

ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE (ADVECCIÓN Y DISPERSIÓN)
DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE
BUENAVENTURA, COLOMBIA

JENNIFER PAOLA BARBOSA HURTADO

Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniera Sanitaria y
Ambiental

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI
2018

ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE (ADVECCIÓN Y DISPERSIÓN)
DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE
BUENAVENTURA

JENNIFER PAOLA BARBOSA HURTADO

Director
CARLOS ALBERTO RAMIREZ CALLEJAS
Ingeniero Civil M.Sc. Ingeniería Hidráulica

Co-Director
CAMILO HERNÁN CRUZ VELÉZ
Ingeniero Sanitario M.Sc. Ingeniería Hidráulica y Saneamiento

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
SANTIAGO DE CALI
2018

ESTUDIO DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE (ADVECCIÓN Y DISPERSIÓN)
DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN LA BAHÍA INTERIOR DE
BUENAVENTURA, COLOMBIA

Mg. CARLOS ALBERTO RAMÍREZ CALLEJAS

DIRECTOR

Mg. CAMILO HERNÁN CRUZ VÉLEZ

CO-DIRECTOR

PhD. EFRAIN BALDEMAR DEL RISCO MORENO

JURADO

Mg. CARLOS OMAR AYALA COLLAZOS

JURADO

Santiago de Cali, septiembre de 2018

*A mi patria, a mi familia, a mis compañeras y compañeros
y a las fuerzas universales que hicieron posible
la materialización de este desafío.*

*A ella, a Clau... que tu aliento de lucha
nos dé la victoria.*

*“El amor ha sido el opio de las mujeres, como la religión el de las masas. Mientras
nosotras amábamos, los hombres gobernaban.”*

Kate Millett.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo representa la materialización de los esfuerzos de muchos seres. Quiero agradecer en primera instancia a esa fuerza intangible que ha permitido que las cosas que han estado fuera de mi control, se organicen a mi favor y me tengan hoy a un paso de ser la primera profesional de mi familia. Gracias a mi madre Blanca Leonor Hurtado Sánchez y a mi padre Luis Antonio Barbosa González, quienes me han formado y han construido los pilares para mi desarrollo personal y profesional. A ellos muchas gracias por su apoyo, por la paciencia, por creer en mí y por darme tanto... incluso mucho más de lo que la paternidad exige. Tengan la certeza de que cada acción de mi vida es pensada por y para ustedes, para mis hermanos y para mi patria. Gracias a mi abuela Enelia González, a quién admiro por su capacidad de lucha. A ella le agradezco su apoyo en mi proceso de formación de pregrado, brindándome un hogar y su particular afecto. Gracias a mi perrito Zeus, su compañía y su nariz húmeda hizo más amena muchas noches largas.

También le agradezco al profesor Elias Cardona Velásquez, quién me brindó esa segunda oportunidad que pocos son capaces de dar; a mi director técnico Américo, quién contribuyó a mi formación deportiva y me enseñó a superar mis límites y a forjar mi carácter a través del deporte. Al profesor Camilo Cruz por su orientación y sus gestiones, las cuales fueron claves en la consecución de los objetivos de este trabajo. Muchas gracias a mi profesor y mentor Carlos Ramírez Callejas, quién siempre ha ido más allá de lo que dicta el deber, con una ética profesional admirable y quién me enseñó que es más importante ser una excelente profesional que una profesional de éxito. Gracias a Diego Ortiz por su apoyo desinteresado al inicio de este trabajo y un especial agradecimiento al Ingeniero Jorge Escobar por brindarme desde su amplia experiencia, las directrices necesarias para que la defensa de esta investigación fuese un éxito. Gracias también a los profesionales de Vallecaucana de Aguas y de MARETEC que colaboraron de forma muy diligente con esta investigación.

Son numerosos los compañeros y compañeras a quien debo agradecer por este gran paso. Primero quiero darle las gracias al maravilloso equipo de trabajo de HIDROMAR, a Yonatan, a Erika, a Jilmer, a Pablo, a Steven, a Daniela y a la mujer más guerrera que he podido conocer en los últimos años, a Claudia... gracias por las risas y por el conocimiento construido en conjunto, por sus aportes y su apoyo incondicional. Gracias a cada compañero y compañera que me apoyó y fue parte de mi proceso formativo.

Gracias a Fabian y a Pelitos por su ayuda desinteresada, por compartir conmigo su conocimiento y cuidar de mí. Gracias a Luisa, a Camila, a Mar y a Rorris por el aguante, por el cariño y por su amistad sincera. Gracias a todos mis amigos y amigas que siempre han estado pendientes de mi bienestar: Josselyn y el combo de necias, Hiran, Yuye, Liliana...me faltan palabras de agradecimiento con ustedes por su hermosa sincronía energética para que las cosas me salieran bien. A Cristhian una vez más gracias por el amor, por las enseñanzas y por los nuevos rumbos que hemos tomado por separado. Y a la vida gracias por todos los otros matices de ese sentimiento.

A Pepita... sólo agradecimiento, por demostrarme una vez más que las almas gemelas existen y que es posible salvar esta patria, en la medida que nos salvemos a nosotras mismas...

RESUMEN

La bahía de Buenaventura concentra elementos fundamentales de la economía del país (puertos, producción maderera y piscícola, etc.); es un estuario receptor de contaminantes provenientes de fuentes naturales y antrópicas que afectan la calidad del agua, poniendo en riesgo los ecosistemas, la salud humana y las actividades socioeconómicas. La evaluación de estos impactos ambientales resulta fundamental para la formulación de planes de manejo ambiental que contribuyan a su recuperación y conservación. En este proyecto se investigó la variabilidad espacial y temporal de las concentraciones de los sólidos suspendidos totales (SST) en la Bahía considerando diferentes condiciones oceanográficas, aportes de tributarios y descargas de agua residual, mediante la implementación del modelo MOHID. Se validó el modelo con base en los registros de campo disponibles (CVC y Universidad del Valle, principalmente). Los resultados muestran que las concentraciones más críticas se presentan en los deltas de los ríos Dagua y Anchicayá y alrededor de la isla Cascajal.

Palabras clave: Sólidos suspendidos totales; modelación; transporte de sedimentos en suspensión; calidad de agua; bahía de Buenaventura.

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. PROBLEMÁTICA.....	17
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	17
2.1.1. Generalidades de la zona de estudio	17
2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
2.3. JUSTIFICACIÓN	19
2.4. OBJETIVOS	20
2.4.1. Objetivo General	20
2.4.2. Objetivos Específicos.....	20
3. MARCO DE REFERENCIA	21
3.1. MODELOS NUMÉRICOS.....	21
3.2. EMPLEO DE MODELOS MATEMÁTICOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	22
3.3. ESTADO DEL ARTE	25
4. MARCO TEÓRICO	26
4.1. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	26
4.2. CONTAMINACIÓN POR AGUA RESIDUAL	26
4.3. MODELOS MATEMÁTICOS	27
4.4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO – MOHID-.....	27
4.4.1. Generalidades	28
4.4.2. Módulos	29
4.5. CALIBRACIÓN DEL MODELO.....	36
4.6. VALIDACIÓN DEL MODELO	37
5. METODOLOGÍA	37
5.1. FASE 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN 37	
5.2. FASE 2: CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y GEOMORFOLÓGICA ..	38
5.3. FASE 3: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO HIDROSEDIMENTOLÓGICO	38

5.3.1.	Sub-fase 1: selección del modelo	38
5.3.2.	Sub-fase 2: esquematización de la bahía de Buenaventura y construcción de la malla computacional	39
5.3.3.	Sub-fase 3: análisis de sensibilidad	39
5.3.4.	Sub-fase 4: calibración del modelo	40
5.3.5.	Sub-fase 5: validación del modelo	40
5.3.6.	Sub-fase 6: implementación del módulo de trazadores lagrangianos.....	40
5.4.	FASE 4: MODELACIÓN MATEMÁTICA DE DIFERENTES ESCENARIOS DE CALIDAD DE AGUA	40
6.	CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y GEOMORFOLÓGICA DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA.....	41
6.1.	ASPECTOS GENERALES DEL MUNICIPIO DE BUENAVENTURA	41
6.2.	DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO DE BUENAVENTURA	41
6.2.1.	Red de alcantarillado	42
6.3.	DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA	44
6.4.	ASPECTOS HIDROMETEOROLÓGICOS.....	46
6.4.1.	Temperatura	47
6.4.2.	Precipitación	50
6.4.3.	Humedad relativa del aire	52
6.4.4.	Vientos	53
6.4.5.	Brillo solar.....	54
6.4.6.	Nubosidad	55
6.4.7.	Salinidad.....	57
6.4.8.	Dinámica Marina y Fluvial.....	58
6.5.	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	62
6.5.1.	Geología.....	62
6.5.2.	Geomorfología	63
6.5.3.	Sedimentología.....	64
6.5.4.	Sólidos en suspensión	64
7.	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO HIDROSEDIMENTOLÓGICO	69

7.1. SELECCIÓN DEL MODELO	69
7.2. ESQUEMATIZACIÓN DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA Y CONSTRUCCIÓN DE LA MALLA COMPUTACIONAL	70
7.2.1. Construcción de la malla computacional	70
7.2.2. Esquematización de la batimetría.....	71
7.2.3. Condiciones de frontera.....	72
7.2.4. Condiciones iniciales	73
7.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	74
7.3.1. Análisis de sensibilidad hidrodinámico	74
7.3.2. Análisis de sensibilidad del modelo sedimentológico	78
7.4. CALIBRACIÓN HIDROSEDIMENTOLÓGICA.....	81
7.4.1. Calibración Hidrodinámica.....	81
7.4.2. Validación del Modelo Hidrodinámico.....	83
7.4.3. Calibración Sedimentológica.....	85
8. PLANTEAMIENTO, MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS PARA EL ESTUDIO DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN LA BAHÍA INTERNA DE BUENAVENTURA	86
8.1. CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS.....	86
8.1.1. Escenario 1 (año 2016): alternativa con seis sistemas de alcantarillado independientes	87
8.1.2. Escenario 2 (año 2047): alternativa con seis sistemas de alcantarillado independientes	88
8.1.3. Escenario 3 (año 2047): alternativa con dos sistemas de alcantarillado independientes	89
8.1.4. Escenario 4 (año 2047): sistema de alcantarillado con dos plantas de tratamiento de agua residual doméstica y un emisario submarino	90
8.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS.....	91
8.2.1. Escenario 1 (año 2016): alternativa con seis sistemas de alcantarillado independientes	91
8.2.2. Escenario 2 (año 2047): alternativa con seis sistemas de alcantarillado independientes	94
8.2.3. Escenario 3 (año 2047): alternativa con dos sistemas de alcantarillado independientes	95

8.2.4.	Escenario 4 (año 2047): sistema de alcantarillado con dos plantas de tratamiento de agua residual doméstica y un emisario submarino	97
8.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	101
9.	USOS ACTUALES Y FUTUROS DEL AGUA DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA (ANÁLISIS DEL PARÁMETRO SST).....	103
10.	CONCLUSIONES.....	105
11.	RECOMENDACIONES	106
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	108
13.	ANEXOS	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización del agua residual de Buenaventura (DBO, DQO, SST y Coliformes Fecales)	44
Tabla 2. Localización de los puntos de monitoreo de la CVC y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM en la bahía de Buenaventura.....	47
Tabla 3. Temperatura media mensual multianual del aire en el municipio de Buenaventura.....	47
Tabla 4. Precipitación y días promedio de lluvia en el municipio de Buenaventura.....	50
Tabla 5. Humedad relativa media mensual multianual en el municipio de Buenaventura.....	52
Tabla 6. Velocidades medias mensuales multianuales del viento en el municipio de Buenaventura	54
Tabla 7. Brillo Solar medio mensual multianual en el municipio de Buenaventura	54
Tabla 8. Nubosidad media mensual multianual en el municipio de Buenaventura.....	56
Tabla 9. Salinidad semestral en los sitios de medición en la bahía interior de Buenaventura	58
Tabla 10. Componentes armónicas principales de las mareas en la bahía de Buenaventura	60
Tabla 11. Subcuencas tributarias de la bahía de Buenaventura.....	61
Tabla 12. Caudales fluviales mínimos, medios y máximos de los ríos y esteros de la bahía de Buenaventura.....	62
Tabla 13. Condiciones iniciales en la Bahía y en las descargas fluviales	74
Tabla 14. Ubicación geográfica de los puntos de control o estaciones al interior de la bahía de Buenaventura.....	74
Tabla 15. Tamaño medio de los sólidos en suspensión medidos en la bahía de Buenaventura	79
Tabla 16. Valores del coeficiente de determinación para diferentes coeficientes de rugosidad de Manning	82
Tabla 17. Condiciones iniciales y variabilidad en las concentraciones asignadas a las cajas, en las diferentes simulaciones realizadas	85
Tabla 18. Escenarios de simulación para el estudio de los procesos de transporte de los SST en la bahía interna de Buenaventura	87
Tabla 19. Identificación de vertimientos correspondientes al Escenario 1 (año 2016)	88
Tabla 20. Identificación de vertimientos correspondientes al Escenario 2 (año 2047)	89
Tabla 21. Identificación de vertimientos correspondientes al Escenario 3 (año 2047)	90
Tabla 22. Usos actuales del agua en la bahía de Buenaventura determinados por INVEMAR (2015)	104
Tabla 23. Cumplimiento de la normativa internacional respecto a valores máximos permisibles de sólidos suspendidos totales para cada uso potencial del agua.....	105

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la bahía de Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia.....	17
Figura 2. Arquitectura del framework de MOHID	29
Figura 3. Esquema de MOHID Water: principales módulos involucrados.....	30
Figura 4. Aplicación de la Segunda Ley de Newton sobre un volumen de control deformable	31
Figura 5. Cobertura de la red de alcantarillado en la zona urbana de Buenaventura	42
Figura 6. Ubicación de las descargas en la zona urbana de Buenaventura	43
Figura 7. Estaciones de muestreo de agua residual doméstica – Municipio de Buenaventura	44
Figura 8. Carta náutica #153 dónde el trazo representa el canal de acceso y las correspondientes zonas de la bahía de Buenaventura: exterior (de color rojo) e interior (de color azul)	45
Figura 9. Bahía de Buenaventura. Localización de puntos de muestreo años 2005-2013	49
Figura 10. Mapa de localización de las zonas (polígonos demarcados con líneas punteadas) y las estaciones de muestreo de la REDCAM (puntos rojos) en el departamento de Valle del Cauca	67
Figura 11. Esquemización de la línea de costa de la bahía de Buenaventura y malla de cálculo utilizada en el dominio de la simulación.....	71
Figura 12. Batimetría y condiciones de frontera en la bahía de Buenaventura.....	72
Figura 13. Cajas o “boxes” para la asignación de las condiciones iniciales (temperatura, salinidad y concentración de sólidos en suspensión) en la bahía de Buenaventura. Bahía exterior (1), bahía interior zona norte (2), bahía interior zona sur (3)	73
Figura 14. Puntos de control para el análisis de sensibilidad hidrodinámico.....	75
Figura 15. Ubicación espacial de los puntos de muestreo de la campaña de campo	78
Figura 16. Alternativa con seis sistemas de alcantarillado independientes.....	87
Figura 17. Localización de los seis puntos de vertimiento de sistemas de alcantarillado independientes para el Escenario 1 (año 2016).....	88
Figura 18. Alternativa con dos sistemas de alcantarillado independientes	89
Figura 19. Localización de los dos puntos de vertimiento de los sistemas de alcantarillado independientes para el Escenario N°3 (año 2047)	90
Figura 20. Recorrido del emisario submarino en la bahía de Buenaventura y localización de las PTAR Lleras y Olímpico.....	91
Figura 21. Concentraciones de SST en la bahía de Buenaventura para el Escenario 1(año 2016 y seis sistemas de alcantarillado independientes). Condición de bajamar viva: (A) sin considerar SST en descargas fluviales y (B) considerando SST en descargas fluviales	93
Figura 22. Concentraciones de SST en la bahía de Buenaventura para el Escenario 2 (año 2047 y seis sistemas de alcantarillado independientes). Condición de bajamar viva: (A) sin considerar SST en descargas fluviales y (B) considerando SST en descargas fluviales	95
Figura 23. Concentraciones de SST en la bahía de Buenaventura para el Escenario 3 (año 2047 y dos sistemas de alcantarillado independientes). Condición de bajamar viva: (A) sin considerar SST en descargas fluviales y (B) considerando SST en descargas fluviales	97

Figura 24. Concentraciones de SST en la bahía de Buenaventura para el Escenario 4 (año 2047, sistema de alcantarillado con dos PTAR y un emisario submarino). Condición de bajamar viva: (A) sin considerar SST en descargas fluviales y (B) considerando SST en descargas fluviales	99
Figura 25. Desplazamiento neto de las partículas vertidas desde el emisario submarino a los (A) 5 días, (B) 10 días y (C) 15 días	100

ÍNDICE DE GRÁFICÁS

Gráfica 1. Diagrama de cajas de la temperatura media mensual del aire en la estación Aeropuerto, municipio de Buenaventura.....	48
Gráfica 2. Diagrama de cajas de la temperatura media mensual del aire en la estación Colpuertos, municipio de Buenaventura.....	48
Gráfica 3. Diagrama de cajas de la precipitación mensual en la estación Aeropuerto, municipio de Buenaventura.....	51
Gráfica 4. Diagrama de cajas de la precipitación mensual en la estación Colpuertos, municipio de Buenaventura.....	51
Gráfica 5. Diagrama de cajas de la humedad relativa del aire (media mensual) en la estación Aeropuerto, municipio de Buenaventura.....	52
Gráfica 6. Diagrama de cajas de la humedad relativa del aire (media mensual) en la estación Colpuertos, municipio de Buenaventura	53
Gráfica 7. Diagrama de cajas del brillo solar mensual en la estación Aeropuerto, municipio de Buenaventura.....	55
Gráfica 8. Diagrama de cajas del brillo solar mensual en la estación Colpuertos, municipio de Buenaventura.....	55
Gráfica 9. Diagrama de cajas de la nubosidad mensual en la estación Aeropuerto, municipio de Buenaventura.....	56
Gráfica 10. Diagrama de cajas de la nubosidad mensual en la estación Colpuertos, municipio de Buenaventura.....	57
Gráfica 11. Niveles de Marea en la bahía de Buenaventura durante el mes de noviembre del año 1997.....	59
Gráfica 12. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: velocidades del flujo en el sitio de control Muelle	75
Gráfica 13. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: velocidades del flujo en el sitio de control La Bocana.....	76
Gráfica 14. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Velocidades del flujo en el sitio de control Muelle	77
Gráfica 15. Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Velocidades del flujo en el sitio de control La Bocana	77
Gráfica 16. Análisis de sensibilidad para la masa mínima de sedimentos: influencia en la concentración de sólidos en suspensión en el punto de control Zona Muelle.....	80

Gráfica 17. Análisis de sensibilidad para la masa mínima de sedimentos: influencia en la concentración de sólidos en suspensión en el punto de control de La Bocana	81
Gráfica 18. Coeficiente de determinación de la relación entre los niveles de mareas medidos y los niveles calculados para diferentes coeficientes de rugosidad de Manning	82
Gráfica 19. Calibración del modelo hidrodinámico. Niveles de marea en el punto de control La Bocana.....	83
Gráfica 20. Calibración del modelo hidrodinámico. Niveles de marea en el punto de control Muelle	83
Gráfica 21. Validación del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Mareógrafo (01/08/2003 – 06/08/2003)	84
Gráfica 22. Validación del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Mareógrafo (16/11/2003 – 26/11/2003)	84
Gráfica 23. Calibración del modelo sedimentológico. Concentraciones de SST en el punto de control Canal (30/10/17 – 03/11/17)	85
Gráfica 24. Calibración del modelo sedimentológico. Concentraciones de SST en el punto de control Zona Muelle (30/10/17 – 03/11/17)	86
Gráfica 25. Variación de las concentraciones de SST en los puntos de control Canal-3, Piñal Norte y Punta Soldado para el Escenario 1 (año 2016 y seis sistemas de alcantarillado independientes) ..	92
Gráfica 26. Variación de las concentraciones de SST en los puntos de control Canal-3, Piñal Norte y Punta Soldado para el Escenario 2 (año 2047 y seis sistemas de alcantarillado independientes) ..	94
Gráfica 27. Variación de las concentraciones de SST en los puntos de control Canal-3, Piñal Norte y Punta Soldado para el Escenario 3 (año 2047 y dos sistemas de alcantarillado independientes) ..	96
Gráfica 28. Variación de las concentraciones de SST en los puntos de control Canal-3, Piñal Norte y Punta Soldado para el Escenario 4 (sistema de alcantarillado con dos PTAR y un emisario submarino).....	98

1. INTRODUCCIÓN

La bahía de Buenaventura es una zona estratégica para la economía del país puesto que en ella se encuentra el principal puerto sobre el Pacífico Colombiano, además de otros terminales marítimos y el principal núcleo urbano del municipio de Buenaventura. Las características propias de la Bahía la clasifican como un sistema estuarino, con una morfodinámica compleja, donde interactúan las mareas, las descargas de aguas continentales, los vientos, el oleaje, etc.; como consecuencia de esto, su hidrodinámica y los procesos del transporte de sedimentos y de las diferentes sustancias contaminantes que llegan a la Bahía a través de ríos, esteros, vertimientos de agua residual doméstica (ARD), agrícola e industrial, se torna más caótica (CVC-INVEMAR, 2015).

