

**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y DE LA CALIDAD DEL AGUA
PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL DE VERTIMIENTOS GENERADOS
A LA CIÉNAGA MESOLANDIA, ATLÁNTICO - COLOMBIA**

JUAN HERNANDEZ RANGEL

DANIEL MARTINEZ RICARDO

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
INGENIERÍA AMBIENTAL
BARRANQUILLA**

2016

**MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA LA
EVALUACIÓN AMBIENTAL DE VERTIMIENTOS GENERADOS A LA CIÉNAGA
MESOLANDIA, ATLÁNTICO – COLOMBIA**

AUTORES

**JUAN MIGUEL HERNÁNDEZ RANGEL
DANIEL EDUARDO MARTÍNEZ RICARDO**

TRABAJO DE GRADO PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

ASESOR

**FRANKLIN TORRES BEJARANO
PhD Ciencias Ambientales**



**UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
INGENIERÍA AMBIENTAL
BARRANQUILLA**

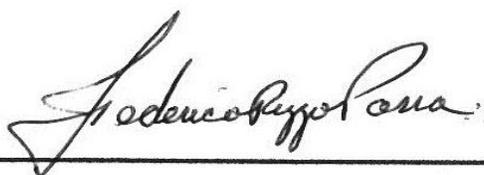
2016

Nota de Aceptación

4,68



Firma del Presidente del Jurado



Firma del Jurado



Firma del Jurado

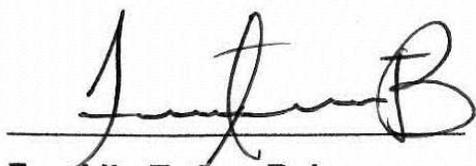
01 de junio de 2016

**ASUNTO: APROBACIÓN DEL PROYECTO DE GRADO TITULADO:
MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA LA
EVALUACIÓN AMBIENTAL DE LOS VERTIMIENTOS GENERADOS A LA
CIÉNAGA DE MESOLANDIA, ATLÁNTICO – COLOMBIA.**

Cordial saludo,

En mi calidad de asesor del proyecto de grado de los estudiantes Juan Hernández Rangel identificado con la cedula de ciudadanía 1,118,848,009 y Daniel Martínez Ricardo identificado con la cedula de ciudadanía 1,143,129,210, doy el consentimiento de que esta se encuentra apto para publicación.

Cordialmente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Franklin Torres Bejarano', written over a horizontal line.

Franklin Torres Bejarano
Asesor proyecto de grado

AGRADECIMIENTOS

Juan Hernández Rangel

Gracias a Dios, mi madre Socorro de Jesús Rangel Pezzotti, mi padre Álvaro José Hernández Vanegas y mi novia Laura Vanessa Castellar Díaz quienes fueron el motor de mis ánimos para poder culminar este anhelado proyecto. A mi tutor de tesis el Doctor Franklin Bejarano le agradezco por el apoyo que me ha brindado durante el estudio de mi carrera profesional como Ingeniero Ambiental.

Daniel Martínez Ricardo

Le agradezco principalmente a Dios por saber llevarme en cada paso dado a lo largo de mi carrera. A mis padres, Arquímedes Martínez y Liliana Ricardo, por el apoyo incondicional cada semestre. A Juan Hernández, compañero del presente trabajo por su dedicación y tiempo. A toda la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad de la Costa, pero especialmente a nuestro tutor e incondicional apoyo en toda esta tarea, el PhD. Franklin Torres Bejarano. Y a todos aquellos que aportaron un granito de arena tanto de información como de ánimos para culminar el presente trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Descripción del problema	11
1.2. Justificación	13
1.3. Objetivos	18
1.3.1. Objetivo General	18
1.3.2. Objetivos Específicos	18
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	19
2.1. Modelación Ambiental	20
2.1.1. Modelación hidrodinámica	22
2.1.2. Modelación en aguas someras	24
2.1.3. Modelación en aguas someras	25
2.1.4. Modelación de la Calidad del Agua	27
2.1.5. Modelos hidrodinámicos	27
2.2. Estado del arte	28
2.2.1. Investigaciones relacionadas con la modelación en aguas superficiales	30
2.3. Descripción del Modelo EFDC EXPLORER	31
2.3.1. Discretización del modelo	36
2.3.2. Ecuaciones gobernantes del modelo EFDC EXPLORER	37
2.3.2.1. Ecuaciones de movimiento	38
2.3.2.2. Ecuación de conservación de la masa	42
2.3.2.3. Ecuación para el oxígeno disuelto	44
2.3.2.4. Ecuación para el nitrógeno amoniacal	47
2.3.2.5. Ecuación para la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)	50
2.3.2.6. Ecuación de los Coliformes Fecales	51
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	52
3.1. La Ciénaga Mesolandia	52
3.2. Municipio de Soledad	54

3.3. Municipio de Malambo	55
3.4. Actividades principales	56
3.5. Clima	57
3.6. Hidrografía	58
3.7. Condiciones iniciales - campaña de Medición y obtención de datos	60
3.7.1. Batimetría Ciénaga Mesolandia	60
3.7.2. Hidrometeorología	62
3.7.3. Condiciones hidráulicas y de calidad del agua de la ciénaga y los vertimientos.	68
3.7.3.1. Calidad del agua	69
3.7.3.2. Resultados de la calidad del agua – Ciénaga Mesolandia	71
3.7.3.3. Caños vertientes	74
3.7.3.4. Condiciones Hidráulicas	75
4. APLICACIÓN DEL MODELO EFDC EXPLORER A LA ZONA DE ESTUDIO	77
4.1. Generación de la malla de cálculo	77
4.2. ESCENARIO 1: Condiciones iniciales, de frontera y forzantes.	78
5. resultados de la hidrodinamica y calidad del agua	80
5.1. Simulación hidrodinámica	80
5.2. Resultados hidrodinámica	83
5.3. Simulación de transporte de contaminantes	83
6. CAPACIDAD DE ASIMILACIÓN	89
7. PROPUESTA DE MEJORA	92
7.1. Análisis de la propuesta de mejora	93
7.1.1. Resultados de simulación Escenario 3	98
7.1.2. Diferencias entre los escenarios propuestos	107
7.1.3. Diseño de canal hidráulico	111
7.2. Otras consideraciones	113
8. CONCLUSIONES	115
REFERENCIAS	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Descripción General de las Capacidades del Modelo EFDC EXPLORER.....	35
Figura 2. Diferencias entre diferencias (b) y elementos finitos (c)	36
Figura 3. Ejemplos de las diferencias finitas empleadas en (1) 2D y (2) 3D	37
Figura 4. Estructura Hidrodinámica del EFDC EXPLORER.....	38
Figura 5. Estructura de la calidad del agua EFDC EXPLORER.....	41
Figura 6. Flujograma del procesamiento de la calidad del agua EFDC EXPLORER.	42
Figura 7. Complejo de Humedales pertenecientes a la ribera del Río Magdalena.....	53
Figura 8. Ciénaga Mesolandia – Zona de Estudio	53
Figura 9. Contorno definido – ciénaga Mesolandia.....	60
Figura 10. Batimetría - Ciénaga Mesolandia.....	61
Figura 11. Perfiles de elevación – Ciénaga Mesolandia.	61
Figura 12. Presión Atmosférica (mbar).	62
Figura 13. Temperatura Atmosférica (°C).	63
Figura 14. Precipitación (mm/día).....	64
Figura 15. Evaporación (mm/día).	65
Figura 16. Radiación Solar (Watts/m ²).....	66
Figura 17. Nubosidad (Cantidad).....	67
Figura 18. Rosa de los vientos.	68
Figura 19. Ubicación de los puntos de toma de muestras.	69
Figura 20. Resultados medidos de Temperatura (°C) y Ph.....	72
Figura 21. Resultados medidos de OD (mg/L) y DBO (mg/L)	72
Figura 22. Resultados medidos de SST (mg/L) y Nitrógeno Amoniacal (mg/L).	73
Figura 23. Resultados medidos de Coliformes Totales y Fecales (NMP/100ml).....	73
Figura 24. Configuración de la malla numérica - Ciénaga Mesolandia.	78
Figura 25. Condiciones de frontera y forzantes – Escenario 1.....	79
Figura 26. Vectores y magnitudes de velocidad.	81
Figura 27. Elevación de la superficie del agua.	82
Figura 28. Rosa de velocidades (A) y vientos (B) – Escenario 1.	83
Figura 29. Simulación Temperatura (°C) – Escenario 1.....	84
Figura 30. Simulación NH ₄ (mg/L) – Escenario 1.....	85
Figura 31. Simulación OD (mg/L) – Escenario 1.....	86
Figura 32. Simulación DBO (mg/L) – Escenario 1.	87
Figura 33. Simulación Coliformes Fecales (mg/L) – Escenario 1.....	88
Figura 34. Asimilación de OD (mg/L).....	89

Figura 35. Asimilación DBO (mg/L).	90
Figura 36. Asimilación NH ₄ (mg/L).	91
Figura 37. Topografía zona de estudio.	92
Figura 38. Perfil de elevación zona de estudio.	93
Figura 39. Condiciones de frontera Escenario 2 y 3.	94
Figura 40. Magnitudes de velocidad – Escenario 2 y 3.....	95
Figura 41. Dirección del agua – Escenario 2 y 3.....	95
Figura 42. Grafica de Temperatura (°C) – Escenario 2 y 3.....	96
Figura 43. Grafica de Oxígeno Disuelto (mg/L) – Escenario 2 y 3	96
Figura 44. Grafica de DBO (mg/L) – Escenario 2 y 3.....	97
Figura 45. Grafica de NH ₄ (mg/L) – Escenario 2 y 3.	97
Figura 46. Grafica de Coliformes Fecales (mg/L) – Escenario 2 y 3.	98
Figura 47. Vectores y magnitudes de velocidad, Escenario 3.....	99
Figura 48. Elevación de la superficie del agua, Escenario 3.....	100
Figura 49. Rosa de velocidades (A) y vientos (B) – Escenario 3.	101
Figura 50. Simulación Temperatura (°C) – Escenario 3.....	102
Figura 51. Simulación NH ₄ (mg/L) – Escenario 3.	103
Figura 52. Simulación OD (mg/L) – Escenario 3.....	104
Figura 53. Simulación DBO (mg/L) – Escenario 3.	105
Figura 54. Simulación Coliformes Fecales (mg/L) – Escenario 3.....	106
Figura 55. Magnitudes de velocidad – Escenario (1) y Escenario (3)	107
Figura 56. Dirección del agua – Escenario (1) y Escenario (3)	108
Figura 57. Grafica de temperatura – Escenario (1) y Escenario (3).....	108
Figura 58. Grafica de oxígeno disuelto – Escenario (1) y Escenario (3)	109
Figura 59. Grafica de DBO – Escenario (1) y Escenario (3)	109
Figura 60. Grafica de NH ₄ – Escenario (1) y Escenario (3).....	110
Figura 61. Grafica de Coliformes fecales – Escenario (1) y Escenario (3).....	110
Figura 62. Secciones del canal trapezoidal.	112
Figura 63. Secciones del canal diseñado.	113
Figura 64. Macrofitas situadas en la ciénaga Mesolandia.	114
Figura 65. Residuos dispuestos en la ciénaga Mesolandia.	114

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de zonificación ambiental de cuencas y tramos del Atlántico	14
Tabla 2. Objetivos de calidad para el quinquenio 2011-2020 para cuencas y tramos del departamento del Atlántico CLASE I.	15
Tabla 3. Valores máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales.....	16
Tabla 4. Promedio climático mensual en la zona de estudio para el año 2015.	58
Tabla 5. Descripción de equipos utilizados para determinar los parámetros <i>in situ</i>	70
Tabla 6. Descripción de las técnicas utilizadas para cada parámetro estudiado.	70
Tabla 7. Caños Vertientes a la ciénaga Mesolandia.	74
Tabla 8. Resultados Parámetros de Vertimiento.....	75
Tabla 9. Resultados hidráulicos de los caños vertientes.	76
Tabla 10. Condiciones geométricas del canal trapezoidal.	112

RESUMEN

Los vertimientos de aguas residuales que se generan a los diferentes cuerpos de aguas pueden ocasionar impactos ambientales negativos, obteniendo disminución en la calidad del agua de los ecosistemas acuáticos. Igualmente, existen diferentes procesos físico-químicos-biológicos propios del cuerpo estudiado, que definen la capacidad de asimilar con mayor o menor intervalo de tiempo los vertimientos recibidos. Actualmente, la ciénaga Mesolandia es el sustento de muchas familias atlanticenses y su calidad de vida de estas ha venido disminuyendo debido al deterioro ambiental que ha tenido la ciénaga, gracias al impacto negativo de los vertimientos industriales y domésticos que en ésta se descargan. Para el presente estudio se realizó un muestreo durante un día en el mes de Agosto, adquiriendo datos representativos de Temperatura, Oxígeno Disuelto (OD), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) Nitrógeno Amoniacal (NH₄), Coliformes Fecales (CF) e hidráulicos de la ciénaga Mesolandia y los vertimientos. Se logró evaluar ambientalmente los vertimientos que se generan a la ciénaga Mesolandia a través de la aplicación del modelo matemático bidimensional EFDC EXPLORER, definiendo la hidrodinámica y la calidad del agua del cuerpo acuático, así mismo se estableció el comportamiento de los contaminantes a través de la interpretación y análisis de los resultados que fueron simulados durante quince (15) días, concluyendo que la ciénaga no es capaz de asimilar todos sus vertimientos, lo cual genera una propuesta de recuperación descrita en el presente estudio, obteniendo resultados favorables en cortos intervalos de tiempo.

Palabras Claves: Modelación hidrodinámica, Modelación de la calidad del agua, EFDC EXPLORER, Evaluación ambiental de vertimientos.

ABSTRACT

The wastewater discharges generated to different bodies of water can cause negative environmental impacts, obtaining decreased water quality of aquatic ecosystems. Similarly, there are different physical-chemical-biological processes of the body studied that define the capacity to assimilate with more or less time interval of the discharges received. The Mesolandia Swamp is currently the livelihood of many families and their quality of life has been decreasing due to environmental degradation that has been thanks to the negative impact of industrial and domestic effluents. For this study, the sampling was collected one day in the month of August, acquiring data representative of temperature, dissolved oxygen (DO), total suspended solids (TSS), biological oxygen demand (BOD), ammonia nitrogen (NH₄), Coliforms fecal (CF) and of the hydraulic and dumping of The Mesolandia Swamp. It was possible assess to environmentally the discharges generated to The Mesolandia Swamp through the application of two-dimensional mathematical model EFDC EXPLORER defining the hydrodynamics and water quality of the water body, also the behavior of pollutants was established through the interpretation and analysis of the results were simulated for fifteen (15) days, concluding that the Swamp isn't able to assimilate all discharges, which generates a recovery proposal described in this study, obtaining favorable results in short time intervals.

Keywords: Hydrodynamic Modelling, Water Quality Modelling, EFDC EXPLORER, Environmental assessment of discharges.

1. INTRODUCCIÓN

Existen actividades antropogénicas que pueden generar impactos ambientales negativos hacia los cuerpos de agua, a través de los vertimientos líquidos y la mala disposición de residuos sólidos. Estos impactos pueden tener altas cargas contaminantes que pueden generar disminución de la calidad del agua, además que algunos de estos cuerpos acuáticos no tienen alta capacidad de dilución y a su vez asimilación. La aplicación de modelos numéricos que permitan determinar el comportamiento de diferentes materiales que son descargados a la hidrosfera ha venido en aumento, debido a que permiten simular de manera correcta lo que está sucediendo y así poder predecir posibles contingencias que puedan ocasionar las actividades humanas.

En Colombia, a través de diferentes entes administrativos (autoridades ambientales), se han venido ejerciendo controles para que los vertimientos líquidos industriales y domésticos sean tratados, para remover cargas contaminantes, antes de ser dispuesto a un cuerpo de agua o al alcantarillado público. La ciénaga Mesolandia es un cuerpo de agua lenticó que hace parte del departamento del Atlántico-Colombia, ubicado en la zona industrial del municipio de Soledad, siendo actualmente receptor de los vertimientos líquidos de industrias y barrios aledaños.

La presente investigación utiliza como herramienta métodos numéricos simplificados capaces de representar las leyes de masas en el transporte y transformación de contaminantes a través de las ecuaciones propias del modelo EFDC EXPLORER, esto con el fin de realizar la simulación del comportamiento hidrodinámico y de calidad del agua de los vertimientos industriales y domésticos que llegan a la ciénaga, con el fin de evaluar ambientalmente las descargas que se generan a este cuerpo de agua y los posibles escenarios que describan condiciones hipotéticas respecto a los vertimientos y recuperación de la ciénaga.

1.1. Descripción del problema

La contaminación hídrica y del medio ambiente de la Ciénaga de Mesolandia y sus alrededores se ve influenciada por la inadecuada disposición de vertimientos industriales y domésticos [1], así como residuos sólidos en el Caño de Soledad, cuya sedimentación es

tan alta que tapona la comunicación con el Río Magdalena y la Ciénaga Grande de Malambo [2].

El vertimiento de aguas residuales de origen urbano, sin tratamiento previo, es una práctica generalizada en las ciudades y pueblos. Es por eso, que se pretende evaluar la conducta de los diferentes parámetros estudiados de una de las ciénagas que comprenden el Complejo Cenagoso de Malambo, según lo establecido en la normatividad ambiental en calidad de agua para los vertimientos líquidos como el Decreto Ley 1076 de 2015 [3], la Resolución 631 de 2015 [4] y la Resolución 000258 de 2011 [5], ésta última de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA).

La superficie de la Ciénaga de Mesolandia es de 240 hectáreas y una de las amenazas más importantes que tiene este cuerpo de agua lo representan las ocupaciones de vivienda que se han ubicado sobre el espejo de agua, más concretamente el barrio Mesolandia, donde existen 130 viviendas que corresponden al 16% del total del barrio que deben ser reubicadas por ser considerado como zona de humedad y de alto riesgo. Pero otra de las amenazas más destacadas sobre este cuerpo de agua lo constituyen las empresas que tienen ubicadas las descargas de los vertimientos líquidos de aguas servidas sobre el cuerpo de agua [6]. Estas fuentes contaminantes actualmente corresponden a: Industrias Puro Pollo, Grupo Aeroportuario del Caribe SAS, la Servicomercializadora Barraza Mora, Batallón de Ingeniería No 2 Vergara y Velasco, EDS La Virgencita, Unibol S.A., Granos y Cereales, Mundial de Tambores, Empaques Industriales Colombianos, entre otros, algunas de las cuales son vertidas directamente a la Ciénaga y otras a caños que desembocan en esta.

Los vertimientos generados a la Ciénaga Mesolandia pueden causar la muerte de organismos acuáticos, afectan el color del agua, generan eutrofización, la cual puede ocasionar problemas estéticos, como mal sabor y olor, y una acumulación de algas, el agotamiento del oxígeno en las aguas más profundas entre otros cambios químicos [7]. Además, estos vertimientos pueden aumentar la concentración de sólidos en la ciénaga. Por lo cual, las especies que habitan ahí han podido haberse extinguido por los altos contaminantes generados por las industrias y urbanizaciones que están ubicadas alrededor del cuerpo de agua [8]. Por todo lo anteriormente expuesto, surgió la siguiente pregunta **¿Tiene la Ciénaga Mesolandia la capacidad de asimilar y auto recuperarse de los vertimientos que llegan a ella?**

El presente proyecto y la pregunta problema se plantea debido que al pasar de los años se viene evidenciando la problemática ambiental que existe en los cuerpos de agua del

Departamento del Atlántico. Pero más recientemente, en el 2009, se determinó que la ciénaga de Mesolandia presentaba una condición crítica, debido a que las cargas contaminantes son mayores a las cargas máximas que la ciénaga puede asimilar[9].

En los tres (3) últimos años, se evidencia el deterioro de los cuerpos de agua del Atlántico debido a diferentes factores que confluyen para acabar poco a poco con la fauna de estos humedales, dando como consecuencia, el deterioro de la calidad de vida de los pobladores que viven de estos ecosistemas acuáticos.

1.2. Justificación

Jurídicamente, según el Decreto Ley 1729 del 06 de agosto de 2002 [10] que pone en cumplimiento los Planes de Ordenamiento Ambiental y Territorial de las Cuencas hidrográficas, ratifica a la cuenca hidrográfica como la unidad básica de planeamiento ambiental. La ordenación de una cuenca tiene por objeto principal el planeamiento del uso y manejo sostenible de sus recursos naturales renovables, de manera que se consiga mantener o restablecer un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico-biótica de la cuenca y particularmente de sus recursos hídricos.

Así mismo, en el Decreto de Ley 1076/15, para los usos del agua y los vertimientos líquidos, en su artículo 2.2.3.3.5.3., inciso cinco (5) exige una evaluación de vertimientos la cual busca principalmente la aplicación de modelos de simulación de los impactos que causen los vertimientos a los cuerpos de agua y la capacidad de asimilación y dilución del cuerpo de agua receptor.

A nivel departamental, la Resolución 000258 de 2011 de la Corporación Autónoma Regional del Atlántico CRA, en su Resolución No. 00258 con fecha del 13 de Abril de 2011 establece objetivos de calidad para las cuencas hidrográficas en su jurisdicción para el periodo 2011-2020. Igualmente confirma que la cuenca del Rio Magdalena está conformada por las Subcuencas 2904-2 (Ciénaga Mesolandia), 2904-3 (Ciénaga del Convento y Malambo), 2904-4 (Ciénaga La Luisa) y define que con sectores que abarcan los humedales de la franja nororiental del departamento, receptores de las descargas de aguas residuales industriales y domesticas provenientes de los cascos urbanos de los municipios de Soledad, Malambo, Sabanagrande, Santo Tomas y Palmar de Varela, Baranoa y Polonuevo.

En la Tabla 1, se presenta una matriz oficial de zonificación ambiental de cuencas, subtramos y usos como resultados de los procesos de ordenación de cuencas prioritarias en la jurisdicción del departamento del Atlántico.

Tabla 1. Matriz de zonificación ambiental de cuencas y tramos del Atlántico (Res. 258/2011).

Cuenca	Subcuenca o tramo	Zonificación ambiental	Usos predominantes	Usos restringidos	Usos prohibidos	Limites cualitativos y criterios de calidad 2011-2020
Cuenca del Rio Magdalena	Complejo de Humedales y ciénagas.	Recuperación para la Conservación.	Preservación de flora y fauna.	Consumo humano y doméstico, pesca de subsistencia	Uso Industrial Pesca.	Clase I. Ver cuadros de parámetros y criterios Clase I.

En su artículo segundo define que las cuencas y tramos Clase I son aquellos cuyo potencial de uso del agua es prioritariamente para LA PRESERVACIÓN DE LA FLORA Y LA FAUNA y cuya calidad, permite el consumo humano y domestico con tratamiento convencional, así como el uso agrícola y pecuario. En la Tabla 2 se define el artículo tercero se establecen los objetivos de calidad para el quinquenio 2011-2020 para las cuencas y tramos clasificados como CLASE I en la matriz de zonificación ambiental de cuencas y tramos.

Tabla 2. Objetivos de calidad para el quinquenio 2011-2020 para cuencas y tramos del departamento del Atlántico CLASE I.

Parámetro	Expresado como	Límites de control	Observaciones
Parámetros Orgánicos			<p>Los valores de control deben establecerse en el 60% de las muestras de monitoreo adelantadas en periodo de clima seco.</p> <p>Los valores y límites indicados quedan supeditados a la reglamentación de límites permisibles que se haga del Decreto 3930 de 2010, la cual está en plena elaboración por parte del MAVDT.</p>
DBO5	mg/L	<7	
OD	mg/L	>3	
Grasas y aceites - GyA	mg/L	<10	
Parámetros Microbiológicos			
Coliformes totales – CT	NMP/100mL	<50000	
Coliformes fecales - CF	NMP/100mL	>2000	
Sólidos			
Solidos flotantes	Presencia	Ausentes	
Solidos Suspendidos Totales - SST	mg/L	<30	
Nutrientes			
Nitritos -: N-NO ₂	mg/L	<1	
Nitratos -: N-NO ₃	mg/L	<10	
Nitratos amoniacal -: N-H ₃	mg/L	<0.5	
Fosforo Orgánico: P-PO ₄	mg/L	≤ 0.1	
Otros Parámetros			
pH	Uph	7-9	
Temperatura	°C	<40	
Olores ofensivos	Presencia	Ausentes	
Sustancias de interés sanitario	Unidades correspondientes		Se adoptan los límites de control establecidos en el decreto reglamentario 3930 de 2010.

La Tabla 3, explica la Resolución 0631 de 2015 [11] del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, donde se establecen los valores límites máximos permisibles para cada parámetro, los cuales están en función de la actividad productiva de la empresa y se definen otros criterios en vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales.

Tabla 3. Valores máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales

Aguas domésticas			
Parámetro	Unidad	Aguas residuales domésticas – ARD	Aguas residuales domésticas – ARD y de las aguas residuales de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales (≤ 625 kg/día DBO_5)
pH	Unidades de pH	De 6 a 9	De 6 a 9
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	Mg/L O_2		90
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Mg/L	100	90
Nitrógeno Amoniacal (NH_3)	Mg/L		Análisis y Reporte
PARÁMETRO	UNIDAD	Aguas residuales domésticas – ARD y de las aguas residuales de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales ($> 625 \leq 3000$ kg/día DBO_5)	Aguas residuales domésticas – ARD y de las aguas residuales de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales (>3000 kg/día DBO_5)
pH	Unidades de pH	De 6 a 9	De 6 a 9

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Mg/L O ₂	90	70		
Solidos Suspendidos Totales (SST)	Mg/L	90	70		
Nitrógeno Amoniacal (NH ₃)	Mg/L	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte		
Aguas industriales					
PARÁMETRO	UNIDADES	RECICLAJE DE TAMBORES	FABRICACIÓN DE PAPEL Y CARTÓN	ELABORACIÓN DE PRODUCTOS ALIMENTICIOS	OTRAS ACTIVIDADES
pH	Unidades de pH	De 6 a 9	De 6 a 9	De 6 a 9	De 6 a 9
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	Mg/L O ₂	600	300	400	50
Solidos Suspendidos Totales (SST)	Mg/L	150	250	200	50

Igualmente, en los tres (3) últimos años, se evidencia el deterioro de los cuerpos de agua del Atlántico debido a diferentes factores que confluyen para acabar poco a poco con la fauna de estos humedales, dando como consecuencia, el deterioro de la calidad de vida de los pobladores que viven de estos ecosistemas acuáticos. El 08 de Agosto de 2014 el diario El Espectador [11] publicó un artículo donde mencionaba que el deterioro de la Ciénaga de Mesolandia, según los pescadores, era generado por los vertimientos de las aguas residuales de los afluentes que a su vez ocasionaba la mortandad de peces. En El Herald del 02 de Junio de 2015 [12], se manifestó que la ciénaga está siendo cargada con un material orgánico superior a su capacidad de depuración. La calidad del agua es “precaria” y amenaza a la población humana. “La ciénaga se termina convirtiendo en una gran poza séptica”. Así como estos problemas, se siguen evidenciando a medida que

pasan los meses tal como se muestran en diferentes artículos de diarios y medios de comunicación a nivel local y nacional [13-16].

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar los vertimientos generados a la Ciénaga Mesolandia a través de la implementación de un modelo hidrodinámico y de calidad del Agua.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Identificar los vertimientos de aguas residuales industriales existentes en la Ciénaga Mesolandia.
- Implementar un modelo hidrodinámico y de calidad del agua que permita determinar los procesos físicos, químicos y biológicos pertenecientes a la Ciénaga Mesolandia.
- Simular el comportamiento de los vertimientos generados a la Ciénaga Mesolandia y su impacto en la calidad del agua.
- Determinar la capacidad de asimilación de la Ciénaga Mesolandia.
- Realizar un diagnóstico y pronóstico del estado de la calidad del agua en la Ciénaga Mesolandia.

2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Esta sección da una descripción detallada sobre el campo de la modelación en ambientes acuáticos, en donde se definirán aspectos generales de la temática, como también los conceptos técnicos que influyen en el transporte de contaminantes y la mecánica de los fluidos, comprendido en el marco teórico. Por otra parte, en el estado del arte se realizará un recuento de toda la información, estudios e investigaciones existentes sobre el tema planteado.

La Ciénaga de Mesolandia es considerada un humedal, el cual puede definirse como una extensión de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, de origen natural o artificial, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros [18].

En otras palabras, son todos los ecosistemas cuyo componente fundamental es el agua, en torno a la cual se forman ambientes intermedios que varían entre permanentemente inundados y normalmente secos, estos sistemas incluyen, desde luego, todos los niveles de diversidad biológica que allí se puedan sustentar [19].

Por lo tanto los humedales son los medios más productivos del mundo. Su característica determinante es la disposición constante o temporal de agua a lo largo de todo el año, esta situación favorece el desarrollo exitoso de una amplia diversidad de flora, fauna y microorganismos que interactúan en complejas relaciones para mantener un equilibrio ecológico de alta fragilidad. En Colombia, factores como régimen climático, complejidad orogénica y ubicación biogeográfica se han combinado de forma excepcional para permitir que el recurso hídrico sea abundante y modele el paisaje tropical formando ríos, estuarios, pantanos, ciénagas y lagunas, entre otros [20].

Muchos han desaparecido como consecuencia de actuaciones de desecación y urbanización (crecimiento de ciudades, avance de la agricultura y ganadería, instalaciones turísticas). Por eso, la importancia de los humedales ha variado con el tiempo. En el período carbonífero, es decir, hace 350 millones de años, cuando predominaban los ambientes pantanosos, los humedales produjeron y conservaron muchos combustibles fósiles (carbón y petróleo) de los que hoy dependemos. El progreso del conocimiento científico de los humedales ha puesto en evidencia unos bienes y servicios más sutiles y han sido descritos a la vez como los riñones del medio natural, a causa de las funciones que pueden desempeñar en los ciclos hidrológicos y químicos, y como supermercados biológicos, en razón de las extensas redes alimentarias y la rica diversidad biológica [21].

También son zonas de transición entre el medio ambiente terrestre y acuático y sirven como enlace dinámico entre los dos. El agua que se mueve arriba y abajo del gradiente de humedad, asimila una variedad de constituyentes químicos y físicos en solución, ya sea como detritus o sedimentos, estos a su vez se transforman y transportan a los alrededores del paisaje. Dos procesos críticos dominan el rendimiento en el tratamiento de los humedales: la dinámica microbiana y la hidrodinámica. Los procesos microbiales son cruciales en la remoción de algunos nutrientes y en la renovación de las aguas residuales en los humedales [22].

2.1. Modelación Ambiental

La evolución de la modelación ambiental ha tenido un aumento debido a las afectaciones que se han causado en los diferentes sistemas ambientales (Aire, Agua y Suelo), estos modelos están fundamentados en diferentes métodos numéricos que buscan la mayor aproximación a la realidad, para así poder pronosticar diferentes escenarios y evitar posibles afectaciones a los sistemas ambientales.

Modelar y predecir la forma como se transportan y reaccionan sustancias vertidas en cuerpo de agua es un campo de estudio que involucra diferentes disciplinas tales como las matemáticas, ingeniería, química, oceanografía. Desde el punto de vista del interés, el conocimiento de cómo se dispersan, distribuyen y reaccionan las sustancia vertidas en el agua, permite trazar anticipadamente la trayectoria que lleva la mancha de contaminante, conocer los tiempos que tardará la sustancia contaminante en llegar una costa o una población cerca, evaluar con antelación el impacto de la sustancia en un ecosistema o asentamiento humano, planear estrategias de concentración de la mancha, seleccionar los mecanismos de recolección de la sustancia y diseñar estrategias de descontaminación. La modelación se ha utilizado en aguas superficiales como una herramienta para evaluar los problemas de degradación ambiental por contaminación que en esta sufre. Además las simulaciones predictivas resultantes han servido para establecer planes de gestión y control del agua para conservar su calidad o restablecerla.

Chapra (2007), establece que establece que un modelo matemático es una formulación idealizada que representa la respuesta de un sistema físico frente a un estímulo externo. En este sentido, al implementar un modelo de calidad de agua, se puede simular las condiciones actuales y futuras del comportamiento de los contaminantes en una corriente

o área de estudio, conociendo de antemano la variedad de procesos físicos, químicos y biológicos que controlan el transporte y la transformación de estas variables.

La modelación ambiental enfocado a la calidad del agua resuelve principalmente un módulo hidrodinámico unidimensional, bidimensional o tridimensional, en el cual se resuelven todas las características hidráulicas del cuerpo de agua estudiado, tales como profundidades, nivel de la superficie libre, rugosidad del fondo, dirección y velocidad del agua, cabe recalcar la importancia de la hidrodinámica al momento de modelar la calidad del agua, debido a que es aquí en donde se desarrollan las ecuaciones de movimiento que están en función de diferentes parámetros físicos.

El siguiente modulo pertenece a la resolución de diferentes ecuaciones que ayudan a resolver variables físicas como la ecuación de estado o densidad, que está dada gracias a los rangos de temperatura y salinidad que se encuentren en el cuerpo de agua. La solución de los diferentes mecanismos de reacción de las variables químicas y biológicas tales como OD, DBO, NH₄, SST Y CF son generalmente resueltas por ecuaciones empíricas propias de cada autor y que se ajustan a cada tipo de cuerpo de agua, estas ecuaciones se resuelven conjuntamente con la ecuación de Advección – Difusión – Reacción en donde este último término es el referido para cada variable ambiental. Posteriormente para este tipo de sistemas como el que estudia este estudio (humedales) es necesario realizar un análisis exhaustivo de las diferentes variables meteorológicas tales como temperatura del aire, evaporación, precipitación, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, entre otras.

Cando se descarga materia orgánica en los cuerpos de agua, este se desoxigena y se va obteniendo un déficit de oxígeno el cual la corriente aguas abajo se recupera debido a la transferencia que tiene el oxígeno gracias a sus coeficientes de reaireación. El cambio de oxígeno respecto al tiempo será proporcional a la concentración de la materia orgánica y su comportamiento puede ser expresado en una reacción de primer orden

$$\frac{dD}{dt} = K_D C$$

Donde, D es el déficit de oxígeno disuelto, t el tiempo, K_D coeficiente de reaireación y C la concentración de la materia orgánica.

Se propone el uso del modelo numérico bidimensional EFDC EXPLORER, el cual es un modelo que simula procesos hidrodinámicos y de calidad del agua en cuerpos de agua superficiales.

2.1.1. Modelación hidrodinámica

La modelación matemática en el campo de la hidráulica ha desarrollado un campo de intervención bastante importante, ya que gracias a éstos, el campo de la hidrodinámica ambiental, ha tomado decisiones trascendentales con base en modelos matemáticos mecanicistas. Al respecto, los modelos hidrodinámicos son utilizados para cuantificar los impactos ambientales producto de proyectos, o para evaluar la pertinencia de una obra o labor en particular, lo que en síntesis, los convierte en una herramienta fundamental en la toma de decisiones [23].

La gran mayoría de modelos numéricos de fluidos derivan sus ecuaciones del principio de continuidad (Ecuación 1), de la ecuación de Navier-Stokes (Ecuación 2) (2da ley de Newton) y de las ecuaciones de la Termodinámica. En particular, todos los modelos hidrodinámicos aplicables a los estudios de estuarios y costas, se basan en el modelo de ondas largas con base en las ecuaciones RANS (Reynolds Average Navier-Stokes, (Ecuación 3, 4, 5, 6) [23].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \text{Ecuación (1)}$$

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

Donde:

μ	Viscosidad dinámica	$ML^{-1}T^{-1}$
(u, v, w)	Componentes de velocidad	LT^{-1}
ρ	Densidad	ML^{-3}

p Presión hidrostática ML⁻²

g Aceleración de la gravedad LT⁻²

X – Momentum:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right] \quad \text{Ecuación (3)}$$

Y – Momentum:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right] \quad \text{Ecuación (4)}$$

Z – Momentum:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \quad \text{Ecuación (5)}$$

Energía:

$$\frac{\partial(E_r)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_r)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_r)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_r)}{\partial z} = -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right] \quad \text{Ecuación (6)}$$

Donde:

(x, y, z)	Coordenadas	L
(u, v, w)	Componentes de velocidad	LT ⁻¹
T	Tiempo	T ⁻¹
P	Presión	ML ⁻²
τ	Esfuerzo	L ² T ⁻¹
Et	Energía Total	ML ² T ⁻²
q	Flujo de Cabeza	LT ⁻¹
Re	Numero de Reynolds	Adimensional
Pr	Numero de Prandtl	Adimensional

2.1.2. Modelación en aguas someras

En los ecosistemas de aguas someras o aguas poco profundas, los sedimentos son importantes para la degradación de la materia orgánica y la producción secundaria [24]. En estos sistemas acuáticos la contribución bentónica a la respiración total se estima en un 40-50% [25 - 27], y que generalmente aumenta con la disminución de la profundidad del cuerpo de agua. A través de la mineralización bentónica, una parte importante de los nutrientes, por ejemplo el nitrógeno, ocupado por organismos pelágicos y algas bentónicas, se recicla. Sin embargo, los sedimentos no sólo transportan nutrientes, existe una proporción se almacena o se elimina del ecosistema. La des-nitrificación es el proceso de eliminación bentónica más importante para el nitrógeno, lo que representa alrededor de un tercio a un medio de la pérdida total de nitrógeno de los cuerpos de agua [28]; [29]. Los sedimentos también almacenan temporalmente la materia orgánica y los nutrientes, tanto en el largo plazo como en el corto plazo [30]. El nitrógeno se elimina por el entierro de material orgánico refractario y se disuelve a través de la acreción de sedimentos [31].

