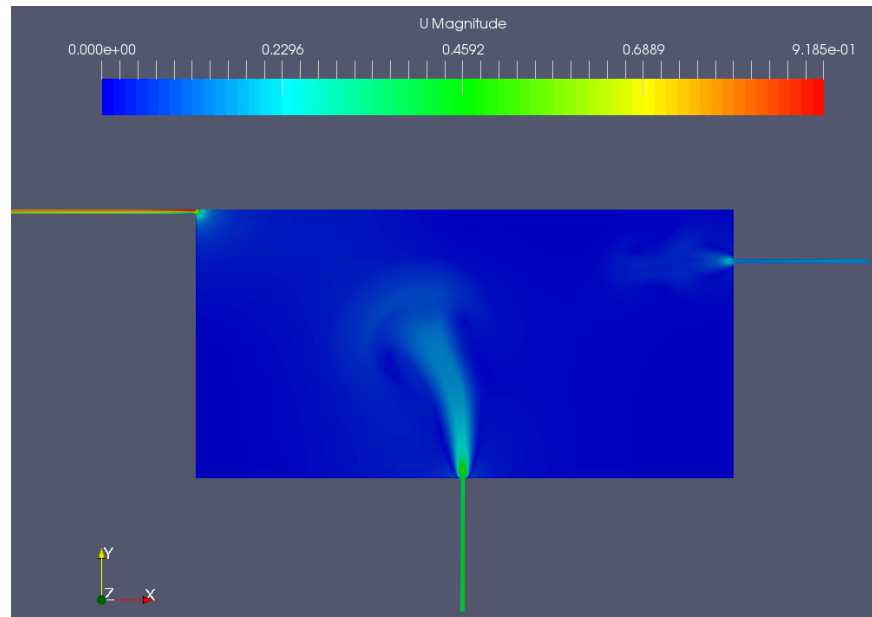
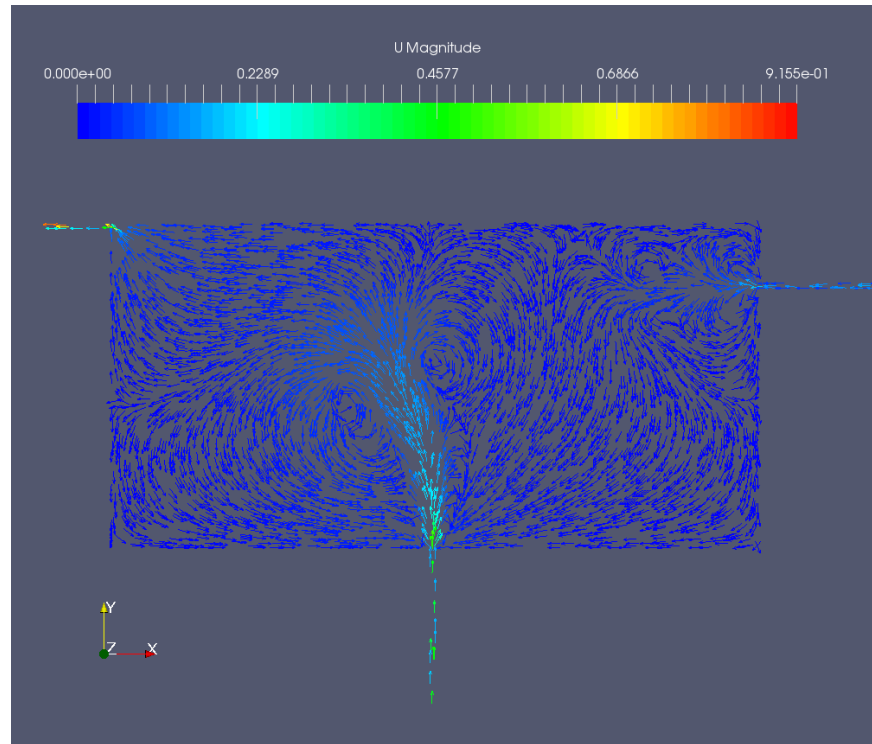


Figura 24: Campo vectorial sobre el cuerpo principal a los 60 minutos



6.3.2. Zona de mezcla por la temperatura

Al igual que en el punto anterior se determina la zona de mezcla, pero en esta oportunidad será la influencia de la temperatura la que permitirá observar los resultados.

Estos efectos de la temperatura debido al fluido por los canales se podría interpretar de varias maneras dependiendo de las condiciones ambientales y la velocidad. Algunas de las conclusiones que se presentan es por ejemplo la combinación de alta velocidad del fluido en los canales, altas diferencia de temperatura entre el cuerpo principal con los canales y el tamaño del cuerpo principal o receptor. En este caso la influencia del flujo de los canales sobre el cuerpo principal es alta en comparación con la influencia del ambiente y esto se evidencia en la figura 27.

Por el contrario, una combinación de baja velocidad en el fluido de los canales y una baja diferencia entre la temperatura del cuerpo con los canales hará que las principales afectaciones se deban por los cambios de temperatura del ambiente a través del tiempo.

Figura 25: Efectos de la temperatura sobre el cuerpo principal a los 10 minutos

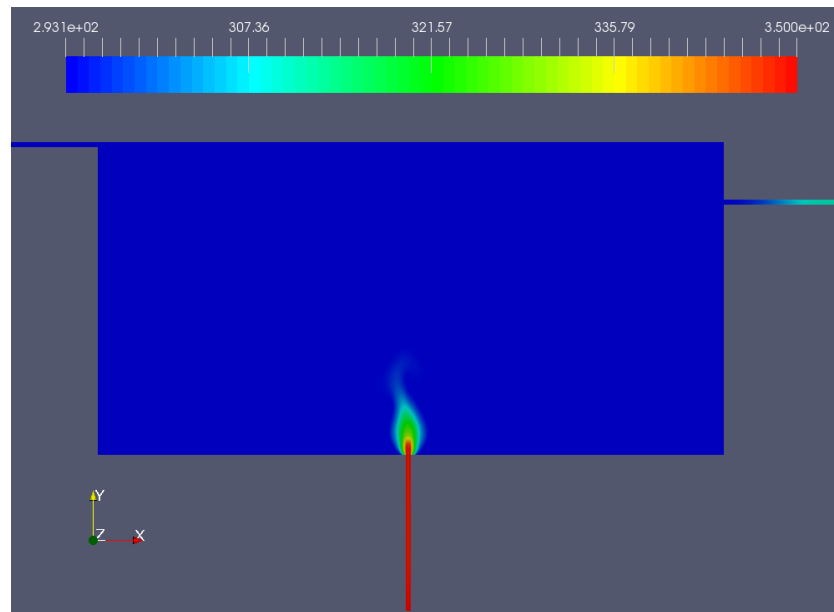


Figura 26: Efectos de la temperatura sobre el cuerpo principal a los 30 minutos

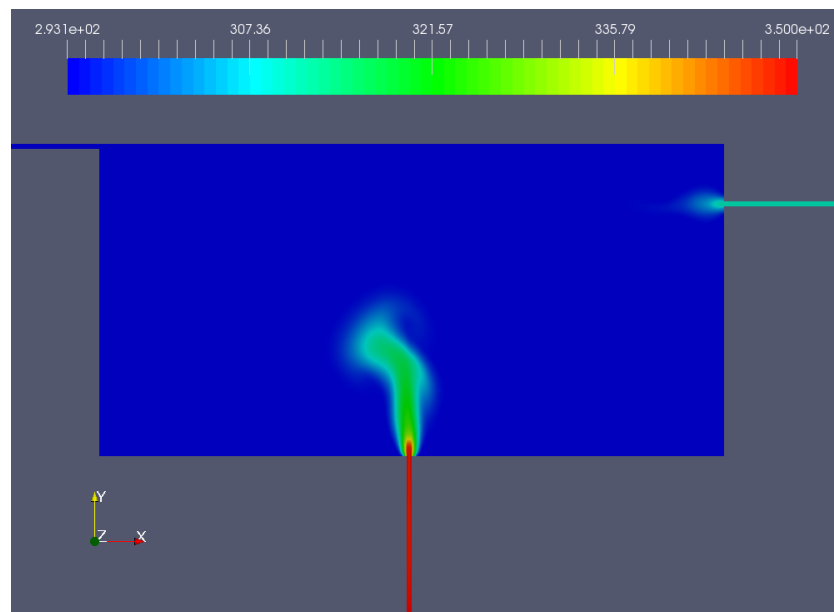
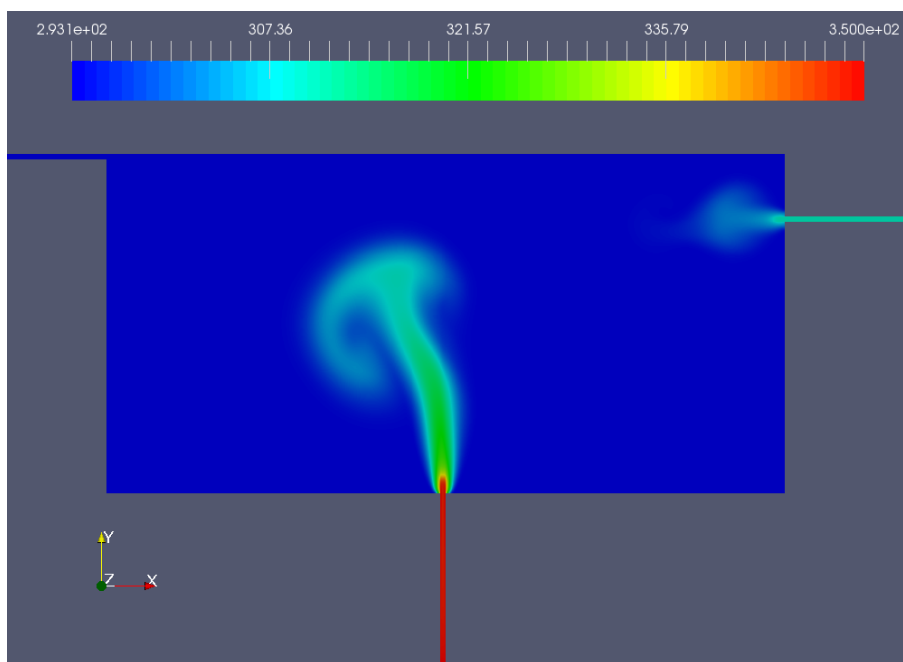


Figura 27: Efectos de la temperatura sobre el cuerpo principal a los 60 minutos



7. ANÁLISIS CIÉNAGA MIRAMAR

Toda la estrategia y solución planteada anteriormente se desarrolla con el propósito de utilizar este modelo en la geometría de la ciénaga que se analizará para este proyecto y observar cómo se comporta el flujo de agua tanto a las entradas en los caños aledaños como en la salida de la ciénaga, al inicio del caño Rosario.

7.1. CIÉNAGA Y SUS ALREDEDORES

La ciénaga Miramar está ubicada en el norte de la ciudad junto a la refinería de Ecopetrol. Para el proyecto se consideraran dos de las principales entradas que tiene, el arroyo Las Camalias y el arroyo Las Lavanderas, y una salida hacia lo que se conoce como el caño Rosario, figura 28.

Figura 28: Ciénaga Miramar y sus alrededores



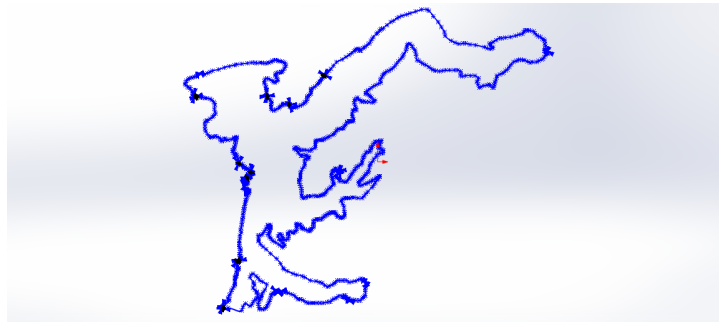
7.2. MODELAMIENTO DE LA CIÉNAGA

Para comenzar el modelamiento de la ciénaga lo primero es determinar su geometría. Parte de la información brindada por el ICP (Instituto Colombiano del Petroleo) para entender aspectos generales de la ciénaga fue el informe realizado por Cardenosa, Orduz y Ospina [5]. En este informe se puede observar los trazos principales de la ciénaga.

Debido a la geometría compleja de la ciénaga se debe buscar un método simple y rápido que permita construir el contorno y volverlo un volumen de análisis en CFD. En el caso de la solución benchmark de canales cruzados se usó el software SALOME desde un principio debido a que la geometría se construía fácilmente por puntos. Para el caso de la ciénaga no se tiene dicha facilidad. Para ese croquis se intentó seguir la batimetría de la ciénaga, sin embargo no fue posible encontrar los parámetros que garantizaran el mallado siguiendo dicha batimetría. Por lo tanto se realizaron ajustes a las diferentes curvas y puntos desde suavizar los fondos hasta considerarla como una proyección del contorno superior. Esto orienta que se plantee una solución para el mallado mediante los siguientes pasos:

- Usando el software de modelado CAD 3D SolidWorks, se copia el contorno de la ciénaga importando la imagen dada en el trabajo hecho por Cardoza, Orduz y Ospina [5] al área de trabajo del software y posteriormente se elimina la imagen para dejar sólo el croquis de la misma y proceder a crear el sólido, figura 29.

Figura 29: Croquis de la ciénaga en SolidWorks



- Para construir el sólido de la ciénaga se deben tener presente la profundidad de la misma. Así que se toman medidas del croquis para compararlas con las medidas reales de la ciénaga y así hallar la escala para dar las diferentes dimensiones y profundidad. A continuación se muestran las dimensiones principales de la ciénaga y con la cuál se calculará la escala de la geometría, figura 30.

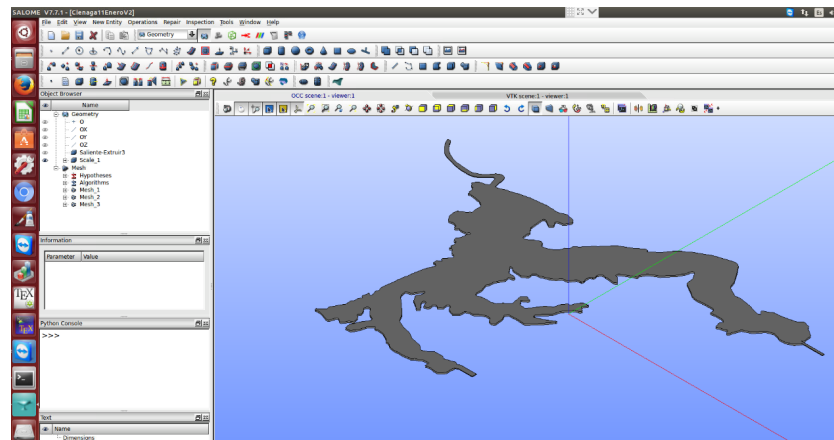
Con esta información y las dimensiones de la geometría en SolidWorks se encuentra que el valor de escala a aplicar en la geometría es de **921**. Este valor es el número de veces que se debe aumentar la geometría para obtener las dimensiones reales de la ciénaga.

Figura 30: Dimensiones brazos ciénaga Miramar. Cardenosa, Orduz y Ospina [5]



- La geometría dibujada y obtenida en Solidworks se importa al software Salome y se aplica la escala calculada de **921**, figura 31.

Figura 31: Geometría de la Ciénaga con dimensiones reales en el *work space* de Salome



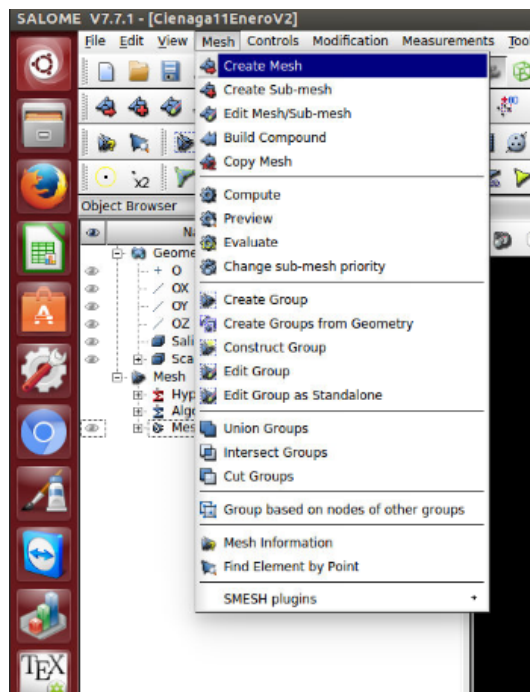
- Finalmente con la geometría ajustada a la escala necesaria, se procede a aplicar el mallado de la misma. Dado que es una geometría compleja por la cantidad de irregularidades que presenta, lo mejor es aplicar un mallado no estructurado.

Salome tiene muchas opciones para aplicar este tipo de mallado pero no es propósito de

este proyecto hacer un estudio profundo del uso del software, por lo cuál se limitará a describir el método de mallado usado y que permitió encontrar los diferentes resultados. Los pasos que se siguen para obtener los diferentes mallados de la ciénaga son:

- Una vez activada la opción Mesh en el *work space* de Salome, se da click sobre *Mesh* en el menú superior y luego en *Create Mesh*, figura 32.