Los aportes de materiales y sustancias contaminantes a la bahía de Buenaventura provienen de diferentes fuentes, tales como las actividades portuarias, pesqueras, mineras y madereras, realizadas no sólo a nivel de la costa sino también en las cuencas hidrográficas; y, los residuos sólidos y líquidos generados por la población asentada sobre toda el área de influencia del sistema hídrico. La alteración del medio natural debido a estas fuentes contaminantes afecta severamente la calidad fisicoquímica y microbiológica del agua, poniendo en riesgo el equilibrio biológico de los ecosistemas acuáticos, la salud humana y las actividades socioeconómicas que se desarrollan alrededor de las áreas costeras.

En este sentido se hace necesario diseñar e implementar un plan de gestión integral de las aguas de la Bahía, que incluya, además de las normativas de vertimientos, zonas de protección y criterios para el uso sostenible del recurso hídrico, el establecimiento y cumplimiento de unos objetivos de calidad del agua con el fin de preservar la salud pública y minimizar los impactos ambientales provocados por la contaminación de este recurso.

Un parámetro muy importante en los estudios de calidad del agua es la concentración de sólidos suspendidos totales (SST). Estos generan problemas durante los procesos de eutrofización debido a la influencia sobre la penetración de la luz y la disponibilidad de nutrientes, afectando la producción primaria y con ello la vida acuática en general; además, pueden tener una relación directa con sustancias químicas disueltas en el agua y los procesos de adsorción-desorción, puesto que actúan como portadores de metales pesados, pesticidas y otros tóxicos de importancia ecológica y sanitaria, que pueden sedimentarse por largos periodos antes de ser resuspendidos a la columna de agua o ser transportados grandes distancias (Zhen-Gang, 2008).

Una estrategia importante para prevenir el deterioro y contaminación de los ecosistemas acuáticos es el establecimiento de unos objetivos de calidad de agua, teniendo en cuenta tanto las cantidades de contaminantes vertidos como su comportamiento posterior en el medio acuático. Se hace necesario, entonces, determinar la evolución espacial y temporal de las concentraciones de los diferentes contaminantes y parámetros fisicoquímicos del agua y cómo pueden interferir con el resto de sustancias presentes en el medio (Moneris & Domenech, 1997). Los modelos matemáticos de simulación se convierten en herramientas

útiles para describir y predecir la evolución espacio-temporal de la contaminación en los ecosistemas marinos y costeros.

Así, el presente estudio tuvo por objeto describir los procesos de transporte de los sólidos suspendidos totales, considerando diferentes escenarios y condiciones hidrodinámicas en la bahía de Buenaventura mediante la implementación del modelo matemático hidrodinámico MOHID.

2. PROBLEMÁTICA

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

2.1.1. Generalidades de la zona de estudio

La bahía de Buenaventura está ubicada en la costa pacífica colombiana, en el departamento del Valle del Cauca, con coordenadas geográficas entre los 77° 16' de longitud oeste y los 3° 56' de latitud norte (ver Figura 1). Tiene aproximadamente 21 kilómetros de largo por 11 kilómetros de ancho, con una sola entrada conocida como La Bocana, formada por Punta Bazán al norte y Punta Soldado al sur, separadas entre sí por un estrecho de cerca de 1600 m de ancho.



Figura 1. Ubicación de la bahía de Buenaventura, Valle del Cauca, Colombia

La bahía de Buenaventura está constituida por una bahía exterior que conecta directamente con el mar abierto y una bahía interior con características propias de un estuario, pues en ella confluyen tanto procesos marinos como fluviales. El acceso al interior de la bahía se efectúa por un canal largo desde La Bocana hasta la isla Cangrejo y continúa hasta arribar a la isla Cascajal, donde se encuentran la ciudad y el puerto de Buenaventura. Dicho canal de acceso permite, además, el tránsito de las embarcaciones desde mar afuera hasta los terminales marítimos de Buenaventura.

La bahía interior presenta una orientación suroeste-noreste y se caracteriza por su forma alargada y angosta de alrededor de 15 km de longitud y 3.4 km de ancho. Los aportes de aguas continentales que ingresan a la Bahía son principalmente provenientes de los ríos Dagua y Anchicayá y de los esteros Pichidó, San Joaquín, Aguadulce, Gamboa, San Antonio y Aguacate.

2.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El municipio de Buenaventura está dividido en su zona rural en 19 corregimientos y 268 veredas; el número de poblados asciende a 388 asentamientos ubicados al interior del bosque húmedo tropical y sobre las riberas de los ríos y quebradas y en la zona costera. La cabecera del municipio está constituida por dos zonas: una insular conformada por la isla Cascajal, en

la que se ha desarrollado toda la actividad portuaria, y una zona continental caracterizada principalmente por el uso residencial con crecimiento espontáneo y sin regulación urbanística; esto ha generado una ocupación dispersa y poco densa del espacio urbano (HIDROCARIBE, 2005).

A pesar de contar con el puerto más importante de Colombia sobre el Pacífico, Buenaventura es considerado en la actualidad como el municipio más pobre del Valle del Cauca, siendo deficiente el grado de desarrollo y las condiciones socioeconómicas de sus habitantes. De acuerdo con los resultados de la ECH (Encuesta Continua de Hogares) realizada por el DANE en 2004, la pobreza, calculada por necesidades básicas insatisfechas (NBI), correspondió al 62.7% de la población, mientras que el 20.9% fue considerada en estado de indigencia. Los anteriores indicadores se ven reflejados en la cobertura de servicios básicos, especialmente en acueducto (75.9%) y alcantarillado (59.6%), los cuales están por debajo de la media departamental que supera el 90% (Banco de la República, 2008). La baja cobertura en los servicios de alcantarillado y su inoperatividad en algunos tramos, además de las deficiencias en las condiciones del saneamiento básico de su entorno inmediato, ubican a las infecciones intestinales en la población infantil como la segunda causa de consulta médica en el municipio de Buenaventura (HIDROCARIBE, 2005).

Los principales usos dados en la actualidad a los cuerpos de agua correspondientes a la bahía interior de Buenaventura están relacionados con la pesca, la navegación y el vertimiento de residuos líquidos y sólidos (Corporación Bioparque, 2012). Sin embargo, la calidad del agua en la bahía de Buenaventura se ha visto afectada por el inadecuado manejo de residuos municipales y por la influencia de otras actividades productivas que aportan altas concentraciones de materia orgánica, nutrientes, sólidos en suspensión, y microorganismos de origen fecal, que deterioran la calidad del agua y limita sus diferentes usos (INVEMAR, 2016).

Según Vivas-Aguas *et al.* (2014), la carga de sólidos suspendidos totales que recibe la Bahía es aportada principalmente por los ríos Dagua, Anchicayá, Potedó y Raposo, lo cual se refleja en el incremento de la turbiedad y la baja transparencia de sus aguas. La cuenca del río Dagua presenta altos niveles de deforestación relacionados con la explotación minera realizada en su cauce; la carga de lavado proveniente de la erosión de esta cuenca, es parte muy importante en el aporte de sedimentos suspendidos a la Bahía (Corporación Bioparque, 2012).

Como explican Marco *et al.* (2004), la turbidez tiene una gran importancia sanitaria, ya que refleja una aproximación del contenido de partículas suspendidas y disueltas, materias coloidales, minerales u orgánicas, por lo que puede ser indicio de contaminación debido a que los sólidos dispersos y las partículas presentes en el agua pueden actuar como portadores de parásitos, bacterias, gérmenes y virus. Adicionalmente, de acuerdo con Boyes y Elliott (2006), la turbiedad atenúa la luz solar, actuando como un factor limitante en la productividad primaria lo cual promueve la disminución de los niveles de oxígeno disuelto.

Si bien se tiene información sobre la calidad del agua de la bahía de Buenaventura, su morfodinámica compleja, los procesos de dispersión y advección de los contaminantes, las

metodologías utilizadas para realizar los muestreos (en ocasiones puntuales y superficiales) y la cobertura de dichas mediciones, han generado dificultades en la generación de diagnósticos efectivos que permitan llevar a cabo una adecuada gestión ambiental de las aguas marinas y costeras.

De este modo, estudiar y predecir los fenómenos de transporte de los sólidos suspendidos en diferentes condiciones hidrodinámicas y climatológicas y teniendo en cuenta las dinámicas poblacionales, permitirá a los entes político-administrativos nacional, departamental y municipal, encaminar acciones de mitigación de la contaminación y prevención de enfermedades infecciosas relacionadas con el agua, enfocándose en las zonas de contaminación crítica o de alto riesgo para la comunidad.

2.3. JUSTIFICACIÓN

El puerto de Buenaventura es el principal puerto colombiano sobre el Océano Pacífico. En el año 2014, Colombia movilizó por sus zonas portuarias marítimas más de 184 millones de toneladas de carga y recibió alrededor de 61 mil buques en las costas Atlántica y Pacífica, alcanzando los 2 millones de contenedores en el año; Buenaventura se ubicó para este año como la segunda sociedad portuaria regional con mayor participación en las rutas de exportación marítima del país, cubriendo el 30.60% de las rutas de servicios portuarios regulares (PROCOLOMBIA, 2015). Pese a su dinámica, el puerto de Buenaventura presenta muchas dificultades en el calado del canal navegable y las vías de acceso terrestres; por ello se han realizado numerosos estudios para la implementación de proyectos encaminados a la ampliación del puerto; algunos de estos trabajos han sido adelantados por HIDROCARIBE LTDA (2005) y la Corporación Bioparque (2012), los cuales involucran estudios de impacto ambiental de las obras que deberían adelantarse para este propósito.

Como producto de la actividad portuaria se generan múltiples impactos ambientales sobre la calidad del agua y la del aire, la hidrología costera, la oceanografía y los procesos costeros, la ecología costera y marina y la calidad del paisaje, por lo cual es obligatorio contar con todos los planes de manejo ambiental y contingencia para minimizar los impactos que se puedan generar (INVEMAR, 2016).

De acuerdo con los estudios realizados por el Banco de la República (2008), la situación socioeconómica de Buenaventura se ha caracterizado históricamente por elementos geográficos (selva tropical, clima húmedo, altas temperaturas y tierras de baja fertilidad); el legado histórico-colonial (economía esclavista con instituciones caracterizadas por la desigualdad) y la presencia del puerto y sus actividades conexas. Pese a las limitaciones geográfico-ambientales y de capital humano, en el municipio existe un potencial productivo en las actividades forestales, pesqueras y ecoturísticas. Sin embargo, toda esta estructura productiva y de comercio nacional e internacional se pone en riesgo debido a la contaminación de las aguas marinas y costeras, siendo los elevados volúmenes de sedimentos descargados a la Bahía y su posterior decantación una de las mayores dificultades para la navegabilidad en la zona. Además, la contaminación de los cuerpos de agua por fuentes

antrópicas (agua residual municipal) fomenta la aparición de patógenos y pone en riesgo la sustentabilidad de los servicios ecosistémicos ofrecidos por la Bahía.

Todo lo anterior obliga a la elaboración e implementación de estrategias de prevención, control y mitigación de la contaminación en la bahía de Buenaventura a través de estudios e intervenciones que involucren de forma integral a la comunidad, los entes gubernamentales y los sectores académicos y productivos. La modelación matemática de los fenómenos de transporte de sedimentos y contaminantes es parte importante de dichas estrategias, siendo útil para predecir las trayectorias de las partículas contaminantes y su localización en el tiempo.

La simulación de diferentes escenarios de contaminación y distintas condiciones mareales y fluviales en la Bahía, además de presentarse como una eficaz y eficiente herramienta predictiva de acuerdo con las condiciones actuales en el municipio, también permite estimar el comportamiento de los SST una vez implementadas distintas medidas de mitigación, tales como sistemas de tratamiento de agua residual, o en momentos de crecimiento demográfico (proyecciones de población y temporadas de turismo). Igualmente, se puede observar la distribución de la contaminación en diferentes condiciones climatológicas e hidrodinámicas.

Los resultados de la modelación permitirán identificar las zonas y los momentos críticos de contaminación, siendo esta información de gran utilidad para concentrar las intervenciones en estos sectores, identificando las causalidades e implementando soluciones más eficaces a la problemática de contaminación del agua en la bahía de Buenaventura.

2.4. OBJETIVOS

2.4.1. Objetivo General

Estudiar los procesos de transporte (advección y dispersión) de los sólidos suspendidos totales en la bahía interna de Buenaventura.

2.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la hidrodinámica de la bahía de Buenaventura.
- Implementar un modelo matemático hidrodinámico y de calidad de agua de la bahía de Buenaventura.
- Implementar un módulo de trazadores lagrangianos en la bahía de Buenaventura.
- Establecer, simular y estudiar diversos escenarios de modelación de los sólidos suspendidos totales en la bahía de Buenaventura, considerando diferentes sitios de vertimientos, proyecciones de población y condiciones mareales.

3. MARCO DE REFERENCIA

Debido a la gran importancia económica y ecológica de las zonas costeras de Buenaventura, en los últimos años se han intensificado los estudios y trabajos sobre la hidrodinámica de estos sistemas, principalmente en los aspectos relacionados con su hidrología, calidad de agua y características geoquímicas. Una de las herramientas utilizadas para llevar a cabo estos estudios es la modelación matemática, puesto que permite predecir el comportamiento futuro de un sistema, siempre y cuando el modelo haya sido debidamente calibrado y validado.

3.1. MODELOS NUMÉRICOS

Los modelos juegan un rol muy importante en todas las ciencias. Pueden ser usados para diversos propósitos: organización de datos, síntesis de la información y elaboración de predicciones. Los modelos expresan las consecuencias lógicas de una serie de hipótesis y permiten generar predicciones, mismas que deben basarse en uno o varios modelos de algún tipo, que pueden ir desde simples analogías tomadas del mundo real, por medio de regresiones basadas en modelos estadísticos, hasta complejos modelos matemáticos multidimensionales que requieren métodos de simulación numérica para llegar a una solución (Canham *et al.*, 2003, citados por Sosa, 2010).

Según Moneris & Domenech (1997), la validez de la predicción realizada por el modelo vendrá determinada por la capacidad del mismo de reflejar el comportamiento del sistema. Por ende, es necesario, por una parte, conocer todos los fenómenos que afectan el comportamiento de las distintas sustancias presentes en el sistema y, por otra, desarrollar un conjunto de ecuaciones que describan estos fenómenos; en el caso de la simulación matemática, las ecuaciones se encuentran implícitas en el modelo y son resueltas por este a partir de la información primaria o secundaria que se le ingrese.

En el caso de la oceanografía en general, y la oceanografía costera en particular, existe una larga tradición en la generación y uso de modelos numéricos (Nihoul, 1975; Bowden, 1983; Heaps, 1987; Dyke, 1996). Sin embargo, modelos acoplados físico-ecológicos y físico-ecológico-sociales son más recientes (Salomons *et al.*, 1999; Peng *et al.*, 2002; Arrequin-Sanchez *et al.*, 2004; Fennel & Neumann, 2004). Estos últimos son necesarios para generar predicciones respecto de los efectos potenciales de las intervenciones antrópicas en los ecosistemas costeros, para poner a prueba las hipótesis respecto de los mecanismos de funcionamiento de estos ecosistemas y para realizar simulaciones respecto de acciones de manejo. Lo anterior es especialmente válido bajo el esquema del manejo integrado de zonas costeras o en la elaboración de normas secundarias sobre la calidad del agua marina (Campuzano & Marín, 2008).

Específicamente, la modelación hidrodinámica de una bahía permite estudiar la respuesta de la circulación de las partículas a la batimetría, a las mareas y al sistema de vientos de la región. La dinámica de estos sistemas se basa en leyes hidrodinámicas correspondientes a

ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de la conservación de la masa y el momento lineal.

3.2. EMPLEO DE MODELOS MATEMÁTICOS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Ramirez (1995). Hydrodynamics and sediment transport processes in Buenaventura bay, Colombia.

Uno de los primeros estudios referentes a la bahía de Buenaventura en cuanto a procesos hidrodinámicos y transporte de sedimentos consistió en la aplicación de dos modelos matemáticos, DUFLOW y TRISULA. El primero, un modelo de flujo unidimensional, permitió la obtención de las características hidrodinámicas principales de la Bahía, haciendo más eficiente en términos temporales el proceso de calibración del modelo de dos dimensiones, TRISULA; este último fue implementado para obtener los patrones de flujo en la Bahía, logrando un mayor detalle en los resultados del comportamiento hidráulico de la zona de estudio. El desplazamiento y distribución de los sedimentos fue trabajado con base en el análisis de resultados de la modelación hidrodinámica y la aplicación de expresiones empíricas existentes para estuarios con características similares a la bahía de Buenaventura.

Universidad del Valle (1999). Estudio hidrodinámico y sedimentológico de la bahía de Buenaventura mediante la implementación del modelo matemático Mike21.

Las contribuciones de este estudio permitieron obtener una mayor comprensión de los procesos hidrodinámicos y del transporte de sedimentos finos cohesivos (lodos) y granulares (arenas) en la bahía de Buenaventura. Por medio de la implementación del modelo matemático Mike21 se estudió la influencia de parámetros como la rugosidad y la viscosidad turbulenta o de remolino en la hidrodinámica de la Bahía; igualmente se evaluó la influencia en los patrones de sedimentación y erosión de parámetros y factores como los coeficientes de dispersión, la velocidad de caída de los sedimentos en suspensión y las concentraciones de sedimentos suspendidos en las fronteras.

Muñoz (2015). Estudio de la dispersión de hidrocarburos debido a un posible derrame en la bahía de Buenaventura, Colombia.

Este estudio tuvo como objetivo estudiar la dispersión de contaminantes tipo hidrocarburo causada por un posible derrame accidental en la bahía de Buenaventura. Para ello se efectuó la caracterización física de la Bahía y posteriormente se implementó el modelo matemático MOHID para simular sus procesos hidrodinámicos. Igualmente se implementó el módulo de trazadores lagrangianos con el fin de estimar las trayectorias de las partículas de diferentes sustancias vertidas en el sistema de la Bahía. Además, dentro del estudio se plantearon, simulaban y evaluaron diferentes escenarios de derrame de hidrocarburo, considerando para ello dos posibles sitios de vertimiento y diferentes instantes de marea.

La modelación permitió estimar la dispersión del hidrocarburo vertido accidentalmente en diferentes sitios y evidenció la influencia de factores como la velocidad y dirección de las corrientes mareales y el nivel de marea en dicha dispersión. Además, se determinó la

afectación en los esteros y ríos por el derrame accidental, de acuerdo con la ubicación del mismo.

Convenio CVC-INVEMAR (2015). Proyecto determinación de objetivos de calidad por usos del recurso hídrico en la bahía de Buenaventura – sector Cascajal, a través de la modelación de coliformes y DBO para definir diferentes escenarios de calidad de agua.

Este estudio tuvo por objeto la selección e implementación del modelo matemático hidrodinámico y de calidad del agua MOHID para describir la circulación de las corrientes al interior de la Bahía y los procesos de dispersión de coliformes termo-tolerantes y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Se plantearon y simularon diferentes escenarios a corto (5 años), mediano (10 años) y largo plazo (20 años), considerando diferentes condiciones: mareales, proyecciones de cargas contaminantes y niveles de tratamiento del agua residual vertida a la bahía de Buenaventura, condicionadas a unos escenarios denominados optimista y pesimista, referente a la implementación de medidas estructurales para su mitigación.

Los resultados de la modelación indicaron que se requieren más mediciones orientadas a la implementación de un modelo numérico puesto que las redes de control o monitoreo no están diseñadas para utilizar los datos en la modelación numérica de la calidad de agua. Sin embargo, los datos obtenidos de calidad de agua resultaron ser muy importantes para la realización de esta modelación. De acuerdo con el estudio, es importante que los programas de monitoreo sean mejorados en sus diseños y en el método de medición para que sus datos sean utilizados en la modelación numérica. Finalmente, se recomienda introducir más parámetros en la modelación; al menos todos los utilizados para definir los criterios de usos del agua y los índices de calidad.

Giraldo (2017). Estudio de las corrientes residuales en la bahía de Buenaventura, Colombia.

En este estudio se implementó el modelo matemático hidrodinámico MOHID y su módulo de trazadores lagrangianos con el fin de simular los procesos hidrodinámicos en la Bahía, determinar las corrientes residuales, tanto durante mareas vivas como durante mareas muertas, y estimar el transporte o desplazamiento neto de las partículas al final de un ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas- mareas muertas. Los resultados obtenidos muestran que en la bahía de Buenaventura existe una circulación residual apreciable en toda su extensión y con dirección predominante hacia el exterior de la misma, aunque en algunos sectores se presentan pequeñas recirculaciones. Se simularon igualmente diferentes condiciones de descargas en los ríos Dagua y Anchicayá, principales tributarios de la Bahía, encontrándose que las corrientes residuales se incrementan cuando los afluentes descargan los máximos caudales, y que se manifiesta en un mayor desplazamiento neto de las partículas o trazadores lagrangianos en dirección hacia la bahía exterior.

Moreno & Perdomo (2017). Determinación de los tiempos de residencia de las aguas en la bahía de Buenaventura.

En esta investigación se determinaron los tiempos de residencia de las aguas en la bahía de Buenaventura mediante la implementación de un modelo matemático hidrodinámico (MOHID) incluyendo un módulo de trazadores lagrangianos. El proceso de modelación consistió en la determinación de los tiempos de residencia para tres zonas delimitadas a partir de varios puntos de emisión a lo largo de la bahía interna, teniendo en cuenta además tres condiciones mareales de rango máximo y promedio de mareas vivas, dos escenarios críticos condicionados por el flujo y reflujo del rango máximo de mareas vivas presentado en los últimos 25 años y un tercer escenario que simula una condición mareal media. Como resultado se pudo observar que los tiempos de residencia mínimos promedio presentados dentro de la Bahía oscilaron alrededor de los 3 días y los tiempos de residencia máximos en promedio oscilaron alrededor de los 76 días, además se evidenció que para la condición mareal de flujo los tiempos de residencia son mayores a la condición de reflujo. A través de este ejercicio se observaron sectores de rápida evacuación que pueden ser de interés para el desarrollo de planes que busquen la reubicación de las actuales zonas de descarga de agua residual.