En muchos sistemas someros del mundo, el aumento de las actividades industriales, agrícolas y domésticos ha conllevado a unas elevadas entradas de nutrientes [32]; [33]. En consecuencia, la reducción de las cargas de nutrientes lleva a invertir la tendencia de aumento de la eutrofización. Sin embargo, la oligotrofización no siempre conduce a la deseada reducción en la intensidad de las floraciones de algas [34], y los efectos no son necesariamente los mismos para los diferentes nutrientes [35].

Para predecir cómo va ser la respuesta de un cuerpo de agua al cambio de las cargas de nutrientes requiere el desarrollo de modelos con las descripciones correspondientes del acoplamiento bentónico-pelágico [31]. Tales modelos podrían servir de base para el establecimiento de metas para la reducción de nutrientes [35] o para predecir los efectos globales del ecosistema. Al aumentar la temperatura del agua y la escorrentía, el cambio global más probable es que desaparezcan las estratificaciones, se reduce la mezcla, aumenta la producción primaria, y disminuye la solubilidad del oxígeno, con consecuencias importantes en la extensión de las zonas anóxicas y respiración bentónica [36].

2.1.3. Modelación hidrodinámica en aguas someras

Las ecuaciones para aguas someras (Ecuación. 7) son una simplificación de las ecuaciones de Navier-Stokes. Las hipótesis claves, consisten en considerar la uniformidad en vertical del perfil de velocidades horizontal, y una distribución de presiones hidrostáticas por debajo de la superficie [37].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial i} + \frac{\partial}{\partial x} [(V_h + D_m) \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [(V_h + D_m) \frac{\partial u}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [(V_v + D_m) \frac{\partial u}{\partial z}] - \frac{1}{\rho_0} \frac{\tau_i^v}{\Delta z}$$

Ecuación (7)

Donde:

u, v, w	Componentes de la velocidad media en las capas verticales	LT ⁻¹
i	Componentes x o y	LT ⁻¹
g	Aceleración de la gravedad	LS ⁻²
ρ	Densidad	ML ⁻³
ρ ₀	Densidad de referencia	ML ⁻³
η	Elevación de la superficie libre del agua	M
V _h , V _v	Viscosidades horizontales y verticales calculadas en el tiempo y el espacio	ML ⁻¹ T ⁻¹
D _m	Coeficiente de difusión molecular	Adimensional
Δz	Altura	M
τ _i ^v	Esfuerzos cortantes de arrastre en la dirección x o y	L ² T ⁻¹
$\frac{\delta u}{\delta t}$	Representa la razón de cambio de la velocidad	LT ⁻¹

respecto al tiempo

$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$	Son los términos advectivos y representan el movimiento del fluido debido a las fuerzas inerciales	LT^{-1}
$\frac{\rho g}{\rho_0} \frac{\partial \eta}{\partial i}$	Es la fuerza de presión, representada a través de la variación de la superficie libre	MLT^{-2}
$\frac{\partial}{\partial x} \left[(V_h + D_m) \frac{\partial u}{\partial x} \right]$	Esfuerzo viscosos que dan origen a la turbulencia dentro del flujo en el eje X	L^2T^{-1}
$\frac{\partial}{\partial y} \left[(V_h + D_m) \frac{\partial u}{\partial y} \right]$	Esfuerzo viscosos que dan origen a la turbulencia dentro del flujo en el eje Y	L^2T^{-1}
$\frac{\partial}{\partial z} \left[(V_h + D_m) \frac{\partial u}{\partial z} \right]$	Esfuerzo viscosos que dan origen a la turbulencia dentro del flujo en el eje Z	L^2T^{-1}
$\frac{1}{\rho_0} \frac{\tau_i^V}{\Delta z}$	Es el esfuerzo cortante de arrastre debido a la presencia de vegetación, el cual causa una reducción en la velocidad de flujo. Éste último término es igual a cero en donde no hay presencia de vegetación	L^2T^{-1}

2.1.4. Modelación de la Calidad del Agua

Debido a la alta densidad industrial que existe actualmente, diversos contaminantes se descargan en el aire, los ríos, lagos y océanos. Los cambios en las concentraciones de los contaminantes en el agua consisten en los procesos bioquímicos, físicos, químicos y biológicos. En los cambios físicos de la contaminación se destacan dos procesos principales muy importantes: la Advección y Difusión. El modelo matemático que describe estos dos procesos es la ecuación de Advección-Difusión (Ecuación 8) [38].

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \Gamma C \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

C	Concentración promedio	ML ⁻³
t	Tiempo	T
u, v, w	Componentes de la velocidad	LT ⁻¹
K _x , K _y , K _z	Coeficientes de difusión turbulenta en las direcciones x,y,z	
Γ _c	Reacción de las variables de calidad del agua	

2.1.5. Modelos hidrodinámicos

La modelación hidrodinámica constituye una herramienta útil para la cuantificación del comportamiento de diferentes cuerpos de agua, permitiendo establecer la variación espacio temporal de velocidades y profundidades bajo diferentes condiciones internas y externas actuantes. En la medida en que un modelo hidrodinámico esté acoplado con un modelo biológico y de calidad de agua puede complementar el comportamiento del cuerpo de agua identificando la variabilidad espacial y temporal de determinantes y constituyentes de interés. Al final, los modelos hidrodinámicos acoplados a modelos biológicos, de calidad de agua y de transporte de sedimentos y contaminantes contribuyen a analizar y comparar de manera relativa diferentes escenarios de manejo potencialmente aplicables a diferentes hidrosistemas complejos [39].

Los modelos matemáticos han contribuido, desde los últimos años, a la definición de la hidrodinámica de masas de agua. Existen varios tipos de modelos hidrodinámicos que pueden ser utilizados para buscar soluciones a muchos de los problemas que se presentan en los cuerpos de agua superficiales. Estos modelos pueden manejar diferentes dimensiones que definen el grado de detalle, para lo cual, escoger el modelo adecuado depende del área de interés, las características físicas del sitio, y el fenómeno considerado.

Actualmente los modelos numéricos que se utilizan en el campo del estudio hidrodinámico de embalses pueden ser [40]:

Unidimensionales (p. ej. HEC RAS, DYRESM), predicen la distribución de temperatura, salinidad y densidad en una vertical en lagos o embalses.

Bidimensionales (p. ej. MIKE, MOHID, CE-QUAL-W2), estudio longitudinal y vertical de la hidrodinámica y la calidad del agua, aplicable a grandes masas de agua.

Tridimensionales (p. ej. ELCOM, EFDC) predicciones de velocidad, temperatura y salinidad en masas de agua naturales así como pautas de circulación y dispersión.

Pronosticar el comportamiento de un cuerpo de agua superficial estacionario en base a distintos escenarios vendrá condicionado por la calidad de los datos disponibles y la precisión del esquema numérico, aunque también por la posibilidad de calibración utilizando registros existentes o experiencias previas en casos semejantes [40].

2.2. Estado del arte

Los modelos ambientales actualmente son unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales, algunos modelos necesitan licencias comerciales; en países europeos y Norte América, los modelos de uso comercial son los que tienen mayor acogida por los usuarios debido a su respaldo y verificaciones de los entes fiscalizadores como la EPA, SMIC y otros; pero también por sus constantes actualizaciones y mejoras para arreglar errores en el software. Las empresas Norteamericanas en comparación con las europeas no invierten mucho dinero en investigaciones para el desarrollo del software, simplemente no modifican los códigos de la fuente, lo cual reduce los costos. Además, estas empresas ofertan cursos de capacitación, las cuales se pagan adicionalmente al modelo matemático, en donde se le da al usuario una documentación detallada con ayudas y manuales muy completos, y soporte en línea [21].

Entre los modelos con licencia comercial de más demanda comercial entre los usuarios se presentan a continuación:

- *MIKE del Instituto Hidráulico Danés.*
- *EFDC EXPLORER del Virginia Institute of Marine Science y Environmental Protection Agency de los Estados Unidos*
- *DELFT 3D del Instituto Independiente DELTARES de Holanda.*
- *RMA-4 desarrollado por el cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, King, Water Resources Engineers, Corps of Engineers en 1973.*
- *GEMMS (Generalized Environmental Modelling System for Surface waters) de The Surface water Modeling Group of ERM Inc.*
- *CWR-ELCOM desarrollado por la Universidad de Wester, Australia.*
- *UNTRIM desarrollado por la Universidad de Trento, Italia.*

Así mismo, existen modelos con licencias de dominio público; estos por ser de dominio público, en su gran mayoría son gratuitos, pero los usuarios se hacen el compromiso a la hora de utilizar estos modelos. Esta serie de compromisos normalmente son: ser parte de la red de modeladores para su mejora, subir el resumen del estudio en el cual se utilizó el modelo, limitarse a comercializar el software, entre otros.

Debido que son de dominio público los soportes y ayudas están limitadas a los mismos usuarios e incluso a entidades sin ánimo de lucro que ingresan a la comunidad de modeladores, como por ejemplo algunas universidades y entidades gubernamentales. Gran parte de la documentación asociadas a los modelos de dominio público, corresponden a manuales que se han ido actualizando a medida que pasa el tiempo basado en los usos que se le hayan dado en los proyectos de investigación, como también a través de comentarios de los usuarios, foros, etc. Por tal razón el uso de estos modelos e algo más complejo que los modelos de uso comercial.

Dentro de los modelos de dominio público más utilizados por los usuarios son:

- *FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model) del laboratorio Marine Ecosystem Dynamics Modeling.*
- *EFDC ((Environmental Fluid Dynamics Code) de Ecosystems Research de Atenas (Grecia).*
- *ROMS (Regional Ocean Model System) desarrollado por Ocean Modeling Group.*
- *MOHID (Modelo Hidrodinámico) desarrollado por MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center).*

2.2.1. Investigaciones relacionadas con la modelación en aguas superficiales

En 1987 Brown and Barnwell crearon un modelo de calidad de agua unidimensional para ríos llamado QUAL2E [41], el cual fue modernizado a QUAL2K; durante esta misma década de los años 90 se presenta un auge en el desarrollo de los modelos hidrodinámicos, donde se construyen y programan la mayoría de modelos 2D y 3D que aun hoy están vigentes, como por ejemplo el ELCOM, EFDC3D, COHERENS, ROMS, MIKE 3, DELF 3D y continúan en desarrollo de nuevas aplicaciones y usos [42]. La agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha desarrollados en conjunto a diferentes investigadores, varios modelos ambientales unidimensionales y bidimensionales entre los que se encuentra AQUATOX, HSPF, WHATIF, entre otros.

Alrededor del mundo la modelación hidrodinámica de las aguas para la calidad ambiental ha tomado mucha importancia, por el hecho que se pueden medir consecuencias futuras sobre el cuerpo de agua, como en La Habana, Cuba [43], en donde se calibró y validó el modelo combinado, advectivo de estado permanente de Streeter y Phelps para describir el comportamiento del oxígeno disuelto y la demanda de oxígeno carbonacea en el río, obteniendo respuesta al impacto de descargas que incidan en la variación de estos parámetros, para diferentes condiciones morfológicas y de flujo. En Florida (EEUU), luego del paso del Huracán Dennis en el 2005, estudiantes de la Universidad Central de Florida [44] utilizaron el modelo POM (Blumberg and Mellor, 1987) para investigar el transporte y concentraciones de la salinidad arrastrada por el fenómeno atmosférico, en donde se concluyó que Dennis aumentó en gran medida la salinidad de la Bahía de Florida.

Para el año 2005 en Venezuela, Aldana G., simuló y predijo la hidrodinámica en las lagunas de estabilización de LUZ en Zulia utilizando un modelo computacional en tres dimensiones llamado FEM y HYDRO-3D, con este modelo se pudo simular modificaciones en la laguna y se demostró que al aumentar el número de salidas incrementa el porcentaje de mezcla y disminuye las zonas de costos circuitos, así como otros parámetros [45].

Posteriormente, Silva, (2008) realizó una evaluación de calidad del agua para el futuro embalse Porce II por la influencia de descarga del embalse Porce II aplicando un modelo de simulación de calidad de agua QUALW2, este modelo bidimensional ayudó a predecir que posiblemente en el futuro vertimiento de agua presentara eutrofia con una posibilidad mayor al 50%, además de que podría tener una disminución en el 20% de la concentración inicial de fosfatos (PO_4) que ingresa al embalse proveniente de las descargas de Porce II, también se determinó que la calidad del agua de este embalse nuevo está en función de la calidad del agua que va a hacer descargada hacia él [46].

En el 2009 Alean, hizo un estudio de modelación para hallar la capacidad máxima de asimilación de vertimientos de carga orgánica en la Ciénega de Mesolandia en el departamento del Atlántico (Colombia), esta investigadora utilizó un modelo hidráulico y de calidad de agua integrado hecho por Camacho en 1997, con este modelo unidimensional se determinó que la calidad del agua en la ciénega estaba en función de los vertimientos generados a ella así como en las condiciones meteorológicas, ya que a través de la modelación se dedujo que en época de lluvia la capacidad de asimilación de la Ciénega era mayor que en época seca [9].

Para el año 2010 Varcacel, Modeló la calidad del agua en el segmento medio del río Luyano en Cuba; este investigador a través del software unidimensional RIOSep® v.2.0

pudo describir más del 90% del comportamiento de DBO y OD, por lo cual el modelo se considera una herramienta muy útil para predecir el comportamiento en el segmento del estudiaría del río [47]; en el mismo año, Palacio, C Calibró un modelo hidrodinámico bidimensional para la bahía de Cartagena en Colombia, este estudio indico que los datos sistemáticos indican un acercamiento a los datos reales, particularmente mejor en marea alta, este modelo actualmente es aplicado para estimar la cantidad de agua que entra y sale de la bahía en marea viva y muerta [48].

Posteriormente en el año 2012 Jojoa J [49]., realizo una evaluación de alternativas de intervención para mejorar la hidrodinámica de la laguna de sonso en Colombia, se usó el modelo CCHE2D y junto a él se mostró diferentes alternativas consideradas que permiten mejorar el comportamiento hidrodinámico de la laguna, restableciendo el flujo, en el año siguiente Gómez, G [50], aplicó el modelo Visual Modflow para la evaluación de la hidrodinámica del acuífero subyacente a un vertedero de residuos sólidos urbanos en México, este investigador modeló un flujo de 15 años mostró que en su trayectoria de flujo se desvía ligeramente hacia el pozo de extracción de agua potable de la población, constituyendo un riesgo por el transporte de contaminantes contenidos en los lixiviados generados en el tiradero de basura.

En Sinaloa, México se buscó monitorear la calidad del agua del dren agrícola El Burrión y aplicar el modelo de calidad del agua QUAL2K, para evaluar las cargas generadas de compuestos fisicoquímicos vertidos al dren principal del distrito de riego 063 [51]. Pero cabe destacar que este modelo no puede ser aplicado al presente proyecto ya que no es compatible con las condiciones hídricas del cuerpo de agua en estudio.

Y muchos otros estudios donde se refleja la importancia de la modelación hidrodinámica en los cuerpos de aguas superficiales para corregir o mejorar la calidad de ellos. Entre los cuales se pueden mencionar las investigaciones realizadas por: Latz A. et al., 2010 (Alemania) [52]; Hasan G. et al., 2012 (Singapur) [53]; Pan C. et al., 2012 [54]; Polomčić D. et al., 2013 (Bosnia y Herzegovina) [55]; Gad M. et al., 2013 (Egipto) [56]; Awang N. et al., 2014 (Malasia) [57].

El modelo EFDC, se ha empleado en múltiples investigaciones en muchos países del mundo. Por ejemplo en China, Gao X. et al, desarrollaron un modelo tridimensional de calidad del agua ambiental con el EFDC. El modelo fue calibrado y verificado a partir de datos observados. Los rangos de error de nivel de agua del río, fósforo total, nitrógeno total y la DQO estaban dentro de 5%, 10%, 16% y 20%, respectivamente, los cuales cumplen con el requisito de precisión. El modelo fue empleado para predecir las

concentraciones de contaminantes en la corriente principal dentro de un año y una época de lluvias fuertes. Los resultados revelaron que las principales fuentes de contaminación que influyen en la calidad del agua de los cursos de agua fueron las fuentes puntuales, seguido de las fuentes de contaminación no puntuales [58].

En Colombia los estudios hidrodinámicos de la calidad del agua en los cuerpos superficiales son muy escasos. En Bogotá se han realizado varios estudios en el Embalse Muña y Río Bogotá, como el de Díaz Helena (2004) [59] donde utilizó el modelo ANUBIS desarrollado por la Universidad de los Andes, establecido en el modelo hidrodinámico desarrollado en lenguaje Pascal por Camacho en el proyecto CIFI - Colciencias (1990), por Camacho (1991) y Lozano (2003), quien adaptó el código al lenguaje Fortran y adicionó al modelo matemático la simulación del oxígeno disuelto, la demanda bioquímica de oxígeno y el ciclo del nitrógeno. La simulación hidrodinámica del modelo se basó en el programa bidimensional TIDEHYD [60], el cual se aplicó al embalse Muña concluyendo que había hipertrofia en el cuerpo de agua. En un estudio en el 2005 sobre el mismo embalse se recomendó la remoción total del buchón, por las apreciaciones que había arrojado el modelo. Barbosa, 2013, realizó un estudio denominado “Modelación hidrodinámica y de calidad de agua del sistema integrado embalse Muña-Río Bogotá” en donde se evidenció la capacidad de asimilación que tiene el embalse Muña sobre todo el material que arrastra el Río Bogotá hasta el cuerpo de agua [61].

Como estrategia de control y seguimiento a las cuencas del Departamento del Atlántico, la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) ha efectuado mediciones teniendo en cuenta que existen factores naturales y antrópicos que puedan afectar la calidad de sus aguas. En el 2012, el Laboratorio Microbiológico de Barranquilla realizó una caracterización sobre la Ciénaga obteniendo: pH entre 6,78 y 7,65; Temperatura de 28,5 °C; Oxígeno Disuelto (OD) entre 2,76 y 5,98 [2].

Torres-Bejarano et al., 2015, realizó un estudio en el Embalse del Guájaro en el departamento del Atlántico, Colombia, calibraron y validaron el modelo EFDC EXPLORER tanto para el período de secas como para el de lluvias, poniendo a prueba la capacidad para simular estos dos (2) escenarios climatológicos, obteniendo como resultado pruebas satisfactorias que dan lugar a estimar las elevaciones y los niveles que puede presentar el cuerpo de agua, en función de los factores climáticos estudiados, como también estimar el caudal de agua que entra a través de las compuertas que alimenta el embalse [62].

2.3. Descripción del Modelo EFDC EXPLORER

Este modelo fue desarrollado inicialmente en el Virginia Institute of Marine Science y posteriormente fue patrocinado por la Environmental Protection Agency de Estados Unidos (US EPA). El modelo EFDC EXPLORER tiene la capacidad de analizar la hidrodinámica de forma tridimensional, resolviendo las ecuaciones de movimiento (verticalmente hidrostáticas) y de superficie libre, junto con las ecuaciones de continuidad y de balance de masa, es decir, con módulos acoplados de salinidad, temperatura, sedimentos y transporte de contaminantes adaptados en ríos, lagunas, lagos, estuarios, reservorios y cuerpos costeros de agua. Es un modelo adaptable a las características necesarias de los estudios sobre cuerpos de agua [63]. Se trata principalmente de un modelo hidrodinámico y de calidad del agua, que puede aplicarse a cualquier cuerpo de agua superficial, incluidos los lagos y los ríos. El EFDC fue desarrollado mediante una estructura caracterizada por: a) un modelo construido con celdas de elementos finitos, b) que es posible humedecer y secar en el procesamiento del contorno, c) que permite el intercambio de calor con la atmósfera d) y también simular la calidad del agua [64]. Es un paquete de modelación hidrodinámica tridimensional multipropósito, capaz de simular una gran variedad de problemas ambientales y de transporte. Resuelve las ecuaciones de movimiento tridimensionales, de superficie libre, de presión hidrostática y de turbulencia para fluidos de densidad variable. La versión EFDC EXPLORER 7.1 (de distribución comercial) es una herramienta completa y flexible, diseñada para el sistema de modelación EFDC, la cual fue optimizada por la empresa Dynamic Solutions International (DSI), que desarrolló una interfaz de usuario que facilita la implementación del modelo, desde el pre-procesamiento de datos hasta el pos-procesamiento de los resultados.

El modelo EFDC ha sido aplicado en el río Yangtsé, en China, con el fin de calibrar y validar el control diario de la elevación de la superficie del agua y utilizar los datos de concentración de sedimentos para simular el sedimento móvil en el lecho del río para los períodos de aguas altas [65]. También se ha demostrado la utilidad de este modelo para contribuir a la restauración ecológica de Perdido Bay, en Estados Unidos [66]; en dicho estudio, se utilizó el modelo EFDC y se simuló la hidrodinámica de este estuario, junto con los parámetros de calidad de agua, salinidad, temperatura, nutrientes y oxígeno disuelto. Por su parte, Wang et al. (2013) trabajaron en el embalse Miyun, uno de los embalses más grandes de China e implementaron el EFDC para obtener una comprensión integral del patrón espaciotemporal de la calidad del agua, simulando los procesos hidrodinámicos y de depósito de algas, con el fin de estudiar los efectos de la protección y la gestión

efectiva del embalse [67]. Entre otras aplicaciones importantes del EFDC, destacan la transferencia de agua para el control de la eutrofización en los lagos y la predicción de la temperatura del agua en los embalses, y también como herramienta de gestión para la restauración de la calidad del agua [68 - 71].

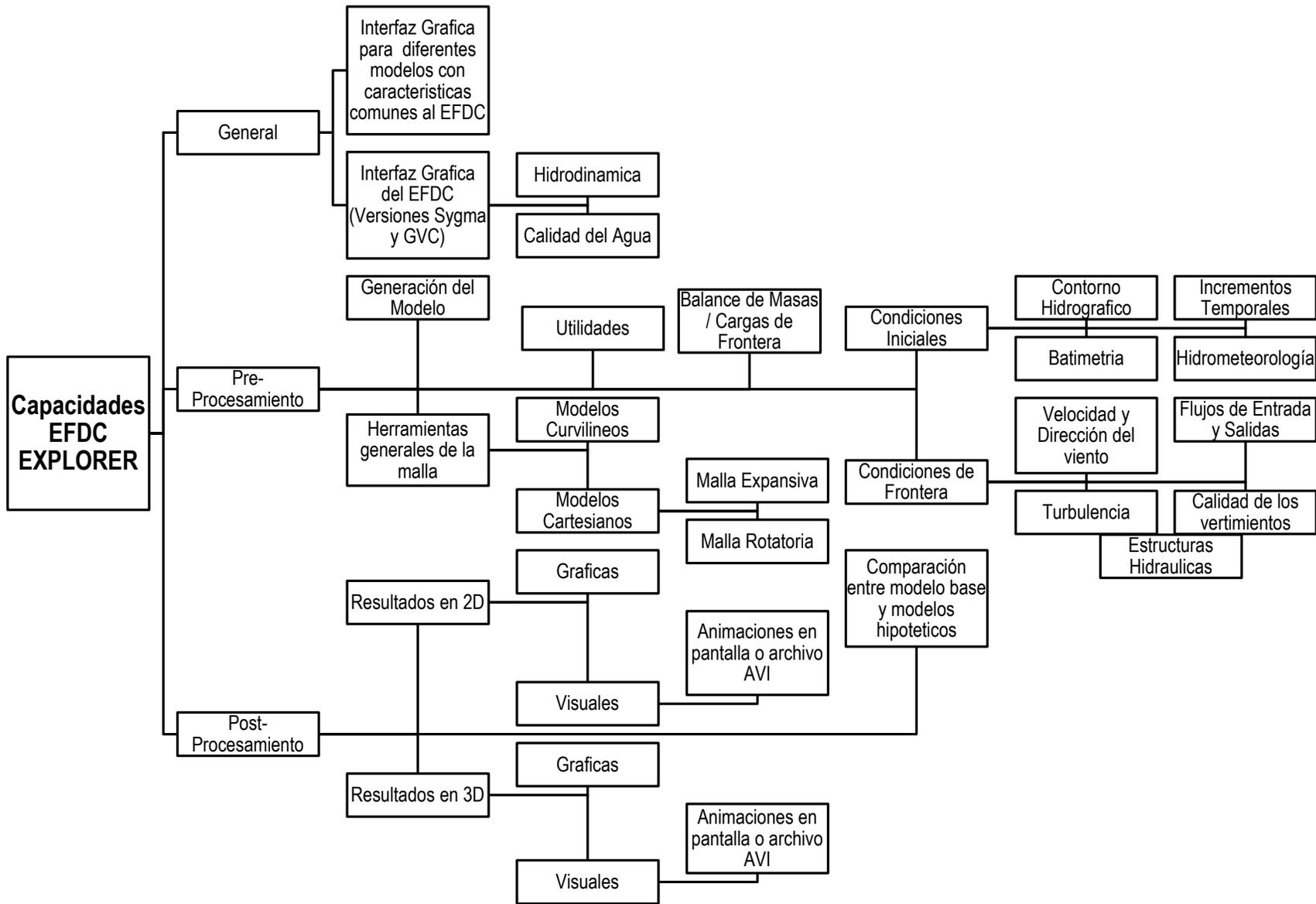


Figura 1. Descripción General de las Capacidades del Modelo EFDC EXPLORER.

2.3.1. Discretización del modelo

El modelo utilizado para realizar las simulaciones de la hidrodinámica y de la calidad del agua de la ciénaga Mesolandia, resuelve diferentes ecuaciones de la dinámica de los fluidos y químicas y biológicas por cada determinante en específico. Estas ecuaciones se resuelven aplicando diferencias finitas en ecuaciones parabólicas con el objetivo de realizar una solución numérica diferencial que permita modelar matemáticamente un sistema dinámico y continuo. La exactitud en la solución obtenida por las diferencias finitas depende fundamentalmente en definir una malla numérica que sea conforme a lo requerido por el modelador. Otro tipo de solución numérica aplicado a este proyecto se obtienen de una solución por métodos de elementos finitos, una de las ventajas más importante de trabajar con estos métodos es la flexibilidad de la malla, que permite obtener una aproximación espacial buena y que se adapta bien a los contorno irregulares del modelo y/o además permite considerar una discretización más fina en aquellas zonas del cuerpo de agua en las que requiera una información más detallada. No obstante, la entrada de datos es más difícil para una malla irregular de elementos finitos que para una malla regular de diferencias finitas. Así para reproducir las ventajas de los métodos con elementos finitos se utiliza un preprocesador que incluya un generador de mallas y un esquema que distribuya de forma correcta los nodos y elementos de la malla y especifique las coordenadas de cada nodo.

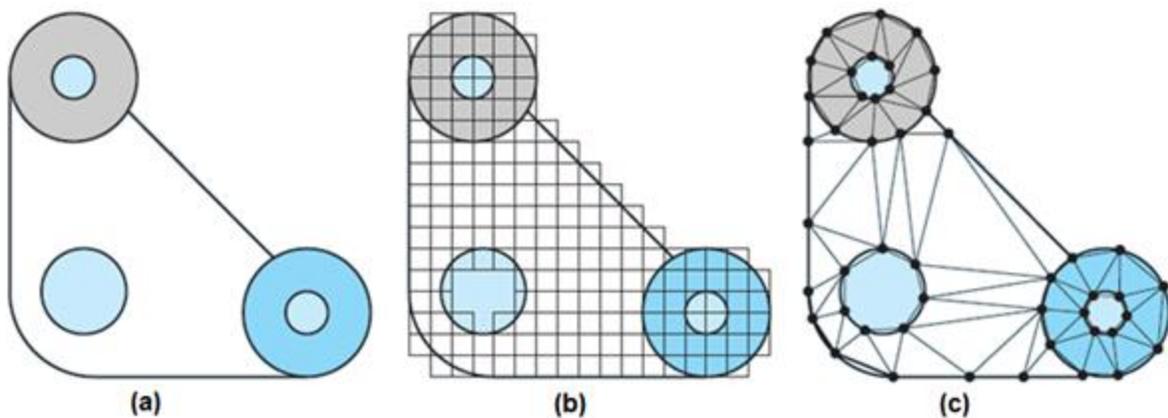


Figura 2. Diferencias entre diferencias (b) y elementos finitos (c) (Chapra, 2006)

Chapra (2006), determina que las principales ventajas y desventajas asociadas a los métodos numéricos para la solución de ecuaciones diferenciales parciales implican

seleccionar entre procedimientos por diferencias finitas y por elemento finito. Los métodos por diferencias finitas son conceptualmente más fáciles de comprender. Además, son de fácil programación en sistemas que pueden ser aproximados con mallas uniformes. Sin embargo, son difíciles de aplicar a sistemas con geometrías complicadas, igualmente, define que las soluciones numéricas deben estar acorde a cada problema en específico, así resolviendo por diferencias numérica todos los problemas que no necesiten aproximaciones complicadas en la frontera del sistema y en las fronteras entre las regiones de diferentes composición, en cambio, una solución por elementos finitos es mucho más adecuada cuando se hace necesario mayor aproximación en las fronteras (Figura 2).

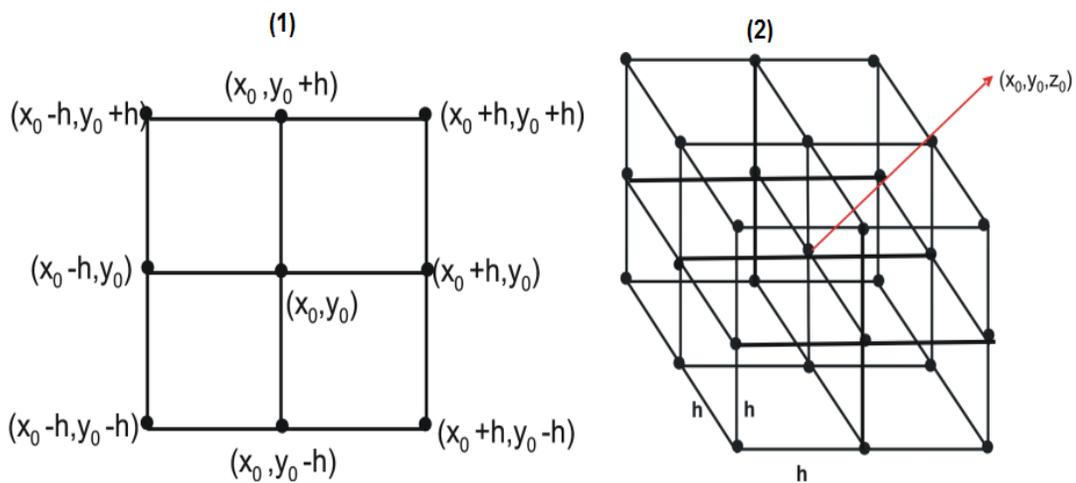


Figura 3. Ejemplos de las diferencias finitas empleadas en (1) dos y (2) tres dimensiones [72]

2.3.2. Ecuaciones gobernantes del modelo EFDC EXPLORER

EFDC EXPLORER aplica en la modelación hidrodinámica las ecuaciones de movimiento (Ecuación 9) y (Ecuación 10), la ecuación de continuidad (Ecuación 11), la ecuación de estado (Ecuación 12) y las ecuaciones de transporte para la salinidad y la temperatura (Ecuación 13) y (Ecuación 14), estas ecuaciones son resueltas integradamente en 2D y 3D.

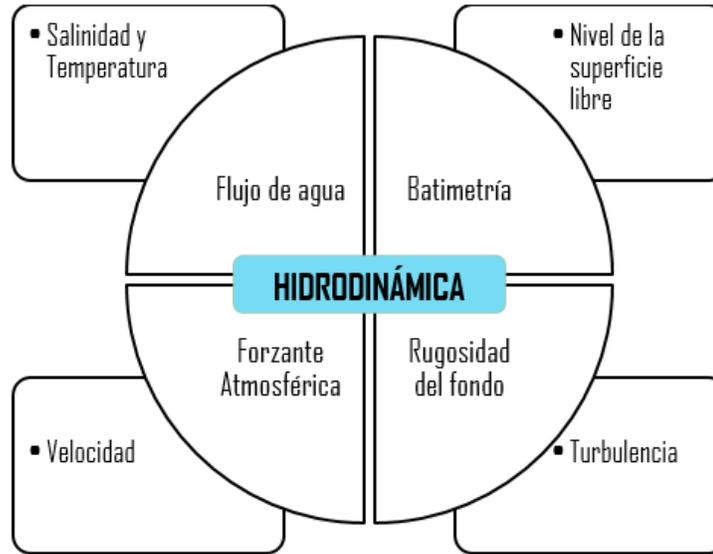


Figura 4. Estructura Hidrodinámica del EFDC EXPLORER [73]

2.3.2.1. Ecuaciones de movimiento

$$\frac{\partial(mHu)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H u u)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v u)}{\partial y} + \frac{\partial(m w u)}{\partial z} - \left(m f + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H v = -m_y H \frac{\partial(g\zeta + \rho)}{\partial x} - m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u \quad \text{Ecuación (9)}$$

$$\frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H u v)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v v)}{\partial y} + \frac{\partial(m w v)}{\partial z} + \left(m f + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H u = -m_x H \frac{\partial(g\zeta + \rho)}{\partial y} - m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v \quad \text{Ecuación (10)}$$

En las ecuaciones (10) y (11), el término 1 representa la razón del cambio de la velocidad con respecto al tiempo; el término 2 son los componentes advectivos y representan el movimiento del fluido debido a las fuerzas inerciales; el término 3 es la aceleración de Coriolis en la curvatura y sobre las tensiones tangenciales del fondo, representada a través

de la variación de la superficie libre; el término 4 es la fuerza de presión, representada a través de la variación de la superficie libre, y el término 5, los esfuerzos viscosos que dan origen a la turbulencia dentro del flujo.

- **Ecuación de continuidad**

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHu)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHv)}{\partial y} + \frac{\partial(mw)}{\partial z} = 0 \quad \text{Ecuación (11)}$$

- **Ecuación de estado**

La densidad del agua está en función de la temperatura y la salinidad, en este estudio se utilizó la ecuación empírica (Ecuación 12) relacionada por Eckart (1958) [74], cabe recalcar que es utilizada para rangos $0 < t < 40^\circ\text{C}$; $0 < s < 40$ PPT.

$$\rho = \frac{1000*(5890+38t-0.375t^2+3s)}{(1779.5+11.25t-0.0745t^2-(3.80+0.01t)s+(0.6980)(5890+38t-0.375t^2+3s))} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde, salinidad (s) en PPT y la temperatura del agua (t) en $^\circ\text{C}$.

- **Ecuación de transporte para la temperatura**

La temperatura es un factor determinante para la velocidad de las reacciones bioquímicas. Las velocidades de reacción aumentan en función de la temperatura, aunque las temperaturas extremas dan lugar a la mortalidad de los organismos. El transporte de la temperatura se basa en la Ecuación 13.

$$\frac{\partial(mHT)}{\partial t} + \frac{\partial(m_yHuT)}{\partial x} + \frac{\partial(m_xHvT)}{\partial y} + \frac{\partial(m_xwT)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T \quad \text{Ecuación (13)}$$

- **Ecuación de transporte para la salinidad**

La salinidad es un trazador para medir la conservación, que proporciona la verificación del transporte de los componentes del modelo y facilita el evaluar la conservación de la masa. La salinidad también influye en la concentración de saturación de oxígeno disuelto y se

utiliza en la determinación de la cinética de las constantes que difieren en solución salina y agua dulce. La ecuación dominante para la salinidad se expresa en la Ecuación 14.

$$\frac{\partial(mHS)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y HuS)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x HvS)}{\partial y} + \frac{\partial(m_x wS)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial S}{\partial z} \right) + Q_s$$

Ecuación (14)

Donde:

u, v	Componentes de velocidad horizontal	LT^{-1}
x, y	Coordenadas ortogonales	L
m_x, m_y	Raíces cuadradas de los componentes diagonales	Adimensional
$H = h + \zeta$	Profundidad total	L
P	Presión física en exceso de la densidad referencial	LT^{-2}
f	Parámetro de Coriolis	Adimensional
A_v	Turbulencia vertical o Viscosidad de Eddy	L^2T^{-2}
Q_u y Q_v	Términos de movimiento afluente-efluente	ML^{-3}
ρ	Densidad	ML^{-3}
T	Temperatura	$^{\circ}C$
S	Salinidad	PPT
A_b	Turbulencia vertical difusiva	L^2T^{-1}
Q	Difusión con la intensidad turbulenta	L^2T^{-1}
l	Escala longitudinal turbulenta	L
E_1, E_2, E_3, B_1	Constantes empíricas	Adimensional
A_u	Difusión vertical	L^2T^{-1}
Q_1 y Q_q	Condiciones de entrada-salida para la temperatura	ML^{-3}

Para el procesamiento de calidad de aguas, se desarrollan las ecuaciones para el oxígeno disuelto (Ecuación 19), Nitrógeno Amoniacal (Ecuación 24) y Demanda Biológica de

Oxígeno-DBO (Ecuación 31), igualmente el modelo las resuelve integradas 2D y en 3D. En la Figura 5 y 6 se explica la estructura del procesamiento de calidad del agua.