Figura 32: Paso 1 en la creación de la malla para la geometría de la ciénaga. Habilitar la opción *Mesh*



- En la ventana *Create Mesh* se ubica la casilla “*Geometry*” y se selecciona la geometría final que se quiere mallar. Para este caso la geometría que se selecciona es la ciénaga en su escala final, figura 33.
- Como algoritmo se escoge la opción de Netgen 1D-2D-3D la cuál permite que se genere una malla conforme a las condiciones geométricas establecidas de la ciénaga. 1D para la segmentación de líneas, 2D para planos y 3D para volúmenes. Este algoritmo toma estas opciones y genera los volúmenes necesarios, figura 34.

Figura 33: Paso 2 en la creación de la malla para la geometría de la ciénaga.
Seleccionar la geometría deseada

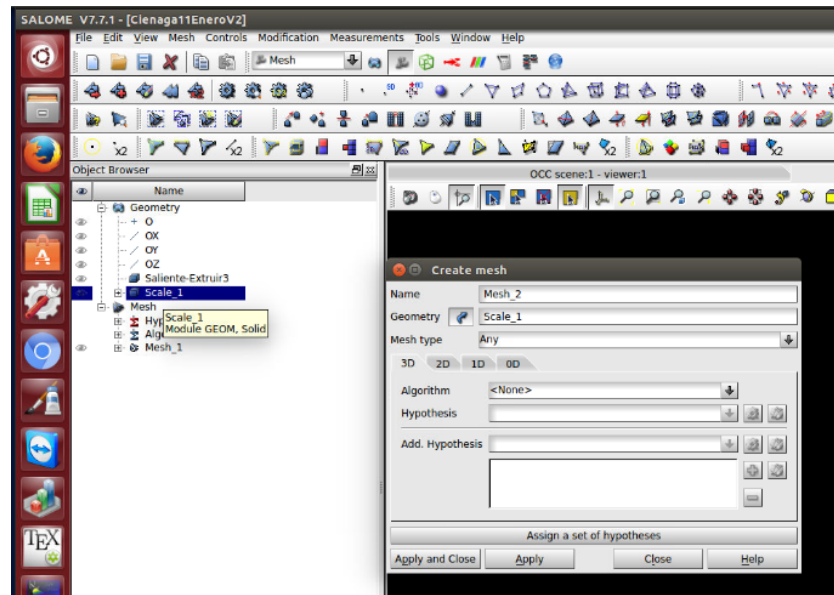
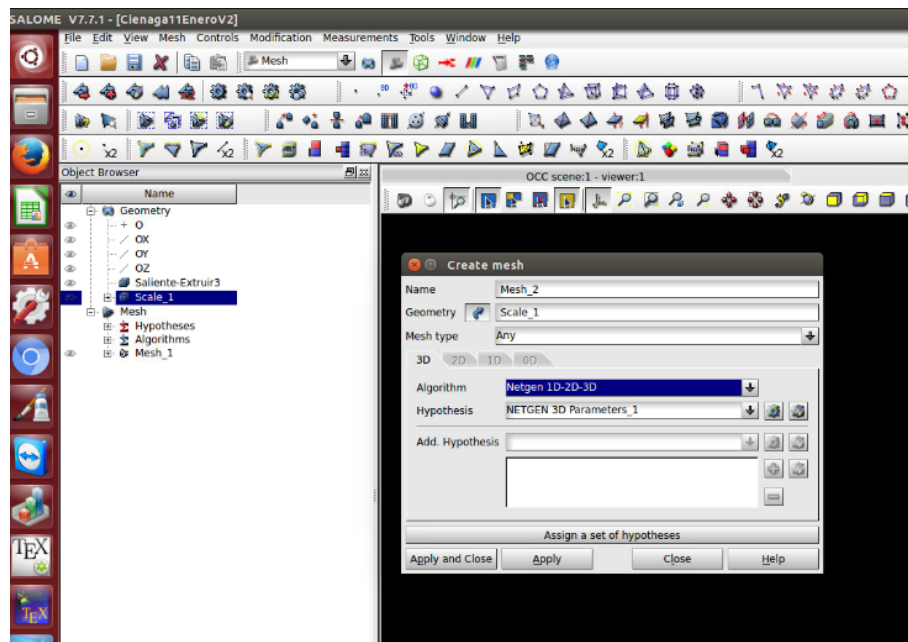
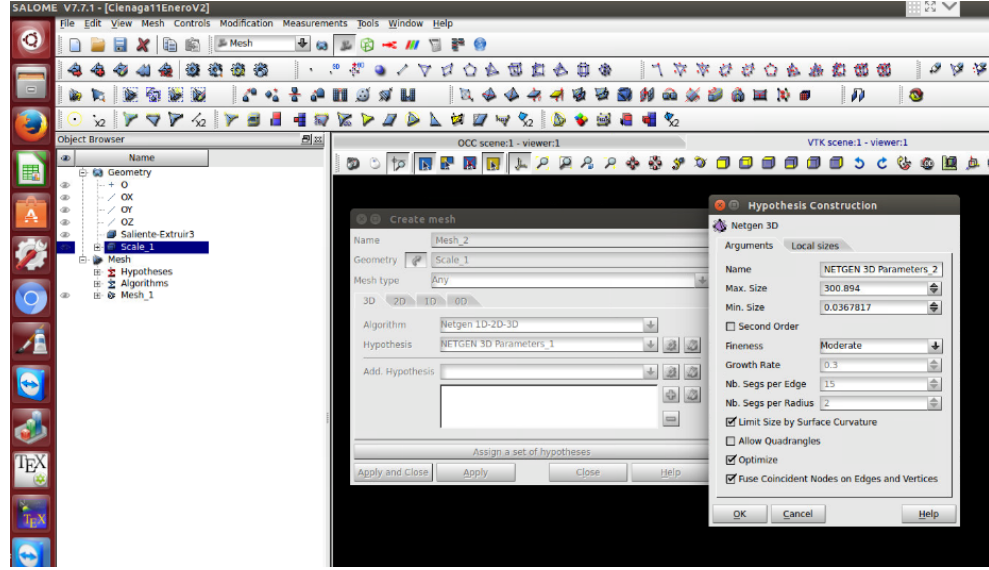


Figura 34: Paso 3 en la creación de la malla para la geometría de la ciénaga. Uso del algoritmo



- En la casilla “*Hypothesis*” se ingresa a una ventana donde se construye el argumento de la hipótesis de mallado mediante las dimensiones máximas o mínimas de las celdas que se esperan obtener en la construcción de la malla, figura 35.

Figura 35: Paso 4 en la creación de la malla para la geometría de la ciénaga. Selección de tamaño máximo o mínimo de la malla



Una manera de poder determinar algún tamaño mínimo que pueda tener las celdas se calcula mediante el número de Courant que se define como:

$$Co = \frac{\Delta t * u}{\Delta x} \quad (38)$$

De esta manera de hacen algunos de los cálculos donde se determina parte de lo tamaños de malla para valores de $\Delta t = 0,05$ y $\Delta t = 0,1$ y en donde se espera un número de Courant menor o igual a 1. Por lo tanto se depeja para realizar los cálculos:

$$\Delta x = \frac{\Delta t * u}{Co} \quad (39)$$

usando números de Courant como 0,1 y 1, se obtienen algunos de los siguientes valores para los tamaños mínimos o máximos de las celdas de la malla: 0,00083; 0,001766; 0,0004; 0,0008.

- Como se mencionó antes, la geometría de la ciénaga es compleja en todo su contorno, por lo que se considera la mejor solución aplicar una malla no estructurada; las cuales fueron desarrolladas como necesidad para solucionar este tipo de geometrías. El uso de este tipo de malla tiene como principales factores el costo computacional y la precisión de la solución [11].

Para reducir cualquier tipo de problemas por precisión se busca hacer una malla fina por toda la geometría. Esto puede traer un alto costo computacional pues se generarán más celdas, sin embargo es necesario encontrar un número mínimo de celdas para no tener problemas de convergencia del modelo.

El software Salome permite trabajar la opción de malla fina, moderada o gruesa. En cada una de esas opciones se debe encontrar el número de celdas necesarias para que el modelo funcione y se observe la convergencia. Para el caso de este proyecto fue la opción de mallado fino la que se usó y se parametrizó el tamaño de las celdas.

- Una vez que los parámetros de mallado son puestos, se aceptan las condiciones y en la malla se da un *click* derecho y se busca la opción *Compute*. De esta manera se comenzará con el mallado de la geometría según las condiciones dadas, figura 36.
- Una vez el proceso haya terminado ya se tendrá la geometría completamente mallada. En la figura 37 se puede observar algunas de las zonas de la ciénaga. En total la malla consta de 2.262.205 celdas. Otra opción que se tuvo fue una malla de 4.405.266 elementos, pero la alta cantidad de volúmenes hacían el proceso aún más lento.
- Finalmente para completar el planteamiento, se debe nombrar los puntos y contornos de la ciénaga tanto en la geometría de Salome como en la malla planteada. Para ello lo que se debe hacer es crear los grupos de caras o "*faces*" que componen un contorno o una frontera completa. Una frontera puede estar compuesta por una o más caras.

Cada frontera real que tiene la ciénaga debe representarse dentro del modelo y ser identificada por un nombre. Para entender un poco más esto, se muestra en la tabla 5 un paralelo de lo que es la frontera en la ciénaga real y en el modelo.

Obtener una malla adecuada que permitiera la convergencia del modelo fue bastante

Figura 36: Paso 5 en la creación de la malla para la geometría de la ciénaga.
Computar los parámetros planteados

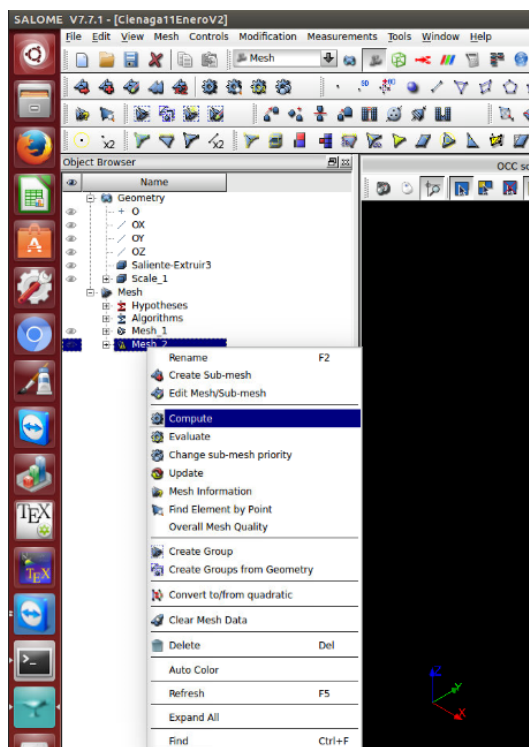


Figura 37: Mallado de la ciénaga en varias zonas

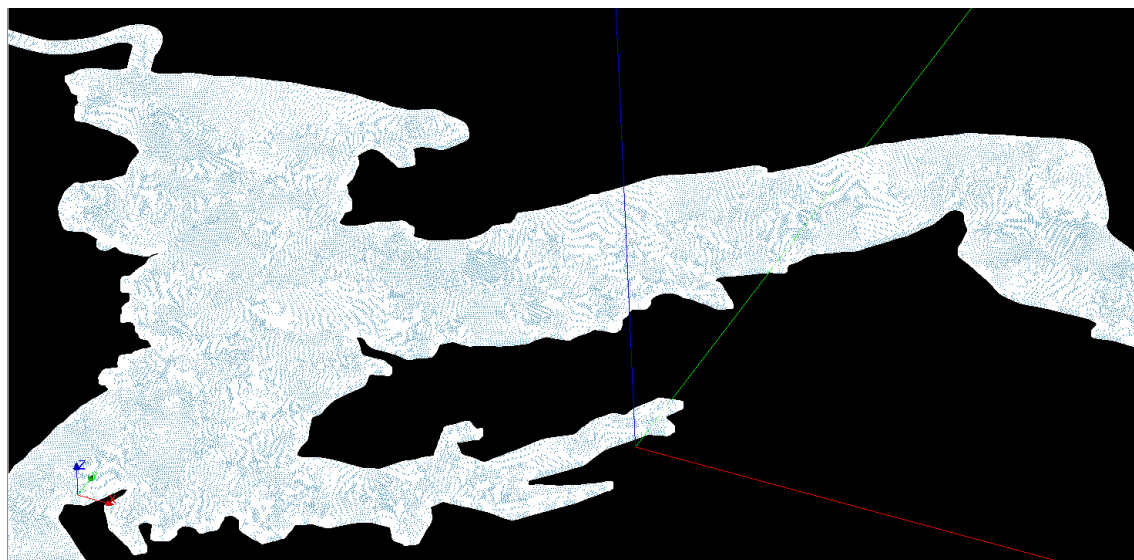


Tabla 5: Identificación de nombres para las fronteras en el modelo

Nombre Real	Nombre Modelo
Arroyo Las Camelias	Inlet1
Arroyo Las Lavanderas	Inlet2
Caño Rosario	Outlet
Fondo de la ciénaga	Fondo
Superficie libre	Superficie
Contorno de la ciénaga	Walls

difícil. Inicialmente se intentó hacer un perfilado de profundidad de la ciénaga más ajustado a la realidad; sin embargo cada configuración de malla que se propusiera siempre arrojaba errores. Por lo general no realizaba la malla.

En caso que el mallado fuera satisfactorio, al momento de correr el modelo eran evidentes problemas de convergencia.

De esta manera fue necesario ir ajustando la geometría hasta una aproximación que permitiera no solamente mallar sino que además admitiera correr el modelo sin problemas. La geometría finalmente cuenta con un fondo plano y paredes verticales. Todo el contorno si corresponde a la realidad de la ciénaga la cuál puede ser consultada en varios medios.

7.3. DATOS DE ENTRADA DE LA CIÉNAGA

Para poder modelar el sistema de la ciénaga, se requiere de información de entrada como por ejemplo, valores de caudal de entrada o salida y la temperatura de referencia o de sus flujos.

Para comenzar a referenciar los valores de temperatura se requiere la información del ambiente alrededor de la ciénaga. Al igual como se hizo en la sección 3.4 *Condiciones de frontera* se deben buscar valores promedio de temperatura en un día normal de Barrancabermeja.

De nuevo se busca como fuente <https://weather.com> y se toman los valores de dos días para tratar de cerrar lo mejor posible el ciclo de temperatura. Se debe aclarar que estos valores son tomados en lugares cercanos a los aeropuertos de cada ciudad. En la tabla 6 se presentan los valores de temperatura en Kelvin.

Nuevamente se encuentra una función que apróxima los puntos y que se pueda utilizar

Tabla 6: Temperatura de Barrancabermeja en dos días promedio
(<https://weather.com/>)

Hora	Temperatura K
00:00	298
02:00	298
04:00	297
06:00	297
08:00	299
10:00	301
12:00	304
14:00	306
16:00	305
18:00	302
20:00	300
22:00	299
24:00	299
26:00	298
28:00	297
30:00	297
32:00	298
34:00	300
36:00	303
38:00	304
40:00	306
42:00	305
44:00	303
46:00	301
48:00	298

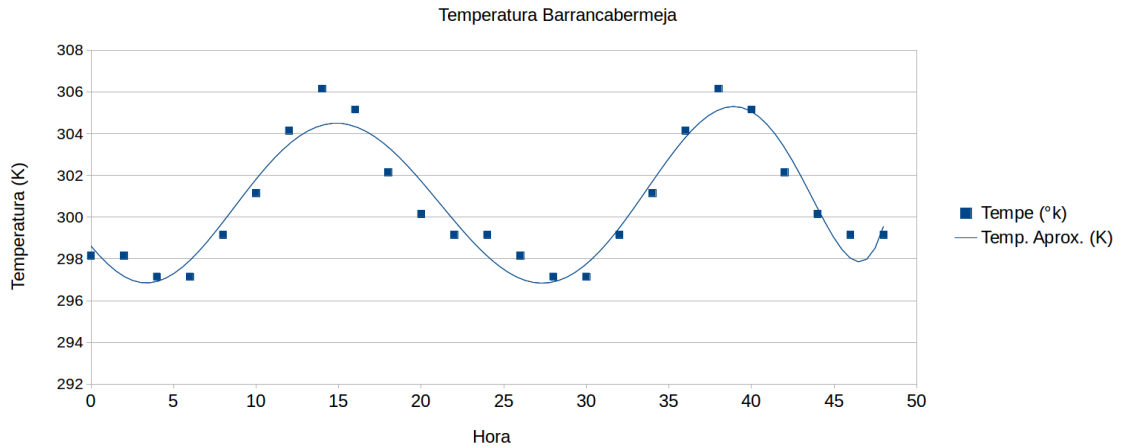
en el cálculo del modelo. Para la ciénaga la función se encuentra y se grafica junto con los puntos como se observa en la figura 38.

$$T_a(t) = 0,000000182259t^7 - 0,000002723455t^6 + 0,000149728t^5 - 0,00358388t^4 + 0,03086671t^3 + 0,0497518t^2 - 0,92317t + 298,6139 \quad (40)$$

donde t está dado en horas.