Burbano (2017). Planteamiento y evaluación de diferentes medidas estructurales para reducir las tasas de sedimentación en el canal de acceso y las zonas de aproximación a los terminales marítimos en la bahía de Buenaventura.

En este estudio se plantearon y evaluaron, mediante la modelación matemática, diferentes medidas estructurales con el propósito de disminuir las tasas de sedimentación en los sectores de aproximación a los terminales marítimos existentes actualmente en Buenaventura. Para ello se realizó la caracterización física de la Bahía, se implementó el modelo matemático hidrodinámico y sedimentológico MOHID con el fin de simular los procesos de sedimentación y, finalmente, se plantearon y simulaban cinco alternativas estructurales como posibles estrategias de reducción de las tasas de sedimentación en la Bahía.

Los resultados obtenidos mostraron que la implementación del desvío total del río Dagua es la mejor alternativa estructural, dado que se disminuyeron las tasas de sedimentación y las concentraciones de sedimentos en suspensión en las zonas próximas a los terminales marítimos.

Leiton (2018). Estudio hidrodinámico y sedimentológico de la bahía de Buenaventura empleando el modelo matemático bidimensional MOHID.

En este trabajo se estudió la hidrodinámica y el comportamiento de los sedimentos suspendidos en la bahía de Buenaventura. Para ello, se implementó un modelo matemático variando la concentración de sedimentos en suspensión aportados por los ríos Dagua y Anchicayá, principalmente.

La implementación del modelo matemático confirmó la influencia de la hidrodinámica de la bahía Buenaventura en el comportamiento de los sedimentos y zonas de sedimentación y de erosión. Los resultados de las simulaciones para un periodo cuasi-quincenal mostraron que el aporte de sedimentos en suspensión por parte de los ríos Dagua y Anchicayá tiene una influencia directa sobre la sedimentación en la Bahía, ya que una variación en la cantidad de sedimentos suspendidos aportados por estos dos afluentes se ve reflejado en los resultados obtenidos en cada simulación.

3.3. ESTADO DEL ARTE

Sobre los procesos de transporte de sedimentos y de sólidos suspendidos totales en zonas estuarinas, marinas y costeras se han realizado numerosos estudios en diferentes regiones alrededor del mundo, de gran importancia para la presente investigación. Algunos de los más destacados se presentan brevemente a continuación.

Álvarez & Trento (2004). Transporte de metales pesados en cursos fluviales.

En este trabajo se simuló el transporte de hierro y cromo en un curso fluvial: el arroyo Las Prusianas (Santa Fe), con un modelo Euleriano (Quickest) que aproxima la ecuación de advección-dispersión mediante un algoritmo de tercer orden. Se determinaron las variaciones espaciales y temporales al nivel de concentraciones totales de metales en agua y en sedimentos de fondo.

La implementación del modelo se realizó bajo el supuesto de equilibrio instantáneo, equivalente a admitir que las escalas de tiempo de los principales procesos de transporte (advección, dispersión, resuspensión y sedimentación) son sustancialmente mayores que las escalas de las cinéticas de sorción de los metales pesados. El modelo, aún en una primera etapa de desarrollo, permitió representar muy bien las concentraciones totales medidas en agua y sedimentos de fondo, con lo cual se espera contar con una importante herramienta de predicción y manejo de sistemas ambientales fluviales.

Chao *et al.* (2007). Numerical modeling of water quality and sediment related processes.

En este estudio se implementó el modelo de calidad del agua en tres dimensiones CCHE3DWQ para simular las variaciones temporales y espaciales de la calidad del agua con respecto al fitoplancton, nutrientes y oxígeno disuelto. Cuatro sistemas que interactúan fueron simulados principalmente, incluyendo la dinámica del fitoplancton, el ciclo del nitrógeno, el ciclo del fósforo y el equilibrio del oxígeno disuelto. Los efectos de los sedimentos del lecho y en suspensión también fueron considerados dentro de los procesos relacionados con la calidad del agua.

Las concentraciones dadas por la simulación del fitoplancton (clorofila) y de los nutrientes fueron, en general, correspondientes con las observaciones de campo. Los estudios de sensibilidad realizados posteriormente demostraron los impactos sobre la calidad del agua de las distintas cargas de nutrientes y sedimentos en suspensión y sus efectos sobre la concentración de clorofila.

Velásquez (2013). Modelación del transporte de sedimentos en el golfo de Urabá, Colombia.

En esta tesis se desarrolló un modelo de transporte de sedimentos para el golfo de Urabá. Los problemas de erosión y sedimentación que aquejan la zona fueron el punto de partida para construir una herramienta matemática que permitió ampliar el conocimiento de la dinámica de los sedimentos en el golfo.

Se utilizó la plataforma Delft3D que acopla la hidrodinámica, el oleaje y el transporte de sedimentos. El modelo considera la descarga de afluentes y disponibilidad en el lecho de dos tipos de sedimentos: cohesivos y no-cohesivos. Se incluyen, además, forzamientos atmosféricos, de marea, oleaje, descarga de ríos y gradientes de densidad. Los resultados del modelo fueron evaluados para tres temporadas climáticas a partir de mediciones realizadas en campo que variaron en su cobertura espacial. Para este proceso se utilizaron parámetros estadísticos que indicaron que la herramienta logra una representación entre buena y razonable de las concentraciones de sedimentos en suspensión en el golfo.

Se determinaron patrones de concentración de sedimentos para las épocas húmeda y seca y se identificó que la respuesta de las concentraciones de sedimentos está altamente ligada a la fuerza y dirección del viento y el oleaje. Finalmente, el modelo logró reproducir para una escala temporal de días, las tendencias de erosión en la costa este del golfo y cerca al municipio de Acandí, mientras la acumulación de sedimentos tuvo lugar en Bahía Colombia, resultados que coinciden con los reportes previos de variación en la línea de costa del golfo.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Los sedimentos en suspensión presentes en ríos, estuarios, bahías, etc., contienen partículas de suelo de diferentes tamaños (arcillas, limos, arenas), al igual que material orgánico (fibras de plantas, células de algas, bacterias, protozoarios y sólidos biológicos). Los sólidos en suspensión con contenido de arcillas superiores al 10% presentan propiedades cohesivas debido a que las fuerzas electrostáticas son comparables o superiores a las fuerzas gravitacionales que actúan sobre las partículas (van Rijn, 1993). Para fines de simplificación conceptual, cuando en el presente estudio se hable de sólidos en suspensión o sedimentos en suspensión, se estará haciendo referencia al mismo grupo de partículas caracterizado en este capítulo, siendo de especial interés la presencia de materia orgánica en la masa del sólido debido a su relación con escenarios de riesgo sanitario y el incremento de la turbiedad de las aguas.

4.2. CONTAMINACIÓN POR AGUA RESIDUAL

El agua residual puede poseer materiales derivados de residuos domésticos o de procesos industriales, los cuales por razones de salud pública y por consideraciones económicas y

estéticas no pueden desecharse vertiéndolos sin tratamiento en lagos o corrientes convencionales.

Se clasifica según su procedencia en: Agua Residual Doméstica (ARD), proveniente de las viviendas o residencias, Agua Residual Municipal (ARM) o el residuo líquido transportado por el alcantarillado de una población y tratado en una planta de tratamiento municipal (incluye el Agua Residual Doméstica, Comercial y proveniente de algunas instituciones) y el Agua Residual Industrial (ARI) que se origina a partir de las descargas de industrias que brindan algún tipo de bien o servicio al ser humano (manufactura, ganadería, minería, etc.)

En general, el agua residual se caracteriza por presentar color, turbidez, concentración baja en oxígeno disuelto y sólidos en suspensión, que pueden ser orgánicos e inorgánicos (Dávila, 2009).

4.3. MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos matemáticos hidrodinámicos en el área de la Ingeniería Sanitaria y Ambiental son utilizados para cuantificar los impactos ambientales producto de proyectos, o para evaluar la pertinencia de una obra en particular, lo que, en síntesis, los convierte en una herramienta fundamental en la toma de decisiones.

La gran mayoría de modelos numéricos de fluidos derivan sus ecuaciones del principio de continuidad, de las ecuaciones de Navier-Stokes (2da ley de Newton) y de las ecuaciones de la Termodinámica. En buena medida, 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), por lo que se puede decir que estos son similares entre sí; sin embargo, esto no es del todo cierto pues existen diferencias entre ellos dependiendo de la suposición realizada para completar y simplificar las ecuaciones. Quizás la más importante, en términos prácticos, es la ecuación de cierre de la turbulencia asumida; otras diferencias significativas se pueden encontrar en los supuestos para simplificar las ecuaciones, como, por ejemplo, el supuesto de presión hidrostática, de la densidad, etc. Otra gran diferencia entre ellos se produce por el método numérico discreto empleado para solucionar las ecuaciones diferenciales en el dominio (Instituto Nacional de Hidráulica, 2010).

Debido a la pertinencia de estos modelos como herramientas de investigación aplicada, en la actualidad existe gran variedad de paquetes de software (comerciales y de uso libre) en el mercado. La selección del modelo MOHID se basó en una serie de ventajas y atributos que presenta este modelo frente a los otros disponibles en el mercado, tales como COHERENS, ROMS, ELCOM, CH3D, entre otros.

4.4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO – MOHID-

En esta investigación se utilizó el modelo hidrodinámico MOHID como herramienta de simulación de los procesos de transporte de los SST en la bahía de Buenaventura; este modelo

fue desarrollado por investigadores del MARETEC perteneciente al Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad Técnica de Lisboa, en Portugal.

4.4.1. Generalidades

MOHID es un modelo de distribución gratuita, compuesto por un módulo hidrodinámico de flujo a superficie libre (tridimensional o bidimensional) y más de cuarenta módulos, que se encargan del modelado de la dinámica de diversos cuerpos de agua, como ríos, estuarios y océanos, basado en las ecuaciones de Navier-Stokes y con las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática (Fernández *et al.*, 2011).

El sistema de modelado MOHID es una herramienta capaz de simular procesos físicos y biogeoquímicos, tanto en columnas de agua como en sedimentos; esto gracias a la adopción de la filosofía de modelos integrados. Además, debido al paradigma de programación orientado a objetos, MOHID permite simular diferentes escalas (mismas que consienten en el uso de modelos anidados) y sistemas (como estuarios y cuencas hidrográficas).

Inicialmente, MOHID fue escrito en lenguaje FORTRAN 77 y utilizado para estudiar los estuarios y zonas costeras, principalmente en Portugal; en sus últimas versiones está implementado en FORTRAN 95 y .NET, lo que permite al modelo usar todas las características de la programación orientada a objetos como: polimorfismo, encapsulación, herencia y sobrecarga de funciones. El modelo está integrado por tres herramientas principales: MOHID Water, MOHID Soil y MOHID Land, y por más de 60 módulos que implican aproximadamente 300.000 líneas de código. Por lo que desde el punto de vista informático se puede catalogar como un sistema de tamaño considerablemente grande. Estos módulos están estructurados según una jerarquía, la cual se presenta en la Figura 2.

MOHID cuenta con una interfaz gráfica (MOHID GUI), bastante útil para calibrar el modelo y poder utilizar los módulos ejecutables del mismo; pero sólo es posible usarla en el sistema operativo Windows, ya que está implementada sobre la plataforma Microsoft .NET. Sin embargo, la GUI es una herramienta de uso opcional ya que, en caso de no contar con ella, es posible invocar las instrucciones del modelo desde la línea de comandos (Sosa, 2010).

El programa numérico de MOHID utilizado para el presente estudio es MOHID Water, el cual se presenta en tres dimensiones y simula diversos procesos que ocurren en cuerpos de agua. Se compone de una serie de módulos que están contruidos sobre las bibliotecas MOHID Base 1 y MOHID Base 2, las cuales se encargan de calcular los procesos físicos y biogeoquímicos y el manejo de la lectura y escritura de los datos requeridos por el modelo. Este programa numérico fue diseñado para simular sistemas acuáticos considerando además los procesos de intercambio con otros medios, como son la interacción con la atmósfera y con el fondo (Barreto, Ezzatti & Fossati, 2009).

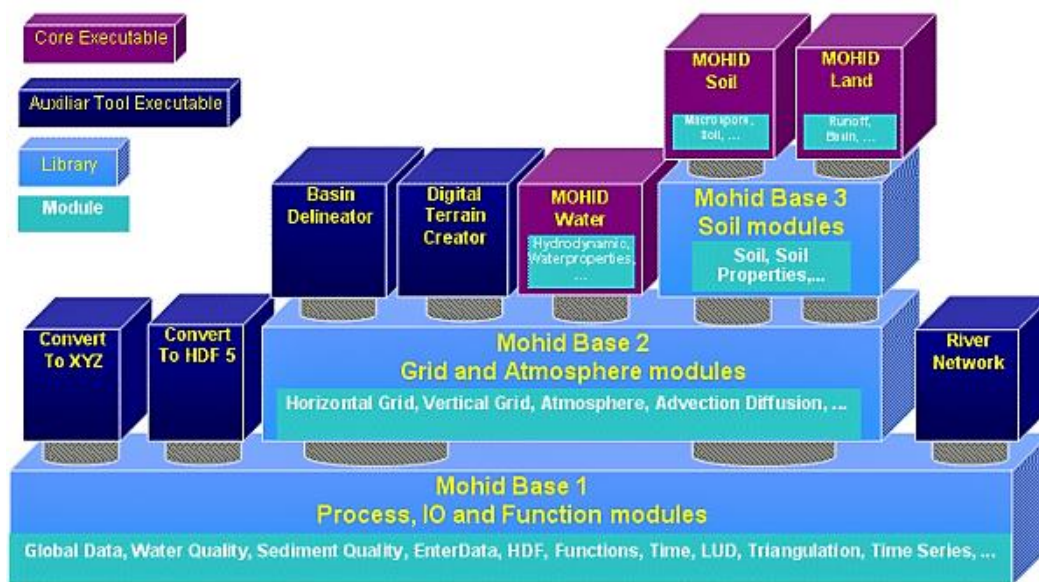


Figura 2. Arquitectura del framework de MOHID

Fuente: Barreto *et al.* (2009)

4.4.2. Módulos

A continuación se describen brevemente algunos módulos del sistema de modelación, los cuales fueron definidos en el “Estudio Inicial del Modelo MOHID” por Barreto *et al.* (2009) y son presentados en este proyecto por considerarse de gran relevancia en la investigación realizada. La Figura 3 muestra la interacción entre los distintos módulos del sistema, mostrando las relaciones y las interfaces con los diferentes medios.

- **Módulo Batimétrico**

Su función es leer los datos batimétricos desde un archivo de entrada de tipo ASCII y publicarlos a todos los módulos cliente que así lo requieran. Los datos batimétricos se almacenan en una malla regular, de tamaño X por Y; por cada punto especificado en la malla se debe indicar la profundidad. Las coordenadas horizontales se pueden dar de diversos tipos, siendo las más comunes las métricas y las geográficas.

- **Módulo Atmosférico**

El módulo Atmosférico plantea las condiciones de frontera en la superficie de la columna de agua y representa la influencia de forzantes externos atmosféricos como el viento y el sol en la superficie del agua. Hay dos tipos de condiciones: una dada por el usuario, usualmente datos meteorológicos (velocidad del viento, temperatura del aire, etc.) y otra como condiciones de borde calculadas automáticamente por el modelo a partir de las condiciones o datos meteorológicos.

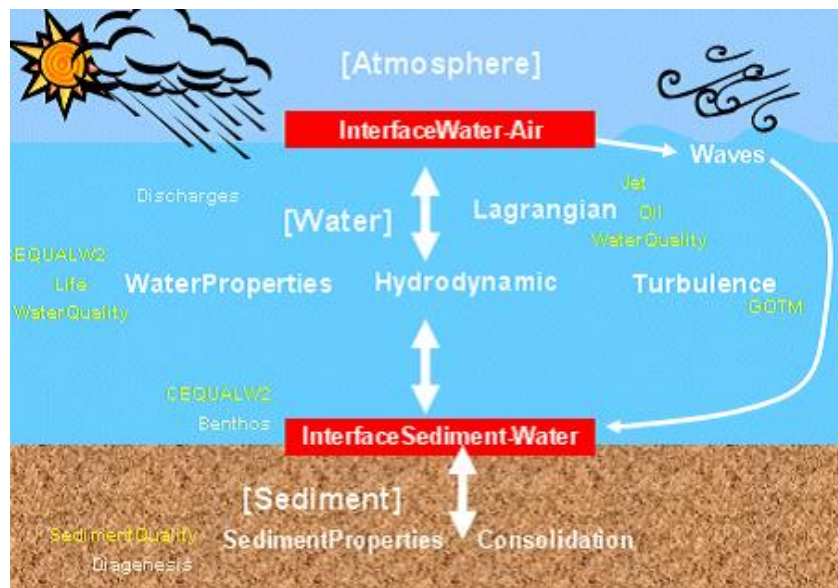


Figura 3. Esquema de MOHID Water: principales módulos involucrados

Fuente: Barreto *et al.* (2009)

- **Módulo Hidrodinámico**

El módulo Hidrodinámico calcula el nivel, la velocidad y el flujo de agua en cada paso de tiempo. La discretización espacial es realizada por una aproximación de volúmenes finitos para discretizar las ecuaciones que gobiernan el flujo, basándose en la forma integral de las leyes de conservación; a partir del volumen que ocupa el fluido (finito), se obtienen las relaciones para una partícula del fluido, reduciendo el volumen de integración hasta alcanzar el volumen correspondiente a una partícula (infinitesimal). Para ello se integra la ecuación diferencial original sobre un volumen finito, cuya forma concreta depende de la malla y del sistema de coordenadas que se esté empleando (Barreto *et al.*, 2009). Por su parte, la discretización temporal se realiza con un algoritmo semi-implícito ADI (Alternating Direction Implicit). Este algoritmo computa alternativamente una componente de la velocidad horizontal implícitamente mientras la otra es calculada explícitamente. El sistema de ecuaciones resultantes es tridiagonal y por lo tanto puede ser resuelto de manera eficiente por el algoritmo de Thomas.

Las ecuaciones primitivas que gobiernan el modelo tridimensional están dadas para un fluido incompresible. Se asume como válido el equilibrio hidrostático y se utilizan las aproximaciones de Boussinesq y de Reynolds para la resolución de las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes, provenientes, a su vez, de la aplicación de la segunda ley de Newton a un volumen de control de dimensiones “dx”, “dy” y “dz”. Lo anterior se presenta gráficamente en la Figura 4.

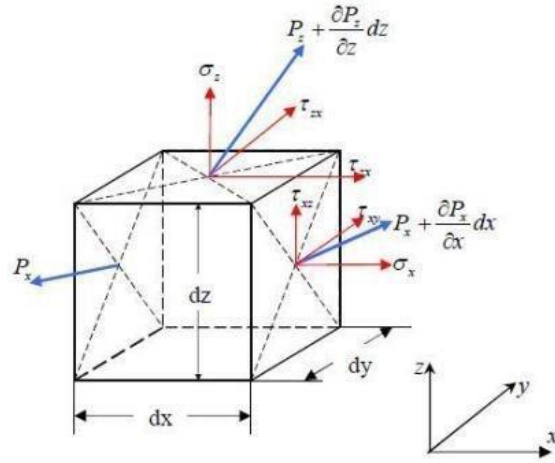


Figura 4. Aplicación de la Segunda Ley de Newton sobre un volumen de control deformable

Las ecuaciones del balance de momento procedente de las aproximaciones antes mencionadas-para las velocidades promedio del flujo horizontal, en su forma cartesiana se presentan en las Ecuaciones 1 a la 3; las cuales expresan que la evolución temporal de las velocidades es igual al transporte advectivo, la fuerza de Coriolis, el gradiente de presiones y la difusión turbulenta. A partir de dichas ecuaciones se determina el campo horizontal de velocidades.