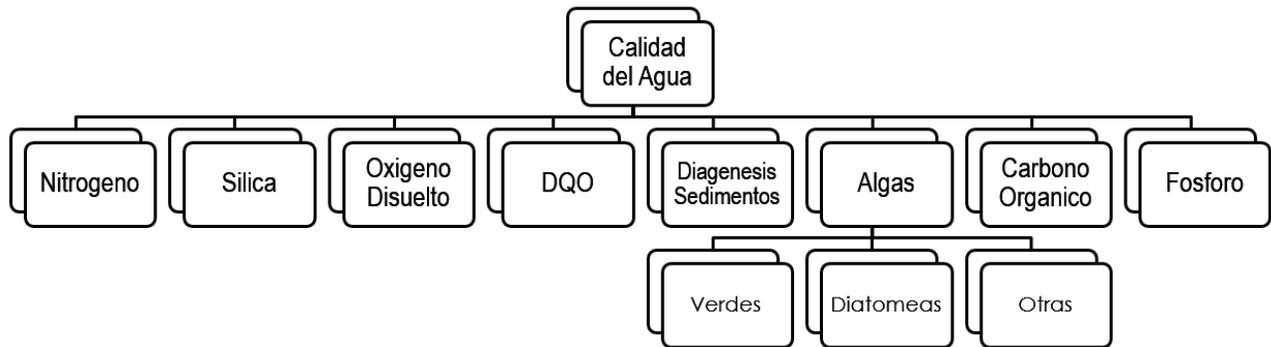


Figura 5. Estructura de la calidad del agua EFDC EXPLORER.

La Figura 5 aclara la estructura de la calidad del agua que maneja el modelo EFDC EXPLORER, principalmente se compone de las reacciones que ocurren en el agua mediante los ciclos orgánicos e inorgánicos, tales como el nitrógeno, DQO, fosforo y algas. Así mismo, interpreta de manera eficaz la diagénesis que ocurre en los procesos de sedimentos, por otra parte incorpora oxígeno disuelto, nutrientes y algas como los parámetros más fundamentales para definir la calidad del agua cualquier cuerpo estudiado.

Por otra parte, la Figura 6 explica los procesos de transformación y comportamiento de los parámetros de la calidad del agua en el modelo EFDC EXPLORER. De esta figura se puede recalcar que los componentes orgánicos y el oxígeno disuelto son los patrones químicos que intervienen directa e indirectamente en los demás parámetros analizados, que a su vez están en función de procesos físicos que pueden ayudar a la reaireación de los sistemas.

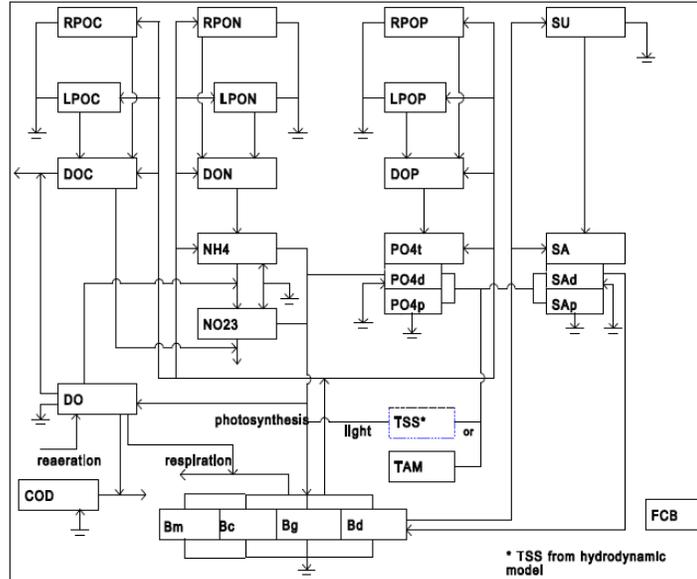


Figura 6. Flujograma del procesamiento de la calidad del agua EFDC EXPLORER.

2.3.2.2. Ecuación de conservación de la masa

La ecuación gobernante del balance de masa para resolver las diferentes variables de la calidad del agua se refiere a la ecuación de advección-difusión-reacción y puede ser expresada tridimensionalmente de la siguiente manera:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \Gamma_c \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

C Concentración de la variable en la calidad del agua

u , v , w Componentes de velocidades en las direcciones sigma, x-, y-, y z-

Kx, Ky, Difusiones turbulentas en las direcciones x-, y-, y z-.

Kz

Γ_c Fuentes y sumideros internos y externos por unidad de volumen

Los últimos tres términos en el lado izquierdo de la ecuación 15 expresa el transporte advectivo y los tres primeros términos en el lado derecho de la ecuación 15 expresa el transporte difusivo.

Estos seis términos para el transporte físico son análogos, y por lo tanto el método numérico de solución es el mismo que los de la ecuación de balance de masas para la salinidad en el modelo hidrodinámico. El último término de la ecuación 15 representa los procesos cinéticos y las cargas externas para cada una de las variables de estado. El presente modelo resuelve la ecuación 15 después de desacoplar los términos cinéticos de las condiciones físicas de transporte. El esquema de solución, tanto para el transporte físico y las ecuaciones cinéticas es de segundo orden.

La ecuación de balance de masas que rige para las variables de estado de calidad del agua (Ecuación 15) consiste en el transporte físico, advección y de difusión, y los procesos cinéticos. Al resolver la ecuación 15, los términos cinéticos se desprenden de las condiciones físicas de transporte. La ecuación de balance de masas solo para el transporte físico, es la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad \text{Ecuación (16)}$$

La ecuación para el proceso cinético, se denomina simplemente ecuación cinética, la cual se presenta a continuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \Gamma_c \quad \text{Ecuación (17)}$$

También puede ser expresada como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K * C + R \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde K es la velocidad cinética (tiempo) y R es el término de la fuente / sumidero (tiempo de volumen de la masa). La ecuación 18 se obtiene mediante la linealización de algunos

términos en las ecuaciones cinéticas, en su mayoría expresiones de tipo Monod. Por lo tanto, K y R son valores conocidos en la ecuación. 18. El método numérico de la ecuación 16 se resuelve de la misma forma que la ecuación de balance de masa para la salinidad y temperatura.

Las fuentes y sumideros representados como Γ_c (Ecuación 15) son descritos a continuación:

2.3.2.3. Ecuación para el oxígeno disuelto

Las fuentes de oxígeno que describe el modelo están relacionadas con la fotosíntesis y respiración de las algas, la nitrificación, la respiración heterotrófica del carbono orgánico disuelto, la oxidación de la demanda química de oxígeno, superficie, el coeficiente de reaireación en la capa superficial, la demanda de oxígeno de sedimentos para el capa inferior y las cargas externas. La ecuación que describe el modelo para este parámetro es:

$$\frac{\partial DO}{\partial t} = \sum_{=c,d,g,m} \left[(1 + 0.3(1 - PN)P - (1 - FCD) \left(\frac{DO}{K_{HR} + DO} \right) BM \right] + AOCR(B) - (AONT)(Nit)(NH_4) - AOCR(K_{HR})(DOC) - \left(\frac{DO}{K_{H_{COD}} + DO} \right) + K_{COD}(COD) + K_R(DO_s - DO) + \frac{SOD}{\Delta V} + \frac{WDO}{V}$$

Ecuación (19)

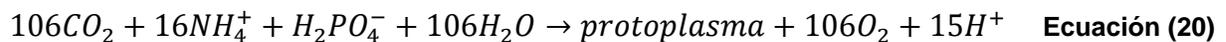
Donde:

PN	Absorción de amoníaco por algas	Adimensional
P	Tasa de producción de algas	T ⁻¹
FCD	Fracción del metabolismo basal	Adimensional
KHR	Constante media de saturación de oxígeno disuelto de algas	ML ⁻³
BM	Tasa de metabolismo basal de algas grupo	T ⁻¹
AOCR	Relación disuelto en oxígeno-carbono en la respiración	M
B	Biomasa de algas grupo	ML ⁻³
AONT	Masa de oxígeno disuelto consumido por unidad de masa de nitrógeno de amonio nitrificado	M

Nit	Tasa de nitrificación	T ⁻¹
NH ₄	Concentración de nitrógeno amoniacal	ML ⁻³
AOCR	Relación disuelto en oxígeno-Carbono en la respiración	M
K _{HR}	Tasa de respiración heterotrófica de carbono orgánico disuelto	T ⁻¹
DOC	Concentración de carbono orgánico disuelto	ML ⁻³
KH _{COD}	Saturación constante del medio de oxígeno disuelto requerido para la oxidación de COD	ML ⁻³
DO	Concentración de oxígeno disuelto	ML ⁻³
COD	Concentración de la demanda química de oxígeno	ML ⁻³
K _r	Coefficiente de aireación	Adimensional
DO _s	Concentración saturada de oxígeno disuelto	ML ⁻³
SOD	Demanda de oxígeno del sedimento	ML ⁻² T ⁻¹
WDO	Cargas externas de oxígeno disuelto	MT ⁻¹

- **Efecto de las algas en el oxígeno disuelto**

Las algas producen oxígeno a través de la fotosíntesis y consumen oxígeno a través de la respiración. La cantidad producida depende de la forma de nitrógeno utilizado para el crecimiento. Ecuaciones que describen la producción de oxígeno disuelto son:



Cuando el amonio es la fuente de nitrógeno, un mol de oxígeno es producido por mol de dióxido de carbono fijado. Cuando el nitrato es la fuente de nitrógeno, 1,3 moles de oxígeno son producidos por mol de dióxido de carbono fijado.

- **Efecto del nitrógeno en el oxígeno disuelto**

La estequiometría de la reacción de nitrificación indica que se requieren dos moles de oxígeno para nitrificar un mol de amonio en nitrato. Sin embargo, la síntesis de la célula por las bacterias nitrificantes se logra por la fijación de dióxido de carbono de modo que menos de dos moles de oxígeno se consumen por mol de amonio utilizada, es decir, AONT = 4,33 g O₂ por g de N.

- **Efecto de la reaireación de la superficie en el oxígeno disuelto**

La tasa de aireación de oxígeno disuelto en la interface aire-agua es proporcional al gradiente de oxígeno a través de la interfaz, (DO - DO_s), al asumir el aire está saturado de oxígeno. La concentración saturada de oxígeno disuelto, lo que disminuye a medida que la temperatura y el aumento de la salinidad, se especifica mediante una fórmula empírica (Genet et al. 1974):

$$DO_s = 14.5532 - 0.38217 * T + 5.4258 \times 10^3 * T^2 - CL * (1.665 \times 10^{-4} - 5.866 \times 10^{-6} * T + 9.796 \times 10^{-8} * T^2) \quad \text{Ecuación (22)}$$

Donde CL es la concentración de cloruro (mg/L) equivalente a S/1.80655.

El coeficiente de aireación incluye el efecto de la turbulencia generada por la fricción del fondo (O'Connor & Dobbins 1958) y por la fricción del viento en superficie (Bancos y Herrera 1977):

$$K_r = \left(K_{ro} \sqrt{\frac{u_{eq}}{h_{eq}}} + W_{rea} \right) \frac{1}{\Delta z} * K T_r^{T-20} \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde:

K _{ro}	Constante proporcional	L
u _{eq}	Velocidad ponderada de la sección transversal	LT ⁻¹

h_{eq}	Profundidad ponderada de la sección transversal	L
B_{η}	Anchura en la superficie libre	L
W_{rea}	Aireación inducida por el viento	LT^{-1}
U_w	Velocidad del viento a la altura de 10 m sobre la superficie	LT^{-1}
KT_r	Constante del ajuste para la temperatura de la tasa de aireación DO	Adimensional

2.3.2.4. Ecuación para el nitrógeno amoniacal

Las fuentes de nitrógeno amoniacal que incluye el modelo están relacionadas con metabolismo basal de las algas, la depredación y la mineralización en la absorción de nitrógeno orgánico disuelto. La ecuación que describe el modelo para este parámetro es:

$$\frac{\partial NH_4}{\partial t} = \sum_{=c,d,g,m} (FNI * BM + FNIP * PR - PN * P) ANC * B + K_{DON} DON - KNit NH_4 + \frac{BFNH_4}{\Delta z} + \frac{W_{NH_4}}{v}$$

Ecuación (24)

Donde:

FNI	Fracción de nitrógeno metabolizado por algas producidos como nitrógeno inorgánico	Adimensional
FNIP	Fracción de nitrógeno producido y despojado como nitrógeno inorgánico	Adimensional
PN	Preferencia por la captación de amonio por algas	Adimensional
ANC	Constante de relación algas-nitrógeno-carbono de algas	M
K_{DON}	Tasa de mineralización de nitrógeno orgánico disuelto	T^{-1}
DON	Concentración de nitrógeno orgánico disuelto	MT^{-1}
KNit	Tasa de nitrificación dada en la ecuación	T^{-1}
BFNH	Intercambio de flujo de agua y sedimentos de amonio, aplicada sólo a la parte inferior de la capa	$ML^{-2}T^{-1}$

- **Efecto de las algas en el nitrógeno amoniacal**

El metabolismo basal de las algas (respiración y excreción) y la depredación contribuyen al nitrógeno orgánico y el amonio. Es decir, el nitrógeno liberado por las algas, tanto el metabolismo basal como en la depredación está representada por los coeficientes de distribución: FNR, FNL, FND, FNI, FNRP, FNLP, FNDP y FNIP. La suma de los cuatro coeficientes de distribución para el metabolismo basal debe ser la unidad, y así mismo para la depredación.

Las algas absorben amonio y nitrato para el crecimiento, pero en particular, el amonio es preferido por las algas a partir de las consideraciones termodinámicas. La preferencia de algas para el amonio se expresa como:

$$PN_x = NH_4 \frac{NO_3}{(KHN_x + NH_4)(KHN_x + NO_3)} + NH_4 \frac{KHN_x}{(NH_4 + NO_3)(KHN_x + NO_3)} \quad \text{Ecuación (25)}$$

Esta ecuación da la preferencia del amonio a ser la unidad cuando el nitrato está ausente, y para ser cero cuando el amonio está ausente.

- **Efecto de la mineralización e hidrólisis en el nitrógeno amoniacal**

Existen cambios de la presencia de nitrógeno cuando las condiciones de nutrientes son limitadas. Uno de estos mecanismos es cuando se realiza la hidrólisis acelerada y otro, la mineralización. Las formulaciones de estos procesos son:

$$K_{RPON} = \left(K_{RN} + \frac{KHN}{KHN + NH_4 + NO_3} K_{RNalg} \sum_{x=c,d,g} B_x \right) * \exp(KT_{HDR}[T - TR_{HDR}]) \quad \text{Ecuación (26)}$$

$$K_{LPON} = \left(K_{LN} + \frac{KHN}{KHN + NH_4 + NO_3} K_{LNalg} \sum_{x=c,d,g} B_x \right) * \exp(KT_{HDR}[T - TR_{HDR}]) \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$K_{DON} = \left(K_{DN} + \frac{KHN}{KHN + NH_4 + NO_3} K_{DNalg} \sum_{x=c,d,g} B_x \right) * \exp(KT_{MNL}[T - TR_{MNL}]) \quad \text{Ecuación (28)}$$

Donde:

K_{RN}	Velocidad de hidrólisis mínimo de partículas refractarias de nitrógeno orgánico	T^{-1}
K_{LN}	Velocidad de hidrólisis mínimo de partículas lábiles de nitrógeno orgánico	T^{-1}
K_{DN}	Tasa mínima de mineralización del nitrógeno orgánico disuelto	T^{-1}
K_{RNalg} ; K_{LNalg}	Relacionan la hidrólisis de las partículas refractarias y lábiles de nitrógeno orgánico, respectivamente, la biomasa de algas	$T^{-1} *$ ML^3
K_{DNalg}	Constante que relaciona la mineralización de la biomasa de algas	$T^{-1} *$ ML^3
KHN	Constante media de saturación para la absorción de nitrógeno en algas	ML^3

- **Efecto de la nitrificación en el nitrógeno amoniacal**

La nitrificación es un proceso mediado por bacterias nitrificantes autótrofas que obtienen energía a través de la oxidación del amonio a nitrito y de nitrito a nitrato. La estequiometría de la reacción completa es:



La cinética de proceso de nitrificación completa se formula como una función de amonio disponible, el oxígeno disuelto y la temperatura:

$$Nit = \frac{DO}{NHNit_{DO} + DO} \frac{NH_4}{KHNit_N + NH_4} Nit_m * f_{Nit}(T) \quad \text{Ecuación (30)}$$

$$f_{Nit}(T) = \exp(-KNit_1[T - TNit]^2) \quad \text{si } T \leq TNit$$

$$f_{Nit}(T) = \exp(-KNit_2[TNit - T]^2) \quad \text{si } T > TNit$$

Donde:

$KHNit_{DO}$	Constante media de saturación de oxígeno disuelto	ML^{-3}
$KHNit_N$	Constante media de saturación de amonio	ML^{-3}
Nit_m	Tasa máxima de nitrificación como TNit	$ML^{-3}T^{-1}$
TNit	Temperatura óptima de nitrificación	$^{\circ}C$
$KNit_1$	Efecto de la temperatura por debajo de TNit sobre la tasa de nitrificación	$^{\circ}C^{-2}$
$KNit_2$	Efecto de la temperatura por encima de TNit sobre la tasa de nitrificación	$^{\circ}C^{-2}$

La función Monod de oxígeno disuelto en la ecuación 29 indica la inhibición de la nitrificación en un bajo nivel de oxígeno. La función Monod de amonio indica que cuando el amonio es abundante, la tasa de nitrificación está limitada por la disponibilidad de las bacterias nitrificantes. El efecto de la temperatura subóptima se representa a través de la fórmula de Gauss.

2.3.2.5. Ecuación para la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO)

$$K_{HR}DOC - DenitDOC - DenitDoc + \frac{WDOC}{V} = \sum_{c,d,g,m} \left(FCD_X + (1 - FCD) \left(\frac{KHR}{KHR+DO} \right) BM \right) B + K_{RPOC}RPOC + K_{LPOC}LPOC + \text{Ecuación (31)}$$

Donde:

DOC	Concentración de la DBO	ML^{-3}
FCD	Fracción del oxígeno disuelto en función de la exudación metabólica por algas	Adimensional
KHR	Saturación del oxígeno por algas	$ML^{-3}T^{-1}$
DO	Concentración del oxígeno disuelto	$^{\circ}C$

FCDP	Fracción de carbono producido por la dilución del carbono orgánico disuelto	Adimensional
K _{HR}	Tasa de respiración heterotrófica del carbono orgánico disuelto (día-1)	ML ⁻²
Denit	Rata de des-nitrificación	T ⁻¹
BFDOC	Flujo bentónico del carbono orgánico disuelto en la capa inferior.	ML ⁻² T ⁻¹
WDOC	cargas externas de carbono orgánico disuelto	MT ⁻¹

2.3.2.6. Ecuación de los Coliformes Fecales

Las bacterias de Coliformes Fecales son indicativos de los organismos en el tracto intestinal de los seres humanos y otros animales. Pueden ser utilizados como un indicador de bacterias como una medida de la salud pública. En el presente modelo, las bacterias de Coliformes Fecales no tienen ninguna interacción con otras variables de estado, y se refleja solamente en un término, mortandad. La ecuación cinética incluyendo cargas externas se puede escribir como:

$$\frac{\partial FCB}{\partial t} = KFCB * TFCB^{T-20} * FCB + \frac{WFCB}{V} \quad \text{Ecuación (32)}$$

Donde:

FCB	Concentración de bacterias	NMP * 100 ml
KFCB	Velocidad de primer orden de mortandad a 20°C	T ⁻¹
TFCB	Efecto de la temperatura sobre la descomposición de bacterias	°C ⁻¹
WFCB	Cargas externas de bacterias de Coliformes Fecales	NMP * 100ml m ³ día ⁻¹

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Departamento del Atlántico cuenta con un volumen cercano a los 454.577.500 m³ de agua representada en ciénagas y pantanos. La cobertura total de los cuerpos de agua corresponde a 21.697 Ha que se pueden agrupar en tres (3) grandes subzonas hidrográficas: Vertiente Occidental del Río Magdalena, Canal del Dique y Arroyos directos al Mar Caribe, representando esto, el hábitat natural de especies de fauna silvestre importantes para la región [75].

En su recorrido por el Departamento del Atlántico, el río Magdalena tiene una longitud aproximada de 107.851 Km. Cuenta con una superficie de 134.192 ha, subdividida en seis subcuencas que vierten sus aguas al Río Magdalena.

El complejo de humedales pertenecientes a la ribera del río Magdalena, está conformado por las ciénaga Mesolandia, Malambo, el Convento, Sabanagrande, Santo Tomás, Luisa, Manatí, el Paraíso y el Uvero y otras ciénagas ya desecadas como la vieja, Sanaguare y Real [76]. En el presente trabajo de grado tomaremos como zona de estudio la Ciénaga de la Mesolandia.

3.1. La Ciénaga Mesolandia

Forma parte del complejo de humedales de la zona Oriental del Departamento del Atlántico (Figura 7), con una superficie que abarca entre 240 y 337 hectáreas de acuerdo con las fluctuaciones de la dinámica del río Magdalena a lo largo del año. Está ubicada al sur Oriente de la cabecera municipal de Soledad bordeando el Río Magdalena, entre las coordenadas planas X: 1.697.500; Y: 925.000; X: 1.699.300; Y: 927.000 [40]. Se localiza entre los municipios de Soledad y Malambo (Figura 8). Hacia el norte comunica con el río Magdalena (a través del caño de Soledad) y hacia el sur, con la ciénaga de Malambo (a través de caño Hondo). Su profundidad media en época de aguas bajas es de 1.2 m y en época de aguas altas, de 2.4 m aproximadamente. Esta ciénaga recibe vertimientos orgánicos e industriales provenientes de las empresas ubicadas a su alrededor y a través del caño de soledad, principalmente.



Figura 7. Complejo de Humedales pertenecientes a la ribera del Río Magdalena.

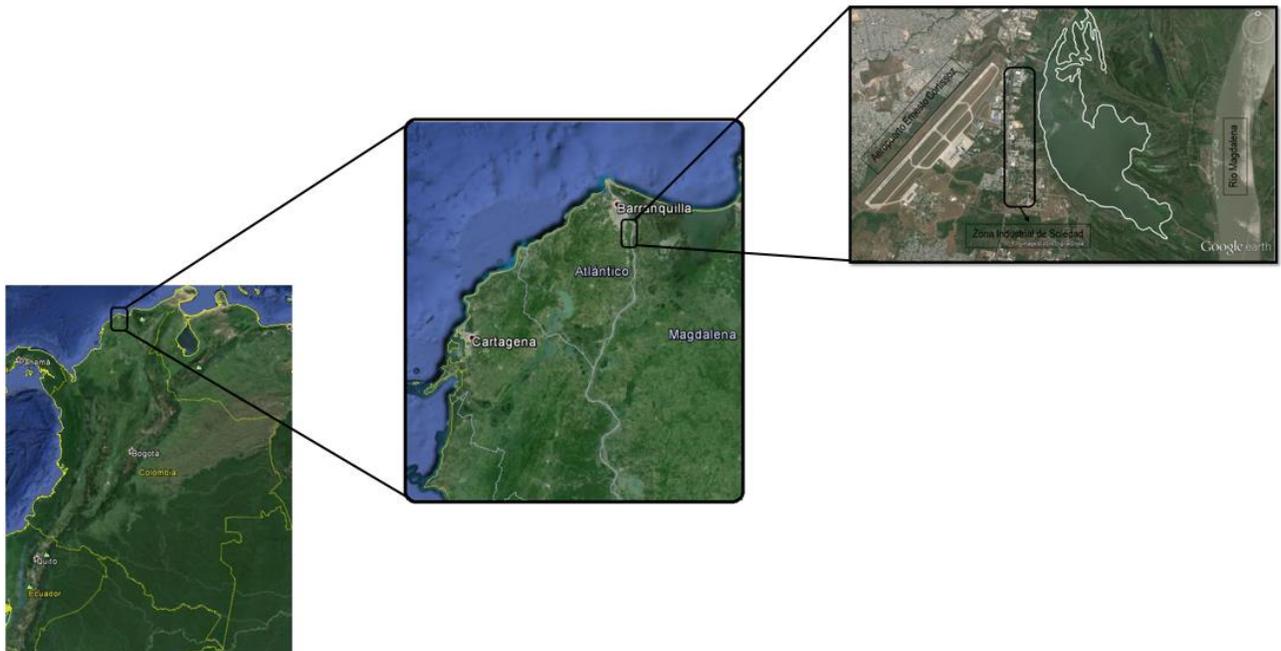


Figura 8. Ciénaga Mesolandia – Zona de Estudio

Esta Ciénaga está alimentada directamente por el río Magdalena y conectada a los arroyos el Salado y el Platanar del municipio de Soledad y el Caracolí del municipio de Malambo. La comunicación se da por bocas naturales y artificiales o por desbordamientos generalizados a lo largo de las orillas, en estados altos del Río e intercomunicación entre las demás ciénagas de la zona [77]. Esta ciénaga recibe vertimientos orgánicos e industriales provenientes de las empresas ubicadas a su alrededor y a través del caño de soledad, principalmente. Se destaca la presencia de una compuerta construida con la intención de permitir una comunicación mucho más directa con el río Magdalena [2].

El agua en la Ciénaga ingresa por escorrentía en épocas lluviosas, pero principalmente por las bocas cuando el río empieza a subir. Se establece un flujo de entrada desde el río por sus mayores niveles a través de las bocas, que en la mayoría de los casos quedan en el extremo aguas abajo de la Ciénaga, debido a que durante el desagüe se forman canales, que quedan abiertos al final del periodo de invierno y al mismo tiempo retroalimentan al Caño de Soledad que actúa como cuerpo conector de drenaje de la Ciénaga en época de llenado, discurriendo sus aguas en el río Magdalena [40].

3.2. Municipio de Soledad

Ubicado en el departamento del Atlántico, el Municipio de Soledad forma parte del área metropolitana de Barranquilla; ocupa el sexto lugar en cuanto a población en Colombia y el tercero en la Región Caribe, después de Barranquilla y Cartagena. El municipio de Soledad está localizado en las coordenadas geográficas 10° 55´ N, 74° 46´ O. Respecto a su extensión, el Anuario Estadístico de la Gobernación del Atlántico le atribuye 67 km², equivalentes a 6.700 hectáreas. Su extensión equivale, igualmente, al 1.97% de la extensión total del departamento del Atlántico [70].

El Municipio de Soledad genera unos 400 L/s de aguas residuales domiciliarias. Teniendo en cuenta que el municipio cuenta con 344.315 habitantes, entonces cada habitante producirá alrededor de 100.4 L/hab/día de aguas residuales, las cuales se describen a continuación:

- **Tratamiento de Aguas y Alcantarillado en Soledad.** El alcantarillado del municipio de Soledad consta de redes de tuberías las cuales conducen las aguas residuales hasta dos subestaciones de bombeo: Subestación Cachimbero y la Subestación el Porvenir. Las descargas de las subestaciones van directamente a

los cuerpos de agua receptores sin tratamiento previo alguno (no se cuenta con una planta de tratamiento de las aguas residuales del municipio). La capacidad instalada de las redes de conducción es insuficiente para cubrir la demanda, por lo que se presentan desbordes y afloramientos de aguas negras en los sectores críticos del sistema. Adicionalmente durante la estación lluviosa parte de las aguas pluviales entran al sistema de alcantarillado de aguas residuales, multiplicándose significativamente problema de las aguas servidas desbordándose hacia las vías públicas.

- **Descargas a Cuerpos de Agua Receptores.** Las aguas residuales domésticas y comerciales, son descargadas al complejo hídrico lagunar constituido por: el Caño de Soledad, la Ciénaga de La Bahía, y a través del arroyo El Platanal. Este sistema hídrico a su vez tributa al río Magdalena a través del caño San Isidro.
- **Aguas Residuales Zona Industrial.** Las aguas residuales industriales que produce el municipio de Soledad, son vertidas a la Ciénaga de Mesolandia y El Caño de Soledad, los cuales están interconectados con el río Magdalena. Esto ha causado la muerte de muchas especies nativas, sin que las empresas se preocupen por la preservación de las mismas. Para el caso de la Ciénaga de Mesolandia es bueno decir que está muy afectada ya que es un cuerpo de agua compartido con el municipio de Malambo, recibiendo aguas residuales de ese sector.

3.3. Municipio de Malambo

Ubicado en el departamento de Atlántico, el municipio de Malambo forma parte del área metropolitana de Barranquilla y se localiza en la ribera occidental del Río Magdalena. Se ubica en las coordenadas geográficas 10° 52' N, 74° 47' O. La extensión del municipio de Malambo es de 108 km² lo que equivale aproximadamente a 2.460,47 Ha del territorio total del departamento, y que representa el 2,92% del mismo. De este total, 359 metros cuadrados corresponden a cuerpos de agua y 697,66 ha (28,35% del área urbana) se encuentran urbanizadas [70].

El municipio produce un volumen aproximado de aguas residuales domésticas de 16.592.8 m³/día, las cuales poseen una carga en DBO₅ de 31.2 ton/año. Y una carga de sólidos suspendidos totales (SST) de 365 ton/año. El total de estos contaminantes equivalentes a 442 ton/año es arrojado a los cuerpos de agua superficiales. Actualmente los cuerpos de agua que están recibiendo la carga directa de contaminantes por aguas

residuales son: el complejo lagunar de Malambo (Ciénaga de Malambo, Ciénaga La Bahía y Ciénaga del Convento).

La población cuenta con 12.330 conexiones domiciliarias que corresponden al 42.14% del cual el 90% de estas redes se encuentran taponadas y en mal estado, lo que da como resultado un servicio de alcantarillado deficiente. Un 26.4% de la población todavía no cuenta con el servicio utilizando letrinas y pozas sépticas para la descarga de sus residuos líquidos. El 31.43% restante no cuentan con ninguno de estos servicios.

Las aguas residuales del municipio son vertidas a la laguna de oxidación cuya capacidad de tratamiento es insuficiente. Con lo que se convierte en un riesgo de contaminación para el cuerpo de agua receptor (Ciénaga de La Bahía). La generación de aguas residuales industriales en el municipio de Malambo proceden en mayor proporción de PIMSA (PARQUE INDUSTRIAL MALAMBO S.A.), el cual es un complejo industrial conformado por 22 empresas que arrojan un volumen de 4.608 m³/día. Los cuales son tratadas en la laguna de oxidación del parque industrial, para finalmente ser vertidas en los pastizales en predios del complejo industrial. En época de lluvias la laguna de oxidación se rebosa y vierte sus aguas en la ciénaga de Malambo.

3.4. Actividades principales

En el departamento del Atlántico, la actividad pesquera se desarrolla aproximadamente por 10.000 personas alrededor del Embalse del Guájaro, la Laguna de Luruaco, las Ciénagas del Sábalo, del Totumo y el Complejo de Humedales de Malambo. La mayoría de estos pescadores se dedican también a labores agrícolas y pecuarias [78].

La producción pesquera en Malambo y Soledad se realiza de forma artesanal y de subsistencia, debido a que no existen asociaciones o cooperativas apoyadas por la institución que ayuden a impulsar este sector que se consideró como una de las primeras bases económicas en el municipio [79].

La actividad pesquera en el Municipio de Soledad y Malambo es realmente pobre e insostenible, debido al mal manejo que se le ha dado a los cuerpos de aguas (caños y ciénagas), que se encuentran en los alrededores de los Municipios, ya que por la contaminación que reciben de las aguas residuales y de lluvias de todas las urbanizaciones, se encuentran contaminados con aguas en mal estado, caso puntual es el de caño viejo de Soledad [80].

Igualmente, existen fincas aledañas al cuerpo de agua que utilizan el agua superficial para realizar diferentes actividades tales como riego y limpieza de objetos, prendas y animales.

En la actividad ganadera se encuentra un área de 6.111 hectáreas pobladas por ganado vacuno. Su pastaje abarca 3.418 hectáreas y la del rastrojo 2693 hectáreas. El ganado es utilizado para la producción de carne y leche. En cuanto a la ganadería porcina, no se tiene un buen manejo técnico, higiénico y sanitario; Según información de la UMATA en este criadero se encuentran más de 1.000 porcinos a los cuales esta entidad les presta el servicio de vacunación contra la peste clásica porcina (P.C.P). Se cuenta sin embargo con 130 cerdos en la zona de Gran Abastos criados en forma tecnificada y con buenos manejos higiénicos y sanitarios [77].

3.5. Clima

Los municipios de Soledad y Malambo poseen piso térmico cálido, debido a que su topografía es plana, el viento constituye un elemento determinante para suavizar la temperatura ambiental [82].

Según el IDEAM, en el informe sobre las características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos [83], la zona de estudio (Soledad y Malambo), presentan:

Un promedio de lluvia durante el año es de 822 mm. La temporada seca principal se extiende de diciembre a abril. En estos meses llueve menos de 3 días al mes. En el mes de julio, se registra nuevamente una reducción de lluvias, aunque menos pronunciada. En los meses de mayo y junio y de agosto a noviembre, las lluvias son más frecuentes. De mayo a agosto llueve entre 6 y 8 días /mes. Septiembre y octubre son los meses más lluviosos con alrededor de 14 días/mes de lluvia en promedio. Hacia el mes de noviembre las lluvias comienzan a disminuir.

La temperatura promedio es de 26.9 °C. Al medio día la temperatura máxima media oscila entre 31 y 32°C. En la madrugada la temperatura mínima está entre 23 y 25 °C. En los meses secos de diciembre a marzo el sol en promedio brilla 8 – 9 horas diarias. El mes con menor brillo solar es octubre con 6 horas/día.

La humedad relativa del aire es menor en el primer trimestre del año. A partir de abril, la humedad se incrementa hasta alcanzar 82% en el mes de octubre.

En la Tabla 4 se muestran los promedios estadísticos obtenidos durante Agosto, Septiembre, Octubre y Noviembre de 2015 en la zona de estudio (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia –IDEAM–).

Tabla 4. Promedio climático mensual en la zona de estudio para el año 2015.

MES \ PARÁMETROS	Presión Atmosférica (mmbar)	Temperatura (°C)	Humedad (%)	Precipitaciones (mm/día)
Agosto	1010,478	29,71653	81,7742	0,022177
Septiembre	1011,932	29,28736	80,8764	0
Octubre	1011,512	28,78118	73,4073	0
Noviembre	1013,326	28,32389	63,1986	0

(Fuente: IDEAM)

3.6. Hidrografía

La red hidrográfica está comprendida por la cuenca del río Magdalena, las Subcuenca de la Ciénaga de Mesolandia, y Ciénaga de Malambo o Grande, como complejo de cuerpos lenticos se constituye como único sistema de red hidrográfica permanente; y como transitorios las microcuencas de los Arroyos caracolí, San Blas, arroyos como Madama y Sapo [82]. Además, diferentes caños que alimentan el complejo con aguas provenientes de lluvias a lo largo de su recorrido, residuos de empresas y/o de la misma comunidad.

El sistema de humedales y Ciénegas en el municipio tiene 1.254,80 hectáreas pertenecientes a la ciénaga de Malambo y Bahía. El espejo de agua tiene 2,50 metros en promedio de profundidad, dependiendo de la entrada del volumen del agua del río proveniente de una canal artificial que conecta el río Magdalena con la Ciénega Bahía. El agua del Caño que viene del municipio de Soledad aporta agua contaminada a la ciénaga con los vertimientos de aguas servidas del alcantarillado de este municipio, que van a templar finalmente a la Ciénega de Bahía y Malambo [82].

Los caños y microcuencas que alimentan el complejo de las ciénagas Mesolandia, Malambo y Convento son [9, 77]:

Caño de Soledad: Tiene una longitud aproximada de 4 kilómetros, con una profundidad en época de lluvias de 2 metros, y en en época de secas de 0,50 metros. Este caño

sirve de comunicación entre el Río Magdalena (del cual es un brazo) con la ciénaga de Mesolandia. Entre el Río y el mercado público de Soledad por el cual hace su recorrido, el caño tiene una longitud aproximada de 2 kilómetros, un ancho medio de 30 metros. Entre el mercado público y la ciénaga de Mesolandia, se presentan dos brazos, los cuales se unen nuevamente en la ciénaga. Estos brazos corresponden a caño viejo de 1,2 kilómetros de longitud y caño nuevo de 1,3 kilómetros. El caño viejo intercepta los drenajes de aguas lluvias y residuales procedentes del municipio de Soledad.

Caño Hondo: Está ubicado en jurisdicción de los municipios de Soledad y Malambo. Al norte se comunica con la ciénaga de Mesolandia y al sur con la ciénaga Grande de Malambo. Presenta una problemática bastante considerable debido a los vertimientos de aguas domésticas, las cuales presentan alto contenido de materia orgánica, lo que acelera la sedimentación de su cauce, así como el incremento de las poblaciones de macrófitas acuáticas.