Es necesario como condición de frontera determinar valores de temperatura inicial para los caños de entrada. Se puede suponer para este caso que existen descargas con valores

Figura 38: Aproximación polinómica de la temperatura



de temperatura 32°C en el caño Las Camelias y de 27°C en el caño Las Lavanderas. Estos valores serán utilizados para comprobar el comportamiento al interior de la ciénaga cuando el flujo de agua entra y además se afecta por las condiciones de temperatura ambiente. De nuevo, se debe dar un valor a la velocidad del viento que se utilizaría en la ecuación (40). Por información de <https://weather.com> se puede afirmar que en Barrancabermeja hay una velocidad promedio diaria de 0.538 m/s . Este será el valor de referencia para la solución del modelo de la ciénaga.

En el caso de la temperatura ambiente se puede afirmar que las condiciones no son similares de un día para otro. Esta es la razón principal por la cuál se quiso aproximar la condición de frontera de la superficie a una función polinómica. Para el caso de este proyecto se tomaron en cuenta dos días y se obtuvo la función. Si se requiere ser más preciso es necesario aumentar el número de días e ir encontrando la función. Por eso es posible modelar una temporada de sequía con datos aproximados o de igual manera una temporada de lluvias.

En este caso no se propuso una función sinusoidal pues idealiza aún más la función y el error podría aumentar.

Para determinar los caudales de entrada en las fronteras del caño Las Lavanderas y Las Camelias, se utiliza la información del caudal medido por el ICP (Instituto Colombiano de Petróleo) dentro de sus proyectos de control de la ciénaga. Como muchos son los escenarios que se presentan dentro del estudio realizado por el ICP, para efectos de este proyecto se toma uno de ellos en el cuál el caudal que se debe obtener a la salida en

el caño Rosario es de 136 lt/s y esta medida es tomada a 20 metros a partir de donde comienza el caño. Para conocer el cuadro completo se puede observar en los archivos adjuntos.

Con la información de los 136 lt/s se puede calcular la velocidad de salida teniendo en cuenta el área de la geometría en el caño Rosario del modelo. Si se modela un flujo continuo se puede determinar la velocidad en cada uno de los caños de entrada y además los valores de Reynolds, Diámetro Hidráulico, k (energía cinética turbulenta) y ε (la tasa de disipación viscosa).

Tabla 7: Cálculo de condiciones de entrada para el modelamiento de la ciénaga

Ecuación	Las Camelias	Las Lavanderas	Salida Caño Rosario
$V = \frac{Q}{A}$ (m/s)	0.001766	0.0008	0.002131
$Dh = \frac{4A}{P}$ (m)	4.852	5.4105	5.2449
$Re = \frac{\rho V Dh}{\mu}$	8551.52	4319.76	11154.57
$k = 1,5[I * V]^2$	4.678e-8	9.61e-9	6.8117e-8
$\varepsilon = \frac{C_\mu^{0,75} k^{1,5}}{l_m}$	4.895e-12	4.087e-13	7.956e-12

Para el cálculo de k y ε se utilizan las referencias dadas para I como la intensidad turbulenta, l_m como la escala de longitud de turbulencia y C_μ como la constante del modelo.

La intensidad turbulenta que es la relación entre las fluctuaciones de velocidad y la velocidad media, tiene unos rangos habitualmente entre el 5 % y el 10 % [11]. Para efectos de este proyecto se usará un valor del 10 % lo que equivale a 0.1 que se usará en la ecuación de k .

La escala de longitud de turbulencia basada en el principio de longitud de mezcla y en condiciones de flujo en canales completamente desarrollados puede usar un valor del 7 % el diámetro hidráulico, es decir $0.07Dh$ [11].

Finalmente la constante del modelo tiene como valor estandar 0.09 para un modelo k-épsilon.

7.3.1. Zona cercana a las paredes

Existen una serie de comportamientos cercano a las paredes que deben ser considerados ya sea por su bajo valor de Reynolds o por el contrario por los altos valores que se presentan. En el caso particular de este modelamiento, su uso principalmente fue diseñado para condiciones de turbulencia en cada elemento de la geometría.

Sin embargo, a pesar de las condiciones de turbulencia que se dan por el número de Reynolds, los valores no son superiores a los recomendados para dar tratamiento para las condiciones de pared como estandar o de no equilibrio ($30 < y^+ < 300$ en el primer nodo). Este tratamiento es recomendable solamente para valores de Reynolds lo suficientemente alto, como por ejemplo $Re > 10e6$ [11].

Para un bajo número de Reynolds se busca la inserción un número suficiente de líneas de las mallas cercanas a la pared ($y^+ < 1$ para el primer nodo) de modo que la capa límite o más próxima puede ser resuelta adecuadamente.

7.4. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados del modelamiento de la ciénaga Miramar incluyendo las entradas de los caños Las Camelias, Las Lavanderas y la entrada al caño Rosario. Es importante recordar que las condiciones que fueron modeladas tiene un estado de flujo continuo de 136 lt/s en la entrada del caño Rosario. La importancia de los análisis de la velocidad y la temperatura, parte de la relevancia que ellos tienen en procesos como la sedimentación y reacciones químicas activadas por cambios bruscos de temperatura en los cuerpos de agua.

7.4.1. Perfiles de Velocidad

El tiempo virtual que se modeló fue de 2 horas con flujo continuo entrando por los caños Las Camelias y Las Lavanderas.

Se tomaron y comprobaron cómo cambian los perfiles de velocidad en el transcurso del tiempo para observar en qué posible momento se estabiliza el sistema.

Una revisión cualitativa de los resultados en el modelo permite observar unos cambios

al interior de la ciénaga y en la escala de la velocidad como se observa en las figuras 39 y 40.

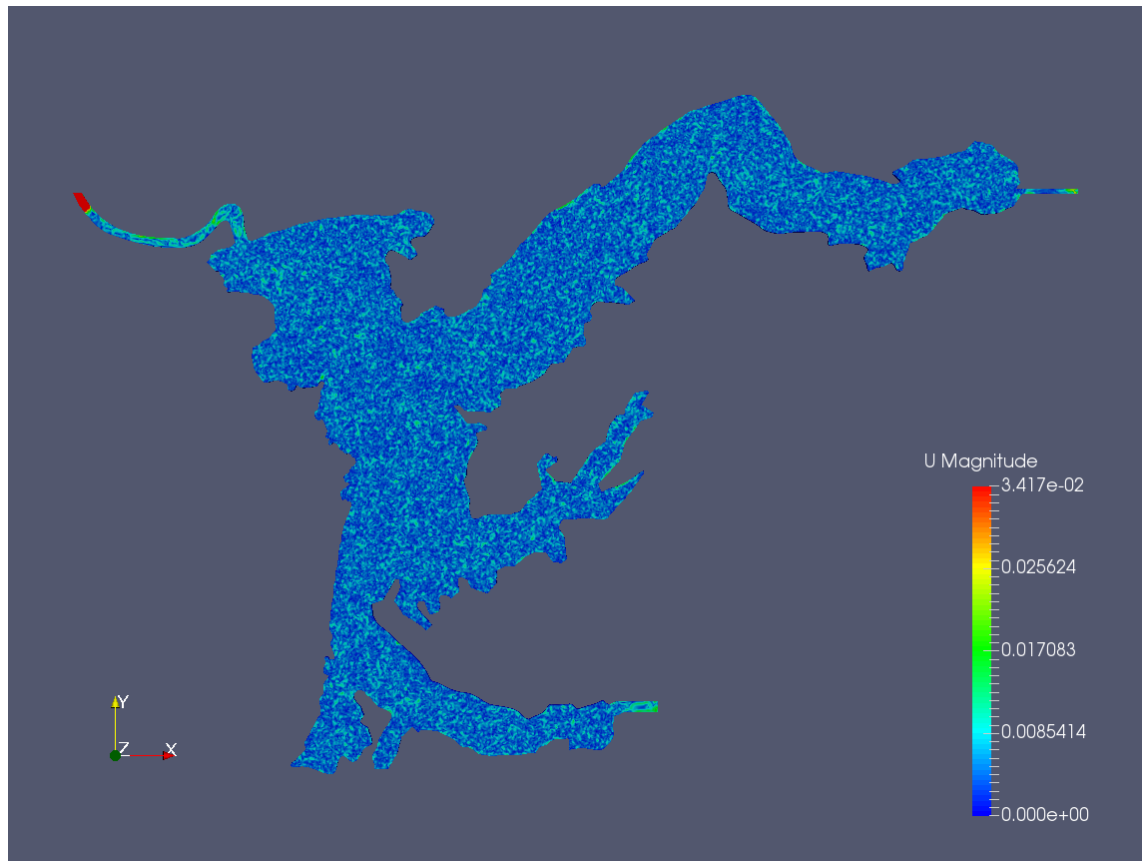
Figura 39: Imagen de la velocidad del flujo a los 15 minutos reales del modelamiento. Vista superior



Sin embargo de ahora en adelante se hará un análisis más detallado en diferentes puntos de la ciénaga y en los caños donde se observará el comportamiento de la velocidad y los perfiles que describe. Lo que se hará es graficar el comportamiento de la velocidad al final de los tramos dibujados para cada uno de los dos caños de entrada como el caño de salida. Se comenzará por el caño Rosario porque es allí donde se debe comparar el valor de velocidad respecto a la tabla 8.

- **Caño Rosario** Para el caño Rosario, el punto de medición será cuando el flujo de agua ya ha entrado al caño. La medición total de velocidad sobre ese punto se usará para comparar el valor de caudal inicial que se tenía como dato de entrada

Figura 40: Imagen de la velocidad del flujo a los 60 minutos reales del modelamiento.Vista superior



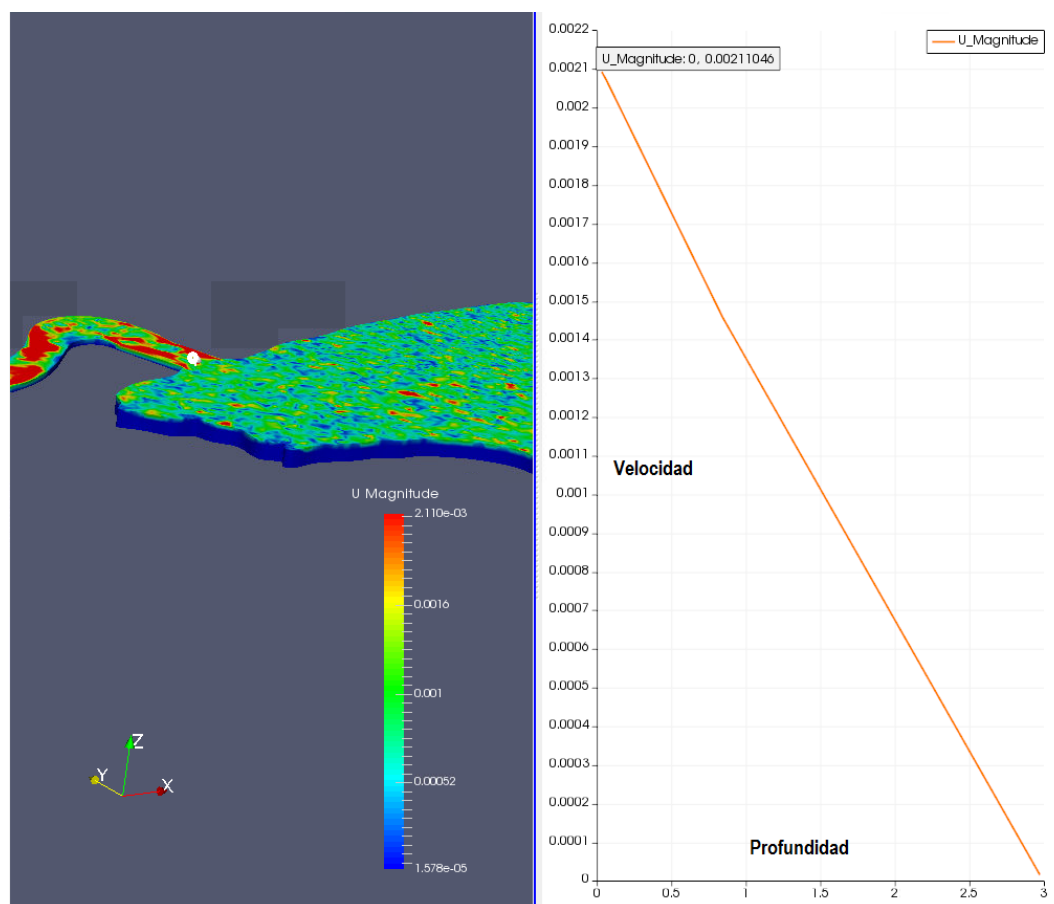
y verificar si los valores son correspondientes. Se debe recordar que como dato de entrada para el modelo se tomó un caudal sobre el caño Rosario de 136 litros/seg y corresponde a una velocidad de 0.002131 m/s.

En la figura 41 se puede observar que la **velocidad total** del flujo de agua después de 5 minutos es de aproximadamente de 0.00211046 m/s. Este valor es similar al valor expuesto en la tabla 8 en la velocidad sobre el caño Rosario.

Luego se procede a construir los perfiles de velocidad al interior del caño y generar las líneas de corriente sobre el mismo.

Las figuras 42 y 43 permiten observar qué sucede con la velocidad en x y y a la entrada del caño Rosario. A medida que pasa el tiempo el flujo que se va desarrollando comienza a estabilizarse después de los 120 minutos.

Figura 41: Velocidad total a la entrada del caño Rosario a los 5 minutos. Imagen tomada directamente de Paraview



La figura 43 permite ver que las líneas de velocidad al principio están sobre el eje positivo y a medida que el tiempo pasa hay una tendencia de la velocidad a moverse sobre el eje negativo, donde se observa estabilidad en los valores. Para corroborar lo anterior se procedió a construir una gráfica con los valores totales de la velocidad en el transcurso del tiempo sobre la superficie del caño.

Este tipo de tendencias son las que permiten diagnosticar cómo se comporta el flujo cuando permanece estable. Es así como un análisis de la figura 45 muestra que hay principalmente 3 efectos del flujo sobre la ciénaga y el caño. El primero deja ver que el agua se ajusta al cambio de sección para poder entrar al caño lo cuál trae consigo un flujo de agua que choca con las paredes de la ciénaga. Hipotéticamente esto puede producir el movimiento de pequeñas partículas que

Figura 42: Perfiles de velocidad U_x a la entrada del caño Rosario después de la Ciénaga

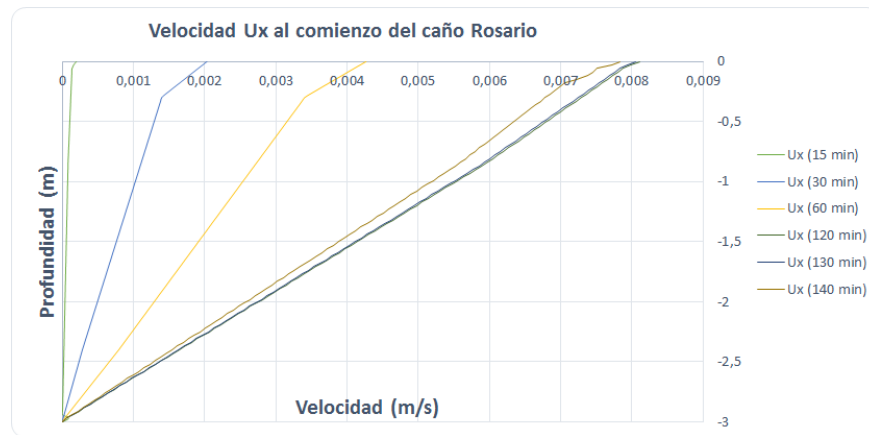
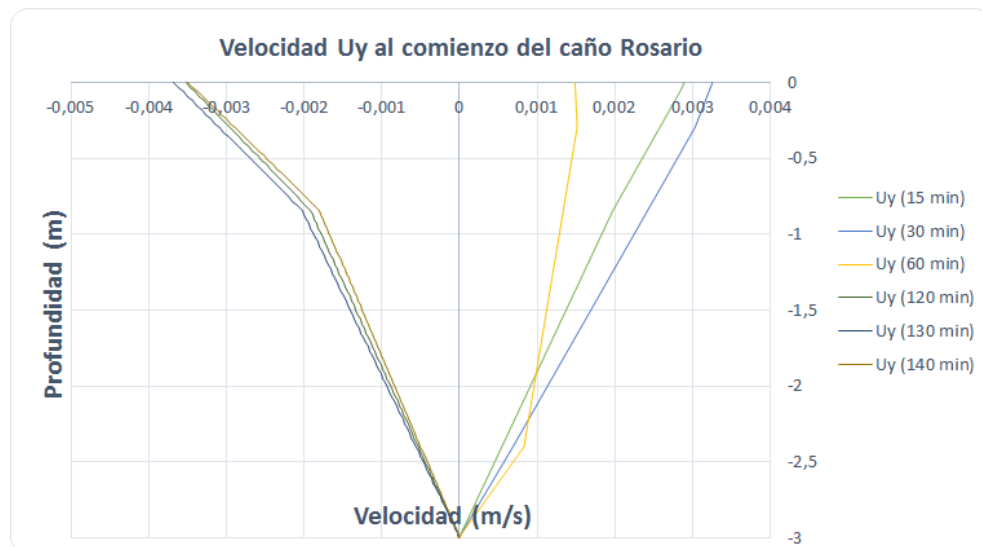


Figura 43: Perfiles de velocidad U_y a la entrada del caño Rosario después de la Ciénaga

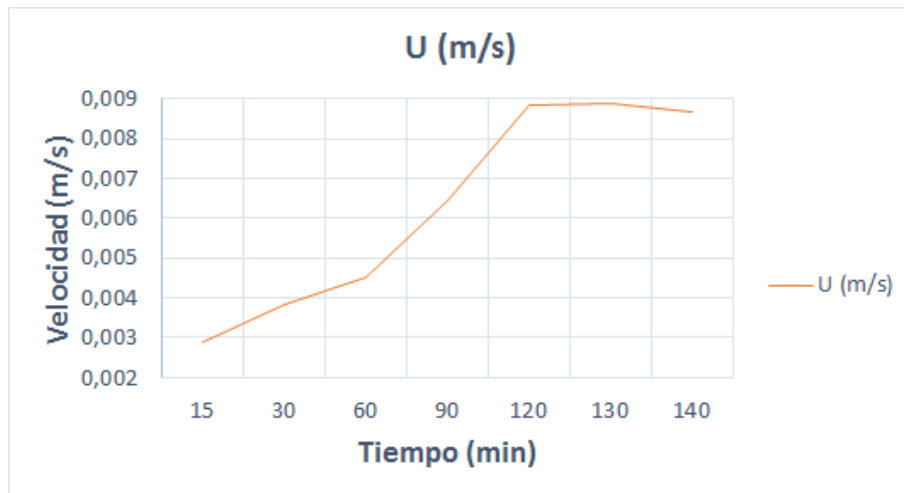


podrían ser arrastrados posteriormente.