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(uu) - \frac{\partial}{\partial y}(uv) - \frac{\partial}{\partial z}(uw) + fu - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((v_H + v) \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_H + v) \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_t + v) \frac{\partial u}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Ec. 1

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(vu) - \frac{\partial}{\partial y}(vv) - \frac{\partial}{\partial z}(vw) + fv - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((v_H + v) \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_H + v) \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_H + v) \frac{\partial v}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Ec. 2

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} = & -\frac{\partial}{\partial x}(wu) - \frac{\partial}{\partial y}(wv) - \frac{\partial}{\partial z}(ww) + fw - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left((v_H + v) \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left((v_H + v) \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left((v_H + v) \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{aligned}$$

Ec. 3

Donde “u”, “v” y “w” son las componentes del vector velocidad en las direcciones “x”, “y” y “z”, respectivamente, “f” es el parámetro de Coriolis, “v_H” y “v_t” son las velocidades

turbulentas en las direcciones vertical y horizontal, “ ν ” es la viscosidad cinemática, y “ p ” es la presión; $\partial u / \partial t$, $\partial v / \partial t$ y $\partial w / \partial t$ representan la variación temporal de la velocidad (en cada dirección) y están dadas por la suma de las siguientes componentes: i) el balance de los transportes advectivos (primeros tres términos en el lado derecho de cada ecuación), ii) la fuerza de Coriolis, iii) el gradiente de presión (siguientes tres términos) y iv) la difusión turbulenta (últimos tres términos). La velocidad vertical se calcula a partir de la integración en la dirección vertical de la ecuación de continuidad para fluido incomprensible (Ecuación 4), entre el fondo y la profundidad “ z ” donde se calcula “ w ” (Ecuación 5):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \text{Ec. 4}$$

$$w(z) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^z u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^z v dz \right) \quad \text{Ec. 5}$$

La ecuación para la superficie libre (Ecuación 6) se obtiene por integración de la ecuación de continuidad sobre toda la columna de agua, es decir, entre la elevación de la superficie libre $\eta(x, y)$ y el fondo $-h$, e imponiendo las condiciones de borde cinemáticas en el fondo y en la superficie:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^{\eta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-h}^{\eta} v dz \right) \quad \text{Ec. 6}$$

El modelo utiliza la aproximación hidrostática ya que las escalas horizontales en los cuerpos de agua estuarinos u oceánicos son mucho mayores que las verticales. Se supone entonces que las aceleraciones verticales son pequeñas respecto a los otros términos que intervienen en la ecuación de cantidad de movimiento en la dirección vertical, y la misma se reduce al balance hidrostático que se presenta en la Ecuación 7, donde g es la gravedad y ρ la densidad.

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0 \quad \text{Ec. 7}$$

Aplicando la ecuación de descomposición de Boussinesq en donde la densidad ρ se divide en una densidad constante de referencia ρ_0 y una fluctuación de ese valor ρ' , e integrando en la dirección vertical entre la superficie libre η y la profundidad z donde se calcula la presión, se obtiene la Ecuación 8. Esta ecuación relaciona la presión en cualquier profundidad con la presión atmosférica en la superficie libre, el nivel de agua y la presión integrada entre ese nivel y la superficie.

$$p(z) = p_{atm} + g\rho_0(\eta - z) + g \int_z^\eta \rho' dz$$

Ec. 8

Utilizando la anterior expresión es posible determinar el gradiente de presiones horizontales en la dirección “ x_j ”, la cual se presenta en la Ecuación 9:

$$\frac{\partial p}{\partial x_j} = \frac{\partial p_{atm}}{\partial x_j} - g\rho_0 \frac{\partial \eta}{\partial x_j} - g \int_z^\eta \frac{\partial \rho'}{\partial x} dz$$

Ec. 9

De esta última ecuación se tiene que el gradiente total de presiones es la suma de los gradientes atmosférico, de elevación de la superficie (gradiente de presión barotrópico) y el gradiente de distribución de la densidad (gradiente de presión baroclínico). Por último, para su operación, el modelo MOHID obtiene la densidad de parámetros como la salinidad y la temperatura y, además, sustituye la descomposición del gradiente de presión (Ecuación 9) en las ecuaciones de la evolución temporal de la velocidad.

Debido a que las ecuaciones antes descritas son diferenciales no lineales, y no tienen soluciones analíticas, es necesario recurrir a métodos numéricos que permiten realizar aproximaciones a sus soluciones.

- Módulo Geométrico

El módulo Geométrico almacena y actualiza la información sobre los volúmenes finitos, calculando las áreas laterales y los volúmenes de la discretización según la demanda. Para realizar estos cálculos se basa en la elevación de la superficie libre calculada por el módulo hidrodinámico y en los datos batimétricos del dominio ingresados.

El enfoque de volúmenes finitos usado en MOHID, permite que la resolución de las ecuaciones de conservación sea independiente de la geometría de cada celda o volumen de control, debido a que solo se requiere el flujo a través de las caras de la celda. De esta manera se logra una separación total entre las variables físicas y la geometría. El módulo Geométrico proporciona datos a los módulos Lagrangiano, Turbulencia y Propiedades del Agua.

- Módulo Lagrangiano

Es un modelo de transporte Lagrangiano que utiliza el concepto de trazador, caracterizado por su posición (x, y, z), así como por características específicas definidas por el modelador, que representan propiedades de partículas tales como sedimentos, bacterias, mamíferos, sustancias químicas, entre otros. La velocidad media es el principal responsable del movimiento de las partículas, cuyas coordenadas espaciales están dadas por la Ecuación 10, donde u representa la velocidad media, x la posición de la partícula, i es un instante dado de t (Sosa, 2010):

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i(x_i, t)$$

Ec. 10

Donde " u " representa la velocidad media y " x " la posición de la partícula. La velocidad en cualquier punto del espacio se calcula usando la interpolación lineal entre dos puntos de propiedades conocidas en el módulo hidrodinámico. El transporte turbulento es el responsable de la dispersión.

El modelo MOHID aproxima la solución a la anterior ecuación mediante el método explícito:

$$x_j^{t+\Delta t} = x_j^t + \Delta t * u_j^t$$

Ec. 11

- **Módulo Propiedades del Agua**

El módulo Propiedades del Agua coordina y maneja la evolución de las propiedades del agua utilizando un modelo Euleriano de transporte. A través de este módulo, MOHID es capaz de simular diferentes propiedades como la temperatura, salinidad, sedimentos cohesivos, fitoplancton, nutrientes, contaminantes, etc.

- **Módulo de Movimiento Vertical Libre**

Este módulo calcula las propiedades del flujo vertical. Básicamente se usa para determinar el movimiento vertical del flujo (en la dirección vertical). Usualmente se utiliza este módulo para calcular la velocidad de caída al simular sedimentos cohesivos, o la velocidad de distintas partículas en las simulaciones de transporte.

Básicamente en este módulo, se pueden seguir dos enfoques diferentes para calcular la velocidad de sedimentación: una velocidad de sedimentación constante y una velocidad de sedimentación que depende de la concentración de sedimento cohesivo. La segunda formulación utilizada en MOHID se refiere solo a la floculación y a los rangos de concentración de sedimentación obstaculizados. La correlación general para la velocidad de sedimentación en el rango de floculación se presenta en la Ecuación 12.

$$W_s = K_1 * C^m \quad \text{para } C < C_{HS} \quad \text{Ec. 12}$$

Y en el rango de asentamiento obstaculizado se presenta la Ecuación 13:

$$W_s = K_1 * C_{HS}^m [1.0 - K_2(C - C_{HS})]^{m_1} \quad \text{para } C > C_{HS} \quad \text{Ec. 13}$$

Dónde W_s en m/s es la velocidad de sedimentación. C (kg/m^3) es la concentración de sedimento cohesivo y el subíndice HS se refiere al inicio de la sedimentación impedida (de

aproximadamente 2 a 5 kg/m³. Los coeficientes $K_1 \left(\frac{m^4}{kg \cdot s}\right)$ y $K_2 \left(\frac{m^3}{kg}\right)$ dependen de la mineralogía del lodo y los exponentes m y m_1 dependen del tamaño y la forma de la partícula.

- **Módulo de la Interfaz Sedimento-Agua**

El módulo de interfaz sedimento-agua calcula las condiciones de contorno en la parte inferior de la columna de agua y el esfuerzo cortante como una condición límite para los módulos hidrodinámicos y de turbulencia. También es responsable de calcular los flujos en la interfaz sedimento-agua, gestionando las condiciones de contorno tanto para las propiedades de la columna de agua como para las propiedades de la columna de sedimentos. Tanto en la columna de agua como en la columna de sedimentos, las propiedades pueden ser disueltas o particuladas. La evolución de las propiedades particuladas depende de los flujos de agua y de la velocidad de sedimentación. Una vez depositados en el fondo, pueden permanecer allí o volver a suspenderse en la columna de agua.

La sedimentación o asentamiento de las partículas y flóculos puede ocurrir solo cuando la velocidad media del flujo es suficientemente baja para permitir que las partículas caigan al fondo y con el tiempo se adhieran a él, sin que puedan ponerse en suspensión inmediatamente. La tasa de sedimentación, S , puede ser expresada como la Ecuación 14.

$$S = \frac{W_c}{h} \left[\frac{\tau_b}{\tau_{cd}} - 1 \right]; \text{ siempre que } \tau_b \leq \tau_{cd} \quad \text{Ec. 14}$$

Donde

W_c = Velocidad media de caída o asentamiento de las partículas en suspensión.

h = Profundidad media a través de la cual las partículas se asientan.

τ_{cd} = Esfuerzo cortante crítico para sedimentación.

τ_b = Esfuerzo cortante de fondo.

Cada esfuerzo cortante está asociado con unas condiciones de flujo características. Así, para cada esfuerzo cortante se tiene o se puede estimar su velocidad (del flujo) correspondiente. El esfuerzo cortante de fondo está dado por la ecuación:

$$\tau_b = \rho g R i \quad \text{Ec. 15}$$

De la ecuación de Manning se tiene que $hi \frac{V^2}{K^2 h^{1/3}}$, y debido a que en canales anchos el radio hidráulico es $R \cong h$. Sustituyendo se obtiene:

$$\tau_b = \rho g \frac{V^2}{K^2 h^{1/3}} \quad \text{Ec. 16}$$

Donde

K = inverso del coeficiente de rugosidad de Manning ($K = 1/n$)

n = coeficiente de rugosidad de Manning.
 ρ = densidad del agua.

De acuerdo con Mehta y Partheniades (1975) (van Rijn, 1993), el esfuerzo cortante crítico de sedimentación puede ser de dos formas: a) esfuerzo cortante crítico de sedimentación total ($\tau_{cd \text{ total}}$), debajo del cual se presenta sedimentación de todas las partículas y flóculos en suspensión (gruesos y finos). b) Esfuerzo cortante crítico de sedimentación parcial ($\tau_{cd \text{ parcial}}$), por encima del cual no habrá más sedimentación de ningún tamaño de partículas o flóculos. El rango de esfuerzos cortantes comprendido entre estos dos valores límites produce solamente sedimentación de las partículas más gruesas.

Cuando el material en suspensión presenta una buena gradación, con partículas que varían desde arcillas finas hasta limos gruesas y arenas finas, el esfuerzo cortante crítico de sedimentación puede presentar un rango amplio de valores. Para el esfuerzo cortante crítico de sedimentación la ecuación que corresponde es la Ecuación 17.

$$\tau_{cd} = \rho g \frac{V_{cd}^2}{K^2 h^{1/3}} \quad \text{Ec. 17}$$

De la anterior expresión se puede despejar la velocidad crítica de sedimentación (V_{cd}):

$$V_{cd} = \left(\frac{\tau_{cd} K^2 h^{1/3}}{\rho g} \right)^{1/2} \quad \text{Ec. 18.}$$

Sustituyendo la última ecuación en la expresión de la tasa de sedimentación se tiene:

$$S = \frac{W_c}{h} \left[1 - \left(\frac{V}{V_{cd}} \right)^2 \right] \quad V \leq V_{cd} \quad \text{Ec. 19.}$$

El esfuerzo crítico de erosión se obtiene mediante la Ecuación 20:

$$\tau_{ce} = \rho g \frac{V_{ce}^2}{K^2 h^{1/3}} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde las velocidades V y V_{ce} son la velocidad media del flujo en profundidad y la velocidad mínima del flujo para que se inicie erosión del material del lecho (lodos), respectivamente.

- **Módulo Turbulencia**

El módulo de Turbulencia calcula los coeficientes de viscosidad horizontal y vertical y las difusividades para diferentes métodos de cierre de turbulencia. Estas propiedades pueden ser calculadas de una manera simplificada utilizando coeficientes de difusión constantes.

4.5. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Es el proceso de ajuste de los elementos geométricos simplificados (batimetría, contornos de estructuras, etc.) y de los valores de los parámetros empíricos (hidráulicos, de sedimentos, de

transporte, de calidad de agua, etc.) que aparecen en las diferentes ecuaciones (hidrodinámicas, de los sedimentos, etc.), de tal manera que los eventos simulados en el modelo reproduzcan de la manera más precisa los eventos de la naturaleza; es una de las fases con mayor relevancia en el proceso de implementación del modelo hidrodinámico y sedimentológico. El objetivo de la calibración es representar los fenómenos hidrosedimentológicos (niveles, velocidades, caudales, sedimentación, erosión) en el sistema para una condición real, disponiendo de datos e información de campo a través del ajuste o modificación de los parámetros físicos dentro de los rangos físicamente válidos como: rugosidad, viscosidad de remolino o turbulenta, coeficiente de erodabilidad etc. El ajuste o modificación de un parámetro debe hacerse con base en la física de los datos y en el conocimiento de los procesos en el sistema o área de estudio.

4.6. VALIDACIÓN DEL MODELO

Con este proceso se verifica que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico, para periodos determinados y condiciones diferentes a las existentes en el período de calibración. De esta manera se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o limitantes aceptables. Usualmente, la validez de un modelo para un período diferente al de la calibración se asume como verdadera considerando condiciones futuras similares a las actuales (Refsgaard & Knudsen, 1996).

5. METODOLOGÍA

Para lograr los objetivos propuestos en el presente estudio, se estableció la siguiente metodología:

5.1. FASE 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Inicialmente se llevó a cabo una revisión bibliográfica rigurosa para obtener información sobre los antecedentes y el estado del arte de la investigación a realizar, lo cual brindó herramientas conceptuales y técnicas para la ejecución de cada uno de los objetivos del estudio. La revisión incluyó artículos científicos, tesis universitarias y proyectos de investigación en áreas afines, entre otros.

En cuanto a la recopilación de información, esta fue suministrada por diversas instituciones y utilizada especialmente para los procesos de modelación y análisis de resultados. Las instituciones a las cuales fue necesario recurrir en el proceso de recolección de información, fueron: la Dirección General Marítima (cartas náuticas 153, 730 y 306 del año 2014); El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (pronóstico de pleamares y bajamares en la Costa Pacífica Colombiana); Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) e IDEAM, (registros históricos de las variables hidrometeorológicas, la temperatura superficial del mar, la salinidad, las concentraciones históricas de SST en la bahía de Buenaventura y los caudales de sus principales afluentes);

Vallecaucana de Aguas S.A. E.S.P., (caracterización de vertimientos de agua residual doméstica de Buenaventura); El Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico (registro de niveles de marea, velocidades, concentraciones de sedimentos en suspensión); Grupo de Investigación en Hidráulica Fluvial y Marítima (HIDROMAR), Universidad del Valle (información de concentraciones de sólidos suspendidos totales obtenida de los resultados de la campaña de campo realizada en el mes de octubre del año 2017, en el marco del Proyecto de Investigación por Convocatoria Interna N°104 C.I. 2959 “Estudio de los Procesos de Transporte (Advección y Dispersión) de los Sólidos Suspendidos Totales en la Bahía Interna de Buenaventura”.

Esta información fue consolidada, depurada y digitalizada, en aras de brindar las condiciones iniciales requeridas por el modelo, tales como descargas de los ríos, temperatura superficial del mar, salinidad y concentraciones de sólidos en suspensión, entre otras.

5.2. FASE 2: CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y GEOMORFOLÓGICA

Para la realización de esta segunda fase se tuvo como base la revisión bibliográfica y la información secundaria recolectada durante la fase 1, a partir de la cual se identificaron las principales características hidrodinámicas y geomorfológicas de la bahía de Buenaventura, incluyendo algunas generalidades del municipio y una contextualización del estado actual de Buenaventura en cuanto a las condiciones de saneamiento y manejo de vertimientos de agua residual doméstica. En esta fase también se describieron aspectos hidrometeorológicos como la temperatura del aire y su humedad relativa, la nubosidad y el brillo solar, la precipitación, la dirección y la velocidad del viento; de igual manera, los aspectos más importantes relacionados con las dinámicas fluviales y marinas, como los caudales de los afluentes, las corrientes, el oleaje y las mareas fueron descritos. Adicionalmente se caracterizó en esta segunda fase, algunos aspectos relacionados con el estado de calidad actual de las aguas de la Bahía, haciendo especial énfasis en las concentraciones de sólidos suspendidos totales presentes.

5.3. FASE 3: IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO HIDROSEDIMENTOLÓGICO

5.3.1. Sub-fase 1: selección del modelo

La selección del modelo matemático se realizó teniendo en cuenta la disponibilidad de herramientas numéricas desarrolladas con un enfoque integrado, incluyendo la modelación hidrodinámica, la modelación de calidad del agua, el transporte de sedimentos, la modelación de la componente biológica, etc. Dentro de este tipo de herramientas se ubica el modelo matemático MOHID, el cual se viene aplicando con éxito en novedosos estudios de estuarios, bahías y zonas costeras en diferentes regiones alrededor del mundo; además, su utilización para fines académicos es libre.

5.3.2. Sub-fase 2: esquematización de la bahía de Buenaventura y construcción de la malla computacional

El primer paso dentro del proceso de implementación del modelo consistió en generar la batimetría de la zona de estudio y construir la malla de cálculo. Para ello se georreferenció el área de estudio mediante coordenadas geográficas WGS 84 con el fin de precisar la línea de costa extraída a través del software Coastline Extractor; esto permitió definir las fronteras abiertas y cerradas del dominio y la posterior incorporación de la información batimétrica de las cartas náuticas en formato .xyz y referenciada con respecto al nivel de sicigia. Posteriormente se procedió a construir la malla computacional. El tamaño de las celdas de la malla está relacionado con el grado de detalle requerido en los resultados de los procesos hidrodinámicos en la Bahía (niveles de marea, velocidades y patrón de circulación de las corrientes), el grado de irregularidad de los contornos batimétricos y topográficos, el tiempo y esfuerzo computacional y la representación de ríos y esteros que descargan a la Bahía.

Se interpolaron los datos niveles batimétricos sobre la malla de cálculo, generando una distribución de profundidades (batimetría) en formato .dat, delimitadas por celdas asignadas como tierra y las celdas de frontera abierta. La frontera abierta de mar corresponde a aquellas celdas donde actúa el forzamiento de la marea.

Condiciones de frontera e iniciales

Para reproducir mediante un modelo numérico los fenómenos hidrodinámicos y de transporte que suceden en un cuerpo de agua, se requiere suministrarle las condiciones de borde o frontera en las fronteras abiertas del modelo. En este estudio se tienen las siguientes fronteras abiertas: (i) frontera de mar, en la cual se deben definir como condición la variación temporal de los niveles de marea; y (ii) fronteras internas fluviales como los ríos y esteros tributarios, en los cuales se introducen las hidrógrafas de caudales.

Los valores de rugosidad del fondo y los valores iniciales de temperatura y salinidad se establecieron a partir de la información obtenida en la caracterización de la bahía de Buenaventura. El modelo MOHID permite crear cajas (o áreas) con información específica en una zona en particular del cuerpo de agua objeto de esta investigación; esto permite representar de una manera más precisa las condiciones características de las zonas de estudio, como pueden ser los diferentes valores de rugosidad, temperatura y salinidad, dependiendo de la localización.

5.3.3. Sub-fase 3: análisis de sensibilidad

Este análisis tuvo por objeto determinar la influencia de determinados parámetros físicos o numéricos (rugosidad, viscosidad turbulenta, tasas de erosión, masa mínima de sedimentos, etc.) en los resultados del modelo (niveles de marea, velocidades de la corriente, patrones de flujo mareales y concentraciones de sedimentos en suspensión).

5.3.4. Sub-fase 4: calibración del modelo

En esta etapa se buscó que las situaciones específicas simuladas en el modelo se asemejaran a las medidas en la naturaleza; los elementos geométricos, tales como batimetría y contornos de estructuras, entre otros, y los valores de los coeficientes empíricos utilizados en las ecuaciones, ya sean de descripción y predicción de marea, hidráulicos, de transporte, de sedimentos, etc., se ajustaron dentro de rangos físicamente válidos, procurando que los valores calculados de los diferentes parámetros y variables hidrodinámicas y de transporte estuviesen próximas a los valores de los mismos parámetros y variables medidas en campo por la Universidad del Valle y el Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico.

5.3.5. Sub-fase 5: validación del modelo

En esta fase fue necesario confrontar los resultados obtenidos en la simulación con las situaciones reales (información de campo) con el objetivo de verificar que el modelo presenta una correcta representación física, hidrodinámica y sedimentológica de la bahía de Buenaventura para diferentes condiciones de simulación.

5.3.6. Sub-fase 6: implementación del módulo de trazadores lagrangianos

Para observar el desplazamiento neto de las partículas de sólidos suspendidos durante el ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas – mareas muertas se empleó el módulo Lagrangiano del modelo MOHID, el cual se basa en el concepto de trazadores lagrangianos. Se generó un posible vertimiento del emisario submarino que se proyecta construir en Buenaventura y mediante la simulación, se determinaron las trayectorias y tendencias en el desplazamiento de los sólidos en suspensión.

5.4. FASE 4: MODELACIÓN MATEMÁTICA DE DIFERENTES ESCENARIOS DE CALIDAD DE AGUA

Se plantearon y simularon diferentes escenarios en los cuales se consideraron variaciones en las condiciones mareales y las cargas contaminantes provenientes de los vertimientos en la Bahía. Para establecer los aportes por vertimientos, teniendo en cuenta las proyecciones a diferentes años y el grado de tratabilidad, se consideraron los resultados obtenidos en los estudios realizados por Vallecana de Aguas - Unión Temporal (UT) Aquapozos para la Formulación del Plan Maestro del Sistema de Alcantarillado del Distrito de Buenaventura y el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV). Siguiendo dichas actuaciones se plantearon cuatro escenarios (un escenario actual correspondiente al año 2016 y tres escenarios futuros en el año 2047). Finalmente se realizó el análisis de los resultados de la modelación hidrosedimentológica, identificando las zonas críticas y con mayores afectaciones debido a los fenómenos de transporte de los sólidos en suspensión en la bahía de Buenaventura. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis respecto a posibles escenarios de riesgo debido a la contaminación por los SST en algunos sectores de interés y conforme a ello las restricciones que podrían generarse en los usos del agua de la Bahía.

6. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y GEOMORFOLÓGICA DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA

6.1. ASPECTOS GENERALES DEL MUNICIPIO DE BUENAVENTURA

El municipio de Buenaventura cuenta con un área de 6297 km², cifra que equivale al 29.7% del territorio del departamento del Valle del Cauca (Alcaldía de Buenaventura, 2001). Limita al norte con el departamento del Chocó, al sur con el departamento del Cauca, al oriente con los Municipios de Calima-Darién, Dagua, Jamundí y las cumbres de la Cordillera Occidental en el sector de los Farallones de Cali y al occidente con el Océano Pacífico.

La ciudad está dividida en dos grandes núcleos urbanos. El primero es la isla Cascajal, que se encuentra en el oeste del municipio y es el principal motor económico de Buenaventura, donde se concentran las mayores actividades económicas y de servicios. El segundo gran núcleo urbano es la zona continental, que es principalmente residencial. Su configuración se ha dado en forma longitudinal al lado y lado de su vía principal, la Avenida Simón Bolívar, con una extensión aproximada de 13 kilómetros y que comunica a la ciudad con el interior del país (Ejecutivo POT, 2013, citado por Vallecaucana de Aguas- Unión Temporal Aquapozos, 2017).

El Distrito de Buenaventura posee un alto grado de complejidad urbanística; está dividido en 12 comunas, 158 barrios y 19 corregimientos. La población del Distrito para el año 2017 era de aproximadamente 348951 habitantes, de los cuales 89% habitaban en la zona urbana y el 11% restante en la zona rural (Vallecaucana de Aguas- Unión Temporal Aquapozos, 2017).

En el municipio de Buenaventura se encuentran altitudes desde 0 m.s.n.m. en el litoral hasta 4200 metros sobre el nivel del mar en la zona de los Farallones de Cali. Esto le permite tener diversidad de ecosistemas, que van desde la selva húmeda tropical hasta el bosque de niebla, y abarcar todos los pisos térmicos, desde el litoral hasta los inicios de páramo en la cordillera occidental.

En la economía de Buenaventura se destaca el sector portuario (77.20%). Le sigue el sector pesquero, que aporta el 10.81% del PIB. Sumados el sector portuario, comercio y servicios se tiene que ellos representan casi el 90% del PIB (Vallecaucana de Aguas- Unión Temporal Aquapozos, 2017).

6.2. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO DE BUENAVENTURA

El distrito de Buenaventura se caracteriza por ser un compendio de zonas permeables y superficies impermeabilizadas, existiendo cambios de usos del suelo bruscos y en muy poco espacio. La caracterización de este municipio en cuanto a los aspectos relacionados con la constitución, distribución y funcionamiento del sistema de alcantarillado, no sólo brinda información compleja de difícil sistematización, sino que, además, da muestra del enorme trabajo que implica el ordenamiento del territorio alrededor y en función de los servicios

ecosistémicos brindados por la bahía de Buenaventura. De allí la necesidad de formular un Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV) para el distrito de Buenaventura que contribuya a la consecución de unos objetivos de calidad de agua en la Bahía, garantizando unas condiciones de salud ambiental adecuadas en el municipio.

Se presenta a continuación una recopilación de la información suministrada por la empresa de servicios públicos Vallecaucana de Aguas S.A., la cual está contenida en la Formulación del PSMV de Buenaventura para el año 2017. Esto representa un acercamiento al estado actual del municipio en materia de saneamiento ambiental, especialmente lo relacionado con el sistema de alcantarillado y los vertimientos de agua residual doméstica del casco urbano de Buenaventura.

6.2.1. Red de alcantarillado

La red de alcantarillado se encuentra dentro del perímetro urbano del municipio de Buenaventura, que tiene un área aproximada de 1373.5 ha. El sistema de alcantarillado sanitario está dividido en dos partes, una correspondiente a la zona continental, con un área aproximada de 1008.0 ha, y la otra, que se encuentra enmarcada en la zona de la isla Cascajal, con un área aproximada de 365.5 ha. Entre los dos sectores que conforman el municipio de Buenaventura, 1139.55 ha, de las 1373.55 ha que ocupan, están cubiertas con sistema de alcantarillado.

La cobertura de alcantarillado, en términos de usuarios, se estima en un 48% con aproximadamente 28600 suscriptores. La baja cobertura está asociada, según el documento de formulación de PSMV, a la existencia de múltiples sectores donde por condiciones topográficas, sociales o económicas, no se hace uso del sistema de alcantarillado, aunque este exista. En la Figura 5 se presenta la cobertura de la red de alcantarillado en la zona urbana de Buenaventura.

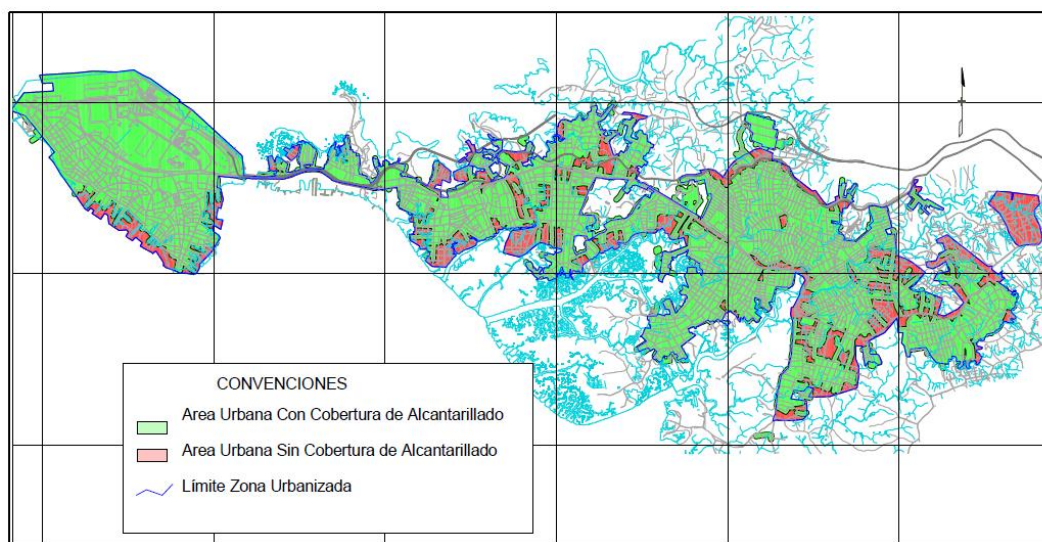


Figura 5. Cobertura de la red de alcantarillado en la zona urbana de Buenaventura

Descripción de la infraestructura existente

La red de alcantarillado de Buenaventura es completamente combinada. No existe ningún subsistema exclusivamente de agua residual ni de agua lluvia en los 385 sistemas independientes existentes. La red de saneamiento de Buenaventura consta de 695 vertidos al medio natural sin depuración previa, con un total de 385 sistemas de alcantarillado independientes. Esta red se compone en su totalidad de conducciones de tipo circular, con un diámetro medio situado en la franja 14"-15". En lo que se refiere al material, un 59% de los conductos son de concreto y un 39% son de PVC, siendo éstos los materiales predominantes.

Identificación y caracterización de vertimientos puntuales

Según el catastro realizado por UT Aquapozos dentro del Plan Maestro del sistema de alcantarillado de Buenaventura en el casco urbano, correspondiente a la zona continental y la isla, se identificaron 718 descargas. Actualmente no se dispone de ningún sistema de tratamiento en el sistema de alcantarillado de Buenaventura, realizándose todos los vertidos directamente al medio (bahía y esteros San Antonio y Aguacate, principalmente). En la Figura 6 se pueden observar las descargas identificadas en el Plan Maestro de Alcantarillado.

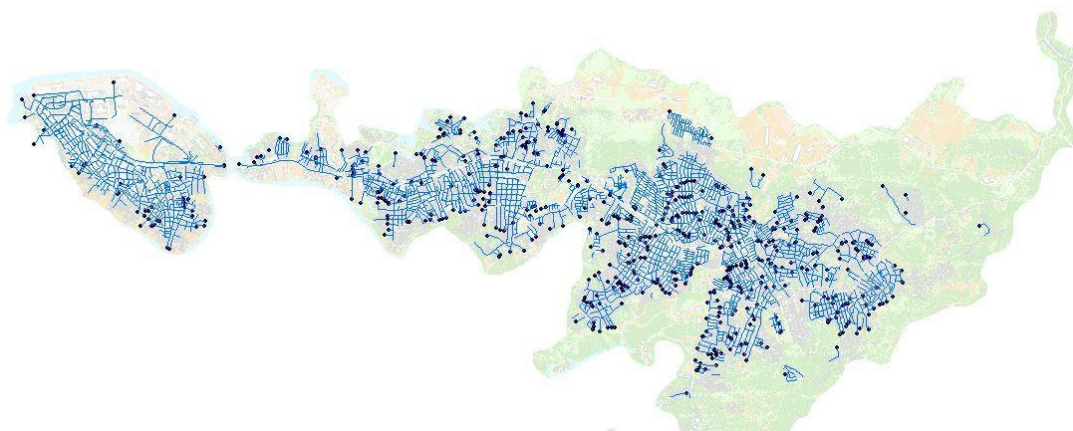


Figura 6. Ubicación de las descargas en la zona urbana de Buenaventura

Fuente: Unión Temporal Aquapozos – Vallecaucana de Aguas (2017)

Como parte de los trabajos del Plan Maestro, se realizó la caracterización de 100 vertimientos líquidos provenientes del sistema de alcantarillado sanitario del municipio de Buenaventura en el período comprendido entre el 25 de enero y el 15 de febrero del 2016. En la Tabla 1 se presentan los resultados de las variables Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Sólidos Suspendedos Totales (SST) y Coliformes Fecales, por ser estos de especial importancia dentro de la normativa ambiental vigente y en la formulación de proyectos de saneamiento e índices de calidad del agua.

Tabla 1. Caracterización del agua residual de Buenaventura (DBO, DQO, SST y Coliformes Fecales)

PARÁMETRO	UND	PROMEDIO	MÁXIMO	MÍNIMO
DBO	mg/L O ₂	150	581	2
DQO	mg/L O ₂	240	865	20
SST	mg/L	150	560	6
Coliformes Fecales	NMP/100 mL	8x108	2x1010	7x103

En la Figura 7 se presentan los puntos de muestreo donde se realizaron las caracterizaciones de los vertimientos de ARD.



Figura 7. Estaciones de muestreo de agua residual doméstica – Municipio de Buenaventura

Fuente: Adaptado de Unión Temporal Aquapozos – Analquim Limitada (2016)

6.3. DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA

La bahía de Buenaventura es considerada un estuario bien mezclado debido a la mezcla de aguas marinas y aguas continentales que ingresan a la Bahía por los ríos Dagua, Limones y Anchicayá y las quebradas y esteros Pichidó, San Joaquín, Aguadulce, Gamboa y San Antonio. En este estuario se pueden observar dos áreas bien diferenciadas: la bahía exterior y la bahía interior (CCCP, 2001; citado por Otero, 2002) (ver Figura 8). Ambas bahías están comunicadas por un canal de acceso, el cual permite el tránsito de embarcaciones desde mar afuera hasta los diferentes terminales marítimos de Buenaventura.

Bahía exterior

La bahía exterior se halla en comunicación directa con el mar abierto, con una longitud de 18 km aproximadamente, medidos desde la entrada a la bahía interior (La Bocana), y se encuentra delimitada por los accidentes geográficos de Punta Magdalena al norte, en Bahía Málaga, y la Boca Cajambre al sur (Muñoz, 2015).

En la entrada a la bahía exterior se presenta una formación del fondo a manera de barra submarina, conformada por arenas medias y sueltas; posee una extensión de cerca de 5 km y sus profundidades relativamente bajas limitan el acceso de grandes embarcaciones durante las mareas bajas a los diferentes terminales marítimos que operan al interior de la bahía (Giraldo, 2017).



Figura 8. Carta náutica #153 dónde el trazo representa el canal de acceso y las correspondientes zonas de la bahía de Buenaventura: exterior (de color rojo) e interior (de color azul)

Fuente: Adaptado de Dirección General Marítima- Dimar (2018)

Bahía interior

La bahía interior presenta una extensión de aproximadamente 15 km; cuenta con una protección natural a la entrada de la misma, reduciendo el oleaje generado mar afuera. En dicha entrada se encuentra un efecto conjugado entre las barras de playa, el delta de marea y sus sedimentos y la posible actividad de la falla de Buenaventura que puede incidir también en la sedimentación (Gómez & Padilla, 1990). La entrada de la Bahía se conoce como La Bocana y está delimitada por tierra firme, al norte por Punta Bazán y al sur por Punta Soldado.

El ancho de la bahía interior varía entre 2.3 y 4.5 km y se encuentra delimitada por dos (2) orillas o costas: i) la orilla norte o septentrional, conformada por terrenos altos, determinada por la vegetación, donde confluyen las quebradas de Aguadulce, Pichidó y San Joaquín, conformando el estero Aguadulce y ii) la orilla sur o meridional, conformada por pantanos o bajos arenosos, e interrumpida permanentemente por varios ríos (Dagua, Anchicayá) y arroyos en los que la marea penetra hacia aguas arriba de las desembocaduras de los ríos. A unos 10 km de La Bocana, se estrecha abruptamente a un ancho de cerca de 2 km, conformándose esta área por zonas poco profundas, donde finalmente se localiza la isla Cascajal y se encuentra ubicado el terminal marítimo de la Sociedad Portuaria Regional de

Buenaventura (SPRBUN). Al oeste de la isla Cascajal se encuentra la isla Cangrejo, que ayuda a estrechar la sección hidráulica en esta zona.

El aporte de caudales de agua dulce en la bahía interior, a pesar de ser determinante en el ecosistema de la Bahía, es insignificante en volumen respecto al prisma mareal, es decir, los volúmenes de agua que ingresan a la Bahía por efecto del flujo y reflujo de la marea. Debido a esto, la bahía de Buenaventura presenta las características de un estuario bien mezclado la mayor parte del tiempo (Muñoz, 2015).

Canal de acceso

El canal de acceso a los terminales marítimos de Buenaventura presenta una longitud total de aproximadamente 30.5 km. Los primeros 15 km están en la bahía interior, desde el frente del muelle del Terminal Marítimo en la isla Cascajal, hasta La Bocana, entre Punta Bazán y Punta Soldado; en esta zona el oleaje es de pequeña amplitud y el alineamiento del canal coincide naturalmente con la dirección de las corrientes locales predominantes. Desde La Bocana, los 15.5 km siguientes se hallan en mar abierto; sobre la bahía exterior, donde se presentan oleajes de mayor amplitud, corrientes cruzadas y vientos de costado. En el año 2015 las profundidades del dragado de profundización efectuado en el canal fueron de 12.5 m en la bahía interior y 13.5 m en la bahía exterior. El ancho del canal varía de 200 m en la bahía exterior a 160 m en la bahía interior (Consortio Dragado Buenaventura, 2015).

6.4. ASPECTOS HIDROMETEOROLÓGICOS

La caracterización hidrometeorológica de la bahía de Buenaventura se realizó para los parámetros de temperatura, humedad relativa, precipitación, vientos, nubosidad y brillo solar, por considerarse de gran relevancia y debido a la disponibilidad de la información y su confiabilidad. Los anteriores parámetros, a excepción de la salinidad, fueron analizados a partir de los registros históricos mensuales del IDEAM (estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura). La variabilidad histórica de la salinidad, por su parte, se analizó de acuerdo con los registros de monitoreo realizados por la CVC en el período 2005 - 2012, con una frecuencia semestral en tres estaciones de monitoreo distribuidas a lo largo de la bahía de Buenaventura.

La ubicación geográfica de cada uno de los puntos de monitoreo de la CVC y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM anteriormente mencionadas se presentan en la Tabla 2.

El análisis de los registros meteorológicos de las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura, las cuales por su ubicación se consideran adecuadas, permiten establecer, en términos generales, que el clima del municipio es predominantemente cálido, muy húmedo, con altas temperaturas y precipitaciones durante la mayor parte del año (POT Buenaventura, 2001), presentando los siguientes pisos térmicos: cálido 5350 km², medio 640 km², frío 58 km² y páramo 30 km². Este comportamiento está relacionado con la ubicación de Buenaventura en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), donde se evidencian bajas presiones atmosféricas y se da la convergencia de vientos alisios tropicales del sureste y del noreste.

Tabla 2. Localización de los puntos de monitoreo de la CVC y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM en la bahía de Buenaventura

Punto de Monitoreo /Estación	Localización	Coordenadas	
		Latitud (N)	Longitud (W)
1	Entrada a la Bahía, frente a la Bocana	3°49'12''	77°10'41''
2	Frente al Río Potedó	3°51'25''	77°06'47''
3	Extremo Norte del Terminal Marítimo	3°53'31''	77°04'48''
Colpuertos	Zona central de la Isla Cascajal	3°53'00''	77°04'00''
Aeropuerto Buenaventura	Aeropuerto de Buenaventura	3°49'00''	76°59'00''

6.4.1. Temperatura

Temperatura del aire

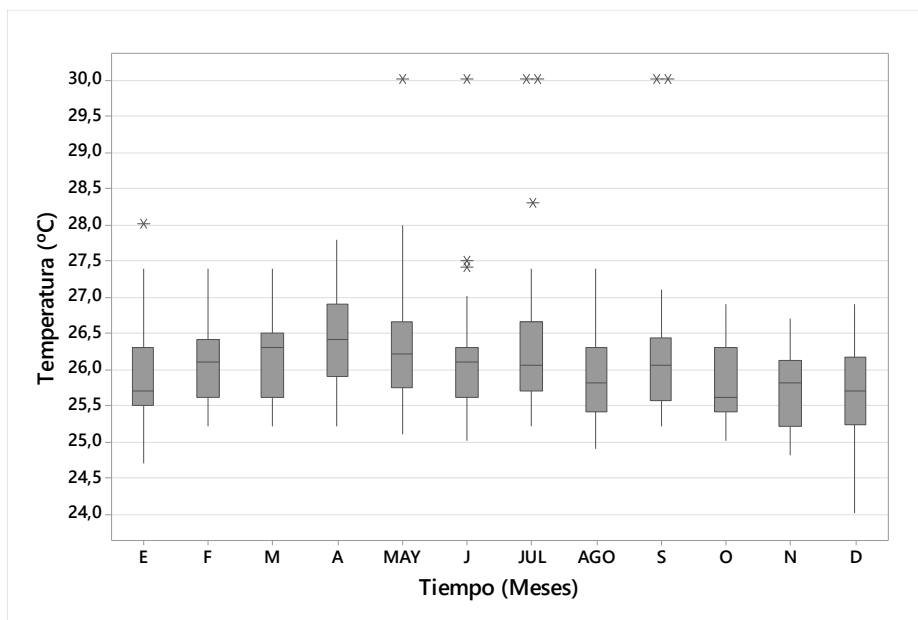
La bahía de Buenaventura se caracteriza por presentar a lo largo del año variaciones mínimas en la temperatura del aire debido al alto contenido de vapor de agua presente en su atmósfera. Asimismo, la temperatura del aire está relacionada con la fluctuación cenital del sol durante el año; esta fluctuación es escasa, lo que impide variaciones estacionales anuales de temperatura. Sin embargo, en la región se presenta un clima tropical de ciclos térmicos diurnos (Collazos, 2014).

El análisis de las variaciones en la temperatura del aire se hizo a partir de los datos suministrados por el IDEAM, los cuales fueron medidos en las estaciones hidrometeorológicas Colpuertos y en el Aeropuerto de Buenaventura. El valor medio anual reportado por el IDEAM para el periodo 1969-2000 fue de 26.1 °C en la estación Colpuertos y en la estación Aeropuerto 25.5°C para el periodo 1962-2014. En la Tabla 3 se presentan los registros de temperatura media mensual multianual del aire en las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura.

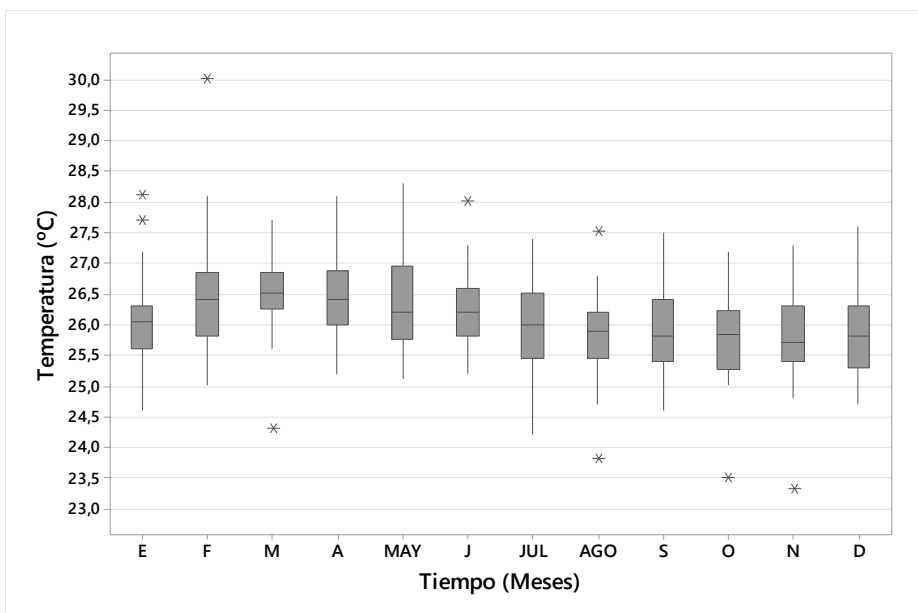
Tabla 3. Temperatura media mensual multianual del aire en el municipio de Buenaventura

Estación	Periodo	Temperatura (°C)												Media Anual
		Mes												
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Aeropuerto B/ventura	1962-2014	25.9	26.1	26.1	26.4	25.5	25.2	24.8	25.9	24.5	25.8	25.7	25.7	25.5
Colpuertos	1969-2000	26.1	25.5	26.5	26.4	26.3	26.2	26.0	25.8	25.9	25.8	25.8	25.8	26.1

En las Gráficas 1 y 2 se presenta la distribución de los registros de temperatura media mensual del aire para las dos estaciones de medición, a partir de la elaboración de diagramas de cajas. Los datos atípicos son presentados como asteriscos (*).