Caño Tortuga: Se encuentra entre los municipios de Malambo y Sabanagrande. Se comunica al norte con la ciénaga Grande de Malambo y al sur con la ciénaga El Convento. Su trayectoria está siendo obstruida por una empresa privada que disminuye su caudal por medio de un “box–coulvert”, de esta forma alterando el funcionamiento limnológico y ecológico de las ciénagas.

Microcuencas transitorias: Del arroyo Caracolí. Presenta dos unidades geomorfológicas diferenciales por su origen y forma general, estas son; llanura fluvio-deltaica del río Magdalena y Planicie a llanura eólica. Compuesta por: arroyo Malambo viejo (5.5 Km), A. Las ceibitas (2.8 Km), A. Barro (2.15 Km), A. El Ají (4 km, recorre un sector agrícola), A. Cuchilla (4.25 Km), A. Hospital (es un brazo del arroyo El sapo) y el A. Madama. Otra microcuenca es la del arroyo San Blas. Considerada como una gran extensión de aguas transitorias, tiene una longitud de 5,8 Km. y un área de influencia de 1.000 Has. Es receptor de las aguas de escorrentías de gran parte de la zona sur occidental del municipio. Nace en el municipio de Baranoa en la vereda San Blas. En su recorrido en el área rural va recibiendo aguas de drenaje arrastrando sedimentos arenosos, hacia su desembocadura. Los siguientes arroyos tributan aguas a su cauce haciendo parte de la microcuenca: A. mamón (2.75 Km), A. Guacamayo (2.8 Km), A. Tambor (3 Km), A. Rufo (2.9 Km), A. Cascarón (2.5 Km).

Actualmente la Ciénaga de Mesolandia es alimentada por el Río Magdalena a través de un canal construido en el año 1993, que presenta una compuerta de 4 x 2.5 metros que controla la entrada de agua del río para niveles superiores a 0.18 metros (2000 m³/s)

hasta el nivel a banca llena de +2.42 metros (10500 m³/s). El canal de aducción se ubica en el sector de la isla Cabica. Éste presenta sección trapezoidal, base de 3.5 m de ancho, para un nivel en el río de +1.44m, que corresponde al caudal multianual (Q= 7100 m³/s), con una capacidad de derivación de 30m³/s [9], cabe recalcar que este caudal para la fecha en donde se desarrolló el estudio se encuentra en malas condiciones.

3.7. Condiciones iniciales - campaña de Medición y obtención de datos

3.7.1. Batimetría Ciénaga Mesolandia

Para la batimetría, se realizó una metodología que consistió en planificar a través de una ruta batimétrica cuales eran los puntos a medir, teniendo como base la medición longitudinal cada cinco (5) metros. Posteriormente se llevó a cabo el muestreo de nivel del agua para cada coordenada plana (XY) específica, adquiriendo datos X (Longitud) Y (Latitud) Z (Profundidad), después se realizó una organización de datos, y la posterior interpolaron de estos mismos con la ayuda del software Surfer 10. Como último paso se representó gráficamente la batimetría a través de curvas de nivel (Figura 10).

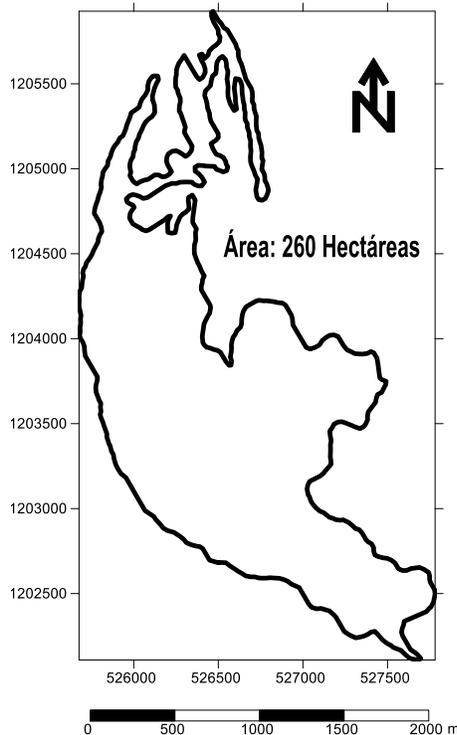


Figura 9. Contorno definido – ciénaga Mesolandia

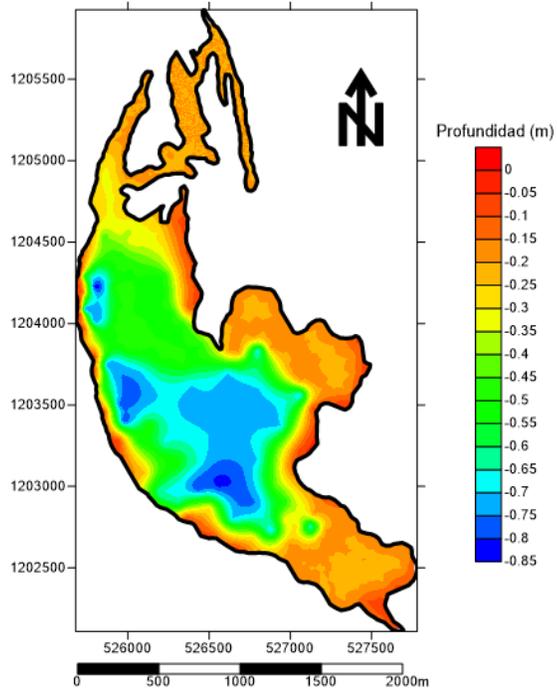


Figura 10. Batimetría - Ciénaga Mesolandia.

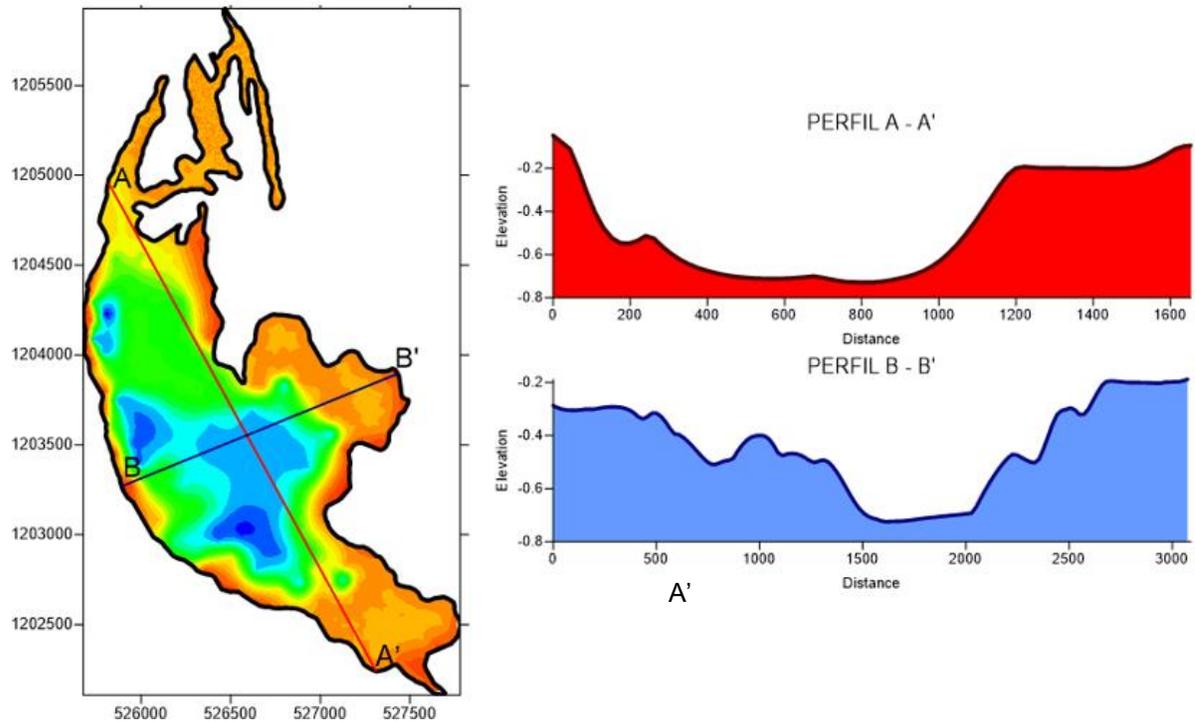


Figura 11. Perfiles de elevación – Ciénaga Mesolandia.

3.7.2. Hidrometeorología

Los datos hidrometeorológicos fueron obtenidos a través del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). Estos datos fueron extraídos de la estación más cercana perteneciente al Aeropuerto Ernesto Cortizos [0029045190], dicha estación se encuentra aproximadamente a 2Km del epicentro de la Ciénaga Mesolandia, por lo cual se concluyó que estos datos son representativos a la hora de simular la hidrodinámica y variables ambientales del sistema.

Estos datos fueron promediados e ingresados al modelo como se muestra a continuación:

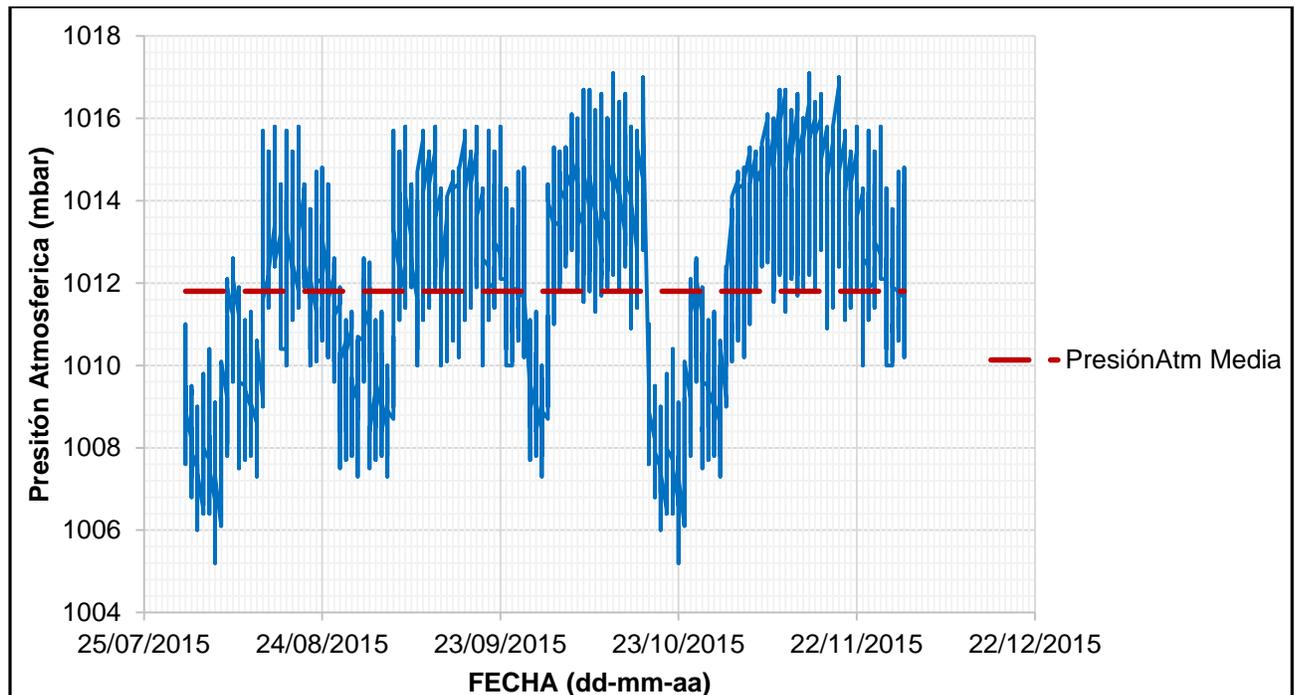


Figura 12. Presión Atmosférica (mbar).

La presión atmosférica presentada en la zona de estudio, muestra unos valores máximos de 1017 mbar, mínimos de 1005mb y una media aproximadamente de los 1012 mbar, la presión se nota alta debido al nivel de la zona de estudio denotando en unos 2 m.s.n.m. la presión atmosférica es una de las variables meteorológicas más importantes ya que define la fuerza ejercida por el planeta hacia un área determinada dentro de esta.

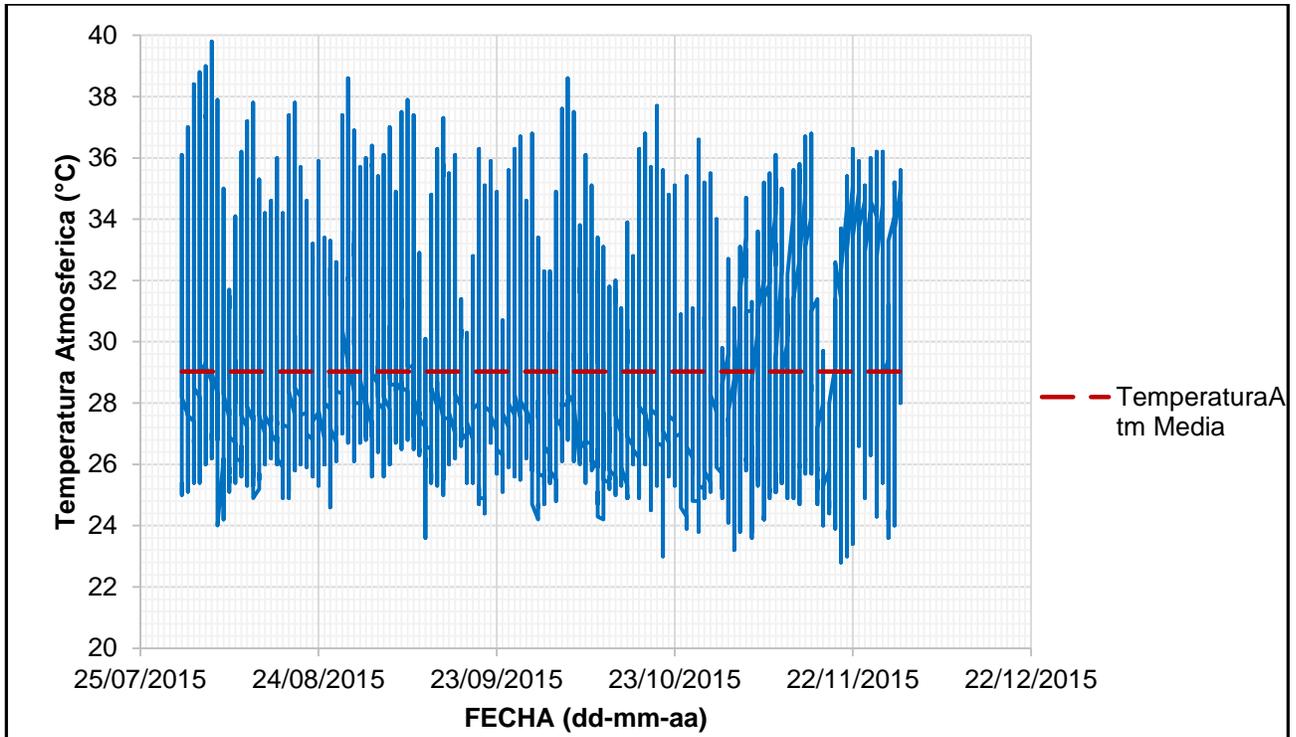


Figura 13. Temperatura Atmosférica (°C).

La temperatura ambiente o temperatura atmosférica es utilizada como variable meteorológica para realizar la modelación de la ciénaga Mesolandia, principalmente influye en ser unas de las variables de la evaporación del agua. Por la ubicación en donde se encuentra la zona de estudio, se presentan temperaturas relativamente altas llegando a 40°C, mínimos de 23°C y un promedio aproximadamente de 29°C. Por las variables meteorológicas el clima se considera de tipo tropical seco, es decir, existe una vegetación propia de la sequedad y altas temperaturas.



Figura 14. Precipitación (mm/día).

La precipitación es considerada dentro de la modelación, una entrada en forma de caudal en el ciclo hidrológico de la ciénaga, los resultados que se observan en la Figura 14, se definen precipitaciones máximas en 11 mm/día, esto se debe a que para el tiempo de estudio predominó la época seca en el departamento del atlántico, igualmente, predominó el fenómeno del niño el cual es una época climática en donde se manifiestan las precipitaciones más bajas de la época.

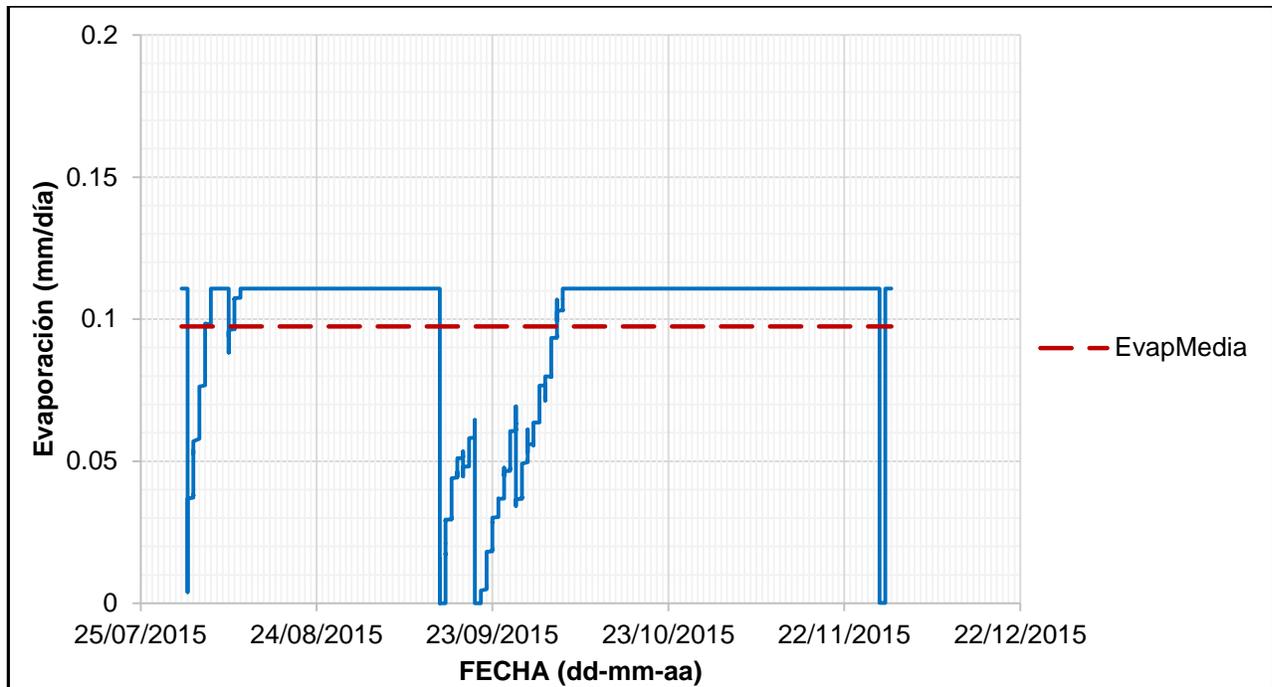


Figura 15. Evaporación (mm/día).

En el ciclo hidrológico definido en el modelo, se considera la evaporación como pérdida (salida) de agua en un intervalo de tiempo, esto conlleva, a la disminución del volumen del recurso hídrico en la ciénaga y por lo tanto al cambio de diferentes factores físico-químicos que pueden definir la hidrodinámica y calidad del cuerpo de agua. En la Figura 15 se contemplan evaporaciones máximas de 0.12 mm/día así como existen día que se consideran sin evaporación, la evaporación está en función de la temperatura y radiación solar existente en la zona de estudio.

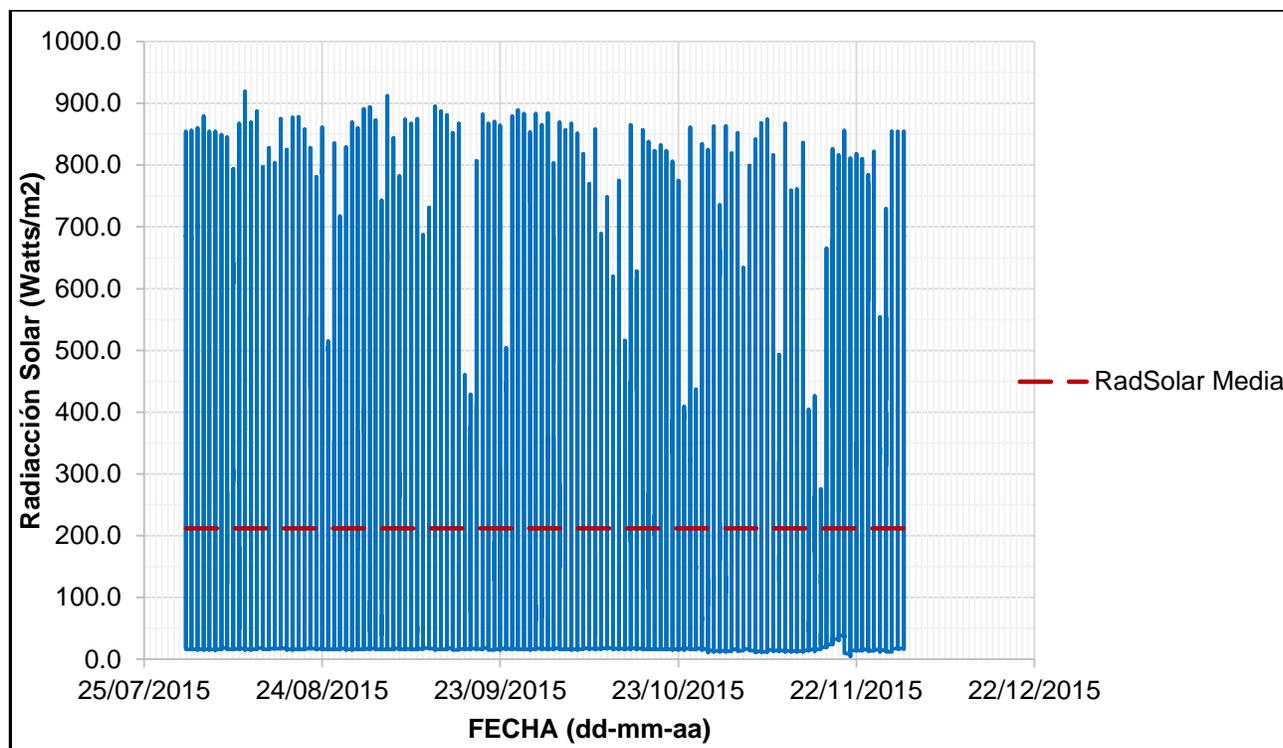


Figura 16. Radiación Solar (Watts/m²).

La radiación solar define la cantidad de energía calorífica que es ejercida sobre una superficie, el modelo interpreta este valor como una variable de la evaporación, con el objetivo de influir a las pérdidas de agua dentro del sistema hidrológico. Esta radiación solar ejerce mayor energía entre las horas de 11 – 14. En la Figura 16 se observa que la radiación solar en la zona de estudio tiene un máximo de 901 Watts/m², un rango nulo (0 Watts/m²) para las horas en donde no se generan rayos solares y un promedio de 200 Watts/m² en los meses estudiados.

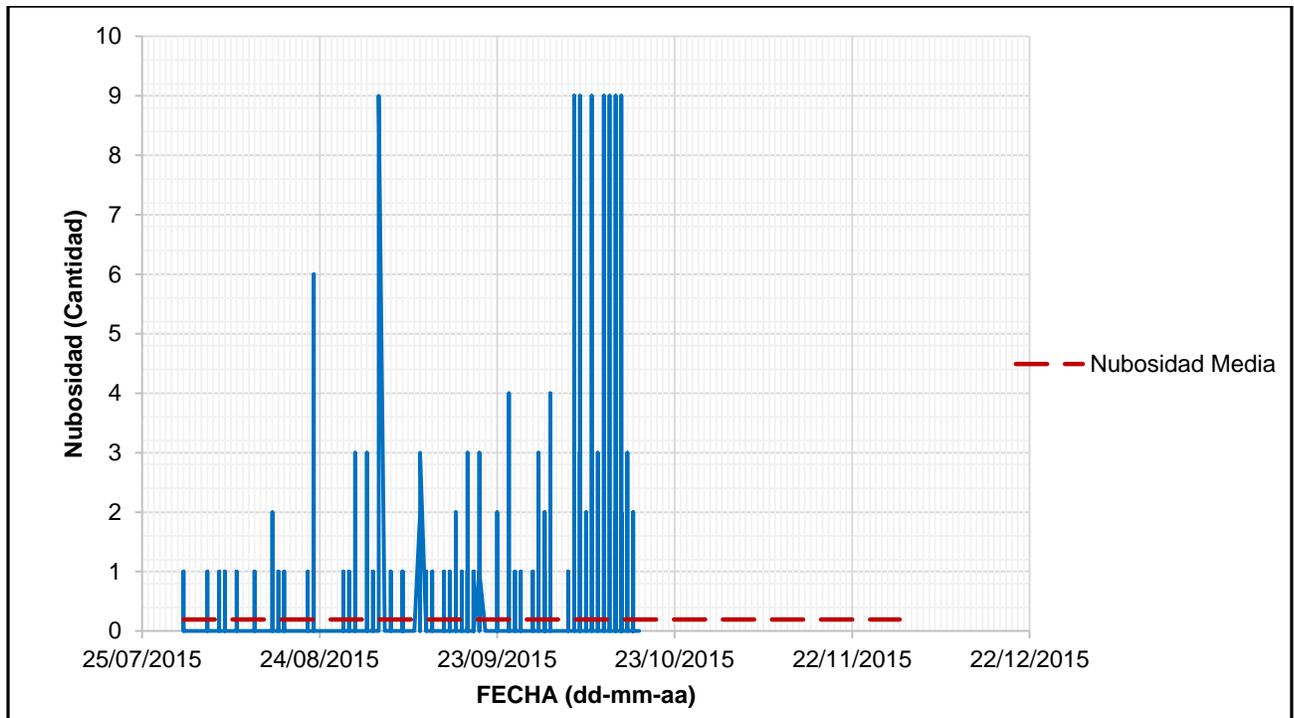


Figura 17. Nubosidad (Cantidad).

La nubosidad se puede definir como la fracción existente cubierta del cielo por nubes, hace referencia en ser una variable meteorológica que interviene en la radiación solar, temperatura, evaporación y precipitación. El modelo EFDC EXPLORER en sus condiciones iniciales exige la nubosidad en términos de cantidad. La Figura 17, muestra los valores utilizados para la modelación arrojando unos máximos 9 y una media de 0.2.

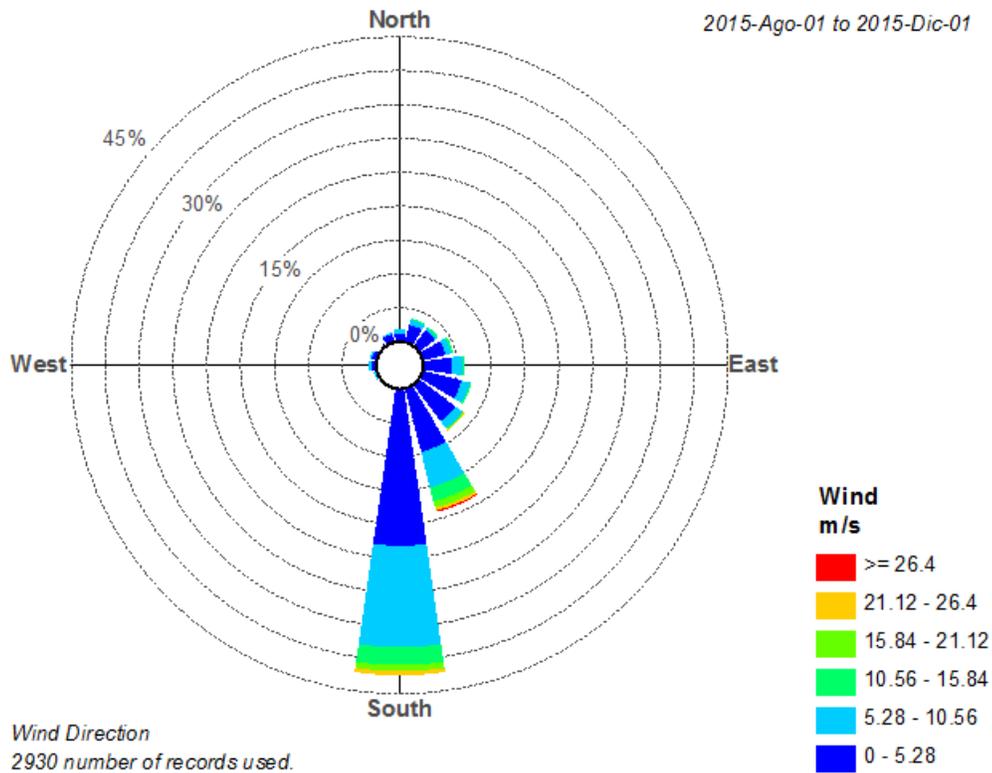


Figura 18. Rosa de los vientos.

La Rosa de vientos mostrada en la Figura 18, describe la dirección, velocidad y frecuencia de los vientos predominantes de la zona. La ciénaga Mesolandia presenta unos vientos con dirección proveniente de la dirección NE, con velocidades máximas de 21.12 y mínimas de 3.41 m/s. La frecuencia de vientos describe porcentualmente que el 45% de los vientos en la zona está en los rangos de 10.56-15-46 m/s. Los vientos son considerados dentro de las ecuaciones numéricas como la forzante más importante para generar los procesos de movimiento en el agua, definiendo sus magnitudes (velocidades) y vectores (direcciones).

3.7.3. Condiciones hidráulicas y de calidad del agua de la ciénaga y los vertimientos.

En este punto se explicarán los diferentes métodos para realizar las mediciones de calidad de agua e hidráulicas igualmente, se mencionarán las diferentes metodologías que se utilizaron para poder obtener, transportar y analizar con precisión y exactitud los datos de

calidad del agua de la Ciénega. Por otra parte, se describirán todos los parámetros y resultados estudiados en cuanto a la calidad del agua de los caños que llegan a la zona de estudio. Posteriormente se realizara la expresión gráfica de la calidad actual de la ciénega sin tener en cuenta los vertimientos.

3.7.3.1. Calidad del agua

Para realizar la toma de muestras se utilizó como referencia la Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas publicada por el IDEAM [84]. El monitoreo se basó en muestras *in situ* y de análisis los cuales se llevaron a cabo en los puntos de monitoreos descritos en diferentes puntos de la ciénega para su representatividad (Figura 19). Igualmente, se especifican los parámetros *in situ* y sus equipos de medición (Tabla 5). Para los parámetros de análisis en laboratorio, se utilizó el muestreo manual debido a que la zona de estudio permitía observar los cambios en las características del agua en cada punto geográfico dado, el tipo de muestra utilizado fue el de muestra puntual tomando diferentes puntos de la ciénega con el objetivo de tener valores representativos.

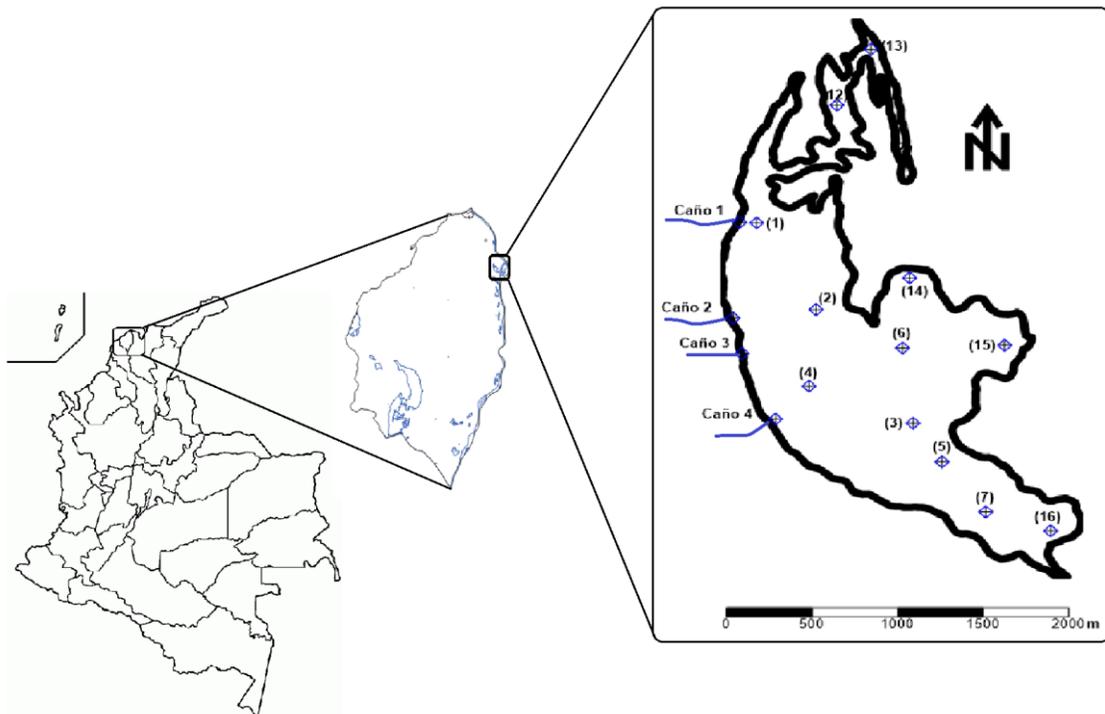


Figura 19. Ubicación de los puntos de toma de muestras.

Los parámetros estudiados fueron tomados en el agua desde frascos plásticos excepto las muestras para Coliformes totales y fecales, para estas se utilizó la metodología de esterilización de envases de vidrio descrita en la guía mencionada anteriormente. Al momento de transportar las muestras se utilizó un recipiente cerrado de poliestireno expandido con hielo seco manteniendo una temperatura constante de 4°C, para posteriormente realizar su respectivo análisis.

Tabla 5. Descripción de equipos utilizados para determinar los parámetros *in situ*.

Equipo	Marca	Muestra	Parámetros
Sonda multiparamétrica	YSI	<i>In situ</i>	Temperatura y pH
Oxímetro			Oxígeno disuelto
Conductímetro			Conductividad eléctrica

Tabla 6. Descripción de las técnicas utilizadas para cada parámetro estudiado.

Parámetro	Técnica utilizada	Tipo de envase	Método de preservación
Fisicoquímicos			
Sólidos Suspendidos Totales	Secado a 103 – 105 °C - Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, AWWA, APHA – WEF 2540D (ED 21 2005)	Vidrio	Enfriamiento simple (4°C) y almacenamiento de la muestra en la oscuridad
Nitrógeno Amoniacal	KJELDAHL - Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, AWWA, APHA – WEF 4500-NH ₃ B-C (ED 21 2005)	Vidrio	Enfriamiento simple (4°C) y almacenamiento de la muestra en la oscuridad

DBO5	Incubación por 5 días – Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, AWWA, APHA – WEF 5220B (ED 21 2005)	Vidrio	Enfriamiento simple (4°C) y almacenamiento de la muestra en la oscuridad
Microbiológicos			
Coliformes Fecales	Técnica de fermentación en tubos multiples - Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, AWWA, APHA – WEF 9221B-E (ED 21 2005)	Vidrio anteriormente esterilizado	Enfriamiento simple (4°C) y almacenamiento de la muestra en la oscuridad
Coliformes Totales	Técnica de fermentación en tubos multiples - Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater, AWWA, APHA – WEF 9221B (ED 21 2005)	Vidrio anteriormente esterilizado	Enfriamiento simple (4°C) y almacenamiento de la muestra en la oscuridad

3.7.3.2. Resultados de la calidad del agua – Ciénaga Mesolandia

La Figura 20 muestra los resultados de la calidad del agua para la temperatura y pH, en las imágenes se observa que la temperatura tiene un promedio de 32°C, un máximo de 34°C que se encuentra en el área oriental de la ciénaga y unas temperaturas mínimas de hasta 30°C. El pH tiene un comportamiento neutro-alcalino observándose valores de 7-10 que son considerados valores óptimos para la supervivencia de algunas especies acuáticas. Con estos valores se determina que la ciénaga tiene una temperatura y pH en términos permisibles según la resolución 00258 de 2011.

Así mismo, en la Figura 21 se contempla un desequilibrio en el oxígeno disuelto, resultando valores heterogéneos en toda el área de la ciénaga, mostrando valores entre 1 y 12 mg/L, el promedio resultante es de 6.5mg/L y el que ocupa un área más extensa se encuentra en los 6 mg/L, este resultado indica que la Ciénega generalmente cumple con los criterios de calidad. La DBO tiene unos valores críticos, llegando a un valor máximo de 120 mg/L y un valor mínimo de 35 mg/L, su promedio es de 43 mg/L, no cumple con los

critérios de qualidade exigido na resolução 00258 de 2011 e como se analisa nos resultados, a vida aquática é muito pouco provável que se habituou a estas condições.