Segundo, existe una parte del flujo de agua que corre dentro del caño pero que produce un vórtice dentro del mismo. Estos vórtices cuando pierden velocidad son los causantes de depósito de elementos o partículas en el cuerpo.

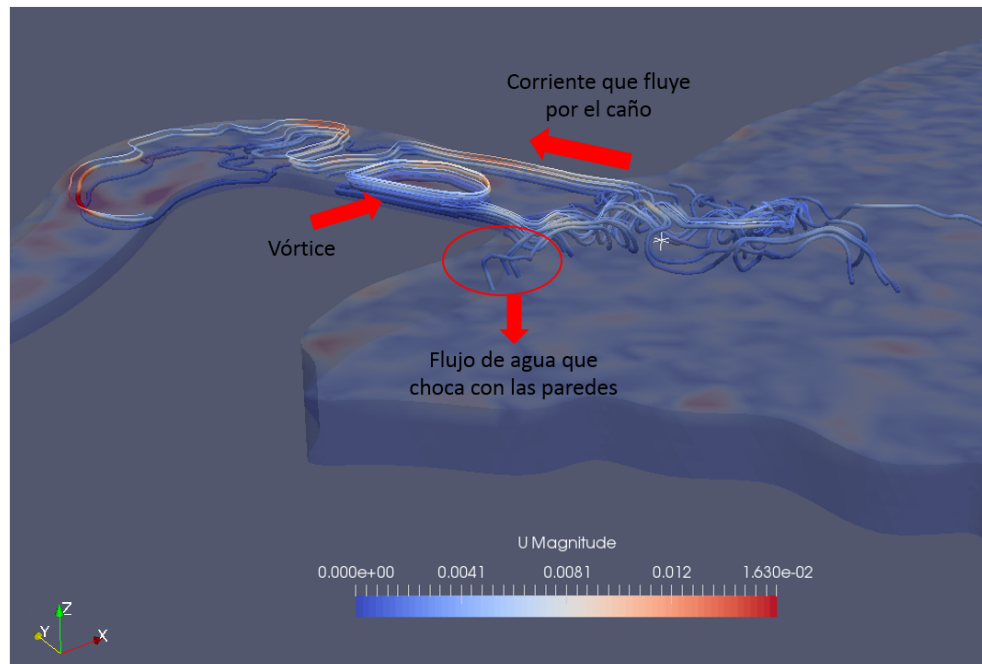
Tercero, una parte del flujo que corre normalmente dentro del caño pero que ajusta sus condiciones debido a restricciones tanto geométricas como de velocidad a sus alrededores. Este flujo podría ser causante del transporte de partículas como se

Figura 44: Velocidad total sobre la superficie del caño Rosario a lo largo del tiempo



mencionó en el primer caso.

Figura 45: Líneas de corriente desde la ciénaga hacia el caño Rosario



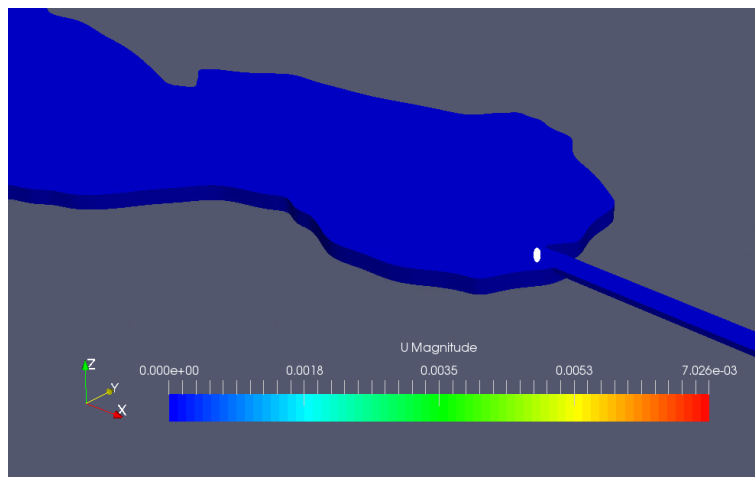
- **Caño Las Camelias** Como se ha mencionado anteriormente, para el caño Las Camelias se tiene un valor de velocidad del fluido a la entrada que corresponde a

0.001766 m/s.

Se monitorea el flujo en un punto a la salida del caño Camelias y a su vez dentro de la ciénaga para verificar la magnitud de la velocidad. Para saber en que tiempo se produce una velocidad a considerarse constante se toma como referencia los perfiles que se producen en ese punto a medida que transcurre el tiempo.

Así se procede a obtener, mediante la información del *Paraview*, los valores de velocidad en cada punto a lo largo de la profundidad de la ciénaga, figuras 47 y 48.

Figura 46: Punto de monitoreo de velocidad a la salida del caño Camelias



En estas gráficas muestra una tendencia clara del perfil luego de los 120 minutos de tiempo en lo cuál los valores de la velocidad tienden a ser similares.

Se puede entonces buscar la magnitud de la velocidad en ese punto a un tiempo de 140 minutos, figura 49.

Cualquier valor negativo de la velocidad en x significa un desplazamiento hacia la salida o caño Rosario debido a la configuración que se tiene de la geometría. Precisamente es lo que se puede observar en la figura 47 donde en puntos cercanos al fondo se observa desplazamiento hacia los valores negativos, es decir a la salida, y en la superficie una recirculación. El punto de mayor velocidad está sobre una profundidad de los 7.5 m como también se puede corroborar en la figura 49. Esto se debe al flujo entrante a la ciénaga que sale del caño y encuentra un diferencial de altura entre el caño y el cuerpo principal.

La figura 50 permite tener mayor claridad respecto a lo mencionado anteriormente.

Figura 47: Perfiles de velocidad en X en el punto de monitoreo a la salida del caño Camelias

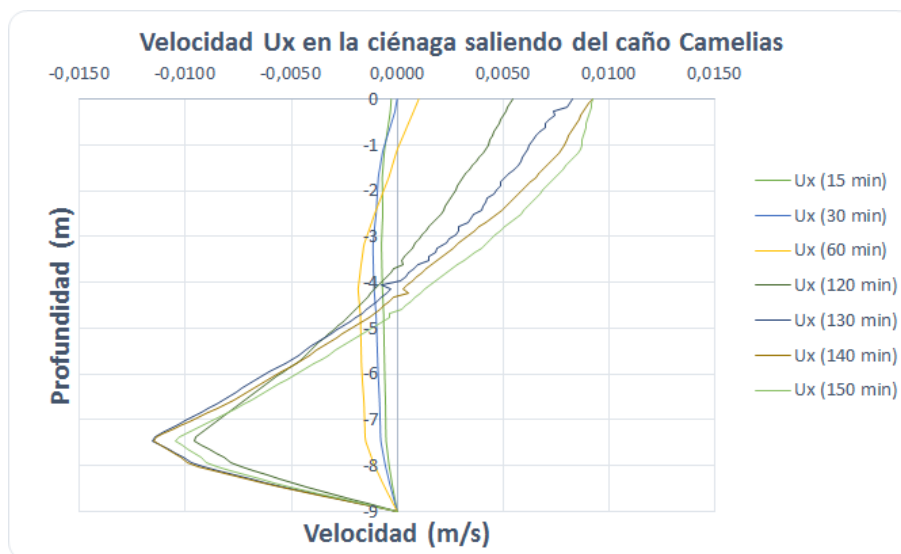
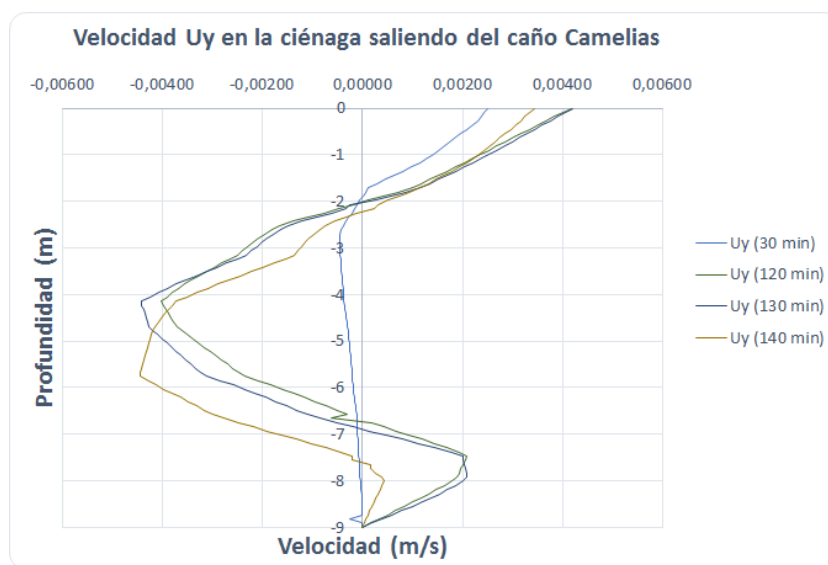
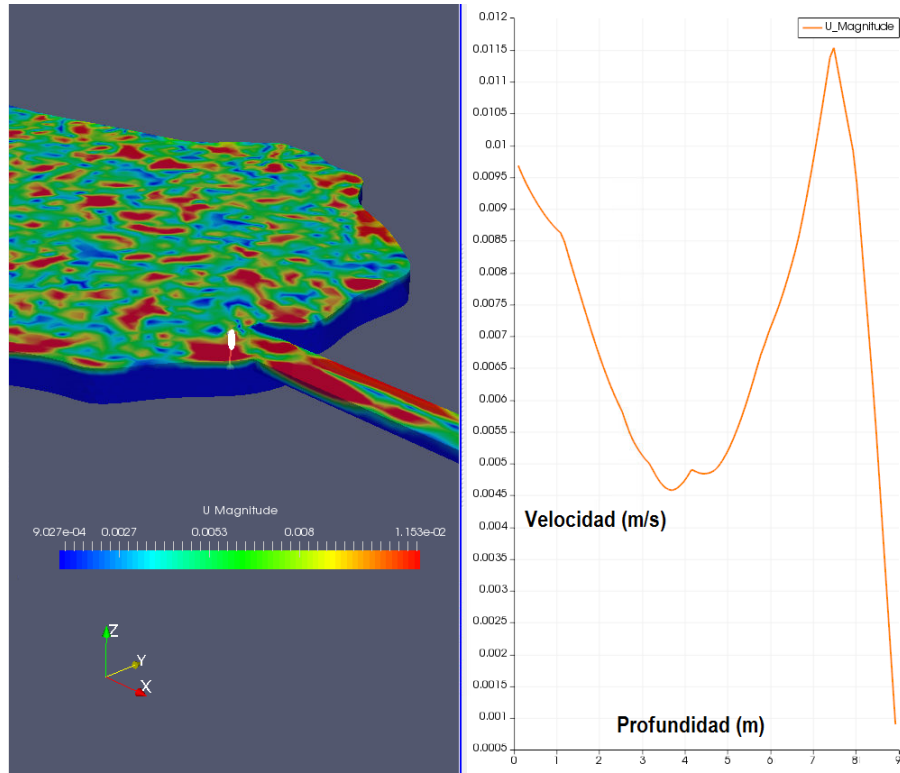


Figura 48: Perfiles de velocidad en Y en el punto de monitoreo a la salida del caño Camelias



Se evidencia cómo las líneas de corrientes toman primero posición en el fondo de la ciénaga para posteriormente dividirse unas hacia la superficie y otras para circular al interior.

Figura 49: Magnitud de la velocidad saliendo del caño Camelias $t=140$ min. Imagen tomada del Paraview



■ Caño Las Lavanderas

En el caso del caño Las Lavanderas se tiene un valor de velocidad del fluido a la entrada que corresponde a 0.0008 m/s.

Se aplica el mismo procedimiento que el caño Camelias. Se monitorea el flujo en un punto a la salida del caño Las Lavanderas y a su vez al interior de la ciénaga para verificar la magnitud de la velocidad. Se construyen los perfiles que se producen en ese punto a medida que transcurre el tiempo y así determinar un tiempo aproximado de velocidad constante.

Para cumplir con ello, se obtiene mediante la información del *Paraview*, los valores de velocidad en cada punto a lo largo de la profundidad de la ciénaga, figuras 52 y 53.

Similar al caso del caño Las Camelias, en este punto de la ciénaga se ve que el perfil de velocidad en x muestra una tendencia similar después de los 120 mi-

Figura 50: Líneas de corriente entre el caño Camelias y la ciénaga

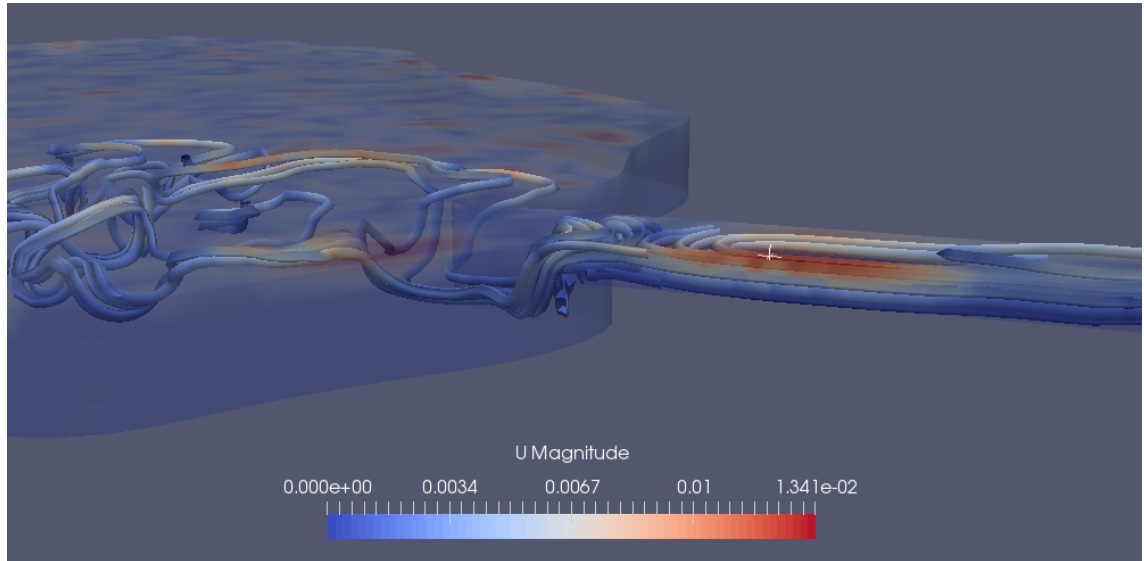
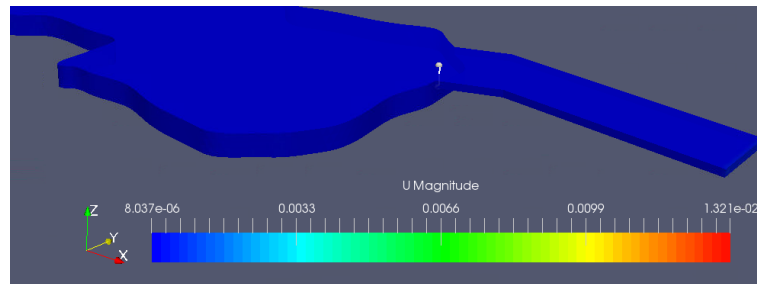


Figura 51: Imagen de punto de medición saliendo por caño Las Lavanderas



nutos de tiempo.