Gráfica 1. Diagrama de cajas de la temperatura media mensual del aire en la estación Aeropuerto, municipio de Buenaventura



Gráfica 2. Diagrama de cajas de la temperatura media mensual del aire en la estación Colpuertos, municipio de Buenaventura

Temperatura de la superficie del mar

Fuente: Collazos (2014)

6.4.2. Precipitación

En el municipio de Buenaventura se presenta un ciclo anual de lluvias regida por la interacción de los principales sistemas de circulación atmosférica en el trópico, resultando de ello la ocurrencia de periodos muy marcados de mayores lluvias, debido principalmente al desplazamiento de la ZCIT. De igual forma, las masas de nubes que se forman a poca altura sobre el mar, saturadas de humedad, son arrastradas por los fuertes vientos del occidente hacia el interior y al encontrarse con la cordillera Occidental se detienen, se enfrían, se condensan y se precipitan, ocasionando abundantes lluvias de forma torrencial, frecuentemente acompañadas de cargas eléctricas (POT Buenaventura, 2001).

El análisis del comportamiento de las lluvias en Buenaventura se efectuó a partir de la información meteorológica de las estaciones Aeropuerto y Colpuertos, obteniendo, además, el número de días de lluvia por mes y por año. En la Tabla 4 se concentra la anterior información.

Tabla 4. Precipitación y días promedio de lluvia en el municipio de Buenaventura

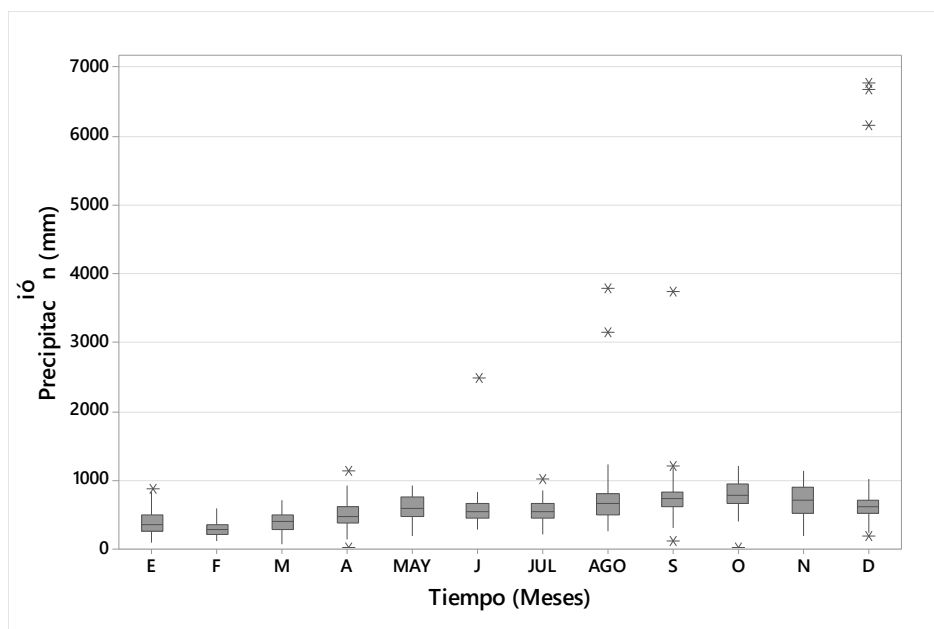
Estación	Precipitación Media (mm)			Días promedio de lluvia	
	Periodo	Media mensual	Media anual	Media mensual	Media anual
Aeropuerto B/ventura	1946-2016	598.5	6465.6	23	280
Colpuertos	1969-2001	622.7	6955.8	26	313

Los registros históricos del IDEAM, dan muestra de las elevadas precipitaciones que se presentan en Buenaventura, siendo ligeramente mayores en la estación Colpuertos con una media anual de 6955.8 mm, en comparación con la estación Aeropuerto (6465.6 mm). Los meses más y menos lluviosos resultaron ser octubre (881.1 mm) y febrero (314.8 mm) para la zona de la estación Colpuertos y para el sector del Aeropuerto, diciembre con 957.9 mm y febrero (280.9 mm).

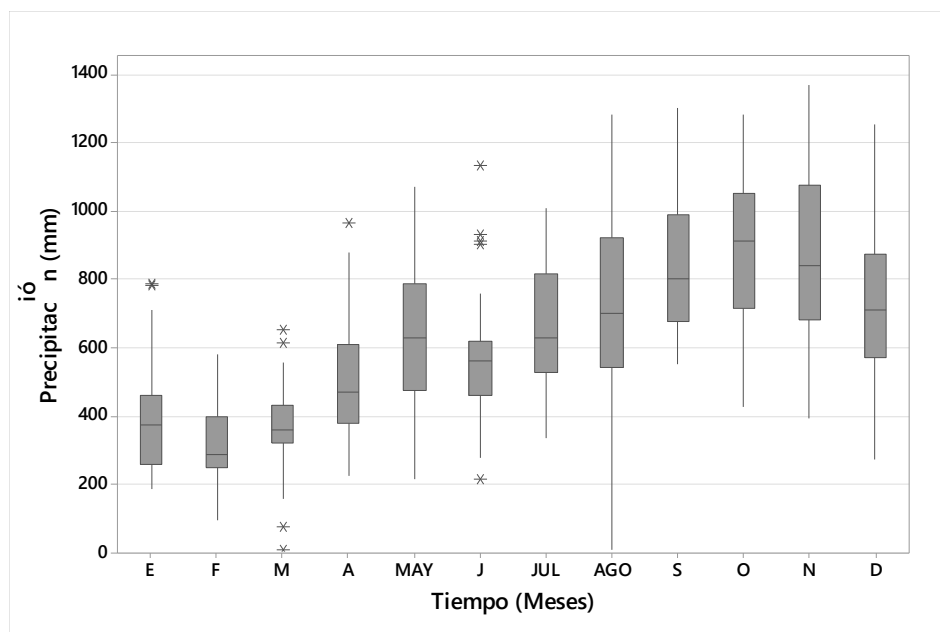
Según los registros del IDEAM, la precipitación presenta un comportamiento similar en las dos estaciones analizadas. Teniendo en cuenta que la estación Colpuertos se encuentra ubicada al interior de la zona de estudio, se considera que la variabilidad en la precipitación registrada en esta estación es la que mejor representa las condiciones reales de la Bahía con un promedio anual de lluvias de 6955.8 mm/año.

En las Gráficas 3 y 4 se presenta la distribución mensual multianual de la precipitación, para las estaciones meteorológicas Aeropuerto y Colpuertos. Se puede observar que en el sector del Aeropuerto se han presentado en el mes de diciembre episodios de precipitación extrema con una magnitud tal que supera la media multianual para ese sector. De igual manera se observa que efectivamente, los periodos de mayores precipitaciones corresponden al segundo

semestre de los años de medición, especialmente durante los meses de octubre, noviembre y diciembre.



Gráfica 3. Diagrama de cajas de la precipitación mensual en la estación Aeropuerto, municipio de Buenaventura



Gráfica 4. Diagrama de cajas de la precipitación mensual en la estación Colpuertos, municipio de Buenaventura

6.4.3. Humedad relativa del aire

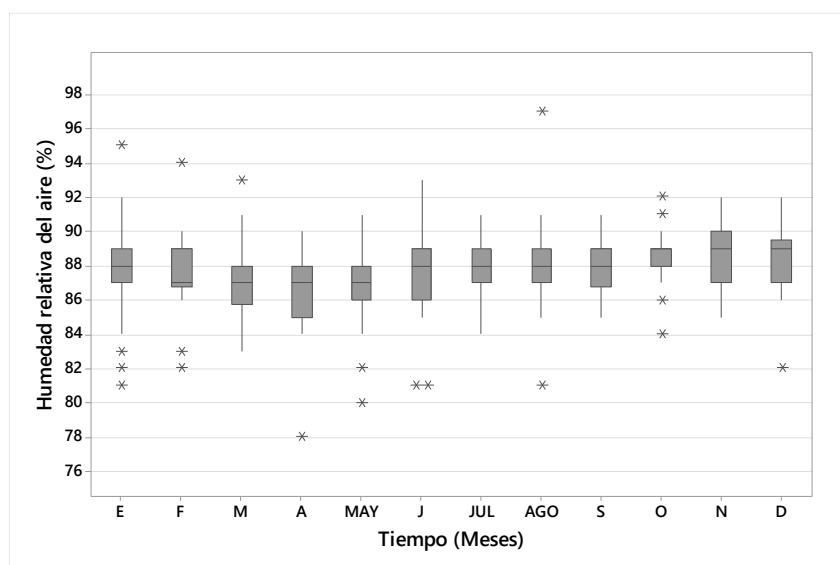
La baja salinidad del mar en la Costa Pacífica Colombiana, con una concentración menor de 30 gr sal/L de H₂O, originada por el alto volumen de agua dulce que descargan los ríos en el litoral, la evaporación de los manglares y selvas de la costa y el estancamiento de las masas de nubes arrastradas por los vientos marítimos por la presencia de la cordillera Occidental, causan que la humedad atmosférica sea alta a lo largo del año (Alcaldía de Buenaventura, 2015).

En la Tabla 5 se presentan los valores de la humedad relativa media mensual multianual en las dos estaciones meteorológicas (Aeropuerto y Colpuertos).

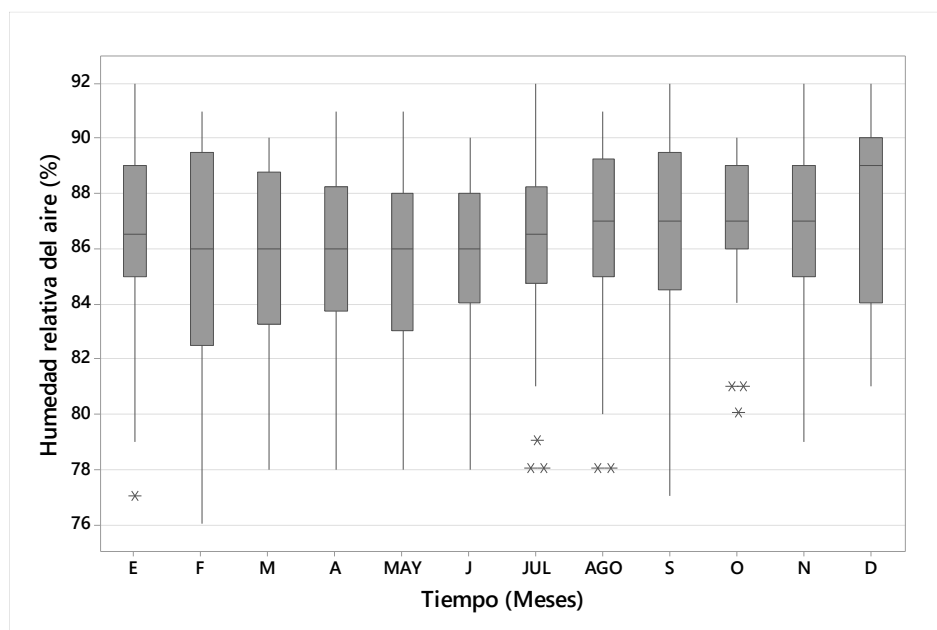
Tabla 5. Humedad relativa media mensual multianual en el municipio de Buenaventura

Estación	Periodo	Humedad relativa del aire (%)												Media Anual
		Mes												
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Aeropuerto B/ventura	1962-2014	87.8	87.5	87.1	86.6	86.8	87.4	87.6	87.9	87.7	88.6	88.3	88.4	87.5
Colpuertos	1969-2000	86.5	85.6	85.6	85.8	85.4	85.3	86.1	86.5	86.5	86.7	86.4	87.3	86.3

El valor medio anual de humedad relativa del aire reportada por el IDEAM para el período comprendido entre 1962–2014 fue de 87.5% en la estación Aeropuerto de Buenaventura, y en la estación Colpuertos se reportó un valor de 86.3% para el período 1969–2000. En las Gráficas 5 y 6 se presentan los diagramas de cajas elaborados para los datos históricos de humedad relativa del aire (media mensual) en las estaciones Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos, respectivamente.



Gráfica 5. Diagrama de cajas de la humedad relativa del aire (media mensual) en la estación Aeropuerto, municipio de Buenaventura



Gráfica 6. Diagrama de cajas de la humedad relativa del aire (media mensual) en la estación Colpuertos, municipio de Buenaventura

Se observa que la humedad relativa del aire en la bahía de Buenaventura oscila entre el 82 y el 89%. Se evidencia, además, un descenso en esta variable durante los meses de febrero a mayo, en los cuales se tienen periodos secos con temperaturas más elevadas; caso contrario sucede durante los meses de noviembre y diciembre, cuando se presentan los mayores valores de humedad en el aire, en concordancia con la época de lluvias y las temperaturas inferiores presentes en las zonas de medición.

6.4.4. Vientos

La cuenca del Pacífico colombiano corresponde a una región de bajas presiones atmosféricas, donde convergen los vientos alisios tropicales del sureste y del noreste. Estas masas de aire con diferencias térmicas y gradientes de humedad, ascienden en forma de una banda nubosa por procesos de convección, caracterizando esta zona por vientos variables y débiles (zona de calmas ecuatoriales) y por una alta pluviosidad (Martínez - Aguilar *et al.* 2010). La acción del viento influye directamente en el movimiento de la superficie del agua, creando un oleaje fuerte o moderado dependiendo de la intensidad y la dirección del viento, incidiendo de manera importante en la dinámica de las masas de agua y en la morfología costera (Collazos, 2014).

De acuerdo con los registros de las mediciones llevadas a cabo por el IDEAM, los vientos en Buenaventura alcanzan en promedio velocidades cercanas a los 0.7 m/s. En la Tabla 6 se presentan las velocidades medias mensuales multianuales del viento en este municipio, en las dos estaciones de monitoreo.

Tabla 6. Velocidades medias mensuales multianuales del viento en el municipio de Buenaventura

Estación	Periodo	Velocidad del viento (m/s)												Media Anual
		Mes												
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Aeropuerto B/ventura	1946-2012	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.7	0.8	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.9
Colpuertos	1969-2001	0.7	2	0.9	0.2	0.1	0.1	0.4	0.5	0.4	0.2	0.2	0.6	0.53

Según el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Pacífico (CCCCP), la ocurrencia promedio de los vientos presentados para el año 2015 fue: suroeste 19%, sur 10% y noreste 7%, por lo cual se establece que las direcciones predominantes en la zona de estudio son, en sur orden, la suroeste y la sur.

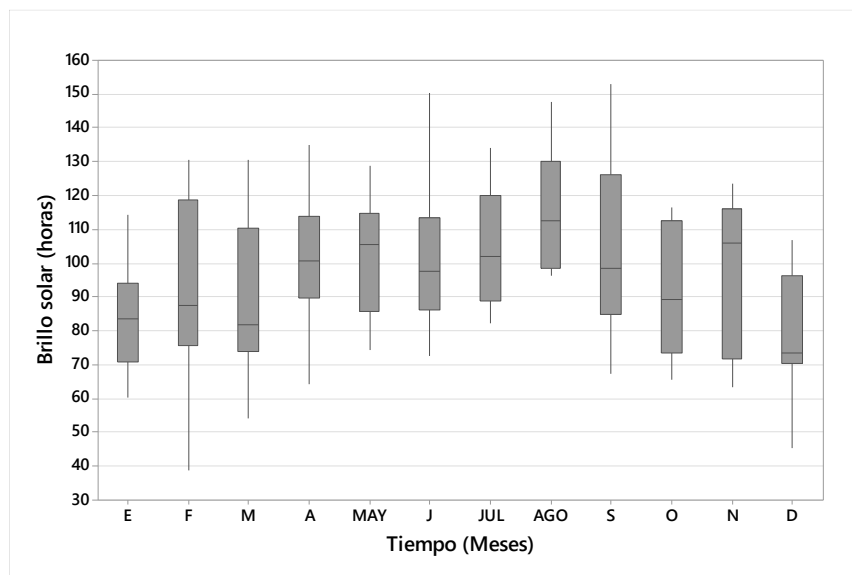
6.4.5. Brillo solar

El total de horas de brillo solar al año o el tiempo total de incidencia de la luz solar directa en Buenaventura se estima en promedio, según información del IDEAM, en 1305.4 horas. Durante el periodo 1969 – 2001, el brillo solar medio mensual multianual en la estación Colpuertos fue 114 horas y el brillo solar medio anual fue de 1442.05 horas. En la estación Aeropuerto, por su parte, se obtuvieron registros que indicaron entre los años 1975 – 2014, un valor medio mensual multianual de 97.4 horas, con un promedio anual de 1168.66 horas (ver Tabla 7).

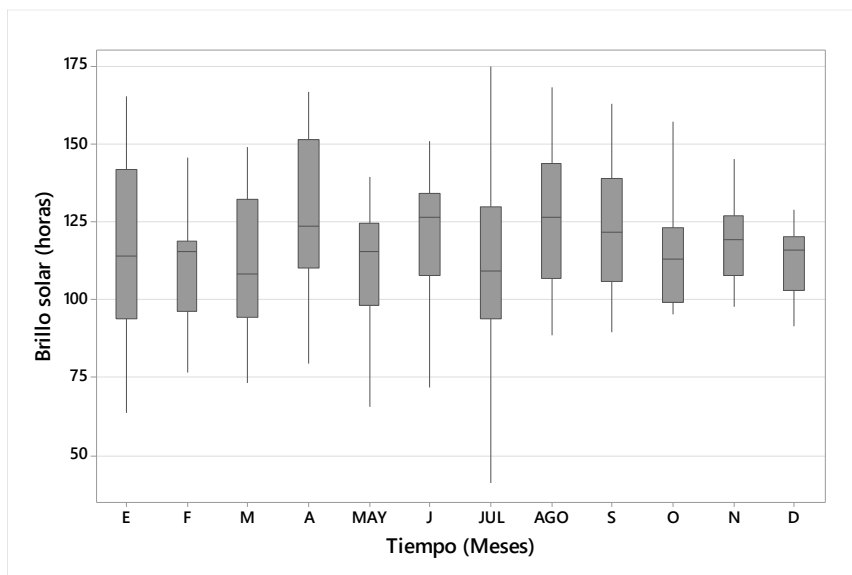
Tabla 7. Brillo Solar medio mensual multianual en el municipio de Buenaventura

Estación	Periodo	Brillo solar (horas)												Media Anual
		Mes												
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Aeropuerto B/ventura	2003-2014	82.8	91.6	90.1	100.2	102.2	101.5	105.1	114.8	140.5	92.3	167.6	178.4	1168.5
Colpuertos	1980-2001	0.7	2	0.9	0.2	0.1	0.1	0.4	0.5	0.4	0.2	0.2	0.6	1442

En las Gráficas 7 y 8 se presentan los diagramas de cajas para los registros históricos del parámetro brillo solar en las estaciones Aeropuerto y Colpuertos, respectivamente. Se observa que en general, los meses con mayor número de horas de incidencia de la luz solar directa son agosto y septiembre para la zona de la estación Aeropuerto y abril y agosto para la zona de la estación Colpuertos.



Gráfica 7. Diagrama de cajas del brillo solar mensual en la estación Aeropuerto, municipio de Buenaventura



Gráfica 8. Diagrama de cajas del brillo solar mensual en la estación Colpuertos, municipio de Buenaventura

6.4.6. Nubosidad

La nubosidad en la zona de estudio, fue caracterizada con base en los análisis realizados en las estaciones meteorológicas del IDEAM. Es un parámetro cuyos resultados pueden obtenerse a partir de la modelación o de la observación del cielo, el cual es dividido en ocho partes llamadas octas y posteriormente se determina cuantas partes u octas están cubiertas de

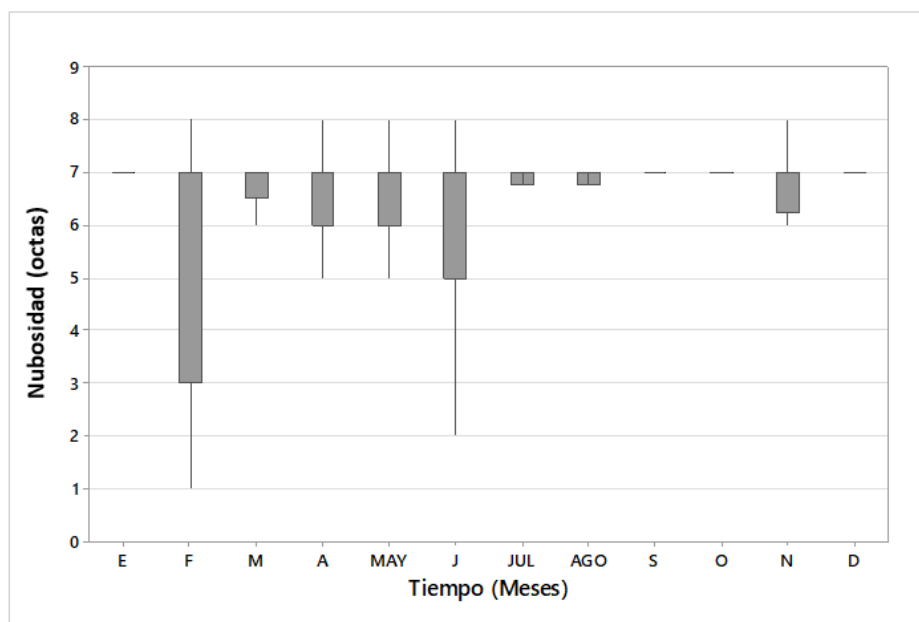
nubes en el momento de la observación. Así, están dados nueve grados de nubosidad: se otorgará el valor de cero cuando haya ausencia de nubes o muy poca nubosidad y el valor de ocho cuando el área de observación se encuentre totalmente cubierta de nubes.