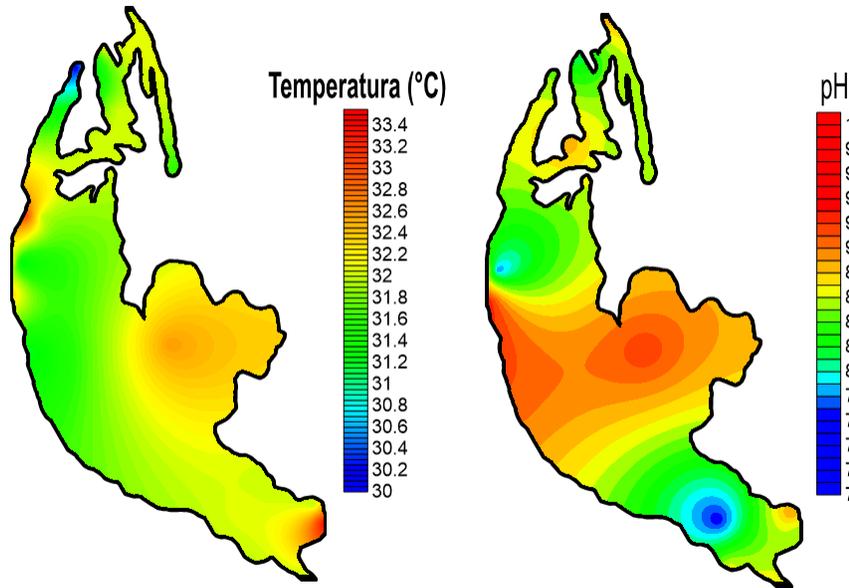


Figura 20. Resultados medidos de Temperatura (°C) y Ph

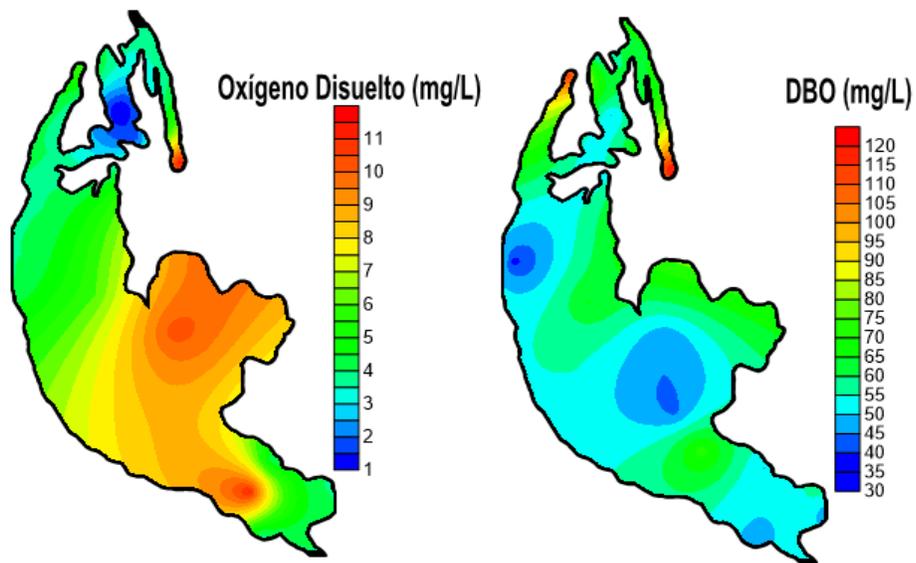


Figura 21. Resultados medidos de Oxígeno Disuelto (mg/L) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)

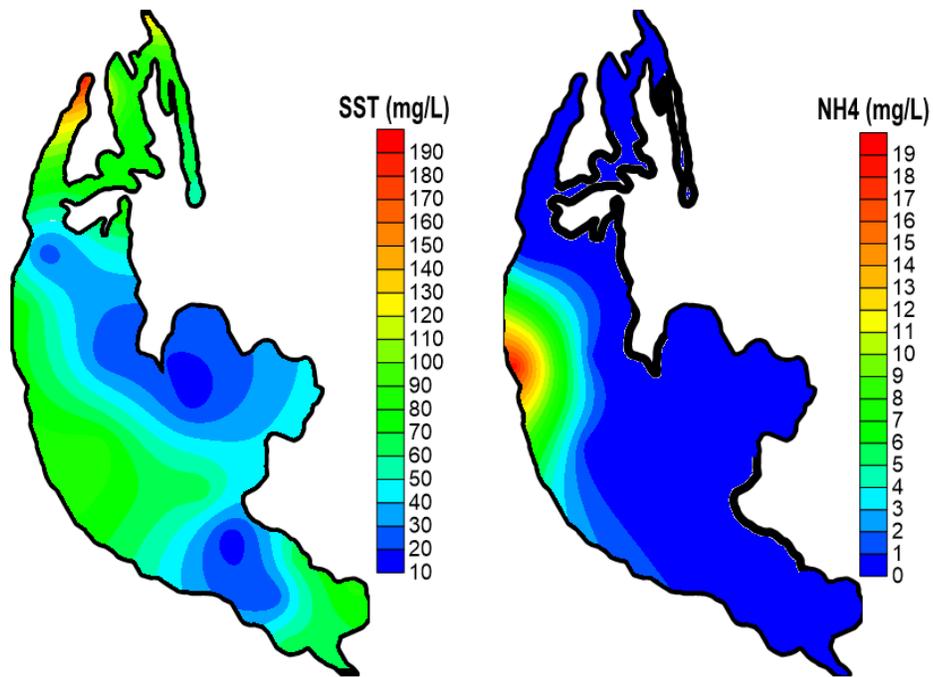


Figura 22. Resultados medidos de Solidos Suspending Totales (mg/L) y Nitrógeno Amoniaco (mg/L).

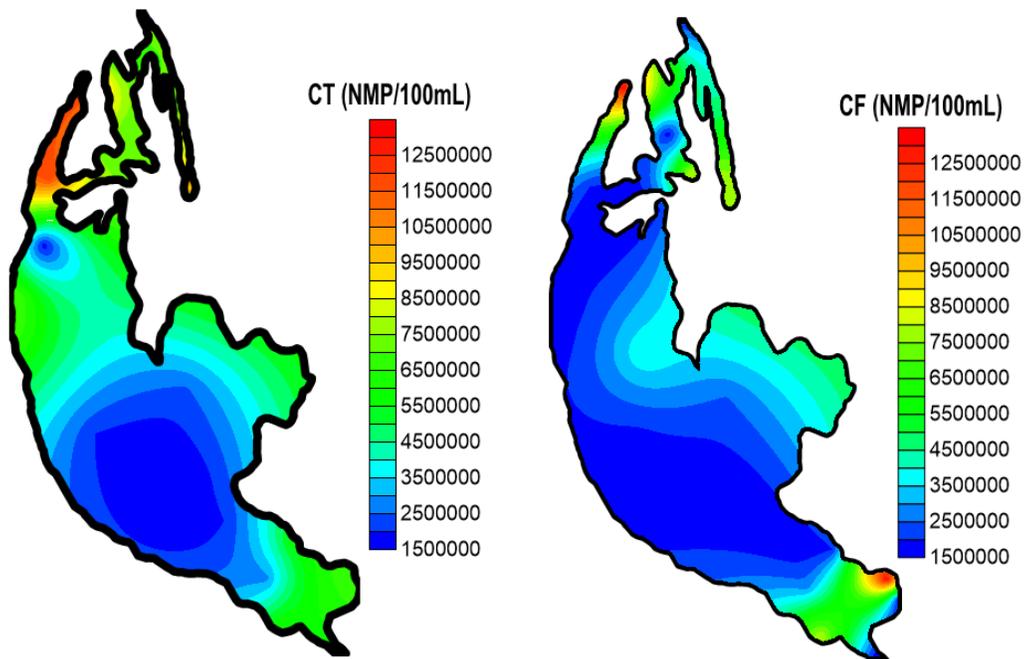


Figura 23. Resultados medidos de Coliformes Totales (NMP/100ml) y Fecales (NMP/100ml).

La Figura 22 describe las condiciones iniciales de los SST y NH₄, diagnosticando valores máximos de 190 mg/L y mínimos 10 mg/L, un promedio de 80 mg/L. Por otra parte, el nitrógeno amoniacal (NH₄) se encuentra en valores altos en los puntos de influencias por los vertimientos, logrando valores máximos de 19 mg/L, en el área restante de la ciénaga se observan valores de 1mg/L. Este resultado se ve influenciado en la eutrofización que existe en el área de mezcla vertimiento-ciénaga por la inexistencia de vida acuática y presencia de macrofitas.

Por otro lado, la Figura 23 da a conocer los valores iniciales de los Coliformes totales y fecales (NMP/100mL) donde para los dos (2) se describen valores entre 1,5x10⁶ y 1,3x10⁷ NMP/100mL, siendo la parte norte de la Ciénaga la más influenciada con estos parámetros.

3.7.3.3. Caños vertientes

Los caños vertientes definen los cuerpos receptores principales de los vertimientos industriales que pertenecen a la zona industrial alledaña a la ciénaga Mesolandia. Se tomaron muestras en la entrada al cuerpo de agua estudiado (Tabla 7), obteniendo los parámetros de interés para realizar las diferentes simulaciones de calidad del agua.

Tabla 7. Caños Vertientes a la ciénaga Mesolandia.

Nombre	Coordenadas (UTM 18N)	
	E	N
Caño 1	525762	1204515.5
Caño 2	525731.9	1203872.4
Caño 3	525802.1	1203631.25
Caño 4	525962.4	1203189 N

La tabla 8 detalla los resultados de la calidad del agua de cada caño que terminan en la ciénaga Mesolandia. Se puede observar que existen caños con una calidad del agua en bajas condiciones (Caño 2 y Caño 3) representando resultados de oxígeno disuelto mínimo y NH₄, SST y DBO altos.

Tabla 8. Resultados Parámetros de Vertimiento.

Parámetro	Unidad	Nombre	Resultado
Temperatura	°C	Caño 1	33
		Caño 2	31.2
		Caño 3	31
		Caño 4	32.9
Oxígeno Disuelto	mg/L	Caño 1	8.8
		Caño 2	1
		Caño 3	2.1
		Caño 4	0.5
DBO5	mgO2/L	Caño 1	66
		Caño 2	66
		Caño 3	120
		Caño 4	68.4
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	Caño 1	0.65
		Caño 2	18.5
		Caño 3	12
		Caño 4	3.5
Coliformes Fecales	NMP/100mL	Caño 1	2,000,000
		Caño 2	1,300,000,000
		Caño 3	8,000,000
		Caño 4	2,000,000

3.7.3.4. Condiciones Hidráulicas

Los cuales de vertimientos se consideran una forzante dentro del sistema de modelación, se basan en la velocidad (v) y área (a), el producto de estas dos variables determina el Caudal de vertimiento (Q). Para el estudio hidráulico de caños se supuso secciones rectangulares homogéneas y arrastre de sedimentos, el área es el resultado del producto entre la base y la altura del caño, la velocidad fue adquirida con un equipo portable Velocity Flow Meter.

Tabla 9. Resultados hidráulicos de los caños vertientes.

Nombre	Área (m ²)	Velocidad (m/s)	Caudal (m ³ /s)
Caño 1	0.75	0.005	0.004
Caño 2	0.47	0.011	0.005
Caño 3	0.89	0.017	0.015
Caño 4	0.65	0.023	0.015

4. APLICACIÓN DEL MODELO EFDC EXPLORER A LA ZONA DE ESTUDIO

El modelo EFDC EXPLORER cumple con los requerimientos necesarios para realizar una correcta simulación que permita evaluar los vertimientos que se generan a la ciénaga Mesolandia, así como simular los diferentes escenarios de esta, cabe recalcar que los resultados están basados en la exactitud de los datos de entrada, incluyendo los coeficientes de reacción que intervienen en el modelo para poder predecir y justificar la pregunta planteada como problema.

Para este proyecto la aplicación del modelo EFDC EXPLORER en la ciénaga Mesolandia se describen en dos fases, la primera se define como un pre-procesamiento de datos en el cual EFDC EXPLORER requiere de datos de entrada tales como las condiciones de frontera e iniciales, definición de la malla de cálculo y batimetría, la segunda nombrada pos-procesamiento se realiza todas las actividades de extracción de datos que le permitan al lector analizar con mayor facilidad los resultados de la modelación.

Para objeto de este estudio se utilizaron dos escenarios de simulaciones, el primer escenario comprende las condiciones actuales de la ciénaga Mesolandia receptora de vertimientos industriales y domésticos así como la hidrometeorología del tiempo simulado. El segundo escenario comprende una propuesta de mejora en donde se pretende ingresar un flujo proveniente al río Magdalena para realizar la recuperación de la ciénaga, en este escenario se tienen muy en cuenta las condiciones topográficas de la zona, así como las hidráulicas y de calidad del agua del río Magdalena.

Generación de la malla de cálculo

La malla numérica es utilizada para los tres (3) escenarios propuestos, se generó utilizando el modelo EFDC EXPLORER, el cual se especializa, además de realizar la modelación de sistemas acuáticos, para la generación de mallas, que proporciona un ambiente para el usuario donde la información geoespacial (tipo mapa) puede ser fácilmente sintetizada y generar mallas de cálculo para su posterior procesamiento, transformando así un espacio continuo en un espacio discreto. La generación de la malla de cálculo requiere de la definición del contorno y batimetría del cuerpo de agua definidos en los ejes XYZ.

La malla numérica utilizada para realizar las simulaciones tiene un $\Delta X = \Delta Y = 5$ m, quedando con 384 elementos en la dirección X y 214 elementos en la dirección Y, para un total de elementos 82176 como se muestra en la siguiente figura:

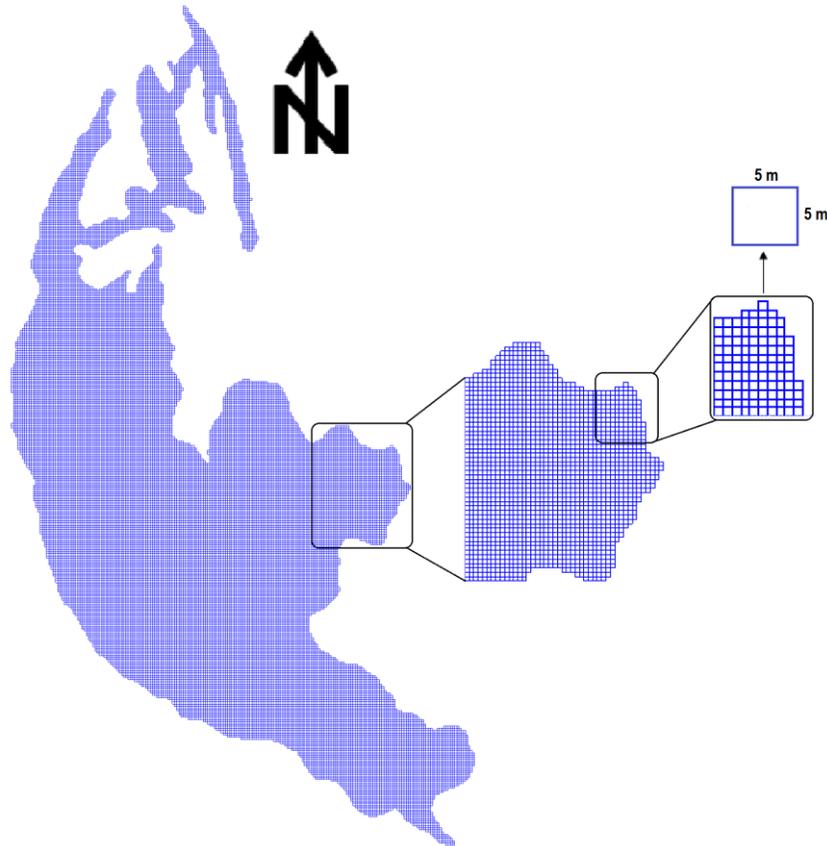


Figura 24. Configuración de la malla numérica - Ciénaga Mesolandia.

4.1. ESCENARIO 1: Condiciones iniciales, de frontera y forzantes.

Para objeto de este estudio, se conoce como condiciones de fronteras, iniciales y forzantes la información adicional que ayudan a relacionar variables entre sí para lograr una exactitud mayor a los resultados, las cuales se les puede denominar condiciones especiales, que permiten ajustar los problemas a condiciones específicas.

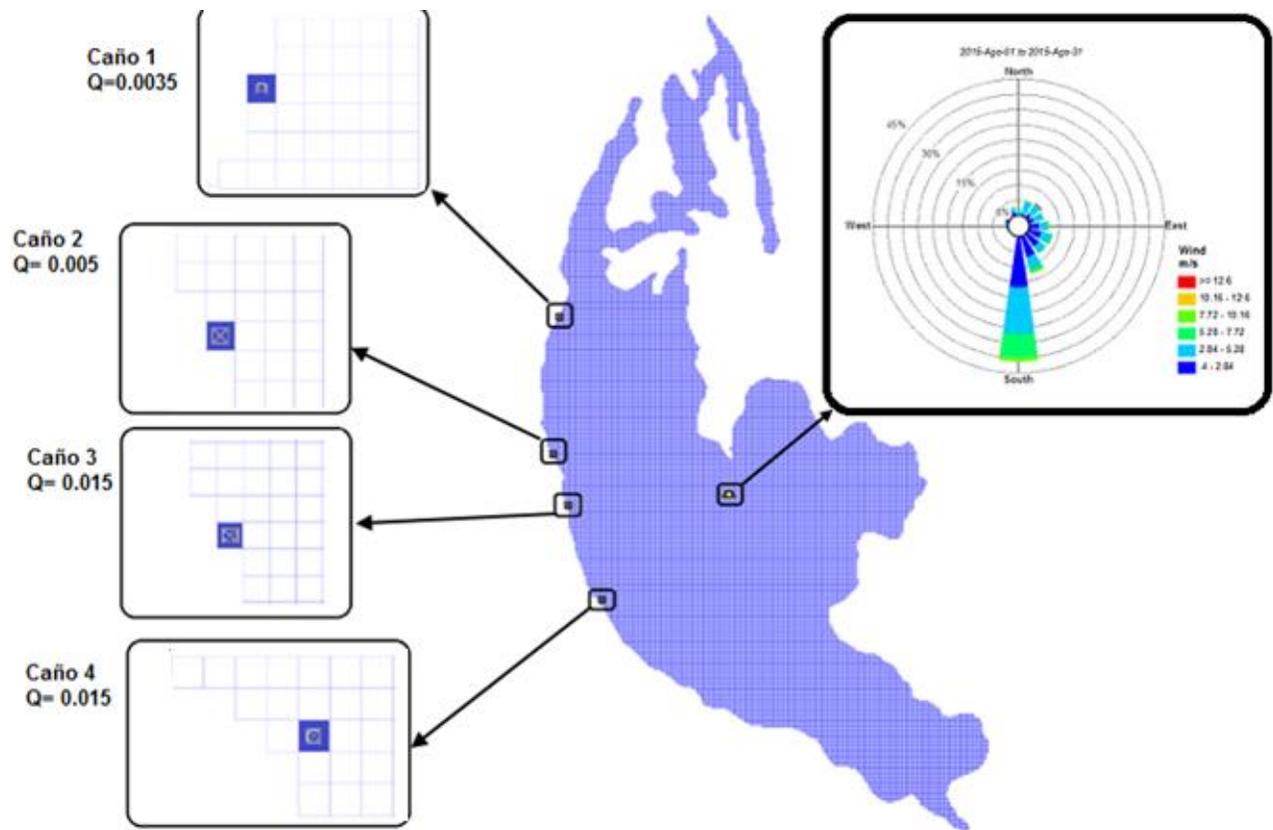


Figura 25. Condiciones de frontera y forzantes – Escenario 1.

5. RESULTADOS DE LA HIDRODINAMICA Y CALIDAD DEL AGUA

El modelo EFDC EXPLORER cuenta con un postprocesador que permite visualizar los resultados en forma de animaciones y diferentes graficas que ayudan a realizar un mejor análisis e interpretación de los resultados.

5.1. Simulación hidrodinámica

La simulación hidrodinámica describe el comportamiento de las direcciones y magnitudes de velocidad respecto al tiempo simulado, en la Figura 26 se muestra en imágenes las simulaciones para el Escenario 1.

La Figura 26 describe mediante diferentes imágenes las direcciones y velocidades cada cinco (5) días de la ciénaga Mesolandia, que están en función de los vientos y las diferentes fuerzas que para objeto de este estudio se localizan en las condiciones de frontera (flujos). Las direcciones predominantes hacia donde se mueve el agua tienen una dirección NNW – NNE, esto se debe a que el viento en la zona sopla hacia esta dirección, las velocidades se encuentran en un rango de 0-0.05 debido a que es un cuerpo de agua con profundidades mínimas, el cual solo la fuerza que genera las velocidades son igual a las que genera sus direcciones (vientos y flujos), de estas imágenes también se puede recalcar que las zonas en donde existen mayor velocidades son las zonas en donde se encuentran los vertimientos y centro de la ciénaga.

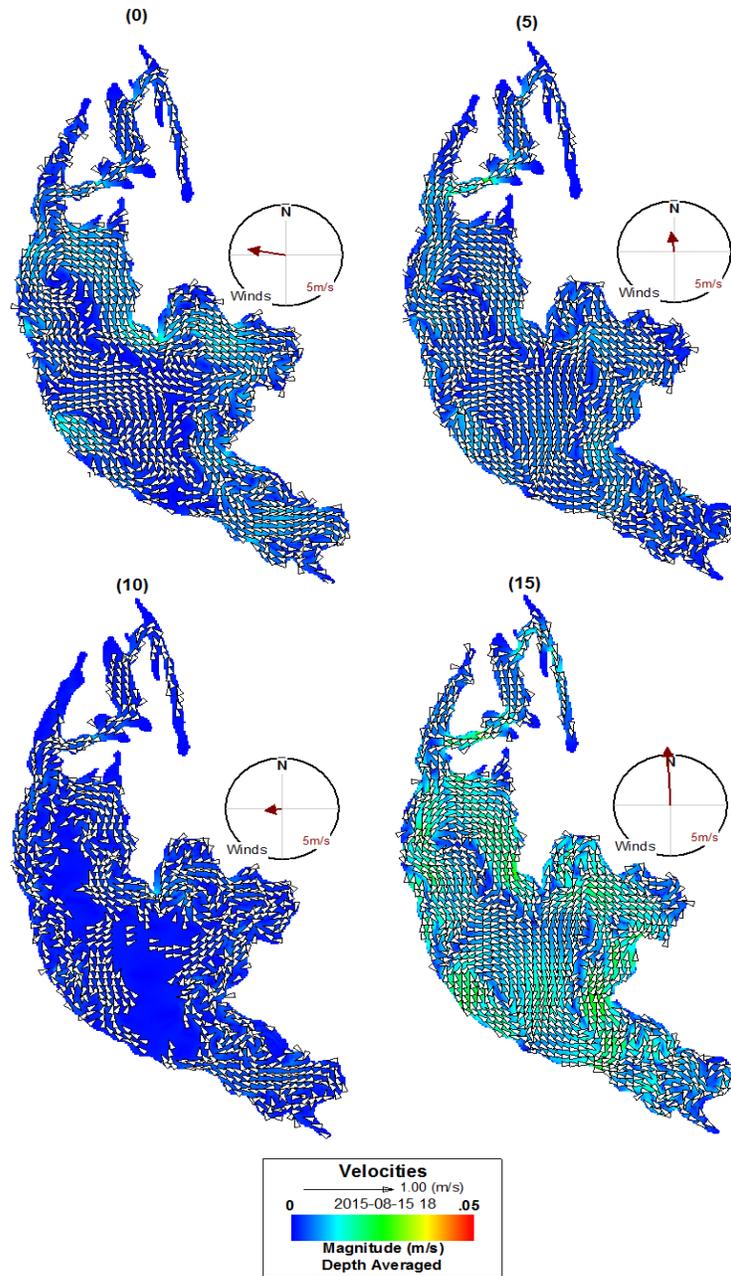


Figura 26. Vectores y magnitudes de velocidad.

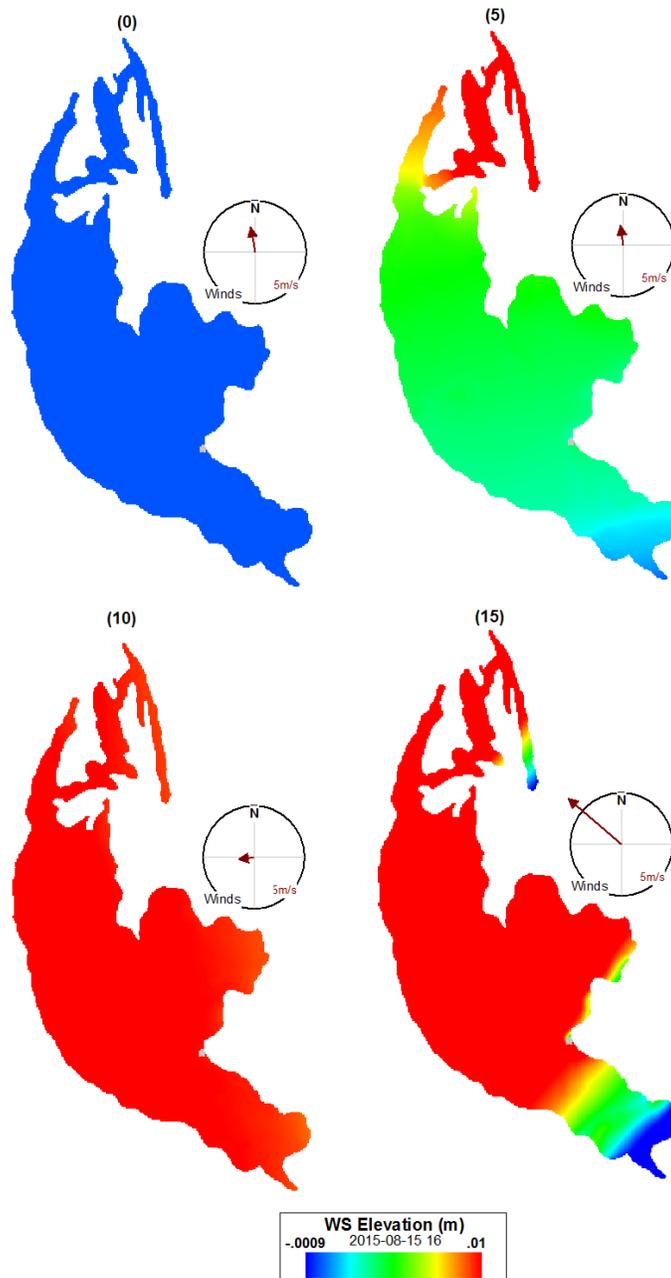


Figura 27. Elevación de la superficie del agua.

La Figura 27 define las diferentes elevaciones que tiene la superficie del agua, estas elevaciones están en función de la hidrodinámica del sistema (dirección y velocidad del viento), como ya ha sido explicado los vientos tienen una predominación en su dirección con sentido NNW – NNE, esto ayuda a determinar hacia donde se mueve el agua y a su vez en que partes tiene mayor y menor elevación. El día 5 confirma lo explicado

anteriormente, en el sur de la ciénaga se encuentra con una elevación del agua del -0.01 m (disminuye) y al norte de la ciénaga se encuentra con una elevación de 0.01 m, por otra parte, para el día 10 se encuentra una elevación homogénea durante toda la ciénaga.

5.2. Resultados hidrodinámica

En el Escenario 1, la rosa de velocidades define las direcciones, velocidades y frecuencias del agua pertenecientes a la ciénaga Mesolandia. Observándose velocidades no mayores a 0.032 m/s con una frecuencia del 5%, las velocidades más representativas se encuentre entre los intervalos de 0.019 y 0.026 m/s con una frecuencia del 30% y las del intervalo entre 0.007 y 0.13 m/s, cabe recalcar que las velocidades son bajas por ser un sistema somero y que las fuerzas que causan su movimiento (forzantes) son los vientos. La rosa de velocidades también define que el agua predomina con una dirección Norte, esto causado por la dirección del viento propia de la zona. La Figura 28 (A) y (B) tiene relación debido a que los vientos se definen como Blowing from y las velocidades como Water to.

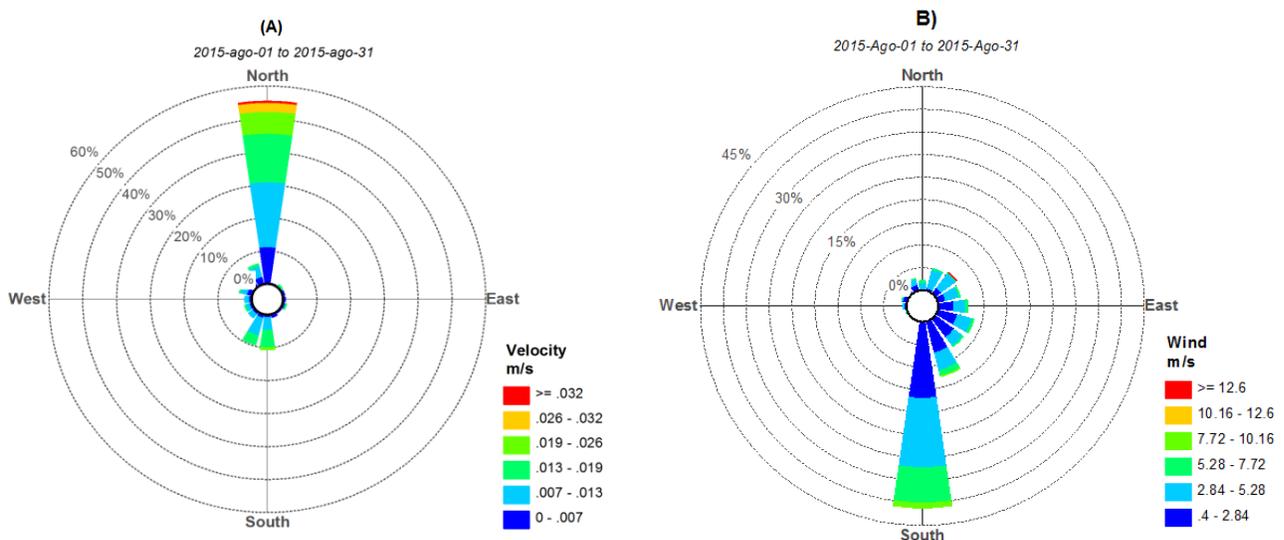


Figura 28. Rosa de velocidades (A) y vientos (B) – Escenario 1.

5.3. Simulación de transporte de contaminantes escenario 1.

Las imágenes mostradas a continuación son los resultados que se obtuvieron para el escenario uno (1), condiciones normales de descarga en el cuerpo de agua.

En la Figura 29, registra un aumento la temperatura en los días diez (10) y quince (15) con una concentración en la zona centro de la Ciénaga generándose corrientes de calor, patrón que ocasiona que se dé una rápida dispersión térmica, generando que la temperatura se equilibre.

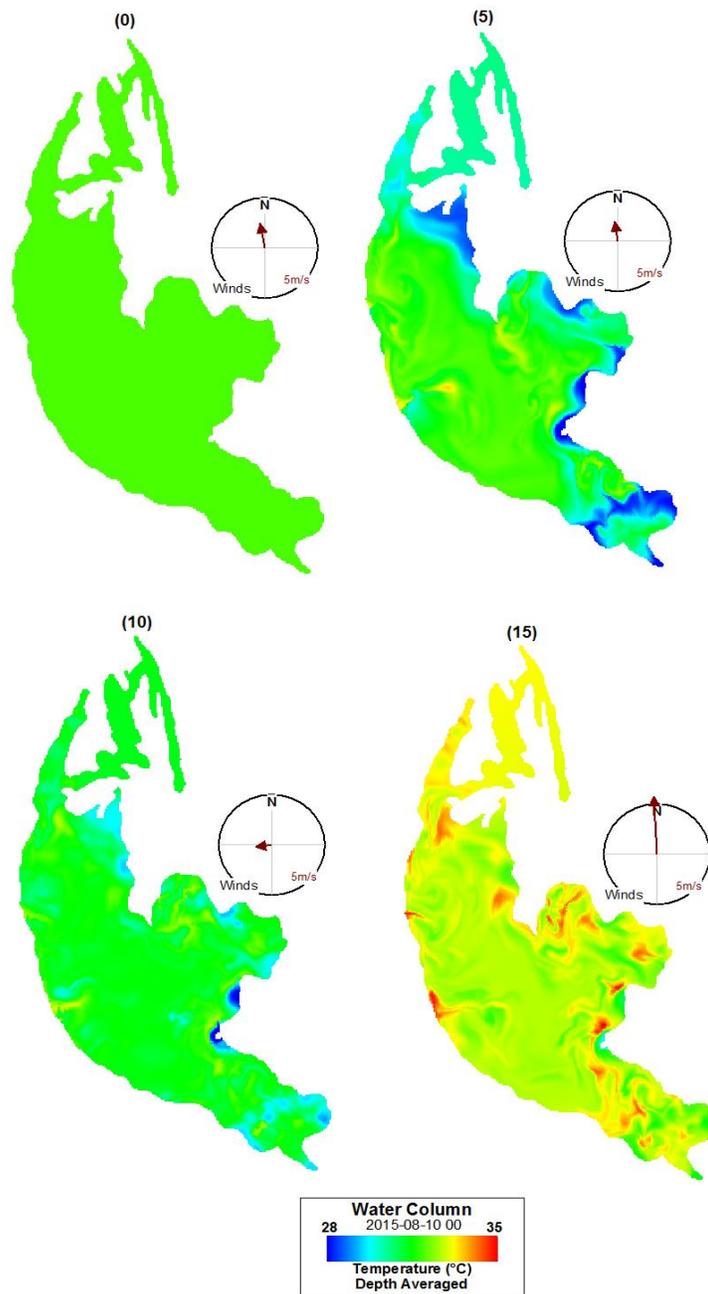


Figura 29. Simulación Temperatura (°C) – Escenario 1.

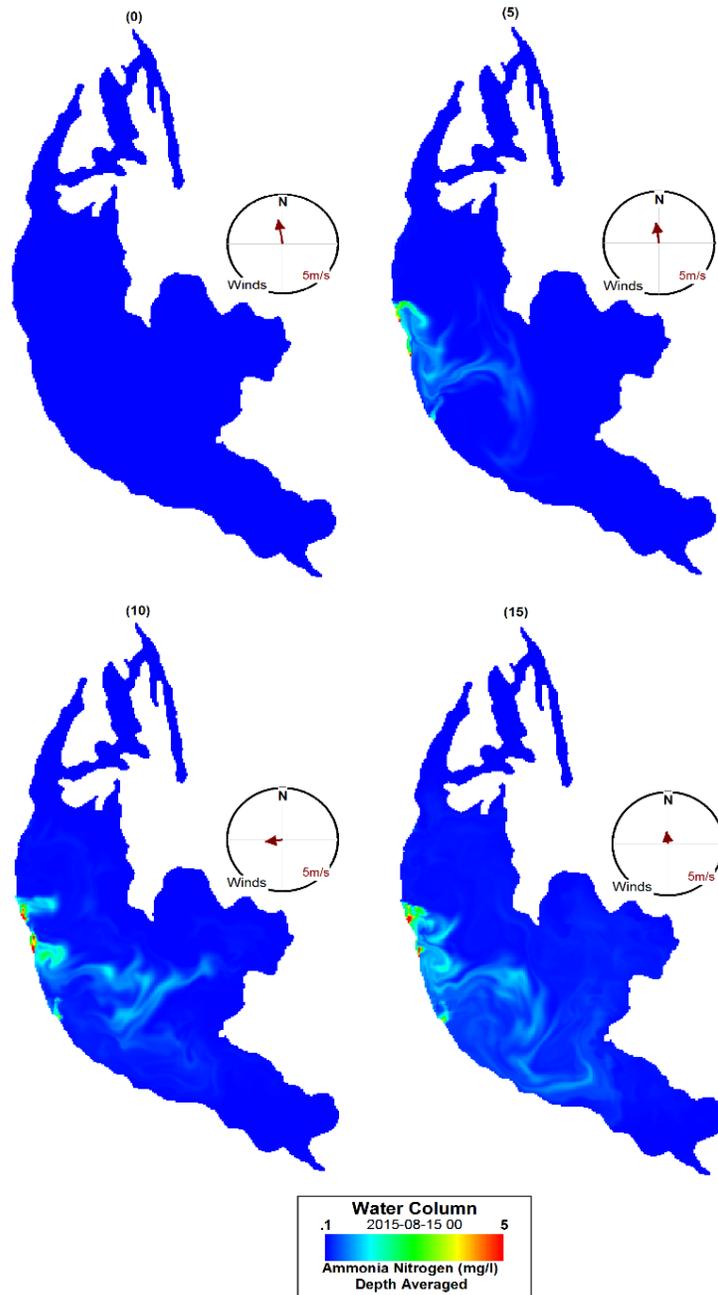


Figura 30. Simulación NH4 (mg/L) – Escenario 1.

El nitrógeno amoniacal NH4 representado en la Figura 30, tiene un crecimiento exponencial respecto al tiempo, pudiéndose observar que en los primeros días de simulación se presentaban valores mínimos en concentración y mientras aumentaba el tiempo la concentración del nitrógeno amoniacal se iba esparciendo en la ciénaga, presentando concentraciones mayores cuando aumenta el tiempo de simulación.