En el caso de los perfiles en y la tendencia es más clara después de los 170 minutos. Como ya se ha podido determinar un tiempo de referencia con patrones de velocidad similares, se puede entonces buscar la magnitud de la velocidad en ese punto a un tiempo de 170 minutos, figura 54.

Gráficamente lo que se puede observar es que para que una partícula sea transportada a la salida o caño Rosario debe tener una componente en x negativa. Sin embargo la combinación de la velocidad en los 3 ejes es lo que efectivamente realiza el transporte de partículas a lo largo de la ciénaga desde las dos princi-

Figura 52: Perfiles de velocidad U_x en la Ciénaga después del caño Las Lavanderas

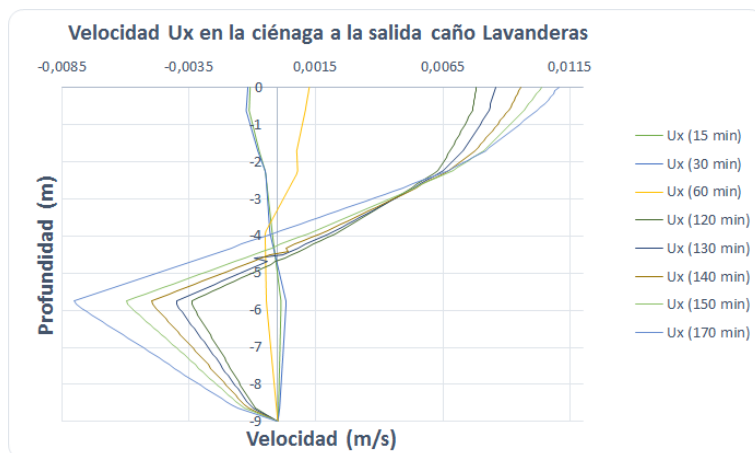
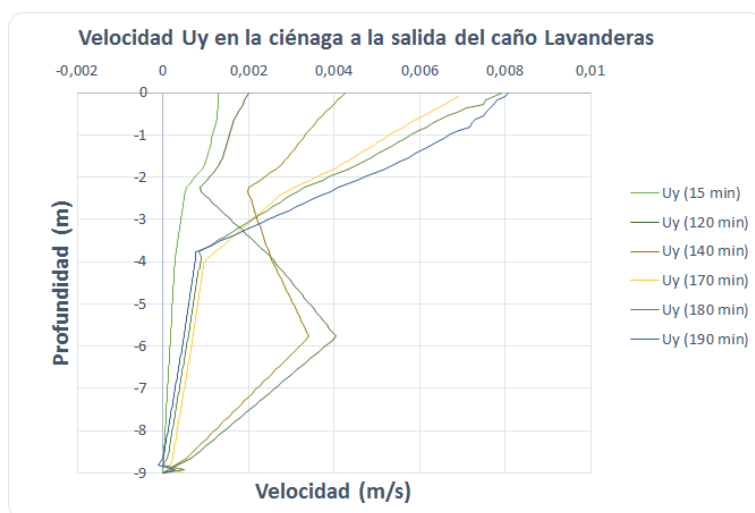
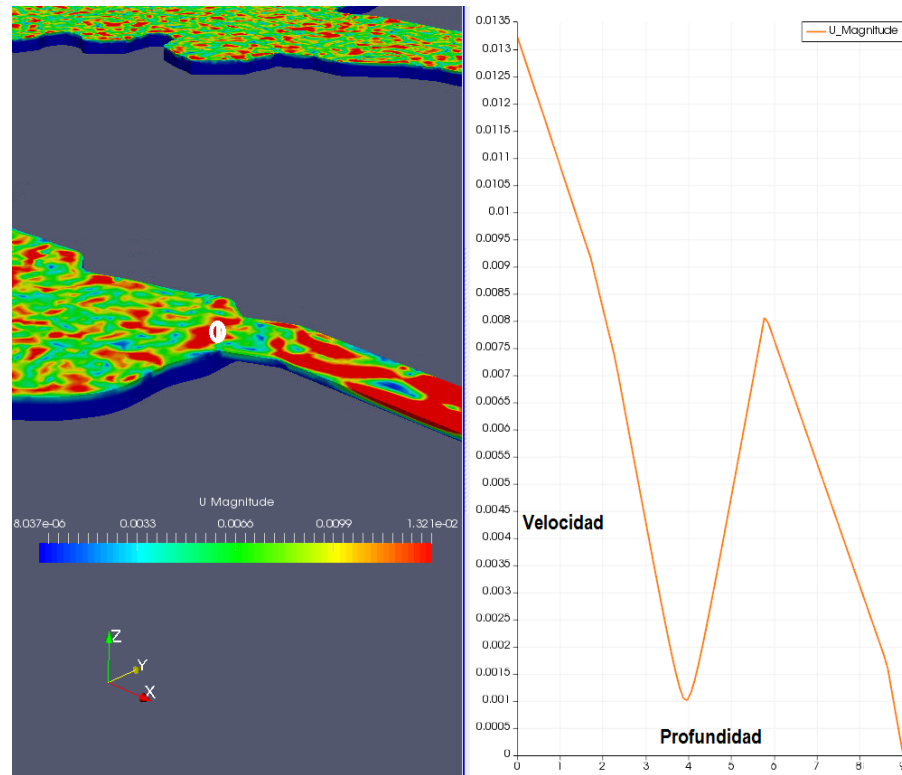


Figura 53: Perfiles de velocidad U_y en la Ciénaga después del caño Las Lavanderas



pales entradas. Más adelante se analizará la combinación de esta velocidad y se encontraran unos perfiles aproximados. La figura 55 muestra la combinación de la velocidad en los 3 ejes y se evidencia que en algunos momentos debido al paso del escalón existen al principio puntos de recirculación.

Figura 54: Magnitud de la velocidad saliendo del caño Lavanderas $t=170$ min. Imagen tomada del Paraview

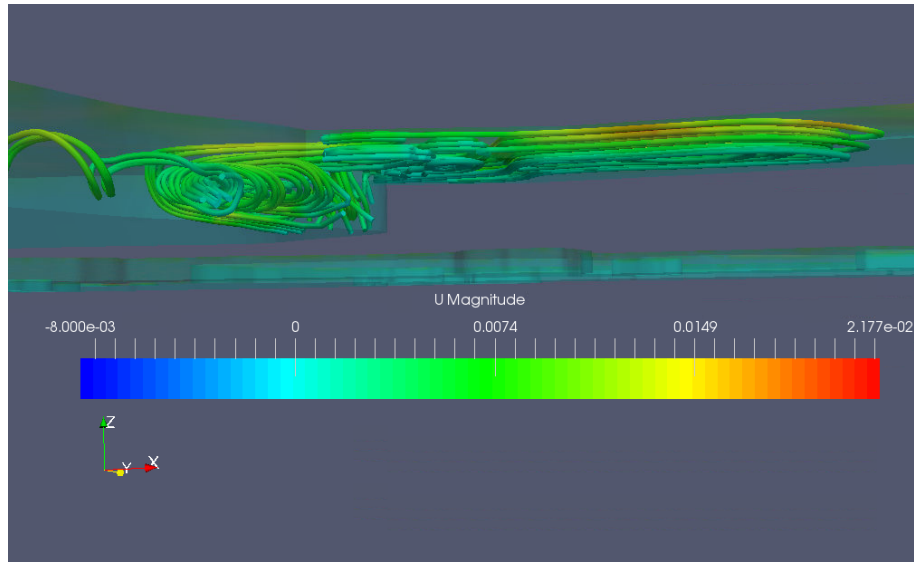


7.4.2. Zonas de mezcla por la velocidad

Al igual como se hizo referencia en la sección 4.3, es posible evidenciar pequeñas zonas en donde la velocidad produce mayores impactos sobre el cuerpo de agua principal. Para el caso de estudio de este proyecto se determinó, según estudios del Instituto Colombiano de Petróleo (ICP), que la velocidad en el caño Las Camelias es de $0,001766 \text{ m/s}$ y en el caño Las Lavanderas de $0,0008 \text{ m/s}$. Estas velocidades son bajas en comparación con las velocidades presentadas en las condiciones de frontera de la sección 4.2 en la aproximación de la solución.

En el caso de la zona producida por el flujo entrante del caño Las Lavanderas, figura 56, se observa que el mayor impacto se produce hacia la parte inferior o viendolo desde la entrada hacia la izquierda. Cuando hay partículas que son arrastradas por la velocidad y se ubican en el área verde, posteriormente son depositadas en el interior de la ciénaga cuando el flujo de entrada pierde velocidad o cuando esta

Figura 55: Líneas de corriente entre el caño Las Lavanderas y la ciénaga. Imagen tomada del Paraview



partícula pasa a áreas de color azul. Este es una de las concurrencias por las cuales se forma la sedimentación de los cuerpos de agua. En este caso la zona de influencia alcanza unos 59 metros aproximadamente de longitud al interior de la ciénaga.

En el caso del caño Las Camelias, figura 57, la zona de influencia es más frontal debido a que la velocidad del flujo en este caño es superior en comparación con el caño Lavanderas. Para este caño la zona de influencia alcanza los 32 metros aproximadamente.

Finalmente, a la entrada del caño Rosario, figura 58, el flujo debe concentrarse para pasar de una zona amplia, como lo es el cuerpo principal, a una zona angosta. Es decir, en un punto la velocidad al interior de la ciénaga se incrementa y es allí donde se producen el transporte de partículas hacia el caño Rosario. Acá la zona de influencia alcanza unos 27 metros de radio aproximadamente al interior de la ciénaga.

El determinar y limitar estas zonas toma vital importancia, ya que de esta manera cuando se determinan dichas áreas, se pueden implementar estrategias de mitigación o de control a las salidas de los caños y a la entrada del Rosario para

Figura 56: Zona de influencia en el caño Las Lavanderas

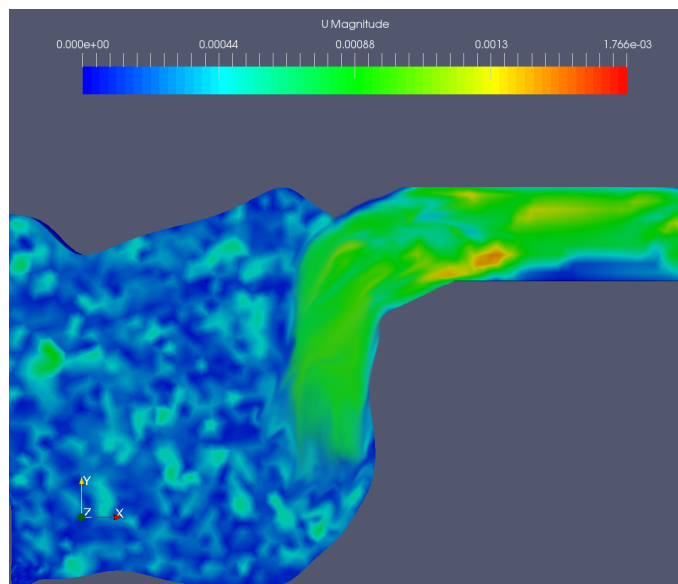
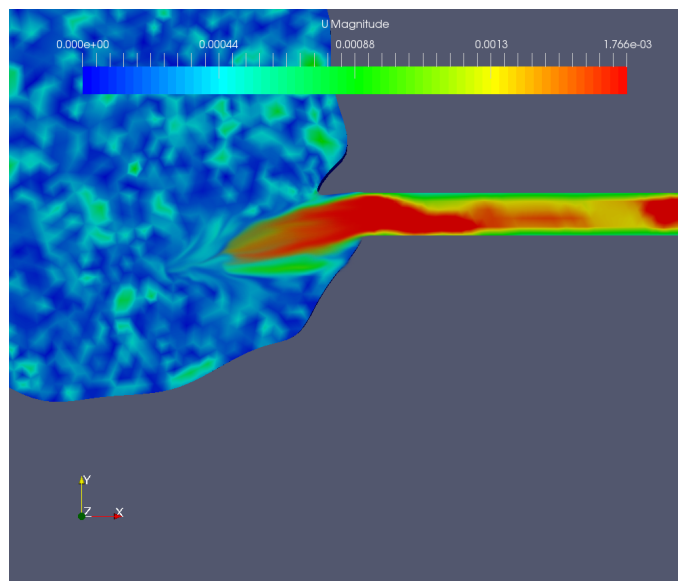
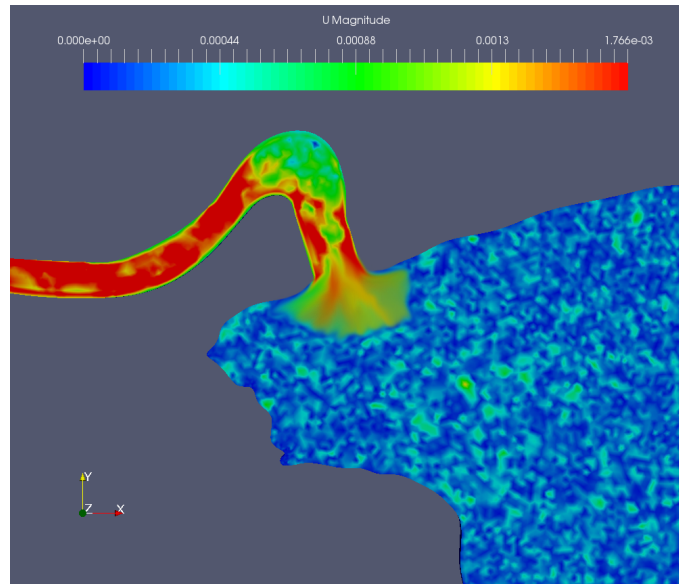


Figura 57: Zona de influencia en el caño Las Camelias



evitar daños importantes en el ecosistema del cuerpo de agua y sus alrededores.

Figura 58: Zona de influencia en el caño Rosario



7.4.3. Velocidad de trayecto

Uno de los detalles importantes a conocer es determinar la velocidad aproximada con la que una partícula podría atravesar la ciénaga si fuera transportada por el flujo de agua a lo largo y ancho de la ciénaga y directamente a la salida. Para encontrar un valor aproximado se tomaron mediciones de la velocidad en la profundidad de la ciénaga en diferentes puntos de la trayectoria. De esta manera se puede crear un perfil de velocidad aproximado de la trayectoria desde el caño Camelias o Lavanderas hasta el caño Rosario.

- **Trayectoria Caño Camelias - Caño Rosario:** Los más de aproximadamente 2000 metros de distancia que separan los caños fueron divididos en 6 tramos. En cada uno de ellos se tomaron las medidas de la velocidad en toda la profundidad de la ciénaga. Posteriormente con la medición de la velocidad en todos los puntos se calcula la velocidad total y sobre esta se hará el cálculo de un valor promedio y de allí el cálculo del perfil de velocidad.
- **Trayectoria Caño Lavanderas - Caño Rosario:** En este tramo el trayecto es de aproximadamente 1600 metros y de la misma manera que el proceso anterior se dividió en 6 tramos.

Figura 59: Trayectoria desde el caño Camelias a la salida

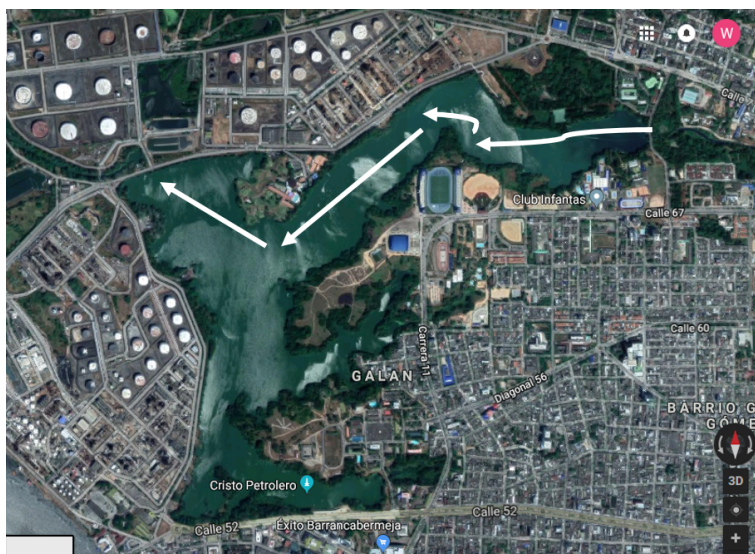


Tabla 8: Valores de velocidad y calculo del promedio total a lo largo del trayecto entre caño Camelias y Rosario

Vel. P1 (m/s)	Vel. P2 (m/s)	Vel. P3 (m/s)	Vel. P4 (m/s)	Vel. P5 (m/s)	Vel. P6 (m/s)	Vel. Prom (m/s)	Profundidad (m)
0,0069	0,0029	0,0046	0,0011	0,0044	0,0097	0,0049	0,0
0,0058	0,0030	0,0045	0,0009	0,0034	0,0089	0,0044	-1,0
0,0056	0,0021	0,0042	0,0011	0,0023	0,0076	0,0038	-2,0
0,0073	0,0015	0,0034	0,0021	0,0019	0,0062	0,0037	-3,0
0,0082	0,0012	0,0029	0,0034	0,0013	0,0049	0,0037	-4,0
0,0075	0,0013	0,0029	0,0034	0,0027	0,0043	0,0037	-5,0
0,0078	0,0019	0,0026	0,0031	0,0042	0,0061	0,0043	-6,0
0,0091	0,0007	0,0019	0,0028	0,0047	0,0054	0,0041	-7,0
0,0078	0,0024	0,0009	0,0018	0,0025	0,0047	0,0033	-8,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-9,0

Gracias a cada uno de los perfiles de velocidad obtenidos para los tramos Camelias - Rosario y Lavanderas - Rosario se puede calcular unos perfiles de tiempo de trayecto y poder determinar cuanto tardaría una partícula en cruzar la ciénaga si fuera el caso en función de su profundidad. Por supuesto como se esperaría a medida que la curva de velocidad se aproxima a -9 el valor de tiempo tiende a infinito ya que en la profundidad de la ciénaga el movimiento de una partícula es muy lento o nulo. Este efecto se evidencia en los problemas de sedimentación que tienen los diferentes cuerpos de agua.