En la Tabla 8 se presentan los valores medios mensuales multianuales de la nubosidad para las estaciones Aeropuerto y Colpuertos de Buenaventura. En general se evidencia poca variabilidad en los datos registrados, demostrando con ello que la bahía de Buenaventura presenta una nubosidad alta (6.4 octas en la estación Aeropuerto y 5.2 octas en la estación Colpuertos).

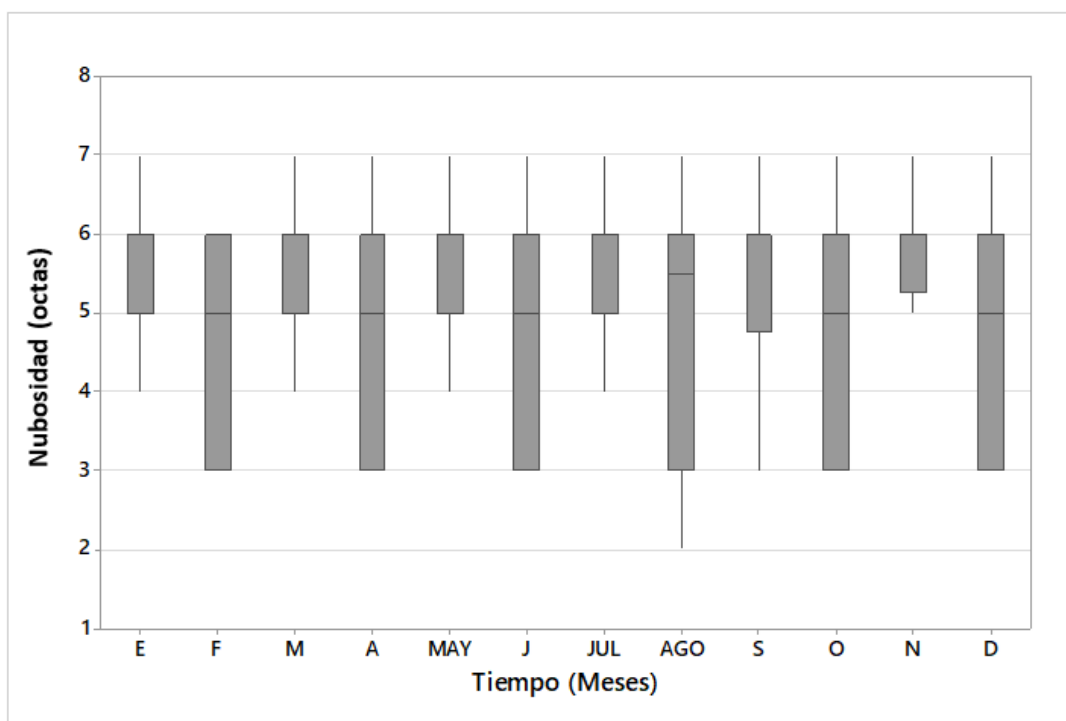
Tabla 8. Nubosidad media mensual multianual en el municipio de Buenaventura

Estación	Periodo	Nubosidad (octas)												Media Anual
		Mes												
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Aeropuerto B/ventura	1964-2014	6.6	5.8	6.4	6.4	6.6	5.9	6.5	6.5	6.7	6.6	6.4	6.9	6.4
Colpuertos	1969- 2000	5.7	4.5	5.5	4.6	5.3	4.9	5.4	4.8	5.4	4.6	5.6	4.5	5.2

El análisis de los Gráficos 9 y 10, indica una distribución homogénea de los datos durante los años y meses de medición en la estación Colpuertos. En contraste, la estación Aeropuerto presenta una mayor variabilidad de la nubosidad en comparación con la zona de Colpuertos.



Gráfica 9. Diagrama de cajas de la nubosidad mensual en la estación Aeropuerto, municipio de Buenaventura



Gráfica 10. Diagrama de cajas de la nubosidad mensual en la estación Colpuertos, municipio de Buenaventura

6.4.7. Salinidad

La CVC ha realizado mediciones semestrales de la salinidad en tres sitios de la bahía interior de Buenaventura (ver Tabla 9).

Los registros indican que la salinidad al interior de la bahía de Buenaventura puede variar entre 0.92‰ y 2.31‰, dependiendo del sitio, los niveles de marea y los caudales de los ríos y esteros que confluyen en ella. Las mayores concentraciones se presentan hacia la entrada de la Bahía y disminuyen hacia el interior de la misma. Igualmente, las salinidades más altas se presentan en pleamar y las más bajas en bajamar. Cuando se incrementan las descargas de agua dulce de los ríos y esteros que tributan a la Bahía, las concentraciones de salinidad disminuyen. De allí que la variación de la salinidad en la columna de agua sea muy pequeña (menor del 1%, presentando valores ligeramente superiores cerca al fondo) y se considere a la bahía de Buenaventura como un estuario bien mezclado la mayor parte del tiempo.

Tabla 9. Salinidad semestral en los sitios de medición en la bahía interior de Buenaventura

Fuente: Collazos (2014)

Salinidad (%)									
Primer Semestre (enero-junio)									
Punto de Monitoreo	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1	1.08	2.31	0.96	2.01	-	2.11	1.47	1.44	1.36
2	0.99	2.14	1.02	1.8	-	1.61	1.34	1.15	1.27
3	1	1.94	0.96	1.41	-	1.39	1.15	1.13	1.18
Segundo Semestre (julio-diciembre)									
Punto de Monitoreo	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1	1.26	2.47	1.71	1.43	1.3	1.22	1.44	1.11	1.83
2	1.06	1.87	1.57	1.33	0.92	0.92	1.32	1.04	1.28
3	0.95	1.54	1.38	1.12	0.72	1.06	0.68	0.96	0.77

6.4.8. Dinámica Marina y Fluvial

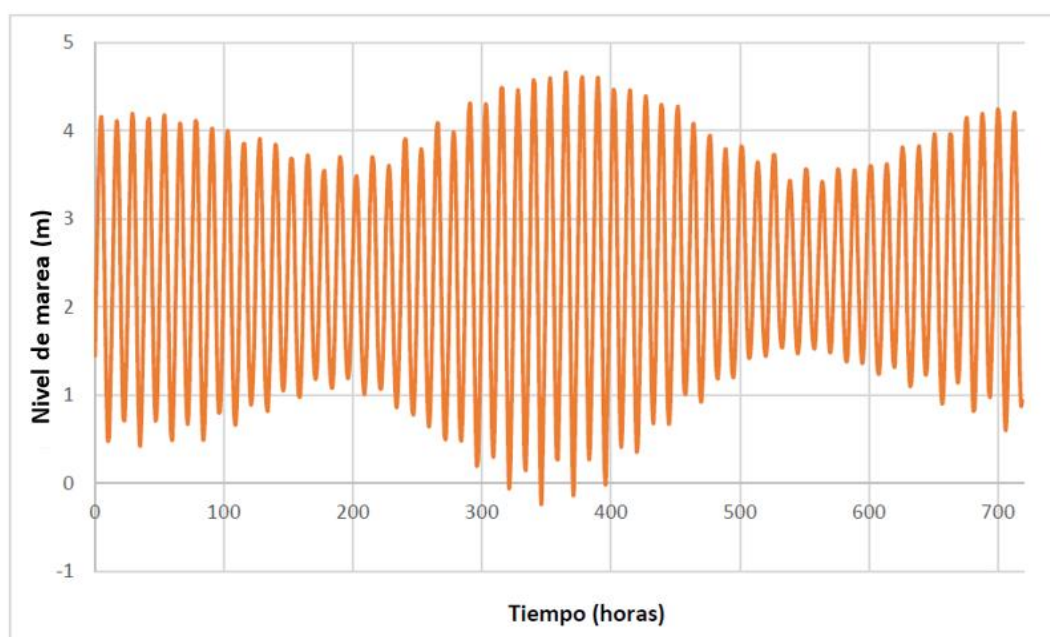
Mareas

Los movimientos de ascenso y descenso de las aguas del mar o mareas son causadas de forma predominante por la atracción gravitatoria ejercida por la luna y el sol. En la bahía de Buenaventura este fenómeno se constituye en uno de los agentes de mayor significación, originando fuertes corrientes durante el flujo y el reflujo. Las mareas en la zona de estudio son de tipo semidiurno regular, presentando dos (2) pleamares y dos (2) bajamares en un mismo día, con un periodo medio de 12 horas y 25 minutos. El rango de marea media es de 3.11 metros, donde el rango mareal puede variar entre 1.3 y 5.4 m (Universidad del Valle, 1999). La diferencia en los rangos de mareas consecutivas es muy pequeña, aproximadamente menor al 10% (Collazos, 2014).

La Gráfica 11 presenta la variación de los niveles de marea en noviembre de 1997. Estos registros horarios permiten apreciar dos períodos de rangos mareales máximos y dos períodos de rangos mareales mínimos, denominados “mareas vivas” y “mareas muertas”, respectivamente. Durante las mareas vivas se presentan las pleamares máximas y las

bajamares mínimas, mientras que durante las mareas muertas tienen lugar las pleamares mínimas y las bajamares máximas.

En la bahía de Buenaventura las características de las mareas son bastante similares a las existentes en el Pacífico Colombiano, con algunas pequeñas variaciones, especialmente en los valores de la amplitud de la marea a medida que esta penetra en la Bahía. Así pues, en la entrada de la Bahía (sector Punta Soldado - Punta Bazán) se tienen amplitudes ligeramente inferiores a las que se presentan en el sector de la isla Cascajal. Según el informe “Estudio sedimentológico de la Bahía de Buenaventura” del Laboratorio Central de Hidráulica de Francia (1975), este aumento en la amplitud de la marea hacia el interior de la Bahía se debe al estrechamiento en la parte interior de la Bahía y en menor proporción a la convergencia entre la entrada y la isla de Cascajal.



Gráfica 11. Niveles de Marea en la bahía de Buenaventura durante el mes de noviembre del año 1997

Fuente: Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico - Universidad del Valle (1998)

El mayor aporte en la formación de la marea está dado por el componente M2 denominado la principal lunar, de lo que se infiere que el tipo de oscilaciones de la marea es semidiurno. Las oscilaciones son similares, pero registran amplitudes distintas de acuerdo con su posición geográfica. En Buenaventura, el porcentaje de las oscilaciones no periódicas (mareas meteorológicas) no es mayor al 5% (Cadena, 2012). Las componentes armónicas principales se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Componentes armónicas principales de las mareas en la bahía de Buenaventura

Símbolo	Periodo (h)	Descripción
M2	12.42	Constituyente principal, mareas semidiurnas, debido a la Luna
S2	12.00	Constituyente principal, mareas semidiurnas, debido al Sol
N2	12.66	Debido a la variación de la distancia entre la Tierra y la Luna
K2	11.97	Debido a los cambios de declinación del Sol y la Luna
K1	23.93	Solar-lunar
O1	25.82	Constituyente principal, mareas diurnas, debido a la Luna
P1	24.07	Constituyente principal, mareas diurnas, debido a la Luna

Corrientes

Las corrientes en el Pacífico Colombiano están relacionadas con el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical y los vientos alisios del norte y del sur. También se tiene influencia al norte de las aguas calientes desde la ensenada de Panamá y al sur de las corrientes costeras de aguas frías y las corrientes oceánicas de aguas cálidas del Perú. Por otra parte, se tiene localmente la corriente de Colombia que recorre la costa de sur a norte hasta mezclarse con las aguas del Golfo de Panamá (Palacios & Quirós, 2006). En la bahía de Buenaventura las corrientes y patrones están influenciadas por diferentes factores como las mareas, las descargas de los ríos, los vientos, el oleaje, las lluvias y la configuración del fondo del mar y de las zonas costeras. De todos estos factores, la marea se constituye el de mayor influencia en el régimen de las corrientes en la Bahía, originando corrientes de alguna intensidad a lo largo de esta y en los esteros, de acuerdo con la fase y el rango de la marea (Universidad del Valle, 1999).

Las corrientes entran a la Bahía y avanzan siguiendo aproximadamente el alineamiento del canal de navegación hasta llegar al sector de la isla Cangrejo, donde el flujo se divide en dos: una buena parte se dirige hacia la zona de los muelles de los terminales marítimos y el estero Aguadulce y la otra fracción hacia el sur de la isla, para continuar hacia el río Dagua, los esteros Hondo y El Piñal y posteriormente hacia el estero San Antonio.

En términos generales se observa que, durante el flujo de la marea, el patrón de flujo a diferentes profundidades es bastante similar. Las velocidades mínimas como es de esperarse, se presentan en los períodos próximos a pleamares y bajamares y en las zonas de menores profundidades (Universidad del Valle, 1999). De acuerdo con el informe “Campaña de Mediciones” del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1980), las velocidades máximas se presentan en los tramos estrechos y en los sectores de mayores profundidades (zona del canal de acceso), aproximadamente en el período comprendido entre las 2.5 y las 4.0 horas después de la ocurrencia de las bajamares y las pleamares (Muñoz, 2015). La máxima velocidad medida fue de 2.08 m/s a 5.0 m de profundidad en proximidad del canal de navegación, frente al sector denominado Boca - Cangrejo. En promedio, las velocidades máximas observadas se hallan entre 1.0 y 1.5 m/s. Las velocidades del flujo en las zonas bajas generalmente presentan valores menores a 0.5 m/s (Palacios & Quirós, 2006).

Cuando la condición mareal es de reflujo en la Bahía se evidencian velocidades de la corriente un poco mayores a las registradas durante la fase de marea subiendo debido a las descargas de los ríos.

Dinámica Fluvial

A la bahía interior confluyen diez (10) tributarios entre ríos, brazos y esteros, alimentados por la cuenca de la bahía de Buenaventura. Los aportes de agua dulce de los tributarios a la Bahía se estiman en un caudal promedio de 448.2 m³/s, con un considerable arrastre de sedimentos que se depositan normalmente en los deltas e islas sobre el flanco sur del canal de acceso al puerto de Buenaventura (Palacios & Quirós, 2006). Las áreas de las subcuencas de los ríos y esteros que tributan a la Bahía se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Subcuencas tributarias de la bahía de Buenaventura

CUENCA	Área (km²)	Porcentaje (%)
Río Dagua	1639	43.6
Río Anchicayá	1200	31.9
Estero Aguadulce	730	19.4
Estero San Joaquín	789	2.1
Esteros San Antonio y Hondo	34	0.9
Estero Gamboa	31.3	0.8
Estero Pichidó	29.3	0.8
Estero Aguacate	16.8	0.4
Total	3759.3	100

El prisma de marea o volumen de agua que entra y sale de la Bahía es directamente proporcional a la amplitud de la marea y a las descargas de los tributarios. Asimismo, el volumen total de agua dulce descargado por los ríos afluentes representa entre un 3% y un 6% del prisma mareal. Las descargas de los ríos tienen influencia significativa sobre el comportamiento de la Bahía, pues traen apreciables cantidades de sedimentos que afectan su morfología y disminuyen las profundidades de agua, tanto en el canal de acceso como en las dársenas de maniobras y aproximación a los diferentes terminales marítimos, obligando a realizar frecuentes dragados de mantenimiento en dichos sectores (Giraldo, 2017). En la Tabla 12 se presentan los caudales mínimos, medios y máximos en los diferentes tributarios de la bahía de Buenaventura.

Tabla 12. Caudales fluviales mínimos, medios y máximos de los ríos y esteros de la bahía de Buenaventura

Fuente: Plan de Ordenamiento Territorial- POT de Buenaventura (2001)

Ríos y Esteros	Caudal (m ³ /s)		
	Mínimo	Medio	Máximo
Río Dagua	55.8	66.1	89.4
Río Anchicayá - Brazo Principal	48.8	98.9	604.5
Río Anchicayá - Brazo Seco	26.2	53.2	325.5
Río Anchicayá - Brazo Humané	15.0	30.0	60.0
Estero Aguadulce	40.0	80.0	160.0
Estero Gamboa	15.0	30.0	60.0
Estero Aguacate	5.0	10.0	20.0
Estero San Antonio	10.0	20.0	40.0
Estero Hondo	5.0	10.0	20.0

6.5. ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

Los procesos de interacción de la dinámica continental y marina hacen de los litorales un espacio particularmente dinámico de respuesta a los cambios globales, locales y regionales. El litoral, entendido como interfase océano- continente, incluye el área de aguas poco profundas donde las olas pueden remover los sedimentos y transportarlos hacia el continente bajo la influencia del oleaje y corrientes de marea; además, se incluyen dentro de esta interfase, a las playas, los acantilados, las dunas costeras, las barras y las flechas, entre otras geoformas, lo cual los convierte en espacios de alta sensibilidad.

El litoral pacífico se clasifica como marginal convergente por su ubicación próxima y paralela a los límites de placas litosféricas (hecho que implica movilidad tectónica), y a su vez, muestra condiciones bioclimáticas de ecuatoriales con alta humedad. En los litorales se recibe en gran parte el efecto del transporte de materiales de la montaña; por lo tanto, es un espacio en proceso de acreción por sedimentación. Sin embargo, en los litorales en proceso de levantamiento, las acumulaciones de sedimento son escasas y dominan los acantilados bajo procesos de abrasión marina (Palacios & Quirós, 2006).

6.5.1. Geología

La geología de la zona norte de la bahía de Buenaventura corresponde a rocas sedimentarias del Oligoceno al Plioceno. Son rocas conformadas por sedimentos marinos, predominando los arcillo-arenosos, los conglomerados y las calizas. La zona sur de la bahía de Buenaventura está constituida por sedimentos no consolidados del cuaternario, gravas, arenas, limos y

calizas. Incluye depósitos fluviales, glaciolacustres, deltaicos, eólicos y depósitos marinos recientes, principalmente calizas, areniscas y evaporitas (Universidad del Valle, 1998).

En la bahía de Buenaventura se presentan las fallas funcionales de Buenaventura, falla inferida proyectada con dirección regional N 20° E en la parte sur y a 40° E en la zona Norte y Pichidó. La falla de Buenaventura es la principal responsable de las anomalías geomórficas que se presentan en el Noreste de Buenaventura y ha hecho que el bloque Sur se desplace hacia el Noreste y el Norte hacia el Sureste; esta falla junto con la falla Naya - Micay parecen ser las responsables del hundimiento Sur de la bahía de Buenaventura y el Oeste de la Costa Pacífica. La falla de Buenaventura pasa por el canal de acceso al Estero San Antonio (Palacios & Quirós, 2006).

6.5.2. Geomorfología

Las formas costeras están en función de los procesos morfodinámicos y estructurales, los cuales presentan una estrecha relación con los aportes continentales y la dinámica litoral.

En términos generales, la bahía de Buenaventura está conformada por colinas y llanuras fluviales costeras. Las colinas están constituidas por sedimentos provenientes de la erosión de la Cordillera Occidental y depositados en un ambiente litoral o continental, recibiendo adicionalmente aportes considerables de material de origen volcánico relacionado con las erosiones que ocurrieron durante el Plio-Pleistoceno. Las llanuras fluviales y costeras constituyen la parte continental de una cuenca sedimentaria en subsidencia continua, en donde se acumulan sedimentos marinos, fluvio-deltaicos y aluviales (Universidad del Valle, 1998).

Existe un predominio de costas acantiladas hacia el norte de la Bahía y costas bajas con concentraciones de sedimentos finos y manglares al sur de la Bahía. Las dos costas de Buenaventura presentan una diferenciación morfológica bien marcada, con la costa sur más estable, comparada con la costa norte, la cual parece ser parcialmente emergida o levantada tectónicamente en época reciente.

La morfología de doble flecha de Punta Soldado y las bocanas Anchicayá y Raposo muestran la poca influencia de la deriva litoral en la región y el posible reciclaje de sedimentos entre las bocanas y los cordones litorales por medio de las corrientes de refluo y flujo. A su vez, la presencia de acantilados en el golfo de Tortugas señala la ausencia de una deriva litoral importante y la poca posibilidad de aporte de sedimentos desde los deltas de los ríos Cajambre y Yurumanguí, localizados al sur de la Bahía (Palacios & Quiros, 2006). Así mismo, la formación rocosa de la costa sur de la Bahía se caracteriza por ser más baja, constituida principalmente por manglares, deltas, colinas bajas y playas activas, lo cual hace que en ella se presenten mayores concentraciones de sedimentos finos, lodos y materia orgánica, factores que no solamente han contribuido al desarrollo de manglares de tipo ribereño, sino también a una alta diversidad de unidades ecológicas. En contraste, la costa norte de la Bahía es más alta y está formada en su mayor parte por terrazas, colinas altas y acantiladas, como son, Punta San Juan de Dios, Punta Piedra y Punta Bazán. De esta manera,

la costa norte de la bahía de Buenaventura parece ser parcialmente emergida o levantada tectónicamente en una época reciente (Moffatt & Nichol Int., 1998).