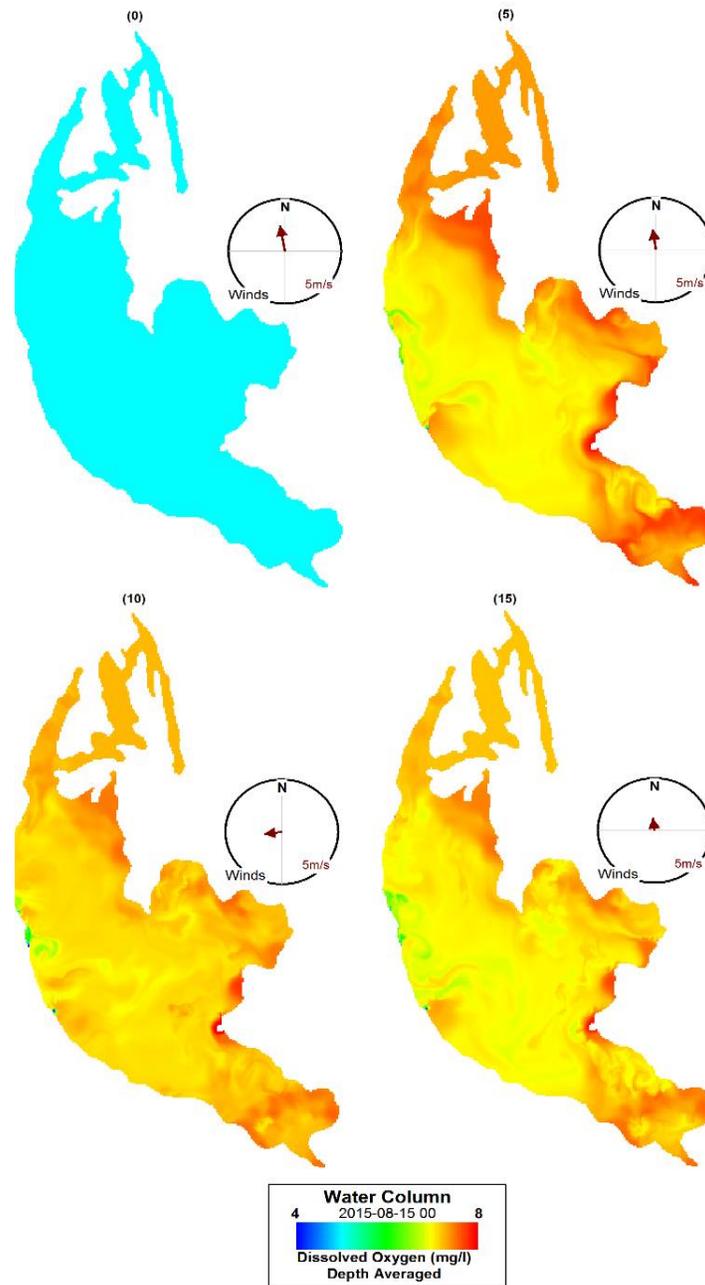


Figura 31. Simulación OD (mg/L) – Escenario 1.

La simulación del Oxígeno Disuelto (OD) en el cuerpo de agua (Figura 31) denota una concentración mayor de este parámetro se encuentra en la zona sur y sureste durante el todos los días de simulación, mostrando valores de 8 mg/L. En general se observa que el Oxígeno Disuelto permanece por encima de un promedio de 6 mg/L.

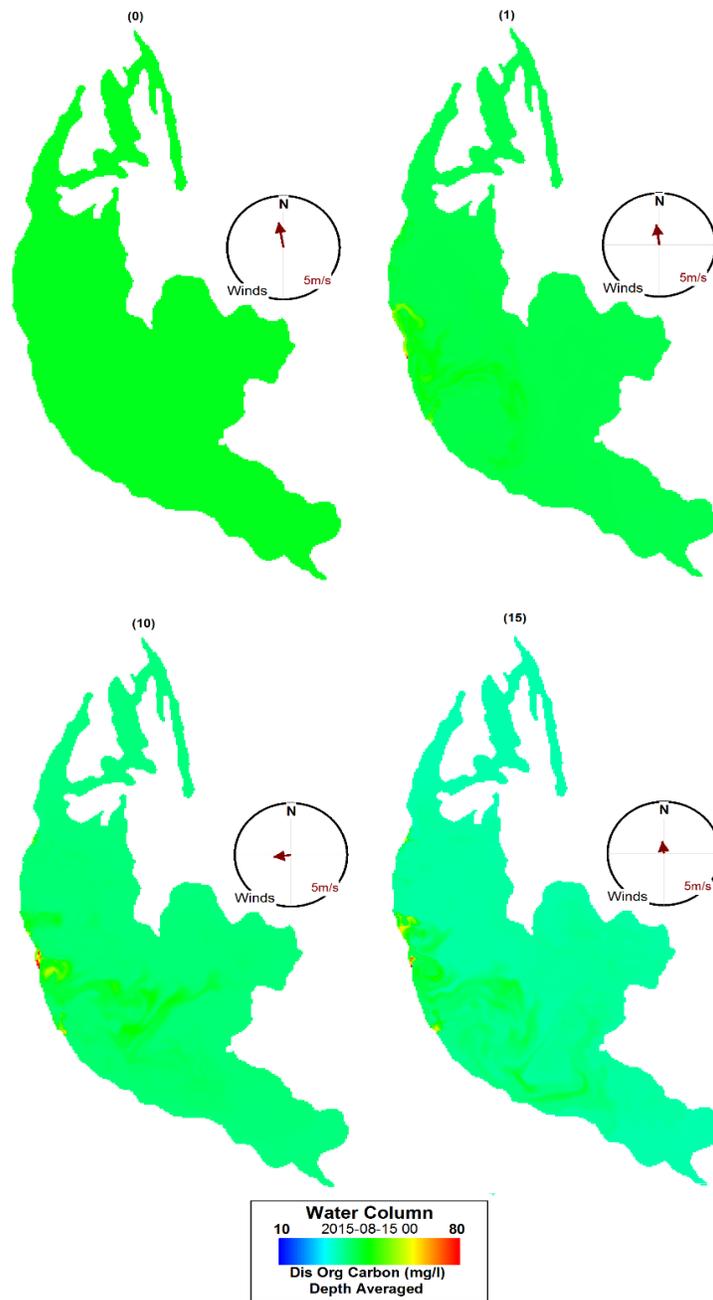


Figura 32. Simulación DBO (mg/L) – Escenario 1.

En la Figura 32, se puede observar el comportamiento de la DBO durante los quince (15) días de simulación. La concentración de DBO en la ciénaga tiene una disminución al momento de transcurrir el tiempo, pero esta disminución no se hace notable debido a que se realiza muy lenta por parte de la ciénaga, logrando tener un promedio de 38 mg/L de DBO.

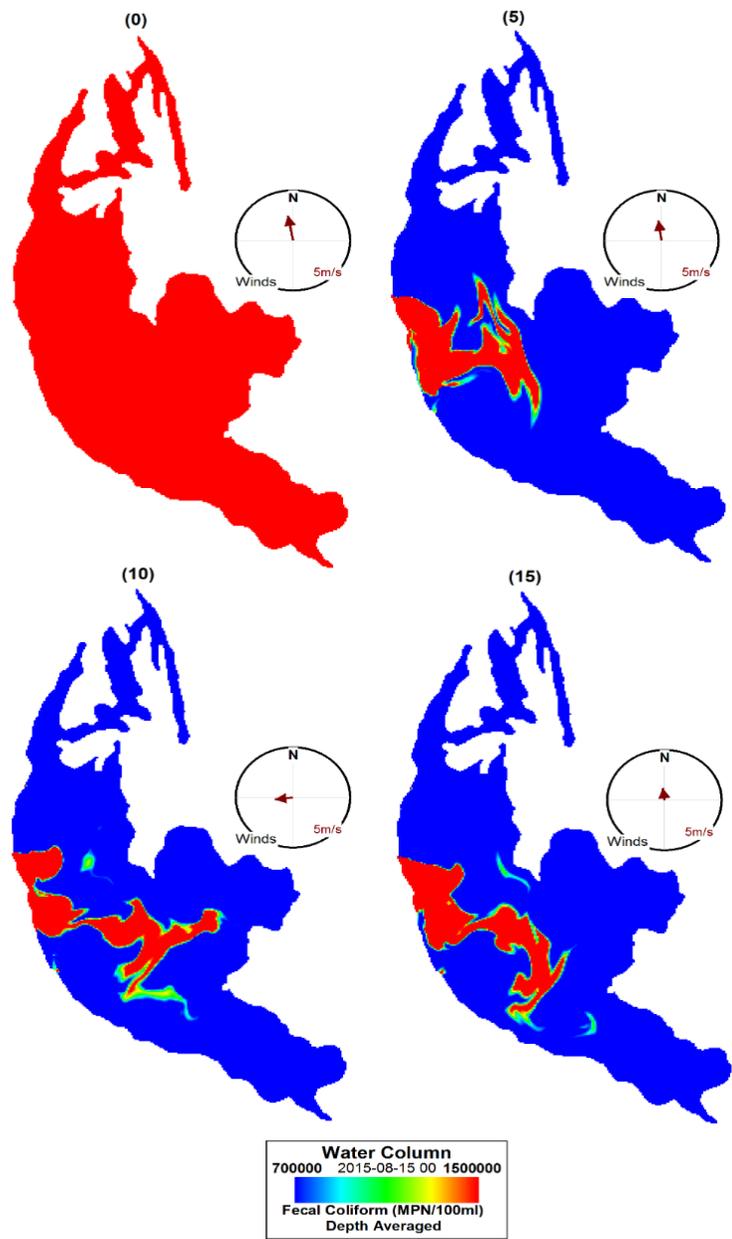


Figura 33. Simulación Coliformes Fecales (mg/L) – Escenario 1.

En la Figura 33 se muestra la simulación de quince (15) días de los Coliformes Fecales en la Ciénaga. En la cual se muestra una pluma que inicia en puntos de vertimientos, la cual se expande hacia el sur del cuerpo de agua denotándose una baja capacidad de asimilación, ya que al llegar al día quince, se observa una cantidad considerable de este parámetro.

6. CAPACIDAD DE ASIMILACION

La capacidad de asimilación definida en un cuerpo de agua se encuentra en función de todos los factores propios físico-químico-biológicos que determinan si este es capaz de auto-depurar sin medios adicionales, las cargas vertientes.

Para objeto de estudio se utilizó una serie de tiempo otorgada por el modelo EFDC EXPLORER en donde se extraen datos de concentración a lo largo del tiempo en el epicentro de la ciénaga con el fin de observar la disminución o incremento de la concentración para los diferentes parámetros estudiados, posteriormente se define la cantidad en concentración que puede ser depurado por la ciénaga Mesolandia.

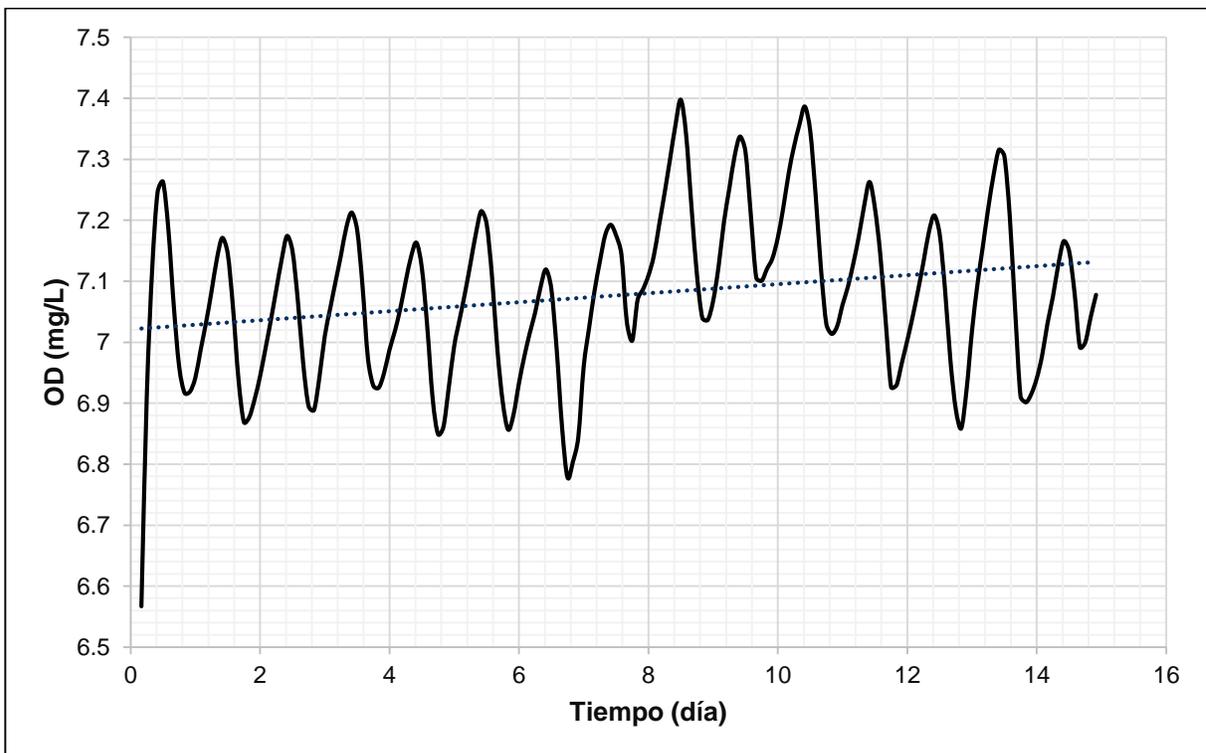


Figura 34. Asimilación de OD (mg/L).

La asimilación del Oxígeno Disuelto, Figura 34, se presenta con una recuperación promedio de este parámetro de 0,1 mg/L cada catorce (14) días como se denota en la línea de tendencia de la gráfica, en donde existen altos y bajos a medida que ingresan vertimientos al cuerpo de agua, ocasionado lentitud a la hora de recuperarse.

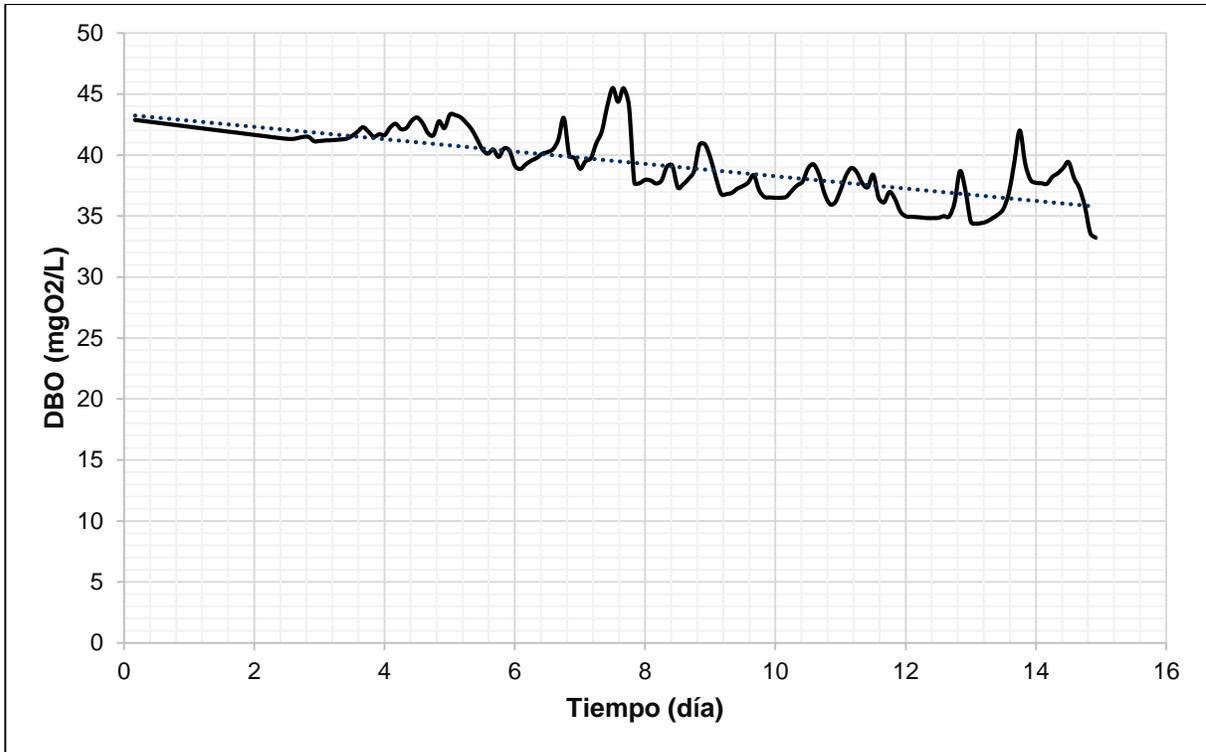


Figura 35. Asimilación DBO (mg/L).

La figura inmediatamente anterior (35), contiene la tendencia de asimilación que presenta la Demanda Bioquímica de Oxígeno. El valor promedio de depuración de la DBO de la Ciénaga es de 5 mg/L cada diez (10) días, teniendo en cuenta los picos y baches que presenta este parámetro y el ingreso constante de vertimientos, el proceso de recuperación del cuerpo de agua por sí solo, se realiza de forma lenta y no eficaz.

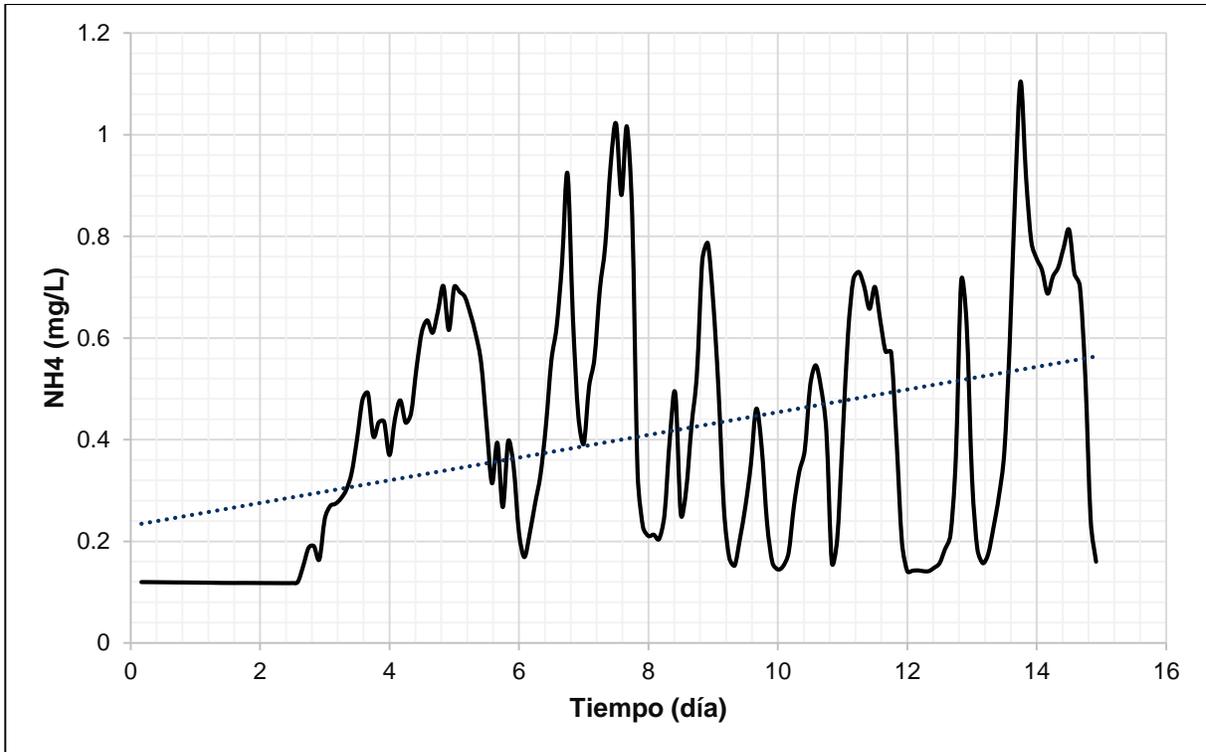


Figura 36. Asimilación NH4 (mg/L).

La Figura 36, nos muestra la asimilación del Nitrógeno Amoniaco en el cuerpo de agua, para este caso la ciénaga Mesolandia no está siendo capaz de asimilar los vertimientos de NH4, presentando una tendencia en aumento exponencial, dando como resultado el aumento de la concentración a medida que transcurre el tiempo, en promedio aumenta la concentración 0.1 mg/L cada día.

7. PROPUESTA DE MEJORA

Gracias a los resultados representados en el punto anterior, se evidenció un deterioro de la ciénaga que según las condiciones actuales puede ir empeorando. Debido a esto se ha diseñado una propuesta de mejora que cumpla con la necesidad de solucionar el problema evidente en que se encuentra la ciénaga Mesolandia.

Por la zona en donde se encuentra situada la ciénaga, aledaña el río Magdalena, se ha estudiado la posibilidad de ingresar una condición de frontera perteneciente a una entrada y salida de agua en el cuerpo estudiado con el fin de realizar una recuperación del sistema.

Metodológicamente se realizó el levantamiento topográfico de la zona para definir las curvas de niveles y así determinar cuál sería el trayecto óptimo de la construcción del canal para transportar las aguas del río Magdalena hacia la ciénaga (Figura 37), posteriormente se obtuvo información histórica sobre las condiciones hidráulicas y de calidad del agua del río Magdalena y así realizar simulaciones con diferentes caudales de entrada en la ciénaga para analizar y determinar cuál es el caudal que ayudara en menos tiempo su recuperación.

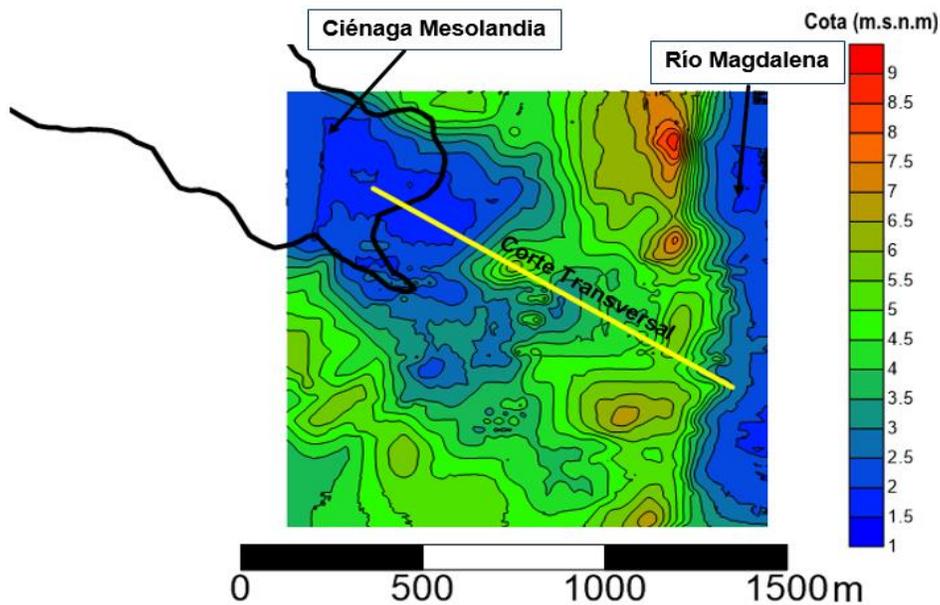


Figura 37. Topografía zona de estudio.

La figura 38 muestra las condiciones topográficas de la zona de estudio, como se puede observar el río Magdalena tiene una altitud mayor que la ciénaga Mesolandia, es por esto que se genera un corte transversal para observar de perfil el estado topográfico de las dos zonas de interés. Cabe recalcar que la sección transversal es la sección por donde debería transcurrir el canal a diseñar, los criterios utilizados para escoger la sección transversal fue el camino más corto para diseñar tiempos de viajes menores y menor volumen de tierra al momento de retirar y rellenar.

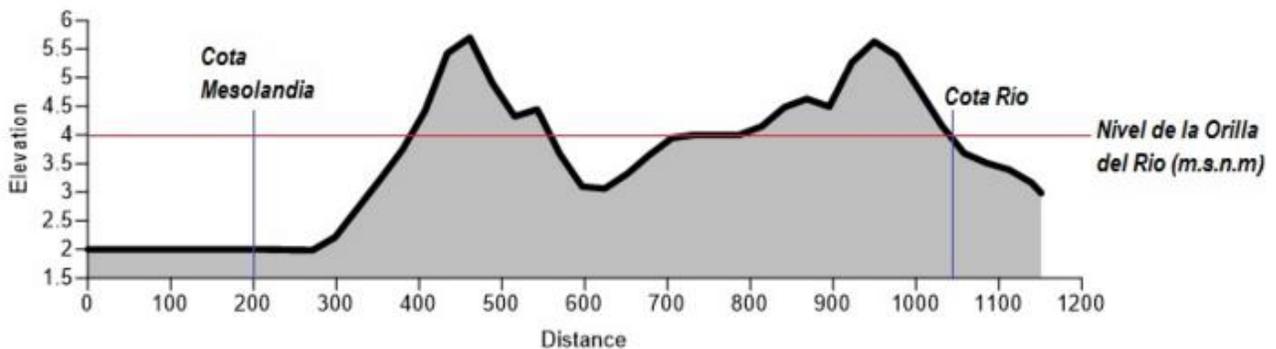


Figura 38. Perfil de elevación zona de estudio.

7.1. Análisis de la propuesta de mejora

Para escoger el caudal óptimo de diseño se simularon dos caudales con el objetivo de observar y analizar el comportamiento de cada uno, el primer caudal (Escenario 2) conlleva una magnitud de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que el segundo caudal (Escenario 3) de $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los criterios para la escogencia del caudal fueron las direcciones y velocidades del agua y el tiempo de recuperación de la ciénaga para cada parámetro en específico para obtener los criterios de calidad otorgada por la corporación autónoma regional del Atlántico: Resolución 000258 del 13 de Abril de 2011 y se puedan reactivar las diferentes actividades de pesca y agricultura.

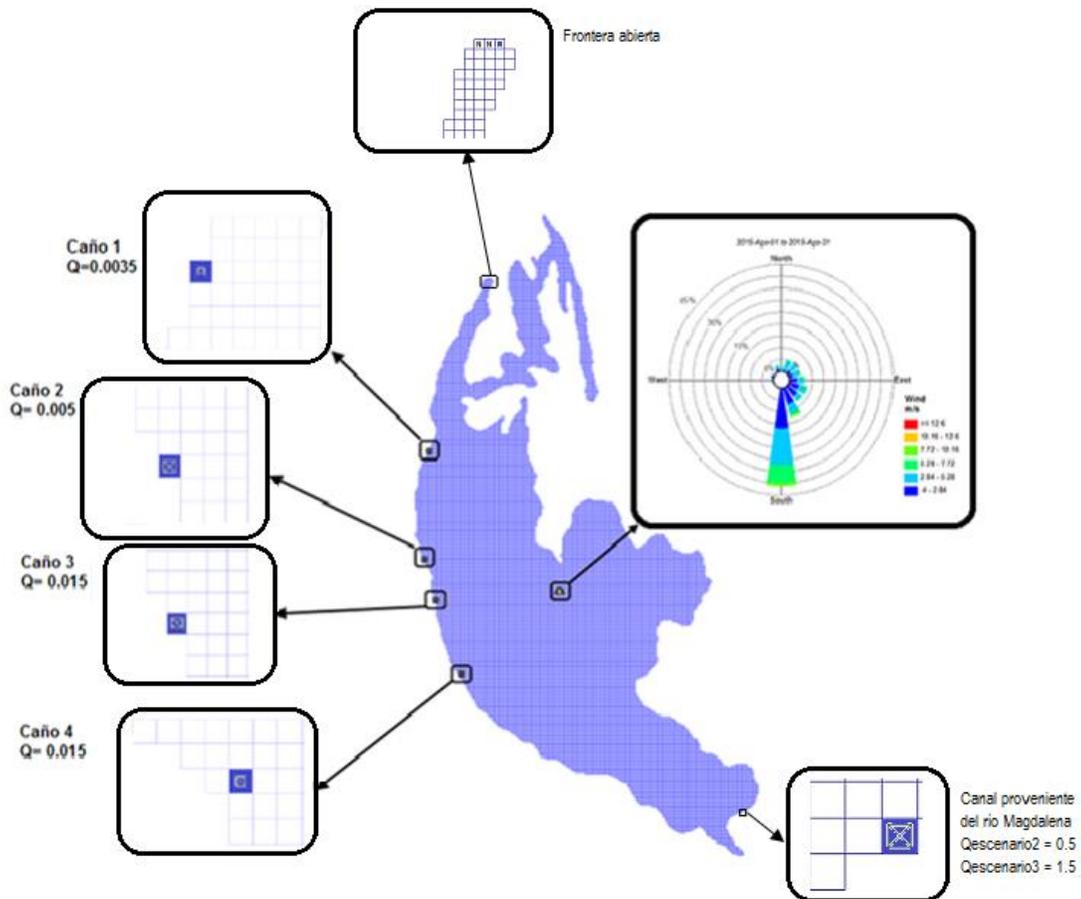


Figura 39. Condiciones de frontera Escenario 2 y 3.

Los resultados de simulación se representaron en graficas donde se muestra una serie de tiempo ubicado en el epicentro de la ciénaga para los dos (2) escenarios de propuesta de mejora, identificando por colores el escenario 2 y 3, como lo muestran las figuras que se explican a continuación.

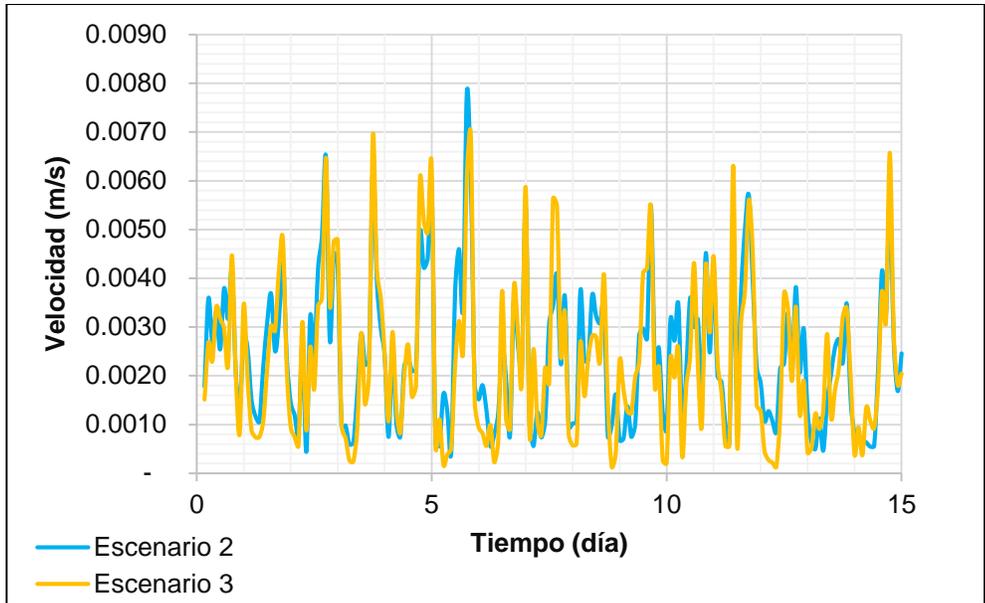


Figura 40. Magnitudes de velocidad – Escenario 2 y 3

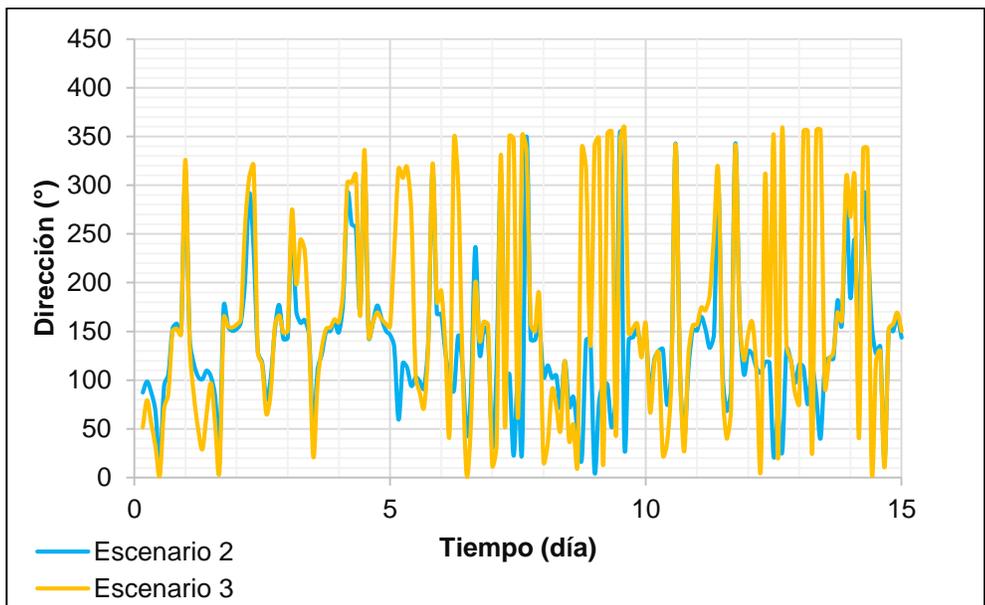


Figura 41. Dirección del agua – Escenario 2 y 3

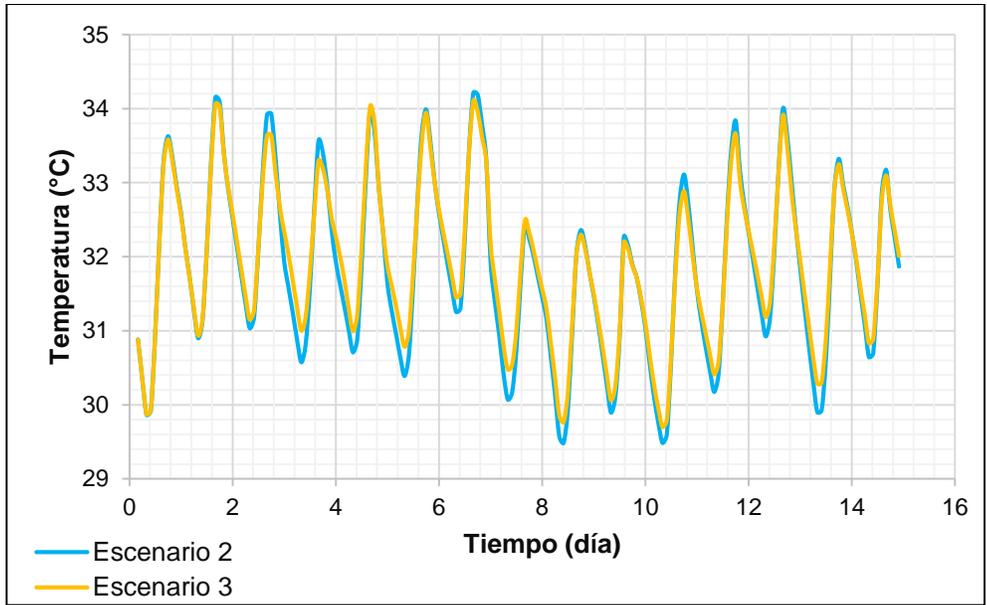


Figura 42. Grafica de Temperatura (°C) – Escenario 2 y 3

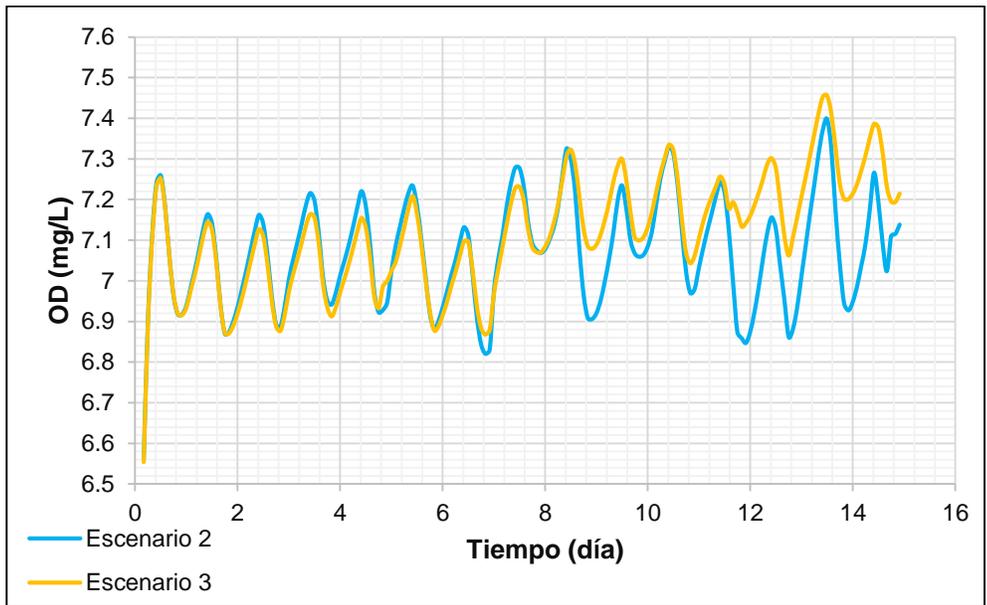


Figura 43. Grafica de Oxígeno Disuelto (mg/L) – Escenario 2 y 3

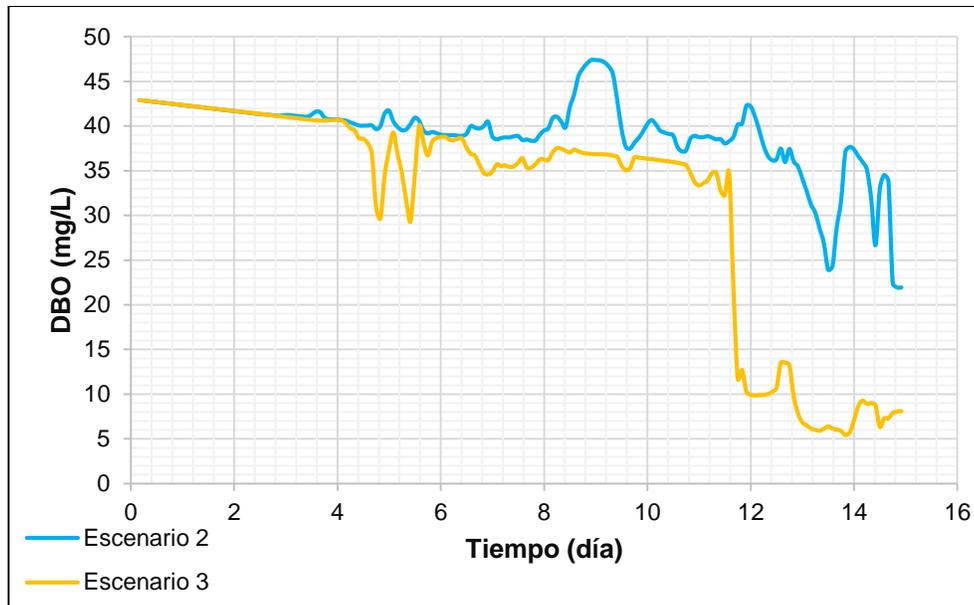


Figura 44. Grafica de DBO (mg/L) – Escenario 2 y 3

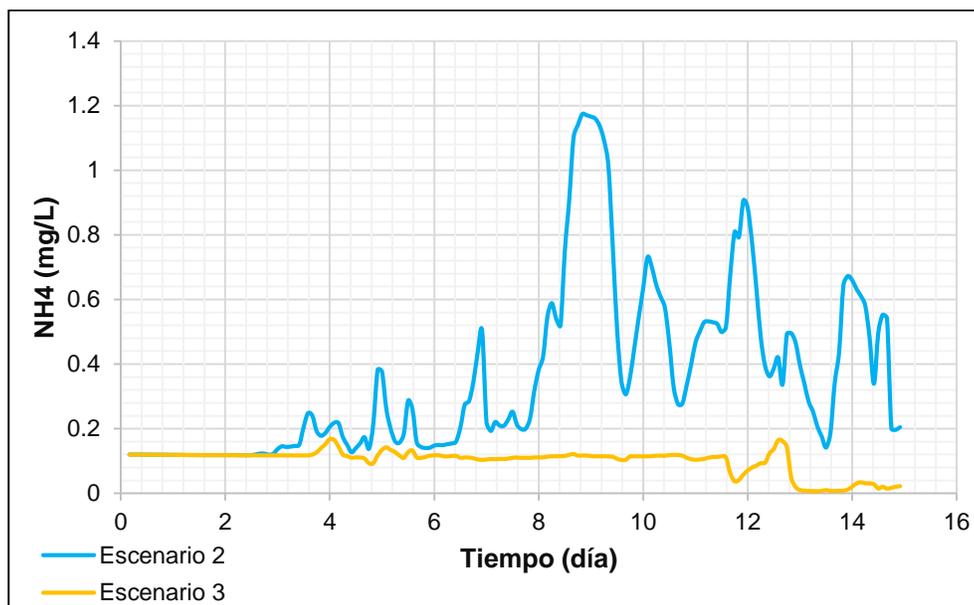


Figura 45. Grafica de NH4 (mg/L) – Escenario 2 y 3.