Con la información brindada en las figuras 63 y 64 se podría determinar, junto con la información de zona de influencia, sobre los lugares más críticos y la profundidad

Figura 60: Perfil de velocidad promedio entre el caño Camelias y el caño Rosario

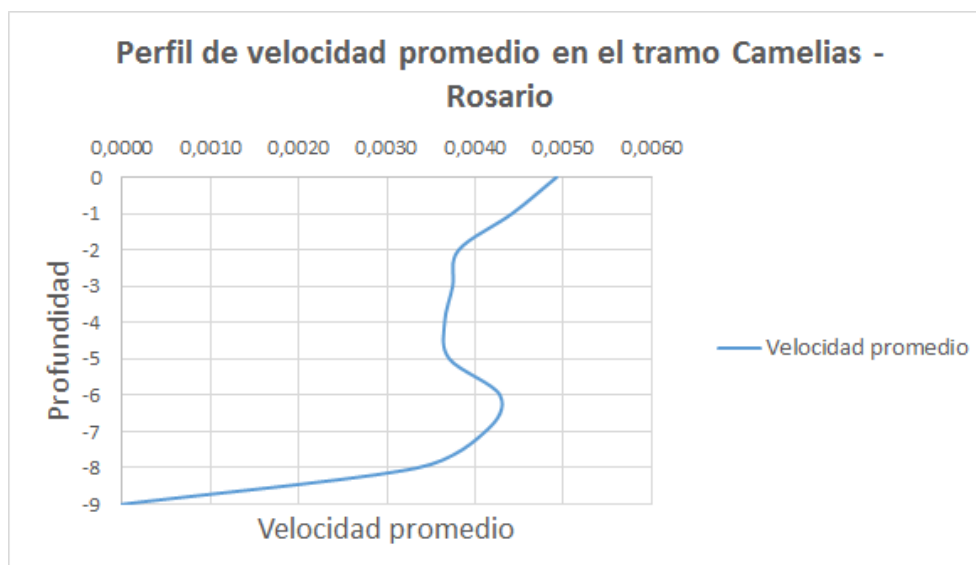
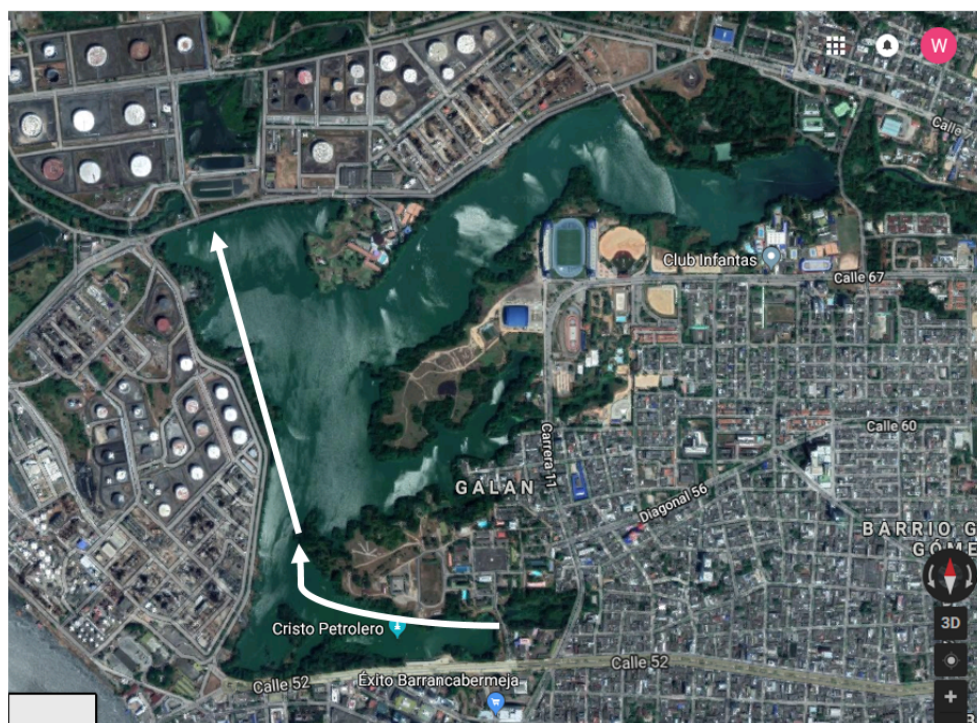


Figura 61: Trayectoria desde el caño Lavanderas a la salida

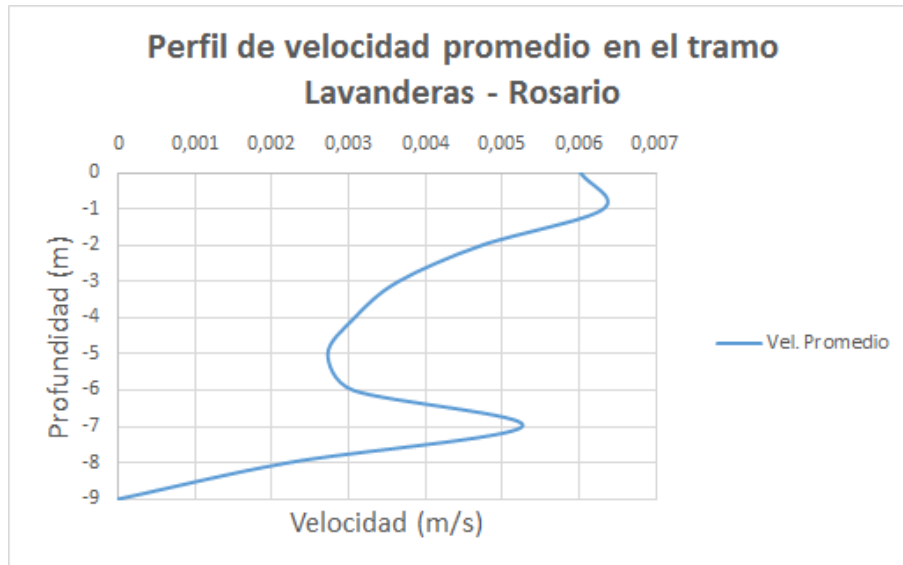


en la cual se pueden producir los efectos más importantes sobre la ciénaga.

Tabla 9: Valores de velocidad y calculo del promedio total a lo largo del trayecto entre caño Lavanderas y Rosario

Vel. P1 (m/s)	Vel. P2 (m/s)	Vel. P3 (m/s)	Vel. P4 (m/s)	Vel. P5 (m/s)	Vel. P6 (m/s)	Vel. Prom (m/s)	Profundidad (m)
0,00806	0,00587	0,00344	0,00527	0,00381	0,00965	0,00601	0
0,00753	0,01224	0,00301	0,00409	0,00212	0,00888	0,00631	-1,0
0,00665	0,00384	0,00301	0,00324	0,00402	0,00763	0,00473	-2,0
0,00500	0,00253	0,00365	0,00267	0,00176	0,00624	0,00364	-3,0
0,00384	0,00156	0,00401	0,00227	0,00189	0,00485	0,00307	-4,0
0,00417	0,00158	0,00302	0,00184	0,00237	0,00335	0,00272	-5,0
0,00535	0,00204	0,00102	0,00134	0,00249	0,00607	0,00305	-6,0
0,00374	0,00210	0,00691	0,00870	0,00165	0,00844	0,00525	-7,0
0,00213	0,00102	0,00036	0,00422	0,00080	0,00468	0,00220	-8,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-9,0

Figura 62: Perfil de velocidad promedio entre el caño Lavanderas y el caño Rosario



7.4.4. Perfiles de Temperatura

Como se ha de recordar, en la sección 4.3 y gráfica 38 se propuso una curva que represente los cambios en la temperatura ambiente. Hasta el momento la información que se ha usado en este proyecto está alrededor de los 170 minutos que es aproximadamente unas 3 horas.

En ese tiempo de 3 horas la temperatura ambiente está entre 298 K (25°C) y 297 K (24°C) la cuál es una temperatura levemente inferior a las temperaturas propuestas en las entradas de los caños. En este caso lo que se debería observar es una pérdida de energía en el cuerpo de agua y dicha energía es transferida al ambiente.

Figura 63: Perfil de tiempo para el trayecto Camelias - Rosario

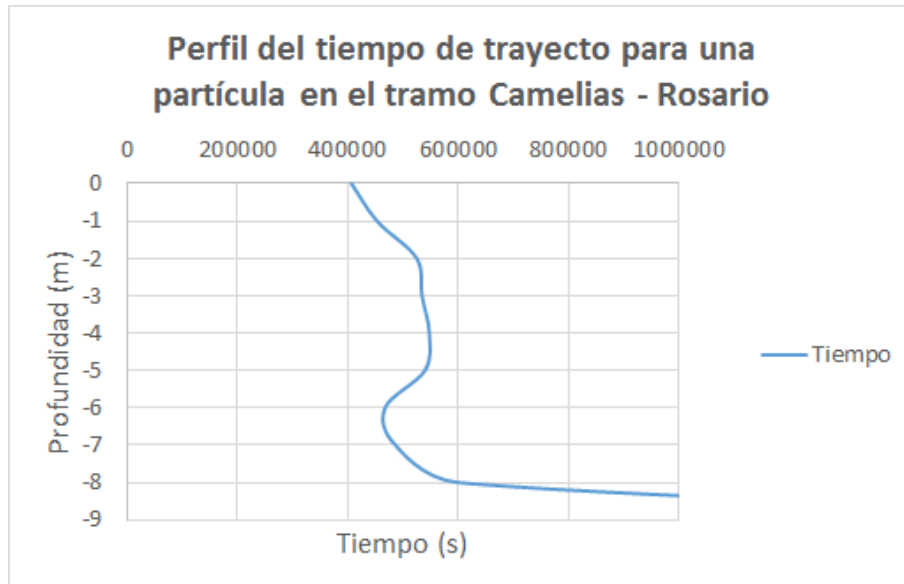
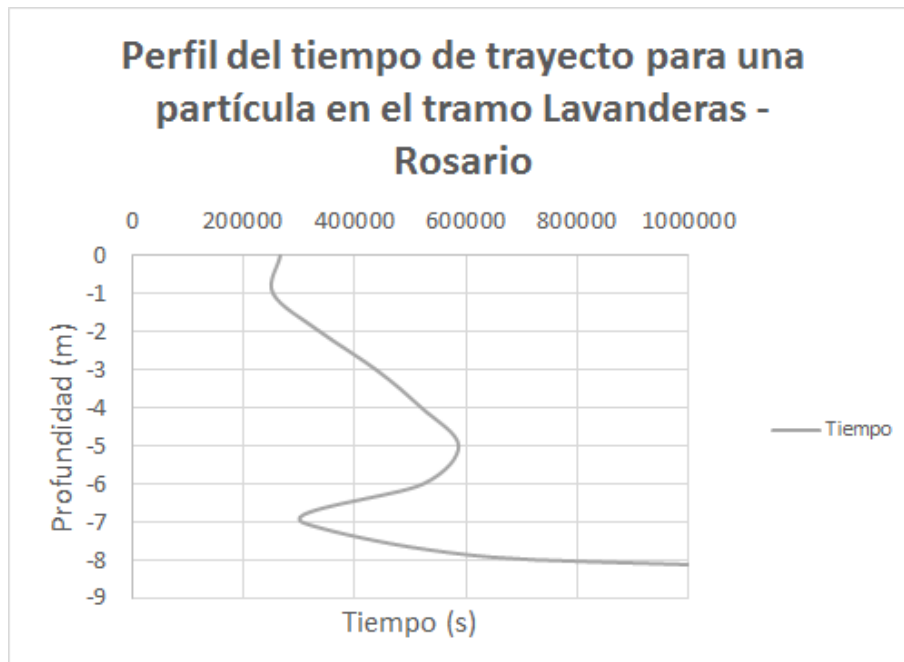


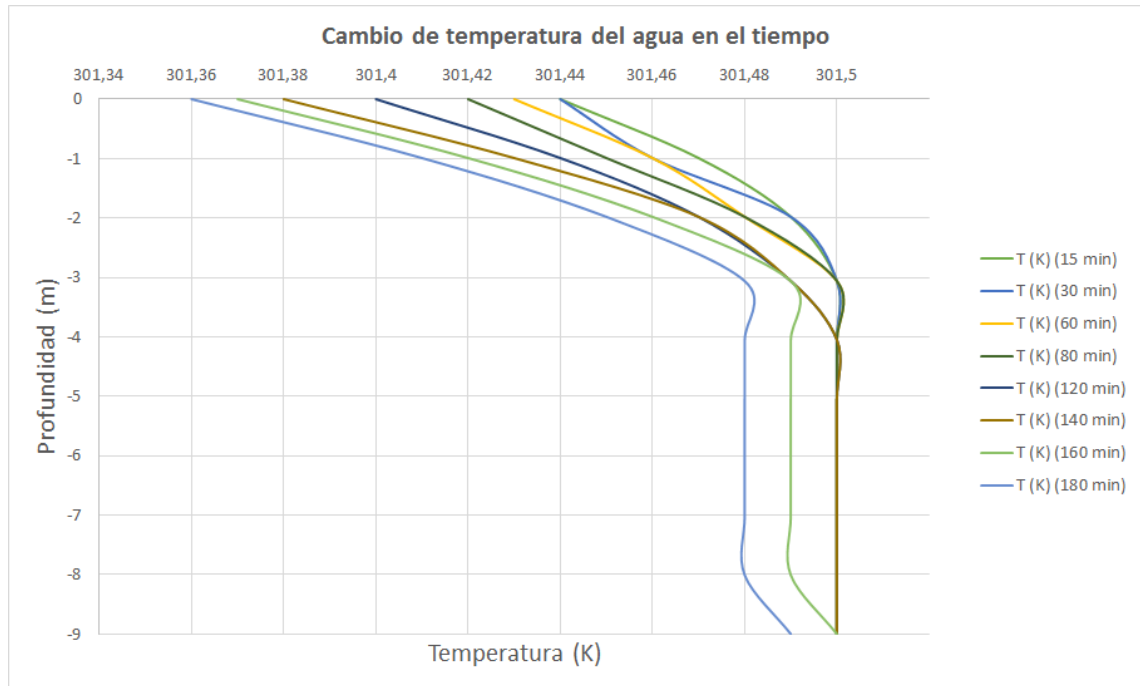
Figura 64: Perfil de tiempo para el trayecto Lavanderas - Rosario



- Punto intermedio de la ciénaga

Para corroborar lo anteriormente dicho, se puede medir en el centro de la ciénaga la diferencia entre la temperatura en la superficie y el fondo en el transcurso del tiempo. Esto se observa en la figura 65.

Figura 65: Cambio de la temperatura al interior de la ciénaga a través del tiempo



Se puede observar que efectivamente la temperatura del cuerpo principal está disminuyendo en el transcurso del tiempo. Sin embargo, como las temperaturas son tan cercanas que durante las 3 primeras horas, la diferencia entre la superficie y el fondo es de alrededor de $0,2^{\circ}\text{C}$.

■ Caño Camelias - Ciénaga

Uno de los mayores impactos que se genera en los cuerpos principales, como se ha mencionado anteriormente, son los cambios bruscos de temperatura producidos por flujos entrantes y que se refleja en los cambios de la DO en el ecosistema del cuerpo de agua. En esta caso se observa mediante la figura 66 que efectivamente en el transcurso de las 3 horas mostradas la temperatura al interior de la ciénaga va disminuyendo y su superficie se va estabilizando. Sin embargo, el diferencial que se muestra oscila sólo entre un $0,1^{\circ}\text{C}$ y $0,2^{\circ}\text{C}$.

- **Caño Lavanderas - Ciénaga** Al igual que en el punto anterior realiza el análisis del cambio de la temperatura por efecto de la afluente producida por el caño Lavanderas durante las 3 primeras horas. En el caso del caño Lavanderas el fondo permanece más tiempo conservando su temperatura.