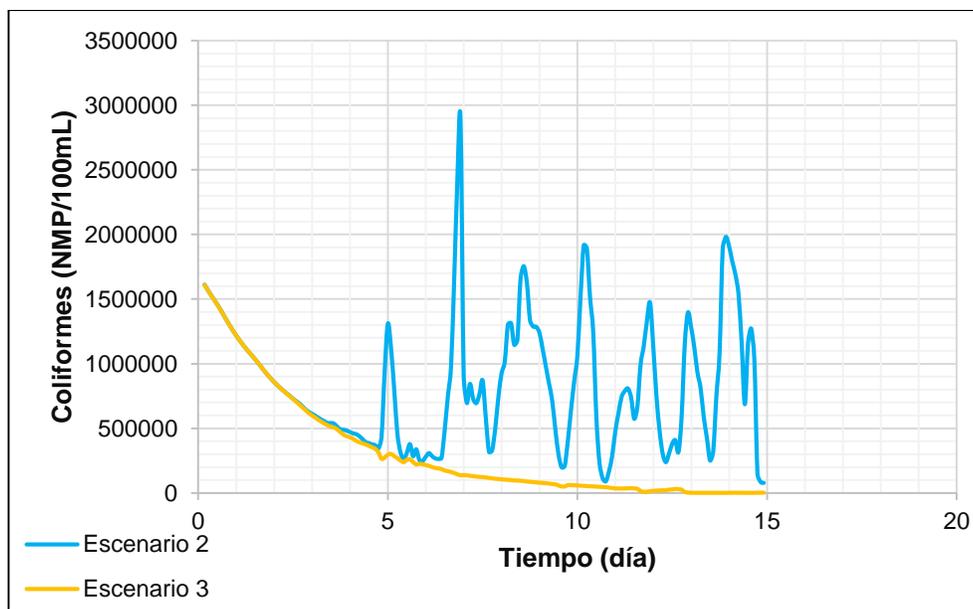


Figura 46. Grafica de Coliformes Fecales (mg/L) – Escenario 2 y 3.

La comparación en los escenarios 2 y 3 respecto a la temperatura (Figura 42) nos muestra un comportamiento similar en los valores representados. Lo mismo ocurre con el oxígeno disuelto en la Figura 43, con la única diferencia que desde el día nueve (9), el escenario 3 empieza a elevar los niveles de oxígeno en relación con el escenario 2. Por otra parte, en la Figura 44, la DBO realiza una mayor depuración de este parámetro desde el día cuatro (4) en el tercer escenario, llegando a valores muy mínimos en comparación con el segundo escenario. El nitrógeno amoniacal (Figura 45) como los coliformes fecales (Figura 46), presentan una disminución permanente de sus valores desde el primer día bajo el escenario 3, algo que no ocurre dentro del 2.

Gracias a los resultados obtenidos de los dos caudales simulados y analizados se determinó que el caudal óptimo para la pronta recuperación de la ciénaga Mesolandia debe transportar un caudal de 1.5 m³/s.

7.1.1. Resultados de simulación Escenario 3

En este ítem se presentan los resultados de la simulación del escenario escogido como propuesta de mejora (Escenario 3) el cual transporta un caudal de 1.5 m³/s, se realizó una

extracción de imágenes pertenecientes al postprocesador del modelo EFDC EXPLORER cada cinco (5) días con un tiempo de simulación de quince (15) días.

La simulación hidrodinámica describe el comportamiento de las direcciones y magnitudes de velocidad respecto al tiempo simulado, en la Figura 47 se muestra en imágenes las simulaciones para el Escenario 3.

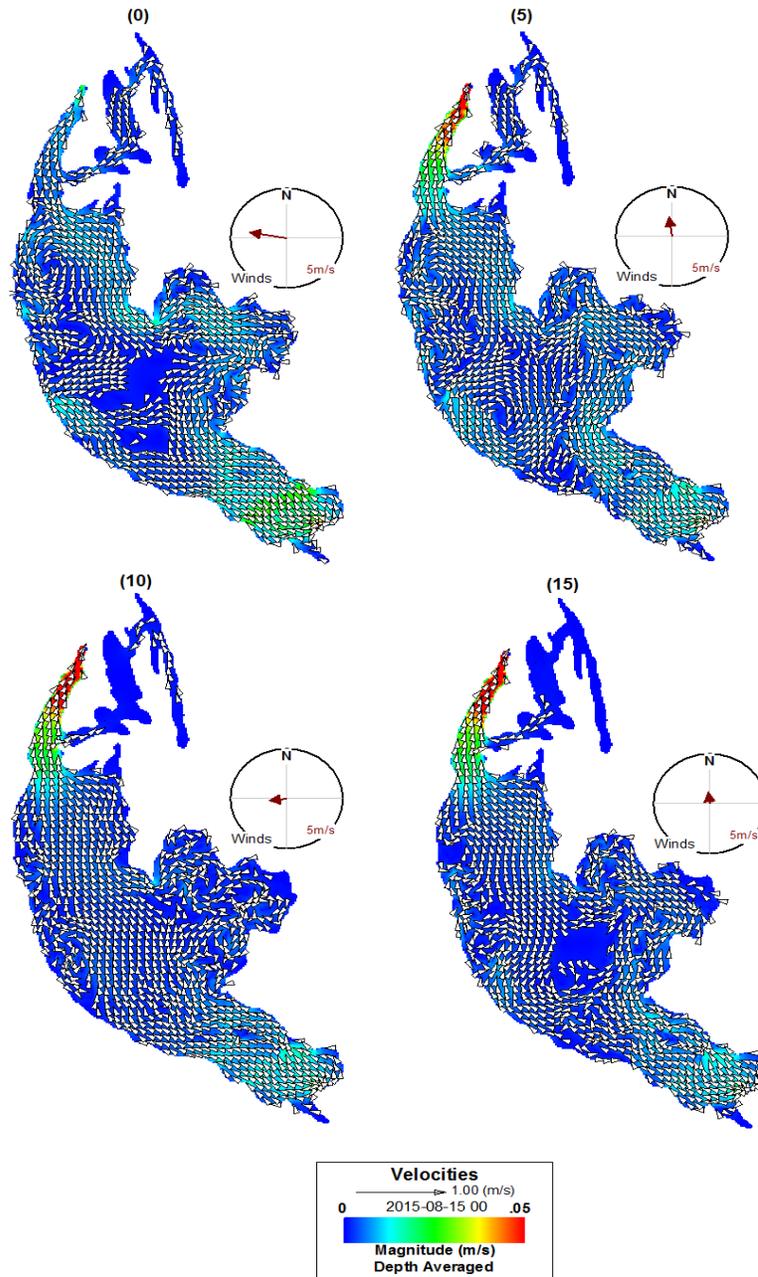


Figura 47. Vectores y magnitudes de velocidad, Escenario 3

La Figura 47 permite observar la conducta que tiene el movimiento del agua en el escenario de mejora tres (3), en ella se observa que las velocidades máximas alcanzadas se encuentran en las zona de salida del flujo, esto se debe a que el área de salida es menor que el área de la ciénaga, así mismo se analiza que las velocidades en la entrada del flujo proveniente al río Magdalena existen velocidades cercanas a 0.03 m/s obteniendo una mayor reaireación en el sistema por forzantes de flujo.

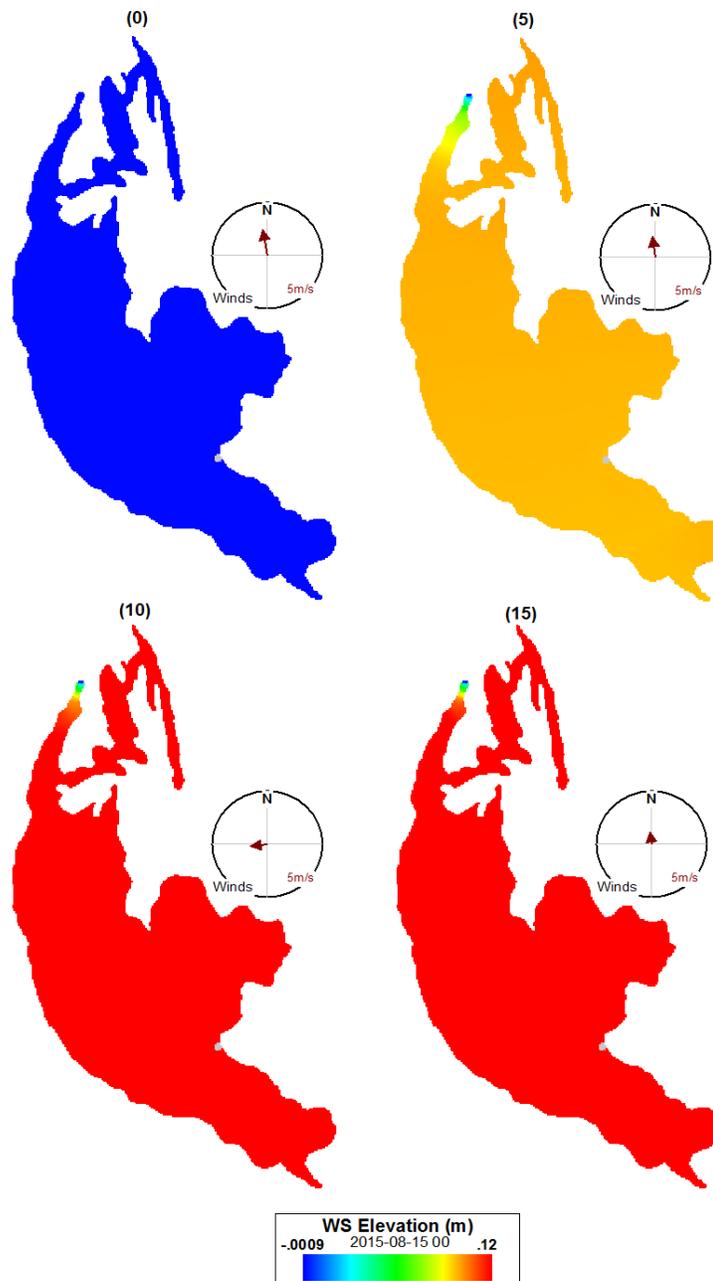


Figura 48. Elevación de la superficie del agua, Escenario 3

En el Escenario 3, la rosa de velocidades define las direcciones, velocidades y frecuencias del agua pertenecientes a la ciénaga Mesolandia durante los quince (15) días de simulación en un escenario hipotético en donde existe una entrada de un flujo proveniente del río Magdalena, en donde se observa que el agua predomina con una dirección Norte, esto causado por la dirección del viento propia de la zona.

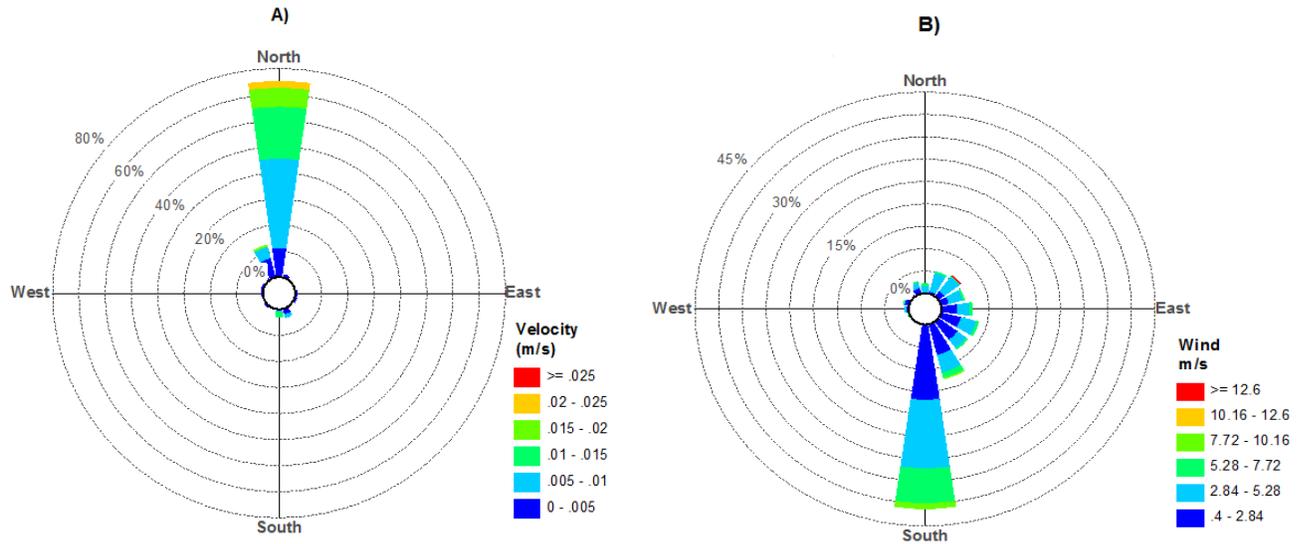


Figura 49. Rosa de velocidades (A) y vientos (B) – Escenario 3.

Las imágenes mostradas a continuación son los resultados que se obtuvieron para el escenario tres (3), condiciones hipotéticas en donde se observa el comportamiento de los parámetros estudiados si se llegaría a penetrar un flujo con condiciones definidas para su recuperación, la figura (A) muestra que la dirección predominante del agua – Water to - tiene un sentido norte, concordando con la dirección del viento en donde se muestra la figura (B) – Blowing from-. Así mismo se observa que las velocidades con mayor frecuencia pertenecen al rango de 0.005 – 0.01 m/s.

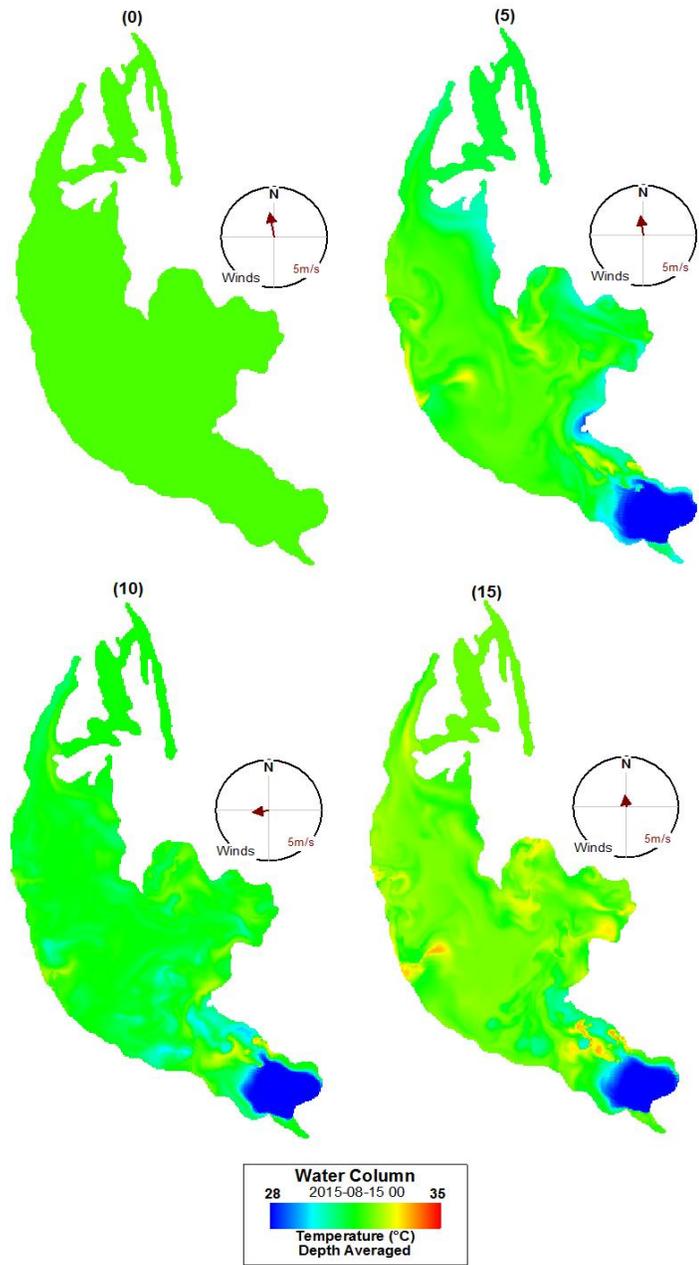


Figura 50. Simulación Temperatura (°C) – Escenario 3.

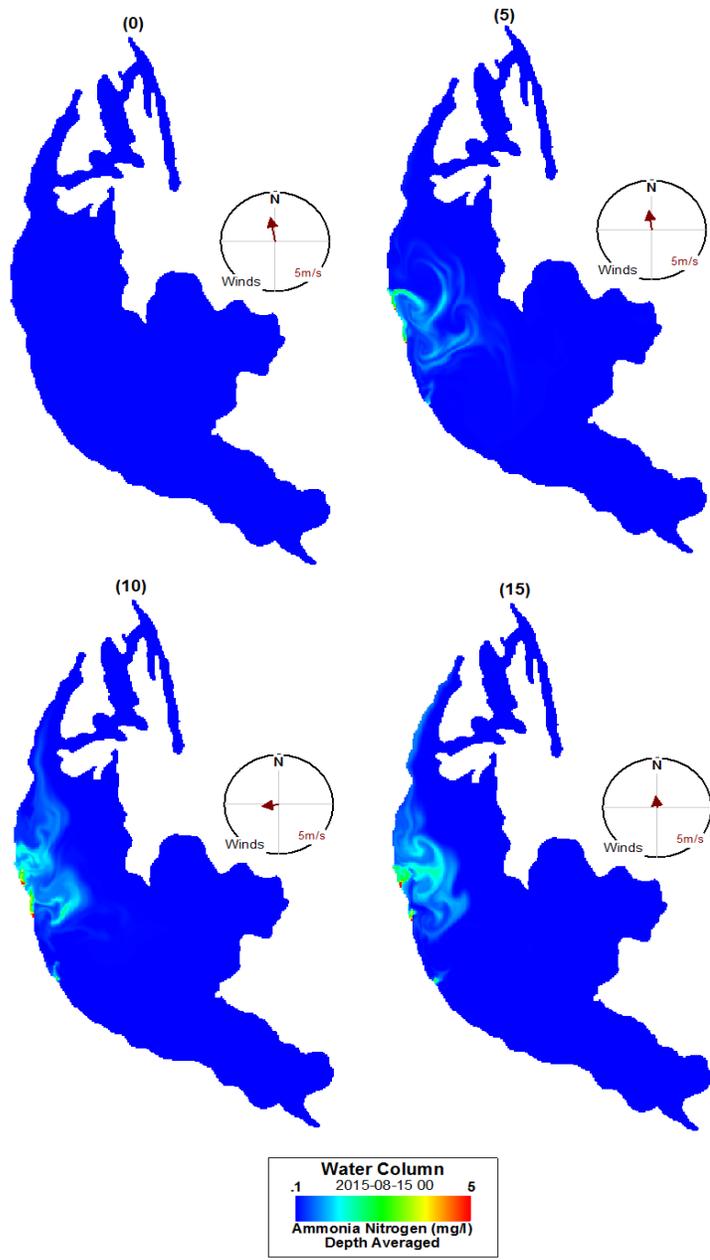


Figura 51. Simulación NH4 (mg/L) – Escenario 3.

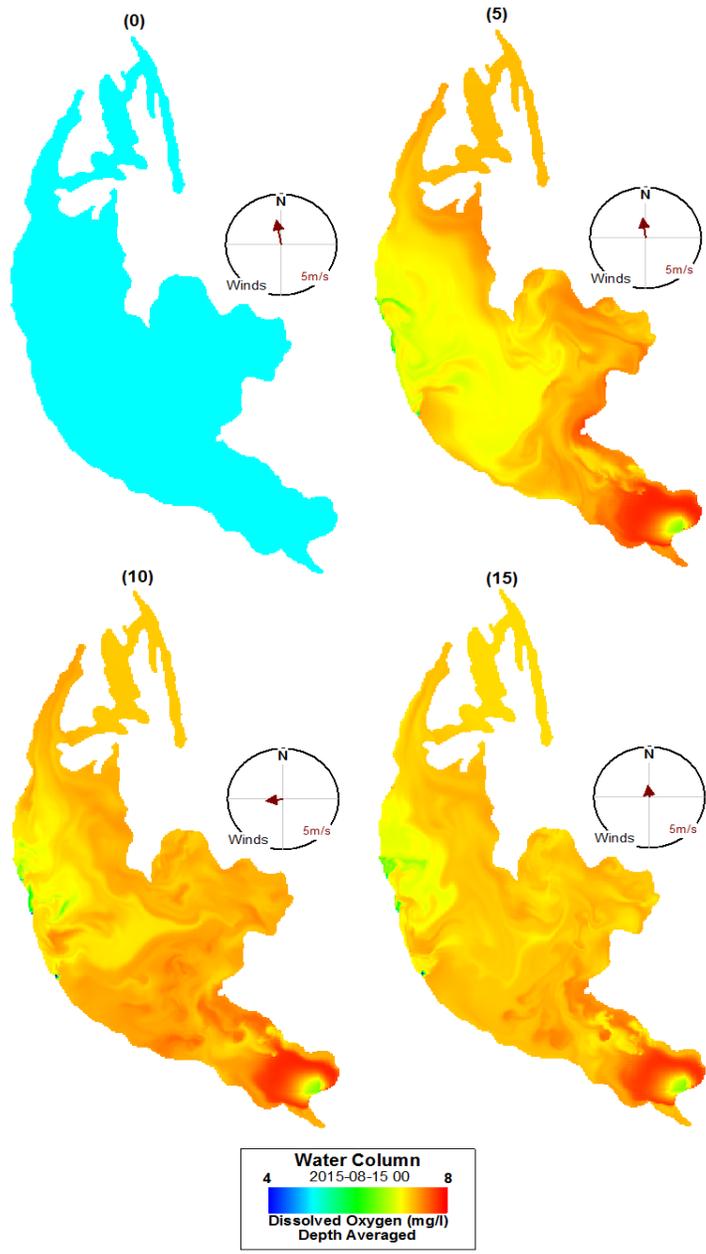


Figura 52. Simulación OD (mg/L) – Escenario 3.

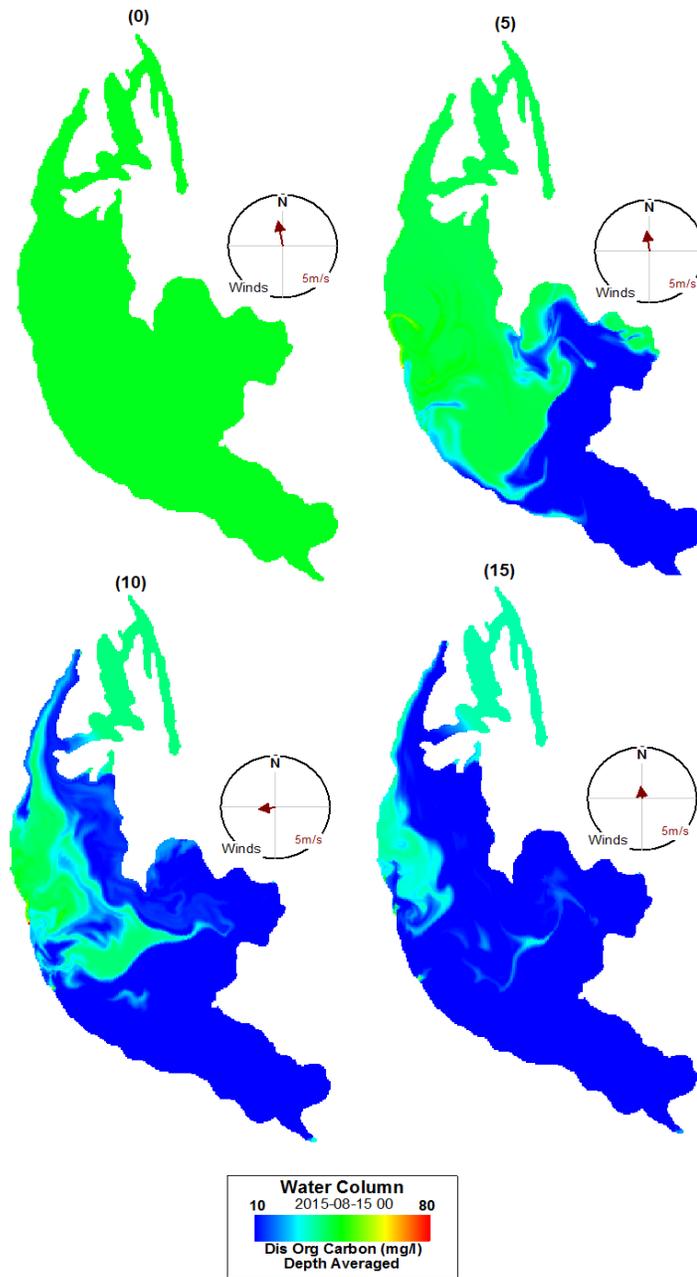


Figura 53. Simulación DBO (mg/L) – Escenario 3.

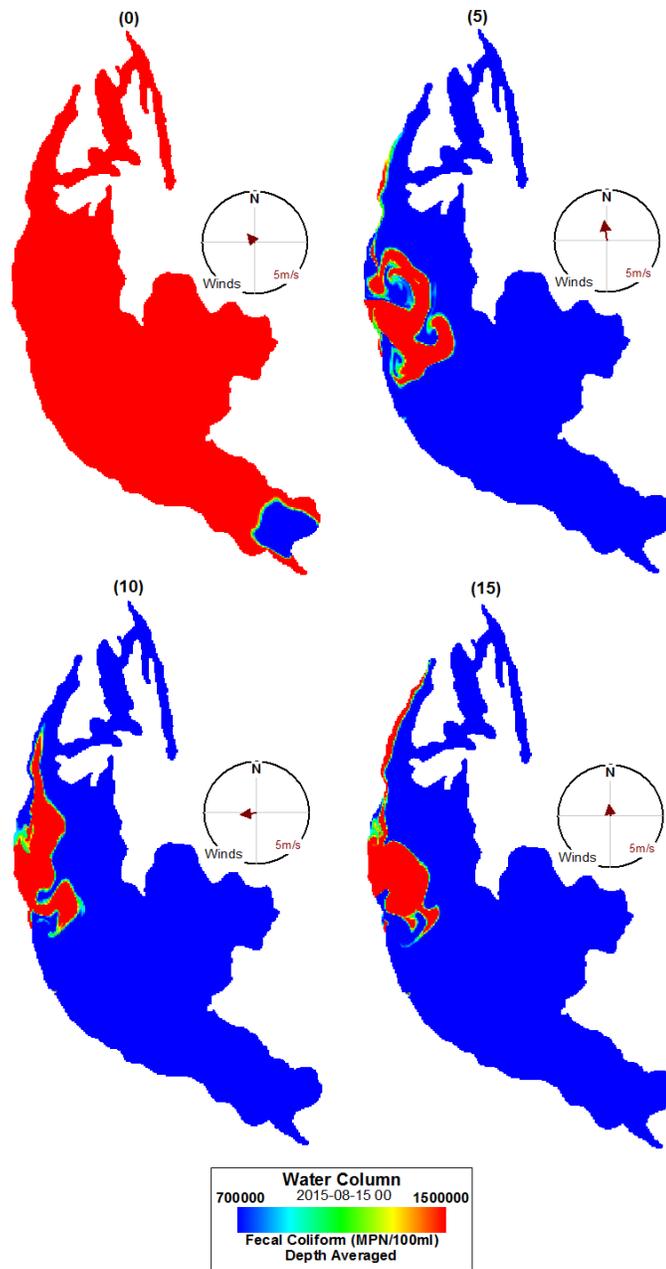


Figura 54. Simulación Coliformes Fecales (mg/L) – Escenario 3.

7.1.2. Diferencias entre los escenarios propuestos

En este ítem se realiza una comparación exhaustiva de los diferentes parámetros estudiados sobre los distintos escenarios propuestos, el escenario uno (1) en donde se cumplen las condiciones actuales y normales de la ciénaga Mesolandia y el escenario tres (3) en donde se realiza una simulación del ingreso de agua proveniente del río Magdalena con el objetivo de su recuperación en corto tiempo. Metodológicamente se utilizó un punto en el epicentro de la ciénaga, extrayendo series de tiempo de los diferentes parámetros estudiados durante quince (15) días y adjuntándolos en una misma grafica para su mejor interpretación.

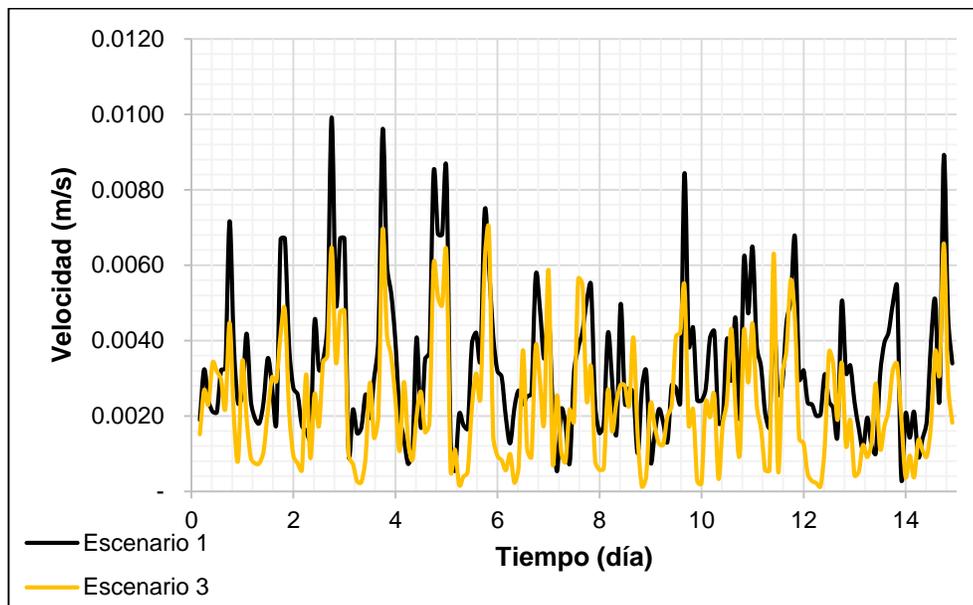


Figura 55. Magnitudes de velocidad – Escenario (1) y Escenario (3)

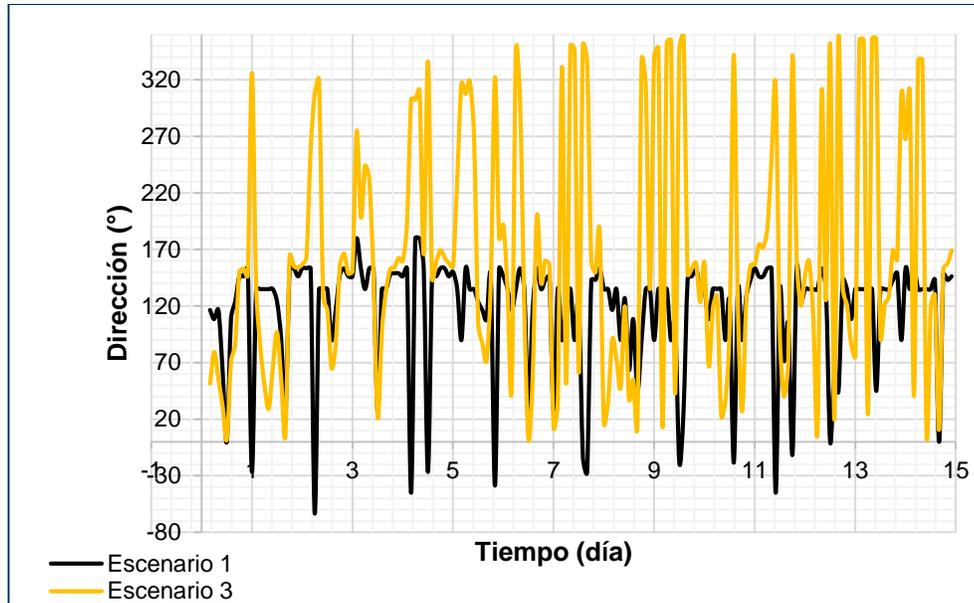


Figura 56. Dirección del agua – Escenario (1) y Escenario (3)

La Figura 55, representa las magnitudes de velocidades de los escenarios 1 y 3, siendo éstas muy similares. Mientras que la dirección del agua (Figura 56) se presenta de forma casi que contraria en los dos (2) escenarios, esto se debe a que la penetración de un flujo proveniente del río Magdalena le da una dirección homogénea al agua hacia el sentido norte donde se encuentra la salida del flujo.