- **Ciénaga - Caño Rosario**

Finalmente se realiza un análisis de los efectos de la temperatura que va con el flujo desde la ciénaga hasta el interior del caño Rosario. En este punto también se observa como la temperatura en el caño va disminuyendo rápidamente, principalmente, porque su profundidad es menor que la de la ciénaga. Posteriormente a medida que la temperatura del cuerpo principal cerca al caño va disminuyendo el flujo de agua que entra al Rosario se estabiliza en su temperatura.

Figura 66: Cambios de temperatura entre el caño Camelias y la entrada de la ciénaga Miramar

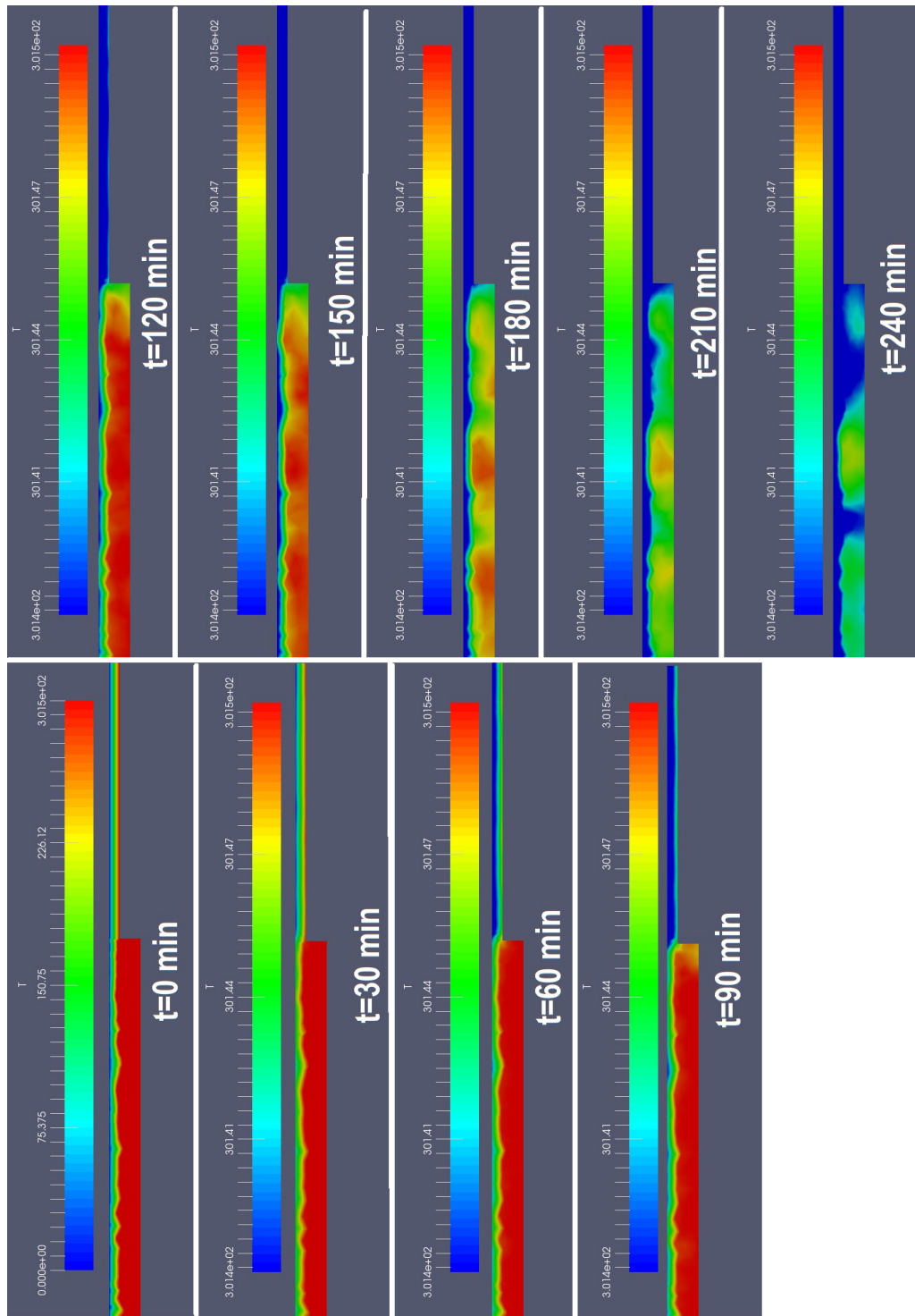


Figura 67: Cambios de temperatura entre el caño Lavanderas y la entrada de la ciénaga Miramar

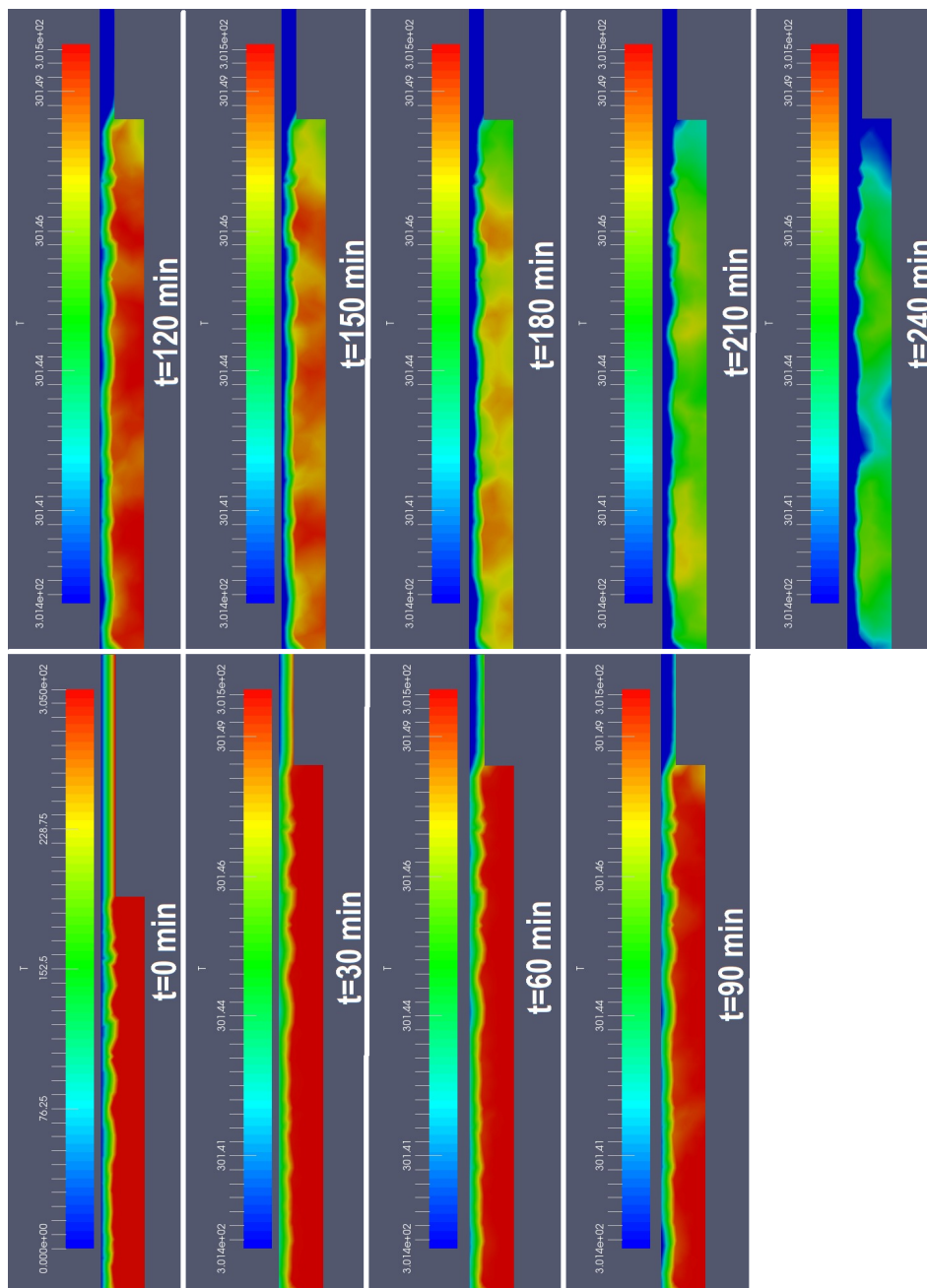
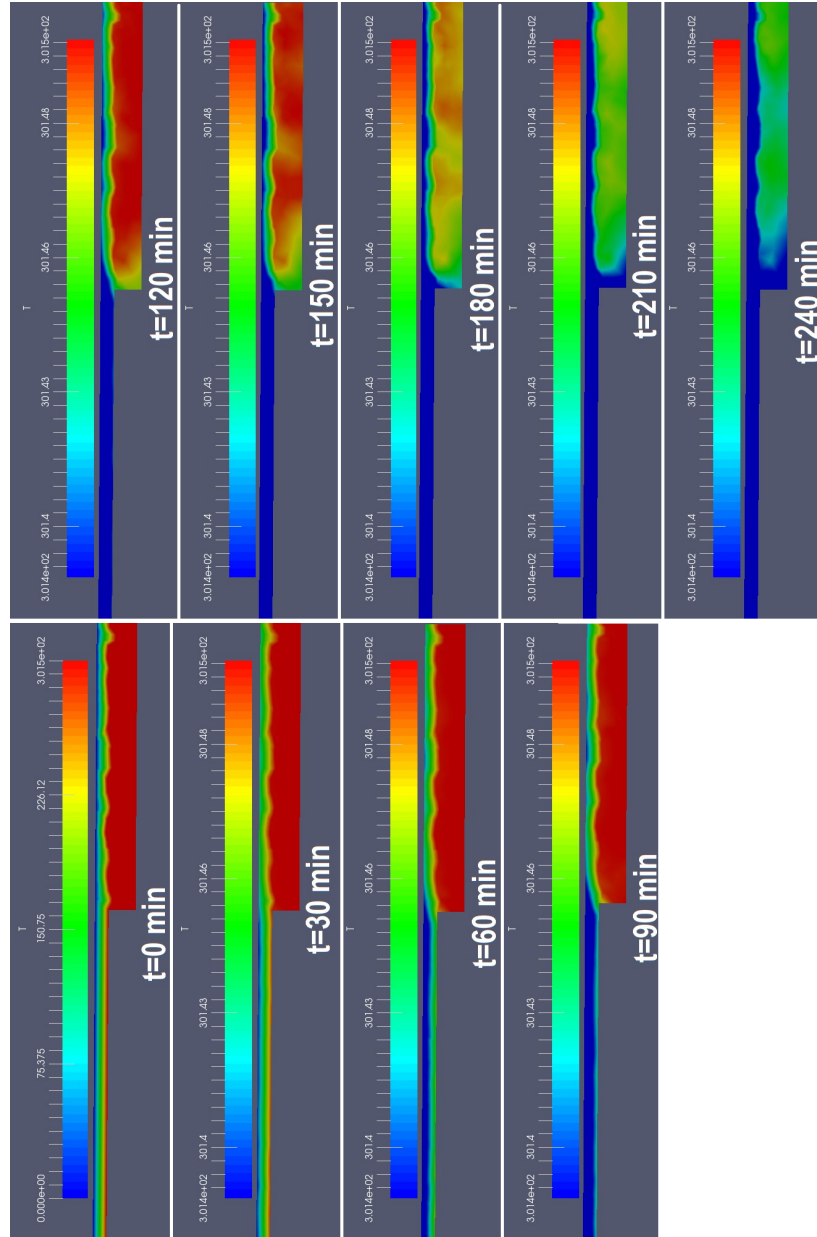


Figura 68: Cambios de temperatura desde la ciénaga al caño Rosario



8. CONCLUSIONES

- Se diseñó una estrategia para la solución del problema planteado. En la estrategia diseñada fue evidente la dependencia de la suavización de la frontera y el contorno de la ciénaga en el proceso de generación de la malla, con el fin de asegurar la posterior simulación y convergencia del campo de flujo.

Se evidenció que no existe una herramienta computacional única que permita realizar el preproceso, es decir, que lea la geometría en formato de gráfico y permita obtener una malla de forma directa, es necesario el uso de varias herramientas de diseño en 3D para completar el proceso.

El éxito en el proceso de mallado, y el posterior proceso de simulación, no depende sólo del cálculo del Courant; se requiere de un proceso iterativo para obtener el número de celdas que permita una convergencia de la solución.

- Se modeló y simuló el sistema compuesto por la ciénaga Miramar, caño Rosario, caño Lavanderas y caño Camelias en 3D considerando el estado transitorio e incluyendo los efectos de las condiciones ambientales, intercambio de energía y viento sobre la superficie de los mismos. Para las condiciones establecidas, el tiempo en que alcanza el estado estable es de tres horas aproximadamente.

Los efectos del viento y el intercambio de energía entre el cuerpo de agua y el ambiente, son de carácter predominantemente superficial para las condiciones presentadas en el proyecto, se observa una influencia de aproximadamente 3 metros de profundidad sobre la ciénaga.

Se evidenció que la mayor influencia de los flujos de entrada a la ciénaga se da a pocos metros de los influjos, donde se visualizan las posibilidades de separación de la sedimentación arrastrada. Se puede concluir que en las zonas alejadas a las entradas, ocurrirá un transporte difusivo de sedimentos, contaminantes, debido a las bajas velocidades observadas.

- En general, el método empleado es robusto, y dentro de unos parámetros de malla y deltas de tiempo que se deben respetar, asegurará el cálculo de problemas similares, obteniéndose resultados que pueden considerarse como "detallados". Sin embargo, desde el punto de vista del tiempo requerido para la simulación se deberían plantear otras estrategias de cálculo más eficientes si sólo es deseable obtener el campo de flujo. El método empleado se recomienda en el caso de mo-

delar otros impactos sobre el cuerpo de agua como, por ejemplo, los efectos de la sedimentación, reacciones químicas y biológicas donde se desee una distribución detallada de las concentraciones de contaminantes, entre otros.

- Con la simulación del modelo se pudo observar que los mayores impactos producidos por la hidráulica de las descargas a velocidades de 0,001766 m/s en las Camelias y de 0,0008 m/s en las Lavanderas, son muy cerca de las entradas. De la misma manera en el caño Rosario con una velocidad 0,002131 m/s, la zona de influencia y de impacto es muy cerca a la salida. En el centro de la ciénaga las velocidades del flujo se mantienen más bajas que en las entradas si se considera la dispersión del flujo como un proceso predominantemente difusivo.
- El proceso de cálculo fue uno de los que más tiempo requirió. Para el cálculo realizado con 2.262.205 volúmenes tardó 45 días para calcular las tres primeras horas del modelo. Cuando se realizó el proceso de calculo con la malla de 4.405.266 volúmenes se tardó alrededor de 60 días en calcular las tres primeras horas del modelo. Esto muestra el costo computacional que se requiere para este tipo de proyectos.

9. TRABAJOS FUTUROS Y RECOMENDACIONES

- Se recomienda para trabajos futuros realizar un modelo con periodos de temperatura para la ciénaga que sean medidos *insitu* y así aportar datos más precisos a la solución planteada en este proyecto.
- Esta herramienta de modelado sólo ofrece una solución sobre la dinámica y los cambios de temperatura sobre el cuerpo de agua. Sin embargo puede ser una base importante para soluciones numéricas más complejas. Se espera que este proyecto pueda ser continuado mediante la adición de modelos para el análisis de las especies químicas y biológicas, reacciones y el efecto de sedimentación sobre el cuerpo de agua.
- Se propone realizar una comparativa de la solución propuesta en este proyecto con un modelo comercial de aguas superficiales en las cuales se puede realizar la parametrización promedio en toda la profundidad de la ciénaga.
- En este caso sólo se usaron dos entradas de flujo principales sobre el cuerpo de la ciénaga. Sin embargo, es posible ajustar la geometría para que tuviera más o menos entradas conforme se requiera y según cambios de orden territorial alrededor de la ciénaga. Por lo tanto se propone hacer un análisis *insitu* de la actualidad respecto a la cantidad de entradas o salidas que existen alrededor de la ciénaga y complementar la solución de este proyecto.
- Se propone una solución para el costo computacional requerido y el uso de herramientas computacionales más optimas para este tipo de modelos. Debido a la cantidad de celdas que se producen y la complejidad de esta geometría; los requerimientos computacionales fueron bastante altos y tardaba mucho tiempo en solucionar el modelo.
- Se propone para trabajos futuros hacer un análisis de puntos críticos y zonas de influencia para casos ambientales extremos como por ejemplo temporadas de invierno o sequías.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABBASI, Ali., ANNOR, F. O., VAN DE GIESEN, Nick. *Investigation of temperature dynamics in small and shallow reservoirs, case study: Lake Binaba, upper east region of Ghana* MDPI Journal Water, Vol 8, No. 84, 2016.
- [2] Anónimo, 2013. <https://aproxan.wordpress.com/>. Fecha de consulta: Noviembre 2015.
- [3] APARICIO MIJARES, Francisco Javier. *Fundamentos de hidrología de superficie*. Editorial Limusa S.A., Primera edición. Mexico. 1989.
- [4] BEDRI, Zeinab., BRUEN, Michael., DOWLEY, Aodh., MASTERSON, Bartholomew. *Environmental consequences of a power plant shut-down: A three-dimensional water quality model of Dublin Bay*. Marine Pollution Bulletin. 2013.
- [5] CARDEÑOSA, M. M., ORDUZ, P. J., OSPINA, V. H. *Informe de Metodología y Trabajo de Campo del Levantamiento de la Información Topográfica con GPS de Precisión de la Ciénaga Miramar* Informes técnicos, CTP, Octubre 2013.
- [6] CHENG, You-liang., HAO, Quing-zhe., LIU, Li-li. *The Effect of Velocity and Outlet Angle of the Thermal Discharge on Its Diffusion with Basic Flow in Power Plant* Procedia Environmental Science, No. 11, 2011.
- [7] DAVIDSON, Lars. *Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling*. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY., Goteborg, Sweden. 2015.
- [8] DIAZ, Beatriz. *Modelación de la calidad del agua en el interceptor río Bogotá en los tramos Fucha - Tunjuelo - Canoas* Proyecto de grado. Magíster en Ingeniería Civil. 2004.
- [9] EDINGER, J. E., BRADY, D. K. *Heat exchange and transport in the environment* Report 14, pp. 8-16., Research Institute, 1974.
- [10] ENTESAR, El-Ghorab. *Physical model to investigate the effect of the thermal discharge on the mixing zone (Case Study: North Giza Power Plant, Egypt)*. Alexandria Engineering Journal. 2013.