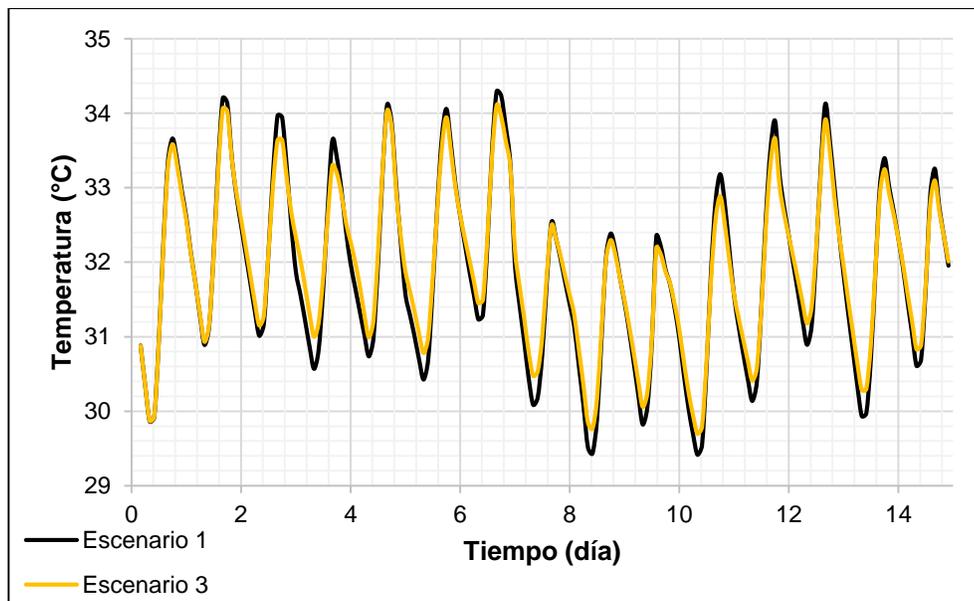


Figura 57. Grafica de temperatura – Escenario (1) y Escenario (3)

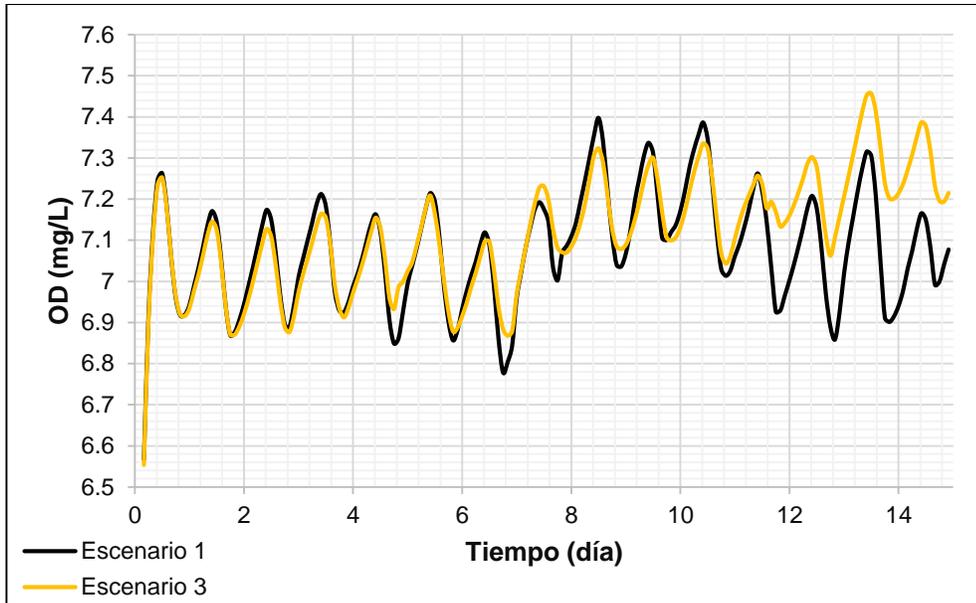


Figura 58. Grafica de oxígeno disuelto – Escenario (1) y Escenario (3)

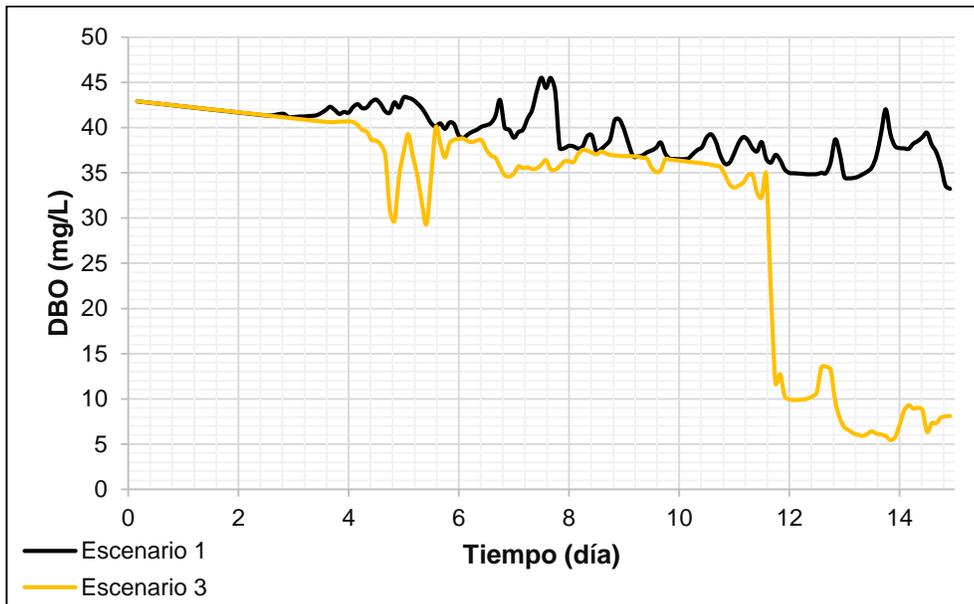


Figura 59. Grafica de DBO – Escenario (1) y Escenario (3)

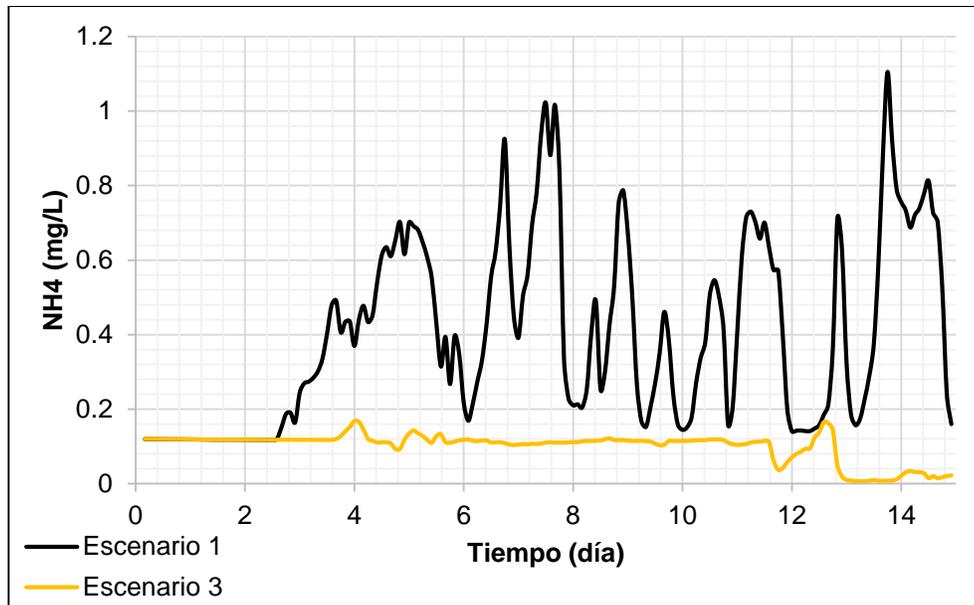


Figura 60. Grafica de NH4 – Escenario (1) y Escenario (3)

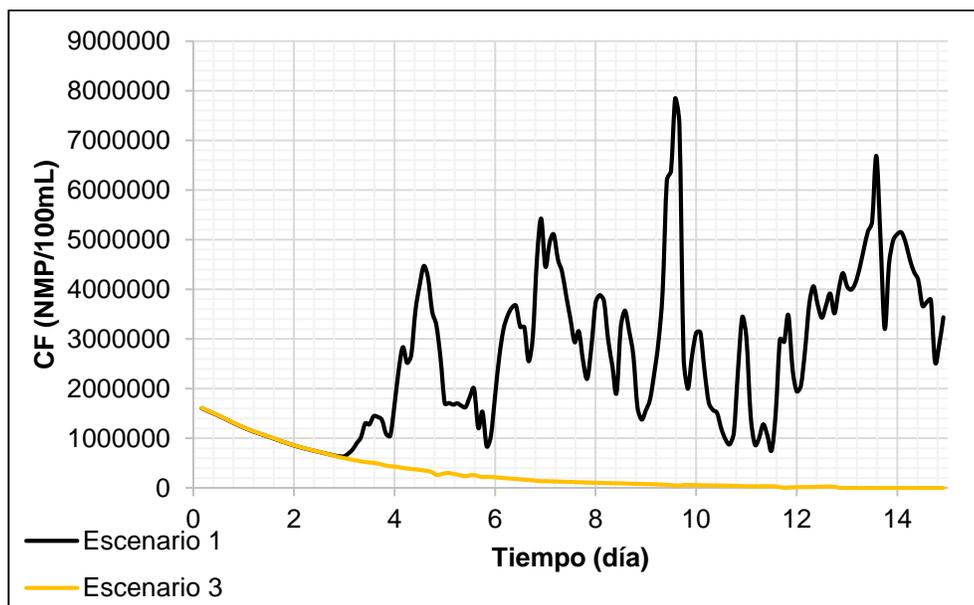


Figura 61. Grafica de Coliformes fecales – Escenario (1) y Escenario (3)

La temperatura (Figura 57) nos muestra un comportamiento similar en los valores representados en los dos (2) escenarios propuestos (1 y 3). De igual forma, en la Figura 58, el oxígeno disuelto, se mantiene similar en los dos (2) escenarios, exceptuando que

desde el día doce (12), el escenario 3 empieza a elevar los niveles de oxígeno en relación con el escenario 1. La DBO (Figura 59) realiza una mayor depuración de este parámetro desde el día once (11) en el tercer escenario, bajando los niveles drásticamente efectuando una rápida recuperación del cuerpo de agua. Tanto el nitrógeno amoniacal (Figura 60) como los coliformes fecales (Figura 61), desde el primer día presentan una disminución constante de sus valores dentro del escenario 3, algo que no ocurre en el 1.

7.1.3. Diseño de canal hidráulico

Teniendo en cuenta las condiciones geotécnicas de la zona de estudio se determinó que el canal hidráulico debe ser diseñado en sección trapezoidal, adquiriendo así mayor área mojada en menor profundidad y manteniéndole estabilidad al suelo. En esta investigación solo se calculó las dimensiones para el diseño del canal por donde se va a transportar el agua del río Magdalena hacia la Ciénaga. Metodológicamente se aplicó la ecuación de Manning (Ecuación 33)

$$V = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación (33)

Igualmente se conoce que

$$Q = V * A$$

Ecuación (34)

Remplazando Ecuación 34 en Ecuación 33

$$Q = \frac{1}{n} A R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación (35)

Donde

Q	Caudal	m ³ /s
V	Velocidad	m/s

A	Área mojada	m ²
R	Radio Hidráulico	M
n	Coefficiente de rugosidad de maning	Adimensional
S	Pendiente longitudinal	m/m

Las secciones geométricas para un canal trapezoidal uniformes con taludes iguales cumplen las siguientes condiciones (Ven Te Chow, 2004) [85]:

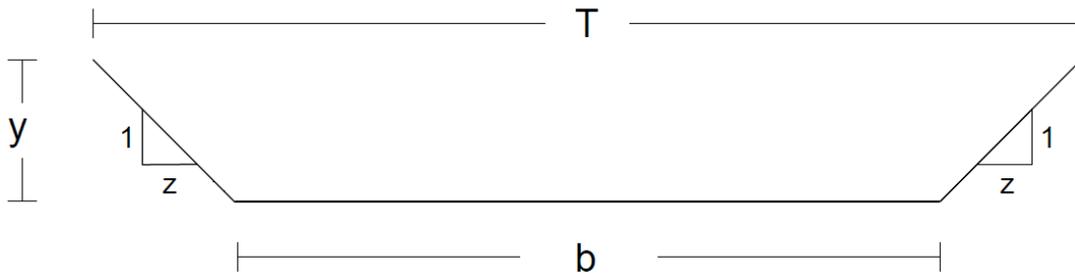


Figura 62. Secciones del canal trapezoidal.

Tabla 10. Condiciones geométricas del canal trapezoidal.

Área (A)	Perímetro mojado (P)	Radio Hidráulico (R)
$y(b + zy)$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{y(b + zy)}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$
Ancho superficial (T)	Profundidad Hidráulica (D)	Factor de sección (Z)
$b + 2zy$	$\frac{y(b + zy)}{b + 2zy}$	$\frac{(y(b + zy))^{1.5}}{\sqrt{b + 2zy}}$

Remplazando el área y radio hidráulico en la ecuación 35 resulta:

$$Q = \frac{1}{n} * y(b + zy) * \left(\frac{y(b+zy)}{b+2y\sqrt{1+z^2}} \right)^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación (36)}$$

Obteniendo un valor de caudal en función de las diferentes variables que conforman el canal trapezoidal.

Posteriormente, logrado descifrar el caudal óptimo para la recuperación de la ciénaga (Q_{optimo}), base del canal (b), pendiente longitudinal del canal (s), talud (z) y coeficiente de Manning (n) se despejan todas las variables que no relaciones la altura del agua (y) con el fin de realizar un proceso de iteración para hallar la altura del agua (y).

Remplazando valores en ecuación 36 resulta

$$1.5 = \frac{1}{0.05} * y(5 + 2y) * \left(\frac{y(5 + 2y)}{5 + 2y\sqrt{1 + 2^2}} \right)^{\frac{2}{3}} * 0.011^{\frac{1}{2}}$$

Despejando en función de y

$$\frac{1.5}{20 * 0.104} = y(5 + 2y) * \left(\frac{y(5 + 2y)}{5 + 2y\sqrt{1 + 2^2}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Realizando el proceso de iteración nos da como resultado una altura de agua (y) de 31cm.

Ya obtenido todos los resultados de las variables del canal trapezoidal para el transporte del agua desde el río hacia la ciénaga se realiza una representación gráfica del canal (Figura 63).

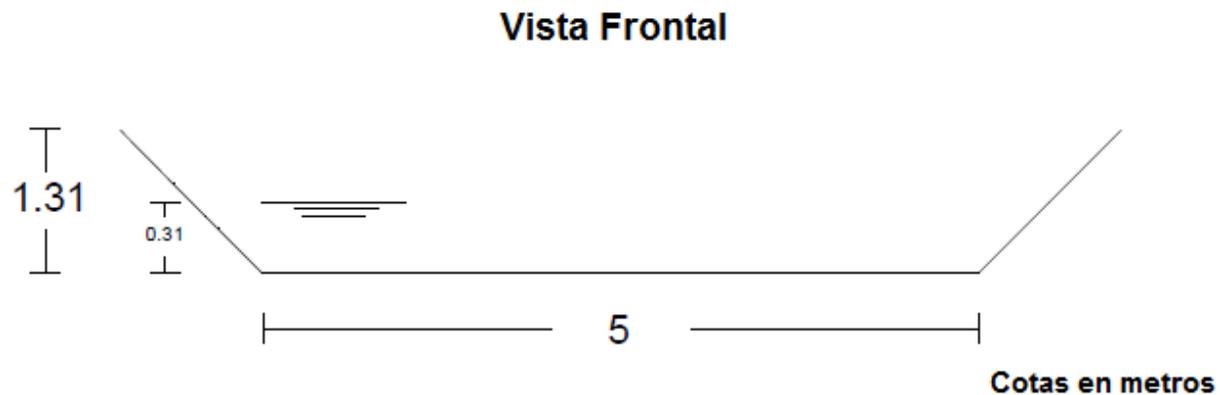


Figura 63. Secciones del canal diseñado.

7.2. Otras consideraciones

La ciénaga Mesolandia receptora de vertimientos industriales y domésticos no está siendo capaz de asimilar todos los contaminantes que llegan a ella, en las diferentes visitas que se realizaron al cuerpo de agua se evidenciaron diferentes macrofitas (Figura 64) que deben ser removidas mecánicamente junto al sedimento contaminado.



Figura 64. Macrofitas situadas en la ciénaga Mesolandia.

La ciénaga Mesolandia también es utilizada como botadero de diferentes residuos sólidos, que también generan diferentes impactos de la calidad del agua, estos residuos (Figura 65) deben ser retirados mecánicamente igual que la maleza.



Figura 65. Residuos dispuestos en la ciénaga Mesolandia.

8. CONCLUSIONES

Las simulaciones realizadas con la ayuda del modelo EFDC EXPLORER permitieron evaluar ambientalmente los vertimientos generados a la ciénaga Mesolandia, estos resultados estuvieron basados gracias a la identificación de los vertimientos que se generan a la ciénaga Mesolandia y la toma de muestra representativa que se realizó (Línea Base). Por otra parte el modelo EFDC EXPLORER cumple con los requisitos propuesto para realizar este de estudios en cuerpos de agua, modelando la hidrodinámica y los procesos físicos – químicos – biológicos que pertenecen a la ciénaga Mesolandia.

Los resultados obtenidos proporcionaron un análisis de observación que junto a diferentes graficas suministradas por el modelo se diagnosticó que la ciénaga Mesolandia no está siendo capaz de asimilar la carga orgánica (DBO) rápidamente disminuyendo 5mg/L cada diez (10) días, y el nitrógeno amoniacal muestra un aumento considerable cuando transcurre el tiempo, aumentando su concentración de 0.1mg/L cada día.

También se determinó que la construcción de un canal que conduzca agua del Río Magdalena con un caudal de 1.5 m³/s haría que la Ciénaga se recupere en corto tiempo, logrando de esta manera poder reactivar las diferentes actividades de pesca y agricultura que se ha perdido debido a la contaminación, obteniendo un beneficio ambiental, social y económico para la población atlanticense.

Por otra parte, los resultados que se muestran en la modelación ambiental son una herramienta para la planificación del cuerpo de agua logrando predecir diferentes vertimientos nuevos que puedan llegar a estar con el fin de definir si son aptos para que la ciénaga los asimile, así como la implementación de diferentes propuestas de mejora o construcción que surjan en el cuerpo de agua estudiado.

REFERENCIAS

- [1] Rincón W. (2015). Plan de Educación Ambiental “COAMCO”. Campaña de Educación Ambiental: Cartilla de Buenas Prácticas Ambientales. Colombotex Ltda. Colombia: Bogotá.
- [2] Corporación Autónoma Regional del Atlántico, CRA. (2012). Plan de acción 2012-2015. Desarrollo con sostenibilidad ambiental. Colombia: Barranquilla.
- [3] Decreto de Ley 1076 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Reglamentario Único del Sector Ambiente. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- [4] Resolución 631 del 17 de Marzo de 2015. Parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Colombia.
- [5] Resolución 000258 del 13 de Abril de 2011. Por la cual se establecen de objetivos de calidad para las cuencas hidrográficas de la jurisdicción para el periodo 2011 – 2020. Corporación Autónoma Regional del Atlántico CRA. Colombia: Atlántico.
- [6] Nullvalue (Noviembre 22 de 1995). Archivo de El Tiempo. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-469716>
- [7] Nebel B. y Wright R. (1996). Environmental Science: The Way the World Works. 5a Edición, Prentice Hall. Estados Unidos.
- [8] Alcaldía Municipal de Malambo (2013). Diagnóstico Ambiental Municipal. Fundación GAIA. Colombia: Malambo.

[9] Alean, L (2009). Modelación de la capacidad máxima de asimilación de vertimientos de carga organica en la Ciénaga de Mesolandia en el Departamento del Atlántico. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. (Tesis de Maestría).

[10] Decreto Ley 1729 del 06 de agosto de 2002. Planes de Ordenamiento Ambiental y Territorial de las Cuencas hidrográficas. Colombia.

[11] Resolución 0631 del 17 Marzo de 2015. Por el cual se establece los parámetros y valores límites máximos permisibles en vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Colombia.

[12] El Espectador. Bogotá DC, 08, Agosto, 2014. Disponible en:
<http://www.elespectador.com/noticias/nacional/alarma-contaminacion-de-cienagas-de-malambo-y-palmar-el-articulo-509345>

[13] El Heraldo. Barranquilla, 02, Junio, 2015. Disponible en:
<http://www.elheraldo.co/local/la-cienaga-de-mesolandia-sufre-por-rellenos-y-aguas-residuales-197668>

[14] El Heraldo. Barranquilla, 01, Julio, 2015. Disponible en:
<http://www.elheraldo.co/local/preocupacion-por-peces-muertos-en-cienaga-de-malambo-203092>

[15] RCN La Radio, 11, Julio, 2015. Disponible en:
<http://www.rcnradio.com/locales/noticias/cra-ordena-suspension-puopollo-por-presunta-contaminacion-en-mesolandia-224445#ixzz3fiPWs8kl>

[16] El Heraldo. Barranquilla, 20, Agosto, 2015. Disponible en:
<http://www.elheraldo.co/local/laguna-de-mesolandia-es-hoy-un-cementerio-212572>

- [17] El Heraldo. Barranquilla, 01, Septiembre, 2015. Disponible en:
<http://www.elheraldo.co/local/acaba-mortandad-de-peces-en-mesolandia-pero-el-desastre-ambiental-sigue-214719>
- [18] UNESCO (1994). Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas. Oficina de Normas Internacionales y Asuntos Legales Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. Francia: París.
- [19] Buitrago, N. (2011). El humedal madre vieja, un laboratorio para el aprendizaje significativo y el desarrollo de habilidades de pensamiento. Maestría en enseñanza de las ciencias exactas y naturales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Orinoquía. Facultad de Ciencias. Colombia: Arauca.
- [20] Borda N. y Largo Y. (2009). Comparación de la densidad de bacterias desnitrificantes entre bosque inundado y morichal en la Reserva Natural Bojonawi. Tesis de pregrado. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad De Ciencias Básicas. Colombia: Bogotá D.C.
- [21] Luna L. (1999). Caracterización biofísica del humedal de la lechería Deearth, Guácimo, limón; Zona Atlántica de Costa Rica. Tesis de pregrado. Escuela de Agricultura de la Región Tropical Húmeda. Costa Rica: Guácimo.
- [22] Llagas W. y Guadalupe E. (s.f.). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad De Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica Y Geográfica. Perú: Lima.
- [23] Instituto Nacional de Hidráulica, INH. (2010). Modelos matemáticos hidrodinámicos de calidad de aguas. Gobierno de Chile.

[24] Jørgensen, B. (1983). Processes at the sediment–water interface. In Bolin, B. & R. B. Cook (eds), *The Major Biogeochemical Cycles and their Interactions*. SCOPE, Stockholm: 477–515.

[25] Heip, R., Goosen, P., Herman, J., Kromkamp, J., Middelburg & Soetaert. (1995). Production and consumption of biological particles in temperate tidal estuaries. *Oceanography and Marine Biology—An Annual Review* 33: 1–149.

[26] Wollast, R. (1998). Evaluation and comparison of the global carbon cycle in the coastal zone and in the open ocean. In Brink, K. H. & A. R. Robinson (eds), *The Sea, The Global Coastal Ocean, Processes and Methods*. Wiley, New York: 213–252.

[27] Alongi, D. (2005). Ecosystem types and processes. In Robinson, A. R. & K. Brink (eds), *The Sea, Vol. 13, The Global Coastal Ocean: Multiscale Interdisciplinary Processes*. Harvard University Press, Cambridge: 317–351.

[28] Christensen, J. (1994). Carbon export from continental shelves, denitrification and atmospheric carbon dioxide. *Continental Shelf Research* 14: 547–576.

[29] Middelburg, J. J., K. Soetaert, P. M. J. Herman & C. H. R. Heip. (1996). Denitrification in marine sediments: a model study. *Global Biogeochemical Cycles* 10: 661–673.

[30] Soetaert, K., J. J. Middelburg, P. M. J. Herman & K. Buis. (2000). On the coupling of benthic and pelagic biogeo-chemical models. *Earth-Science Reviews* 51: 173–201.

[31] Soetaert, K., & Middelburg, J. J. (2009). Modeling eutrophication and oligotrophication of shallow-water marine systems: the importance of sediments under stratified and well-mixed conditions. *Hydrobiologia*, 629(1), 239-254. doi: 10.1007/s10750-009-9777-x.

- [32] Van Raaphorst, W. & V. N. de Jonge. (2004). Reconstruction of the total N and P inputs from the IJsselmeer into the western Wadden Sea between 1935 and 1998. *Journal of Sea Research* 51: 109–131.
- [33] Soetaert, K., J. J. Middelburg, C. Heip, P. Meire, S. VanDamme & T. Maris. (2006). Long-term change in dissolved inorganic nutrients in the heterotrophic Scheldt estuary (Belgium, the Netherlands). *Limnology and Oceanography* 51: 409–423.
- [34] Kemp, W. M., W. R. Boynton, J. E. Adolf, D. F. Boesch, W. C. Boicourt, G. Brush, J. C. Cornwell, T. R. Fisher, P. M. Glibert, J. D. Hagy, L. W. Harding, E. D. Houde, D. G. Kimmel, W. D. Miller, R. I. E. Newell, M. R. Roman, E. M. Smith & J. C. Stevenson. (2005). Eutrophication of Chesapeake Bay: historical trends and ecological interactions. *Marine Ecology Progress Series* 303: 1–29.
- [35] Cerco, F. & T. Cole. (1993). 3-Dimensional eutrophication model of Chesapeake Bay. *Journal of Environmental Engineering-ASCE* 119: 1006–1025.
- [36] Justic, D., N. Rabalais & R. Turner. (2005). Coupling between climate variability and coastal eutrophication: evidence and outlook for the northern Gulf of Mexico. *Journal of Sea Research* 54: 25–35.
- [37] Pedrozo-Acuña, Adrián, & Torres-Freyermuth, Al ec. (2011). Sobre el uso de las ecuaciones de Navier-Stokes con el promedio de Reynolds en el campo de la ingeniería de costas. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(2), 51-67.
- [38] Gavete, L., Ureña, F., Benito, J. J., & Gavete, M. L. (2012). Modelling of the advection–diffusion equation with a meshless method without numerical diffusion. *International Journal Of Computer Mathematics*, 89(3), 377-389. doi:10.1080/00207160.2011.587872.

[39] EMGESA, Empresa de Acueducto Y Alcantarillado de Bogotá, Empresa de Energía De Bogotá, Universidad de los Andes. (2006). Definición y valorización técnica de alternativas de sectorización, operación y manejo y modelación hidrodinámica y de calidad del agua del embalse del Muña (Fase III). Colombia: Bogotá.

[40] Arbat M., González O., Salgado A., Sánchez M., Bladé E., Dolz J. (s.f.). Modelación unidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con DYRESM. Grupo de Investigación FLUMEN. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya, Jordi Girona 1-3 D-1, 08034, Barcelona.

[41] Chapra, S. (2008). QUAL2K: A modeling framerwosk for simulating river and stream watwer quality. Documentation.

[42] Betancur, G. (2013). Metodología para la selección de modelos hidrodinámicos tridimensionales. (Tesis Maestría). Universidad Nacional de Colombia.

[43] Catasús J., Portela J., Garcés A., Machado E. (2015). Empleo de trazadores en la obtención de modelos de calidad de agua en el Río Almendares. (Spanish). Nucleus, (34), 19-26.

[44] Huang, W., Hagen, S., & Bacopoulos, P. (2014). Hydrodynamic Modeling of Hurricane Dennis Impact on Estuarine Salinity Variation in Apalachicola Bay. Journal Of Coastal Research, 30(2), 389-398. doi:10.2112/JCOASTRES-D-13-00022.1.

[45] Aldana, G. (2005) Simulación y predicción de la hidrodinámica en las lagunas de estabilización de LUZ utilizando un modelo computacional en 3D. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia [online]. 2005, vol.28, n.1 [citado 2015-06-02], pp. 86-94.

[46] Silva, S Evaluación (2007). De la calidad del agua del futuro Embalse Porce III por la influencia de la descarga del Embalse Porce II: Modelo de simulación de calidad del agua del futuro embalse Porce III. Rev. Ing. Univ. Medellin [online]. 2008, vol.7, n.13, pp. 21-37. ISSN 1692-3324.

[47] Valcarcel L. et al. (2010). Modelación de la calidad del agua en el segmento medio del río Luyanó. Nucleus, No. 47. Cuba: Ciudad de La Habana.

[48] Palacio, C., Garcia, F & Garcia, U (2010). CALIBRACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO 2D PARA LA BAHÍA DE CARTAGENA. Dyna, vol. 77, núm. 164, diciembre, 2010, pp. 152-166

[49] Jojoa, J., et. Al. (2012). Evaluación de alternativas de intervención para mejorar la hidrodinámica de la laguna de sonso. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, núm. 11, enero-diciembre, 2012, pp. 41-51 Universidad del Valle Cali, Colombia

[50] Gómez, G., Morales, G., Miranda G & Pavón T. (2013). aplicación del modelo visual modflow para la evaluación de la hidrodinámica del acuífero subyacente a un vertedero de residuos sólidos urbanos. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, vol. 29, núm. 3, 2013, pp. 119-126

[51] González L., Torres F., Rodríguez H., Rivera N. (2013). Modelación de la Calidad del Agua en el Dren El Burrión del Distrito de Riego 063, Guasave, Sinaloa, México. Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2013) "Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity". México: Cancun.

[52] Latz, A., & Schmidt, S. (2010). Hydrodynamic modeling of dilute and dense granular flow. Granular Matter, 12(4), 387-397. doi:10.1007/s10035-010-0187-6.

[53] Hasan, G., Maren, D., & Cheong, H. (2012). Improving hydrodynamic modeling of an estuary in a mixed tidal regime by grid refining and aligning. Ocean Dynamics, 62(3), 395-409. doi: 10.1007/s10236-011-0506-4.

- [54] Pan, C., & Huang, W. (2012). Numerical Modeling of Tsunami Wave Run-Up and Effects on Sediment Scour around a Cylindrical Pier. *Journal Of Engineering Mechanics*, 138(10), 1224-1235. doi: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000406.
- [55] Polomčić, D., Dragišić, V., & Živanović, V. (2013). Hydrodynamic Modeling Of A Complex Karst-Alluvial Aquifer: Case Study Of Prijedor Groundwater Source, Republic of Srpska, Bosnia And Herzegovina. *Acta Carsologica*, 42(1), 93-107.
- [56] Gad, M. A., Saad, A., El-Fiky, A., & Khaled, M. (2013). Hydrodynamic Modeling Of Sedimentation In The Navigation Channel Of Damietta Harbor In Egypt. *Coastal Engineering Journal*, 55(2), -1. Doi: 10.1142/S0578563413500071.
- [57] Awang, N. A., Jusoh, W. W., & Hamid, M. A. (2014). Coastal Erosion at Tanjong Piai, Johor, Malaysia. *Journal Of Coastal Research*, 71122-130. doi:10.2112/SI71-015.1.
- [58] Gao, X. P., Li, G. N., Li, G. R., & Zhang, C. (2015). Modeling the effects of point and non-point source pollution on a diversion channel from Yellow River to an artificial lake in China. *Water Science & Technology*, 71(12), 1806-1814. doi:10.2166/wst.2015.161
- [59] Díaz H. (2004) Modelación hidrodinámica del embalse del Muña, Tesis de Magister Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, director L. A. Camacho.EEB – GRUCON (2005) Plan de seguimiento y monitoreo del embalse del Muña. Monitoreo llevado a cabo durante 2004 y 2005.
- [60] Camacho, L.A. (1991). Implementación de un modelo hidrodinámico y de transporte de contaminantes bidimensional y su aplicación al caso de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Tesis de Magíster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- [61] Barbosa, S. (2013). Modelación Hidrodinámica Y De Calidad De Agua Del Sistema Integrado Embalse Muña-Río Bogotá. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Colombia: Bogotá.

- [62] F. Torres-Bejarano, et al. La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia, Rev. int. métodos numér. cálc. diseño ing. 2015.
- [63] Zhou J., Falconer R., Lin B., (2014). Refinements to the EFDC Model for Predicting the Hydro-Environmental Impacts of a Barrage Across the Severn Estuary, Renewable Energy, 62, pp 493.
- [64] Hamrick, J.M. (1992). A Three-Dimensional Environmental Fluid Dynamic Computer Code: Theoretical and Computational Aspects, The college of William and Mary, Wirginia Institute of Marine Science, pp 317. Spacial report.
- [65] Jun Q., Zhifeng Y., Zhenyao S. (2012). Three-Dimensional Modeling of Sediment Transport in the Wuhan Catchments of the Yangtze River. Procedia Environmental Ecological, 13, pp. 2437-2444.
- [66] Xia M., Craig P. M., Wallen C. M., Stoddard A., Poulsen J. M., Peng M., Schaeffer B. and Liu Z. (2011). Numerical Simulation of Salinity and Dissolved Oxygen at Perdido Bay and Adjacent Coastal Ocean. Journal of Coastal Research, 27 (1), pp 73-86.
- [67] Wang Y., Jiang Y., Liao., Gao P., Huang X., Wang H., Song X. and Lei X. (2013). 3-D hydro-environmental simulation of Miyun reservoir, Beijin. Journal of Hydro-environment Research, English (in Presna), pp. 1-13.
- [68] He G., Fang H, Bai S., Liu X., Chen M., Bai J. (2011). Application of a Three-Dimensional Eutrophication Model for the Beijing Guanting Reservoir, China. Ecological Modelling, 222 (8), pp. 1491-1501.
- [69] Li Y., Acharya K. and Yu Z. (2011). Modeling Impacts of Yangtze River Water Transfer on Water Ages in Lake Taihu, China. Ecological Engineering, 37 (2), pp. 325-335.

[70] Yang M., Li L., Li J. (2012). Prediction of Water Temperature in Stratified Reservoir and Effects on Downstream Irrigation Area: A case study of Xiaohushan reservoir. *Physics and Chemistry of the Earth*, 53-54, pp. 38-42.

[71] Wu G. and Xu Z. (2011). Prediction of Algal Blooming Using EFDC Model: Case study in the Daoxiang Lake. *Ecological Modelling*, 222 (6), pp 1245-1252.

[72] Sánchez, L., Ureña, F., Benito, J y Gavete, L. (2009). Resolución de la ecuación de Difusión en 2-D y 3-D utilizando diferencias finitas generalizadas. *Consistencia y Estabilidad*.

[73] Torres-Bejarano F., et al. (2015). Hydrodynamics modelling utilizing the EFDC Explorer model for the sustainable management of Canal del Dique-Guajaro hydrosystem, Colombia. Faculty of Environmental Sciences, Coast University Colombia and the Faculty of Engineering, University of San Luis Potosí Mexico.

[74] Eckart, C. (1958). Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures. *American Journal of Science* 256: 225–240.

[75] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2004). Estudio Nacional del Agua. Colombia.

[76] Escolar, A. (s.f.). Ecosistemas acuáticos del Departamento del Atlántico. Corporación Autónoma Regional del Atlántico. PAT 2007 – 2009. Colombia: Barranquilla.

[77] Corporación Autónoma Regional del Atlántico, CRA. (2009). Resolución 000587 del 05 de Octubre de 2009. Colombia: Barranquilla.

[78] Gobernación del Atlántico (2008). Plan de Desarrollo Departamental 2008-2011 “por el Bien del Atlántico. Unidos todos, se puede lograr.

[79] Asocars & Universidad del Magdalena (2011). Ajuste del plan de ordenación y manejo del complejo de humedales de la vertiente occidental del Río Magdalena en el departamento del Atlántico y determinación de la ronda hídrica de los humedales de Sabanagrande, Santo Tomas y Palmar de Várela. Convenio de asociación 01 de 2011.

[80] Corporación Autónoma Regional del Atlántico, CRA. "s.f.". Agenda Socioambiental Local. Disponible en:

<http://www.crautonomia.gov.co/documentos/omau/agendasocioambientallocal.pdf>

[81] Corporación Autónoma Regional del Atlántico-Cormagdalena-Conservación Internacional (2007). Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Magdalena en el departamento del Atlántico.

[82] Sociedad Colombia de Arquitectos – Regional Atlántico (2013). Documento diagnóstico, Plan de Ordenamiento Territorial (documento preliminar). Administración Municipal de Malambo.

[83] IDEAM. Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. Archivo. Disponible en:

<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf>

[84] IDEAM. Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. Disponible en:

<https://drive.google.com/file/d/0ByC6KZVO29XyODhjMzQxNzgtNjFkMi00MmUwLTg4N2UtNDQ5YjI3Y2IzZjU5/view?ddrp=1&hl=es#>

[85] Ven Te Chow. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGRAW – HILL INTERAMERICANA S.A.



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO
UNIVERSIDAD DE LA COSTA
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

ACTA N°: 17
DE SUSTENTACIÓN DE PROYECTO DE GRADO

En la Universidad de la Costa, CUC, siendo las 3:00 pm. horas, del día 1 de Junio del año 2016 en cumplimiento de lo señalado en el Acuerdo 237, se presentó el(los) estudiante(s):

JUAN HERNANDEZ RANGEL
DANIEL MARTINEZ RICARDO

Con el fin de sustentar el proyecto de grado titulado:

**MODELACION HIDRODINAMICA Y DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA LA
EVALUACION AMBIENTAL DE VERTIMIENTOS GENERADOS POR CIENAGA
DE MESOLANDIA**

Ante el comité evaluador, integrado por:

Asesor: **FRANKLIN TORRES BEJARANO**

Evaluador: **EDUARDO ESPINOSA FUENTES**

Evaluador: **FEDERICO RIZZO PARRA**

Firma del(los)
interesado(s)

Concluida la presentación y la defensa oral, el comité evaluador dictaminó otorgarle una calificación de* 4,68

El Director de Programa le hizo saber al sustentante el resultado obtenido

Nombre de Asesor
Nombre de evaluador
Nombre de evaluador
Director de Programa

*Opciones de calificación: cinco, cuatro, tres, no aprobada, incompleto