- [11] FERNANDEZ ORO, Jesús Manuel. *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*. Editorial Reverté S.A., Barcelona. 2011.
- [12] GARCÍA, Hermes. *Modelación de la calidad del agua en corrientes naturales mediante sistemas no lineales acoplados*. Pontificia Universidad Javeriana. Julio de 2008.
- [13] Grupo de Actividad en Sistemas Dinámicos. *Un poco de historia en análisis numérico* <https://cosiam.konradlorenz.edu.co/2015/12/un-poco-de-historia-en-análisis-numérico.html>, 2015.
- [14] GURRAM, S. K., KARKI, K. S., HAGER, W. H. *Subcritical Junction Flow* Journal of Hydraulic Engineering, Vol 123, No. 5, 1997.
- [15] HERNANDEZ, Oscar Eduardo. *Development of a highly resolved 3-D computational model for applications in water quality and ecosystems* Iowa Research Online. 2014.
- [16] JIN, Kang-Ren., HAMRICK, John H., TISDALE, Todd. *Application of three-Dimensional hydrodynamic model for lake Okeechobee* Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 126, No. 10, October, 2000.
- [17] LABATUT, Rodrigo., EBELING, James., BHASKARAN, Rajesh., TIMMONS, Michael *Exploring flow discharge strategies of a mixed-cell raceway (MCR) using 2-D computational fluid dynamics (CFD)* Aquacultural Engineering, No. 66, 2015.
- [18] NGUYEN, Van Thinh. *3D numerical simulation of free surface flows over hydraulic structures in natural channels and rivers* Applied Mathematical Modelling. 2015.
- [19] PARVEEN, N., ABBASI, T., ARYA, A. *A Modelling Framework For Simulating River And Stream Water Quality*. International Journal of Advance Research in Science and Engineering, Vol 07, No. 01, February, 2018.
- [20] PASIOK, R., STILGER-SZYDLO, E. *Sediment particles and turbulent flow simulation around bridge piers* Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2010.
- [21] *Plan de Desarrollo Barrancabermeja*. Consulte en: [https://www.barrancabermeja.gov.co/institucional/Nuestros Planes/Plan de Desarrollo.pdf](https://www.barrancabermeja.gov.co/institucional/Nuestros_Planes/Plan_de_Developmento.pdf). Año de consulta: 2015.

- [22] PODGORNIK, Rudolf. *Turbulence Models in CFD*. University of Ljbljana., Slovene. 2007.
- [23] QUAMRUL AHSAN, A., BLUMBERG, Alan. *Three-Dimensional hydrothermal model New York of Onondga Lake* Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125, No. 9, September, 1999.
- [24] SANCHEZ, Oscar *Ecosistemas acuáticos: Diversidad, procesos, problemática y conservación* Consulte en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/533/ecosistemas.pdf>. Año de consulta: 2015.
- [25] THE AZIMUTH PROJECT. Última revisión: Abril 2015. *Fluid flows and infinite dimensional manifolds*. Disponible en: <http://www.azimuthproject.org/azimuth/show/Azimuth+Blog>.
- [26] United States Environmental Protection Agency, EPA *Water Quality Analysis Simulation Program* Consulte en: <http://www3.epa.gov/>. Año de consulta: 2015.
- [27] VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics* Editorial Longman Group Ltd., Londres. 1995.
- [28] WANG, Yushi. *Development of a numerical tool to predict hydrodynamics, temperature and TDG in hydropower flows* Iowa Research Online. 2013.
- [29] WEBER, Larry J., SCHUMATE, Eric D., MAWER, Nicola. *Experiments on Flow at a 90 Open-Channel Junction* Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 127, No. 5, Mayo, 2001.
- [30] WILCOX, David C. *Turbulence Modelling for CFD* DCW Industries, Inc., USA. 2010.
- [31] ZINKE, P., OLSEN, N.R.B., BOGEN, J. *Three-dimensional numerical modelling of levee depositions in a Scandinavian freshwater delta*. Geomorphology. 2011.

ANEXOS

A continuación se presenta información pertinente al proyecto y resultados del modelo. Por ejemplo, el estudio del caudal del modelo, se mostrará la gráfica de los residuals que se generaron al correr el modelo y los códigos en cada una de las fronteras para la solución de las ecuaciones del fluido y la ecuación de la energía.

Figura 69: Valores de caudal medido en el caño Rosario

FORMATO MEDICION DE CAUDAL POR MICROMOLINETE OTT C2 10.150'																														
SERVICIOS DE LABORATORIO Y PLANTAS PILOTO																														
CENTRO DE RECEPCION DE MUESTRAS																														
Version: 2																														
USI-GRM-F-034																														
Elaborado: 31/01/2011																														
EQUACIONES VELOCIDAD PROMEDIO (m)																														
HELICE N° 4																														
EQUACIONES																														
HELICE N° 6																														
EQUACIONES																														
n <= 0.290																														
v = 0.40497m+0.039																														
0.290 < n <= 0.85																														
v = 0.48317m+0.013																														
0.85 < n <= 4.93																														
v = 0.50727m+0.001																														
FECHA MONITOREO: 22 de Enero de 2014																														
LUGAR O PLANTA: GRB-Caño Rosario 20m Despues Vertedero																														
PUNTO DE MUESTREO: Caño Rosario 20m Despues Vertedero																														
EQUIPO: Micromolinet OTT C2 10.150																														
HELICE N°: 6																														
MEDICION (%Profundidad): 40%																														
Punto de muestreo	Base Total (m)	# De seccion	Distancia desde la corria al punto de muestreo (m)	Profundidad total del punto de muestreo (m)	Numero de Revoluciones medidor del rotor (rev)	Tiempo de medicion del rotor (s)	Ancho parcial medidor (m)	Altura del medidor a partir de profundidad (m)	Revoluciones promedio segun N° de rotor (rev)	Velocidad promedio (m/s)	Velocidad media (m/s)	Profundidad media (m)	Seccion parcial Area (m²)	Caudal Por Punto m³/s	Caudal (L/s)															
CAUDAL TOTAL (L/s):															136															
RESPONSABLES: YAHIR ORTIZJORGE BARBOSA																														
OBSERVACIONES:																														

Figura 70: Residuals en los cálculos del modelo de la ciénaga para $\Delta t = 0,05$

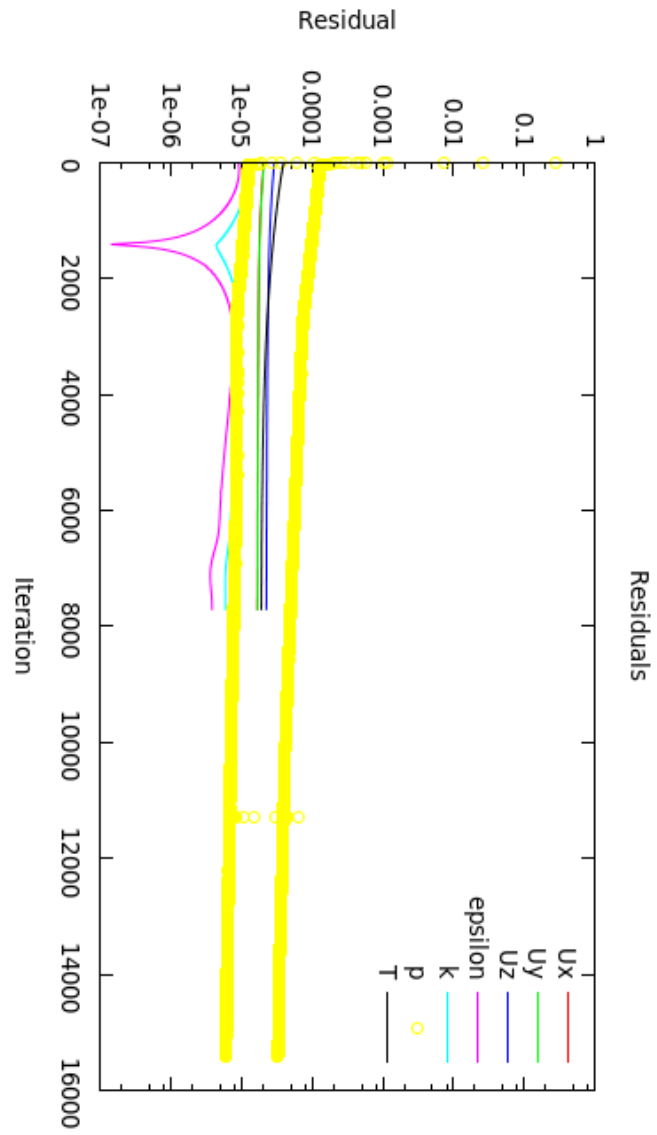


Figura 71: Residuals en los cálculos del modelo de la ciénaga para $\Delta t = 0,1$

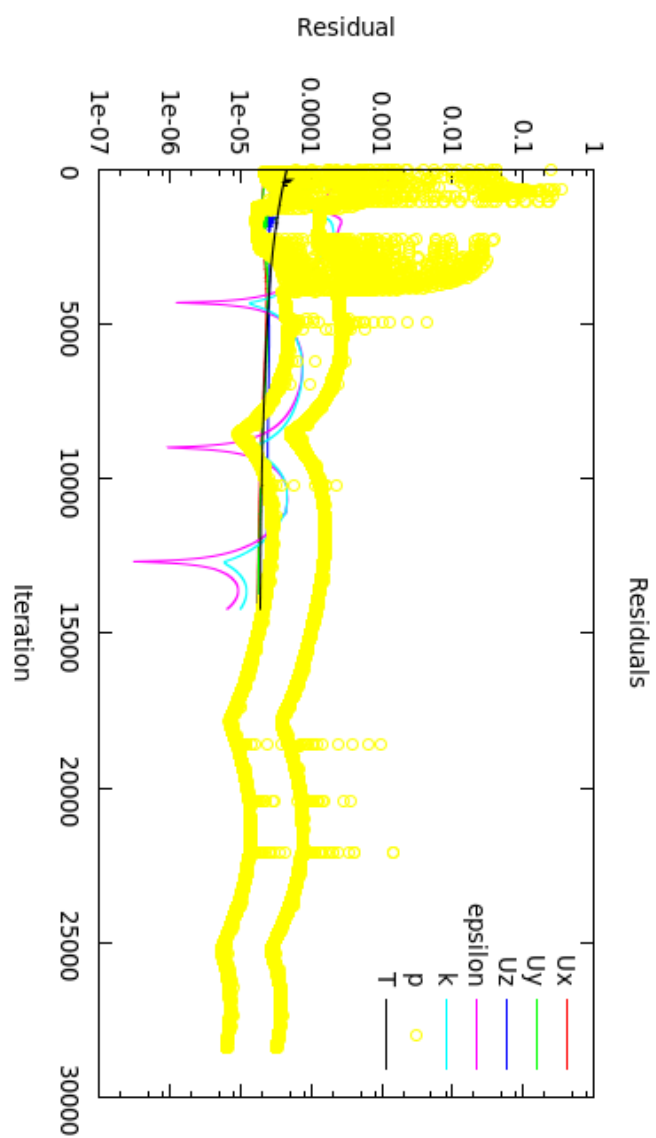


Figura 72: Configuración de la velocidad en las diferentes fronteras de la ciénaga

```

/*----- C+ -----*/
\=====
\\      /   F i e l d       OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\     /    O p e r a t i o n   Version:  3.0.1
\\    /    A n d                Web:      www.OpenFOAM.org
\\   /    M a n i p u l a t i o n
\=====
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    object       U;
}
// *****

dimensions      [0 1 -1 0 0 0];

internalField    uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    Inlet1
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (-0.001766 0 0);
    }
    Inlet2
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (-0.0008 0 0);
    }
    Outlet
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue       uniform (0 0 0);
        value            uniform (0 0 0);
    }
    Fondo
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (0 0 0);
    }
    Superficie
    {
        type            slip;
    }
    Walls
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (0 0 0);
    }
}
// *****

```

Figura 73: Configuración de la temperatura en las diferentes fronteras de la ciénaga

```

/*----- C++ -----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       T;
}
// ***** //

dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
internalField   uniform 301.5;
boundaryField
{
    Inlet1
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 305;
    }

    Inlet2
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 300;
    }

    Outlet
    {
        type      zeroGradient;
    }

    Fondo
    {
        type      zeroGradient;
    }

    Superficie
    {
        type      groovyBC;

        variables "Uw=0.538;K=0.58;h=0.002261*(6.9+(0.345*pow(Uw,2)));Ta=0.000000182259*pow((time
()/3600),7)-0.00000272345*pow((time()/3600),6)+0.00014972*pow((time()/3600),5)-0.0035838*pow((time
()/3600),4)+0.0308667*pow((time()/3600),3)+0.0497518*pow((time()/3600),2)-0.923172*(time()/3600
)+298.6139;f=(h*mag(delta()))/(K-(h*mag(delta())));";
        valueExpression "Ta";
        fractionExpression "f";
        value      uniform 0;
    }

    Walls
    {
        type      zeroGradient;
    }
}
// ***** //

```


Figura 74: Configuración de la presión en las diferentes fronteras de la ciénaga

```

/*-----* C++ *-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       p_rgh;
}
// *****

dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField    uniform 0;
boundaryField
{
    Inlet1
    {
        type      zeroGradient;
    }
    Inlet2
    {
        type      zeroGradient;
    }
    Outlet
    {
        type      fixedValue;
        value      uniform 0;
    }
    Fondo
    {
        type      zeroGradient;
    }
    Superficie
    {
        type      zeroGradient;
    }
    Walls
    {
        type      zeroGradient;
    }
}
// *****

```

Figura 75: Configuración de la energía cinética turbulenta k en las diferentes fronteras de la ciénaga

```

/*----- C+ -----*/
=====
V      F i e l d       O p e r a t i o n   A n d   M a n i p u l a t i o n
=====
OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
Version: 3.0.1
Web: www.OpenFOAM.org
FoamFile
{
    version            2.0;
    format              ascii;
    class               volScalarField;
    location             "0";
    object              k;
}
// *****

dimensions          [0 2 -2 0 0 0];

internalField        uniform 2.281e-3;

boundaryField
{
    Inlet1
    {
        type            turbulentIntensityKineticEnergyInlet;
        intensity        0.1; // 10% turbulent intensity
        value             uniform 4.678e-8;
    }
    Inlet2
    {
        type            turbulentIntensityKineticEnergyInlet;
        intensity        0.1; // 10% turbulent intensity
        value             uniform 9.611e-9;
    }
    Outlet
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue        uniform 6.8117e-8;
        value             uniform 0;
    }
    Fondo
    {
        type            kqRWallFunction;
        value             $internalField;
    }
    Superficie
    {
        type            zeroGradient;
    }
    Walls
    {
        type            kqRWallFunction;
        value             $internalField;
    }
}
// *****

```

Figura 76: Configuración de la tasa de disipación de energía turbulenta ε en las diferentes fronteras de la ciénaga

```

/*-----* C++ *-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    location     "0";
    object       epsilon;
}
// *****

dimensions      [0 2 -3 0 0 0 0];
internalField   uniform 2.46e-3;

boundaryField
{
    Inlet1
    {
        type          turbulentMixingLengthDissipationRateInlet;
        mixingLength   0.33964; // 0.5m - half channel height
        value          uniform 4.895e-12;
    }
    Inlet2
    {
        type          turbulentMixingLengthDissipationRateInlet;
        mixingLength   0.37873; // 0.5m - half channel height
        value          uniform 4.087e-13;
    }
    Outlet
    {
        type          inletOutlet;
        inletValue     uniform 7.956e-12;
        value          uniform 0;
    }
    Fondo
    {
        type          epsilonWallFunction;
        value          $internalField;
    }
    Superficie
    {
        type          zeroGradient;
    }
    Walls
    {
        type          epsilonWallFunction;
        value          $internalField;
    }
}
// *****

```