6.5.3. Sedimentología

En la bahía de Buenaventura el principal mecanismo de transporte de sedimentos lo constituyen las mareas y las corrientes mareales; sin embargo, es de especial importancia dentro de la dinámica de los sedimentos, la influencia de las descargas de los ríos y esteros y otros factores como la salinidad, la temperatura y la floculación. El material orgánico, por su parte, propicia la floculación de las partículas cohesivas finas en suspensión, siendo también de interés dentro del estudio de los procesos de transporte de los sólidos en suspensión.

A continuación se presenta la caracterización de los aspectos sedimentológicos inherentes a la bahía de Buenaventura, en lo que respecta al material del lecho marino, los sedimentos en suspensión y el contenido de materia orgánica.

Material del Fondo

En muestreos realizados por la Universidad del Valle en la Bahía (1992) se determinaron las características granulométricas y la distribución espacial del material de fondo en la misma. Los resultados indicaron que el material de fondo está constituido en gran medida por arenas finas (0.125 – 0.250 mm), medianas (0.25 – 0,50 mm) y material cohesivo muy fino (limos y arcillas, diámetro menor de 0.074 mm); este último material, junto con el lodo espeso, se encontró en cercanías de los muelles del Puerto; también se evidenció material fino alrededor de la isla de Buenaventura, en los esteros Gamboa, Aguacate y Aguadulce, en las áreas del delta río Dagua y en el área de la Bahía entre La Bocana y la isla Delicias. De igual manera, se encontraron, pero en menores proporciones, arenas gruesas (0.5-2.0 mm), gravilla (2-64 mm), cantos rodados (64-256 mm) y rocas en el canal de acceso, desde la entrada a la Bahía hasta el sector este de la Isla de Buenaventura.

En síntesis, el material más fino se encuentra en las áreas de planicie mareal, en los sectores de confluencia de los ríos y esteros y en las zonas de velocidades del flujo más bajas. El material más grueso se halla en los sectores de los canales principales y más profundos, en los cuales las corrientes son más intensas (Universidad del Valle, 1999).

6.5.4. Sólidos en suspensión

La concentración de los sedimentos en suspensión varía sobre toda la extensión de la Bahía, debido a diferentes factores tales como el flujo y reflujo de la marea, los cambios de las corrientes mareales, la variación en los niveles y los rangos de marea, la variabilidad de los caudales y descargas de sólidos aportados por los tributarios, la variación en los caudales de vertimientos de agua residual municipal y los cambios en las concentraciones de sólidos en estos efluentes.

En el estudio realizado por la Universidad del Valle (1999) se llevó a cabo una recopilación y análisis de la información disponible sobre concentraciones de sedimentos en suspensión al interior de la Bahía; dentro de este documento se presentan los resultados obtenidos por la

Universidad del Valle en la campaña de muestreo del año 1992, donde se estableció que las concentraciones de sedimentos en suspensión presentaban valores medios y bajos (generalmente menores de 100 mg/L), con una distribución vertical uniforme y concentraciones ligeramente mayores cerca del fondo. En las dársenas de atraque de los muelles del Terminal Marítimo las concentraciones medidas fluctuaron entre 60 y 100 mg/L, en contraste con el sector del Muelle Petrolero que arrojó concentraciones del orden de 250 mg/L. Las máximas concentraciones fueron halladas en los siguientes sectores: entrada a la Bahía, principalmente cerca a la costa en La Bocana y Punta Soldado (100 a 200 mg/L); Punta Guida- Sector Norte de la Bahía después de La Bocana (150 a 400 mg/L); y, algunos tramos del canal de acceso (100 a 250 mg/L).

El consorcio Hidroestudios- Moffat realizó entre el 24 de agosto y el 14 de septiembre de 1996 un muestreo intensivo de sedimentos en suspensión (alrededor de 700 muestras) en los sectores del río Anchicayá, río Dagua, Delta del río Dagua, Isla Cangrejo, Aguadulce, Muelle – Bodega 1 y Mar Afuera – Boyas 8 y 6. Se encontró que, en general, las concentraciones de sedimentos en suspensión durante el flujo de la marea (o marea entrando) son mayores a las concentraciones durante el refluo de la misma. En la estación del delta del río Dagua, durante la marea entrante se encontró una concentración máxima de sedimentos en suspensión de 433 mg/L, le sigue en magnitud la estación Isla Cangrejo con 317 mg/L y la estación Muelle con 196 mg/L, mientras que en la estación del río Dagua se presentó el valor más bajo, con 80 mg/L. Por otro lado, para marea saliente, la concentración de sedimentos en suspensión más alta fue de 316 mg/L y se presentó en una vertical de la estación Muelle; la concentración mínima de sedimentos en suspensión, tanto en marea entrante como en saliente, fue de 3 mg/L y se presentó en las estaciones Boya, sector de La Bocana y río Dagua (Universidad del Valle, 1999). Este fenómeno indica, según los resultados del estudio, una mayor tasa de sedimentación durante los periodos próximos a pleamar, en los cuales las velocidades son mínimas y presentan una mayor duración. Caso contrario ocurrió en el sector de Muelle Nuevo, donde las concentraciones en refluo resultaron superiores a las concentraciones durante el flujo de la marea.

Es de destacar que, en la bahía de Buenaventura, los ríos Anchicayá y Dagua son fuentes importantes de sedimentos para el sistema. Así lo indica, en el caso del Anchicayá, la presencia de concentraciones relativamente grandes durante la marea saliente y concentraciones muy bajas durante la marea entrante. Por el contrario, se registraron concentraciones similares durante mareas entrante y saliente en el río Dagua. Dichos resultados, combinados con las altas concentraciones medidas en el delta del río Dagua, Isla Cangrejo y Muelle pareciera indicar que la resuspensión de los sedimentos es un factor importante en el aumento de las concentraciones de sedimentos en suspensión (Universidad del Valle, 1999).

En conjunto, las mediciones de concentraciones de sedimentos en suspensión demuestran que el sistema de estuario de Buenaventura es muy complejo y dinámico. Las interacciones complicadas de las corrientes mareales y fluviales y el oleaje generan variaciones fuertes en las concentraciones de sedimentos en suspensión (Universidad del Valle, 1999).

Por otra parte, la CVC a través de su red de monitoreo en la bahía de Buenaventura (ver Figura 9), ha realizado mediciones semestrales de los principales vertimientos en la Bahía y de los ríos que tributan a ella. La información disponible de las concentraciones de sólidos suspendidos totales en la bahía de Buenaventura representa la variación de dicho parámetro de calidad del agua en 30 sitios sobre la Bahía, distribuidos desde el sector de La Bocana hasta la isla Cascajal. A partir del año 2012, el número de sitios de muestreo se redujo a 15. En el Anexo 1 se presenta la información histórica de las concentraciones de sólidos suspendidos totales obtenidas para el primer y segundo semestre de cada año.

Respecto al primer semestre de los años de medición, la zona de entrada a la Bahía tuvo un valor máximo de 64.50 mg/L en el sitio 24, correspondiente al año 2012; el sitio 50, por su parte, presentó para el año 2005 el valor más bajo con 5 mg/L. En la zona media del canal de acceso a la Bahía, el valor más alto de SST fue reportado en el año 2011 en el sitio 163 con un valor de 92.20 mg/L y el más bajo en el sitio 132 con 3.30 mg/L. En cuanto a la zona alrededor de la isla Buenaventura, el valor más alto de sólidos suspendidos se reporta en el año 2008 en el sitio 239 con 93.50 mg/L y en el año 2010 el sitio 183 reporta el valor más bajo con 3.86 mg/L.

En el segundo semestre de los años de medición, la mayoría de los valores de sólidos suspendidos se encontraron en el rango de 0 a 50 mg/L; unos pocos valores estuvieron por encima de este rango, en su mayoría, en los sitios de muestreo localizados en la zona media del canal de acceso a la Bahía y en los alrededores de la isla de Buenaventura, donde se presentó el valor más alto en el sitio 223 con 260 mg/L en el año de 2011; en la zona de entrada a la Bahía el valor más alto se registró en el año 2013, en el sitio 3 con un valor de 71.70 mg/L y el valor más bajo en el año 2006 en el sitio 50 con 9.80 mg/L. En la zona media del canal de acceso a la Bahía en el año 2011 el valor más alto registrado fue de 174 mg/L en el sitio 178 y el más bajo en el sitio 172 con un valor de 2.00 mg/L, para el mismo año de medición. Finalmente, en la zona alrededor de la isla de Buenaventura se identificó que el valor más alto se presentó en el año 2011 con 260 mg/L el cual fue en el sitio 223 y el más bajo en el sitio 190 en el año 2006 con un valor de 5.60 mg/L.

Con el propósito de obtener información que facilitara la gestión ambiental de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC para el manejo integral del ambiente marino, la Red de Vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia (REDCAM) ha realizado desde el año 2001 la evaluación y el diagnóstico de la calidad de las aguas marinas y costeras del departamento del Valle del Cauca, teniendo en cuenta variables fisicoquímicas, microbiológicas y contaminantes orgánicos e inorgánicos. En el informe técnico resultante de este programa se presentaron los resultados del diagnóstico de la calidad de las aguas marinas y costeras con base en los muestreos realizados en el segundo semestre de 2015 y segundo semestre de 2016.

La REDCAM cuenta con una red de 55 estaciones de muestreo en el Valle del Cauca distribuidas en cuatro zonas: Bahía Málaga, Buenaventura afuera, Buenaventura urbana y Costa sur Buenaventura, como se puede observar en la Figura 10.

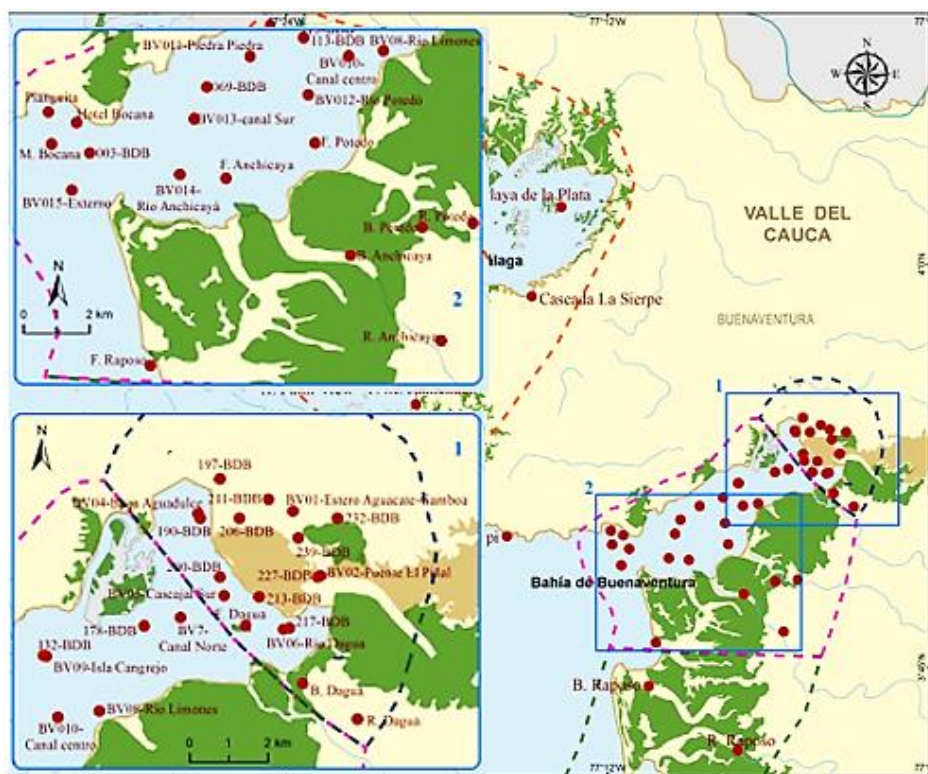


Figura 10. Mapa de localización de las zonas (polígonos demarcados con líneas punteadas) y las estaciones de muestreo de la REDCAM (puntos rojos) en el departamento de Valle del Cauca

Fuente: REDCAM (2016)

Buenaventura Urbana corresponde a la zona interior de la bahía de Buenaventura, donde se concentra la mayor parte de las actividades comerciales y portuarias, específicamente en la isla Cascajal; además se encuentran los esteros Aguacate y Gamboa y la desembocadura del río Dagua. La zona Buenaventura Afuera, corresponde a la entrada de la bahía interna de Buenaventura, la cual está determinada por Punta Bazán y Punta Soldado, o lo que se conoce como La Bocana. En la orilla norte se encuentran las playas Pianguita y La Bocana y en la orilla sur están la isla Soldado, los esteros Brazo Largo y Machetagedó y la desembocadura de la quebrada Potedó y del río Anchicayá. Finalmente, está la zona Costa Sur Buenaventura con estaciones localizadas en el río Raposo (REDCAM, 2016).

En el informe técnico realizado por la REDCAM en el año 2016 se presentan los resultados de los muestreos de calidad del agua efectuados por la CVC entre los días 10 y 13 de agosto de 2015 y en los días 26 de junio y 6 y 7 de julio de 2016. En el muestreo realizado en el año 2015 se visitaron sólo las estaciones localizadas en la zona Buenaventura Afuera y una estación de Buenaventura Urbana, mientras que en el año 2016 se abarcaron las tres zonas de monitoreo. Dentro de este estudio se encontró que los sólidos suspendidos totales

oscilaron entre 3.56 y 89.10 mg/L. Las mayores concentraciones de SST se registraron en el muestreo de junio-julio de 2016 en las estaciones playa Magüipi (80 mg/L) en la zona Bahía Málaga; 178-BDB (70 mg/L), Hotel Bocana (88 mg/L) y Muelle Bocana (68 mg/L) en la zona de Buenaventura Afuera; en 197-BDB (80 mg/L) y 239-BDB (81 mg/L) de la zona de Buenaventura Urbana, lo cual puede asociarse a la influencia de las mareas, las escorrentías y los aportes del estero las Cruces y los ríos Anchicayá y Potedó, que traen consigo sólidos producto del lavado de suelos.

Generalmente, la mayoría de estaciones han presentado concentraciones de SST por debajo de los 150 mg/L, lo cual puede estar asociado a la dinámica de las mareas que ayudan a la dilución y dispersión de los SST. Con frecuencia, los sólidos suspendidos están en mayor concentración en los muestreos realizados durante el segundo semestre del año, lo cual guarda relación con la mayor precipitación en este período (REDCAM, 2016).

La REDCAM, en su informe técnico de diagnóstico y evaluación, expone, además, las fuentes terrestres y marítimas de contaminación en la bahía de Buenaventura, destacando el agua residual, los residuos sólidos, la actividad marítima y portuaria intensiva, el muelle petrolero, el manejo y transporte de hidrocarburos y derivados del petróleo, la industria maderera y pesquera, los lixiviados, el turismo en La Bocana, Juanchaco y Ladrilleros, pequeños cultivos de pan coger, chontaduro y coco (Dagua), y aportes de los ríos San Juan, Naya, Anchicayá, Potedó, Raposo y Dagua.

Material orgánico

Análisis de los resultados de las mediciones de campo realizadas por la Universidad del Valle en los años 1992 y 1998 indican contenidos relativamente altos de material orgánico en toda la bahía de Buenaventura y, en particular, en los sectores del Terminal Marítimo y del Muelle Petrolero. El contenido promedio de materia orgánica hallada fue del 42% para toda la Bahía. Se aprecia igualmente una variación no muy consistente con el período de la marea y el sitio de muestreo. Este alto contenido de material orgánico en los sedimentos de la bahía de Buenaventura podría explicarse en función de la contaminación de la que es objeto, el alto grado de deforestación de las cuencas de los ríos tributarios (principalmente el río Dagua) y la erosión de las orillas y las zonas de manglares.

Dinámica de los sedimentos y procesos sedimentológicos

Las características físicas de la Bahía están influenciadas por diversos factores, incluyendo la acción de la marea y la dinámica de los sedimentos; esta última es influenciada por las descargas de los ríos y esteros (en menor proporción) y otros factores como la salinidad, la temperatura y la floculación. Adicionalmente, existe una interacción muy marcada entre la dinámica fluvial y la mareal, que se manifiesta en toda la bahía de Buenaventura. El efecto más sobresaliente lo representa la intrusión salina del prisma mareal, involucrando las variables de salinidad, corrientes, transporte de sedimentos en suspensión y de fondo y el oleaje.

La problemática de alta sedimentación se presenta principalmente en los alrededores de la isla Cascajal, esteros Aguacate y Gamboa y el delta del río Dagua, zonas caracterizadas por sus bajas profundidades, corrientes de baja velocidad y elevados niveles de turbiedad que propician la floculación y sedimentación del material fino.

Los procesos de sedimentación dentro de la Bahía se potencializan debido a los procesos erosivos inducidos en las partes altas y medias de las cuencas tributarias, por las obras de dragado en la Bahía y por el vertimiento de residuos líquidos y sólidos provenientes de actividades antrópicas.

El estudio de las dinámicas de transporte de los sedimentos en la bahía de Buenaventura implica el entendimiento y la caracterización de los mismos, con base en sus características fisicoquímicas y la forma en la que el flujo actúa sobre ellos. La descripción de los procesos del transporte de sedimentos finos cohesivos, que son de especial interés para este estudio, difiere de los sedimentos no cohesivos, ya que se deben tener en cuenta no sólo sus características fisicoquímicas (densidad, diámetro, contenido orgánico), sino también las características del flujo (turbulencia, salinidad, concentración de sedimentos) y sus fenómenos asociados (erosión, sedimentación, consolidación y resuspensión).

La zona de bajamar localizada sobre la parte sur de la isla Cascajal está conformada principalmente de lodos, definidos como la mezcla de sedimentos - agua, compuestos por arcillas, limos, arenas, materia orgánica y agua. Los sedimentos descargados por los tributarios son depositados inicialmente en sus deltas, posteriormente las corrientes mareales se encargan de distribuirlos hacia diferentes sectores en la Bahía con tasas variables dependiendo de las características hidrodinámicas, sedimentológicas y morfológicas en los distintos sectores. Concentraciones de sedimentos en suspensión cercanas a 80 mg/L, y superiores, pueden originar mayores tasas de sedimentación que de erosión y, con velocidades del flujo relativamente bajas, pueden ser una de las principales causas de la sedimentación en la bahía de Buenaventura (Universidad del Valle, 1999).

Los estudios realizados por la Universidad del Valle (1999) indican que durante las mareas muertas se presenta una mayor sedimentación y aumentan los materiales que se consolidan progresivamente en el tiempo, incrementándose los esfuerzos críticos de erosión, razón por lo cual gran porcentaje del material sedimentado durante los períodos de mareas muertas no serán removidos durante la presencia de las mareas vivas.

7. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO HIDROSEDIMENTOLÓGICO

7.1. SELECCIÓN DEL MODELO

Para el proceso de selección del modelo se tuvieron en cuenta tres criterios primordiales: 1) acceso al software de modelación (libre) para su implementación, 2) el modelo debía haber sido utilizado con éxito en estudios hidrodinámicos en zonas costeras y estuarinas y 3) el modelo debía ser capaz de representar bidimensionalmente los procesos hidrodinámicos y de

advección-dispersión, la influencia mareal, el oleaje, las descargas fluviales y los vertimientos de agua residual doméstica junto con su respectivo aporte de contaminación.

El software seleccionado de acuerdo con estas características fue el modelo matemático MOHID, el cual es un sistema de modelado en tres dimensiones que permite simular la dinámica de diferentes cuerpos acuáticos. Para los objetivos de este estudio, el proceso de modelación se realizó en dos dimensiones (2D) y a través del sistema de modelado interno que posee el software, MOHID WATER.

7.2. ESQUEMATIZACIÓN DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA Y CONSTRUCCIÓN DE LA MALLA COMPUTACIONAL

7.2.1. Construcción de la malla computacional

Se ubicó la bahía de Buenaventura empleando el sistema de coordenadas geográficas WGS 84; la línea de costa se obtuvo empleando el aplicativo *Coastline Extractor* y se ajustó de modo que representara adecuadamente las descargas fluviales más representativas en la Bahía (ríos Dagua y Anchicayá, esteros Aguadulce, Gamboa, Aguacate y San Antonio), definiéndose de esta manera, la frontera abierta del dominio (ver Figura 11).

Dado que no se contaba con la información batimétrica hasta el límite de la influencia mareal, se estimaron las profundidades de los ríos tributarios Dagua y Anchicayá con base en la información disponible de los volúmenes oscilantes para mareas máximas, las longitudes máximas de influencia mareal y la morfología media de los cauces.

En el río Anchicayá, para un rango de marea máxima registrada de 5.40 m el volumen oscilante es 31.3 millones de m^3 y la longitud de la influencia mareal es aproximadamente 25 km; además, se consideró un ancho medio de 120 m, un factor de rugosidad de Manning de $0.04 \text{ s}/m^{3/2}$ y un caudal medio de $152 \text{ m}^3/\text{s}$.

En el río Dagua, en marea viva máxima de 5.4 m de rango el volumen oscilante estimado es 3.1 millones de m^3 , la influencia mareal alcanza una longitud de 10 km y su cauce presenta, en su tramo final, un ancho medio de 60 m; se adoptaron para los cálculos un factor de rugosidad de Manning de $0.04 \text{ s}/m^{3/2}$ y un caudal medio de $66 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para construir los perfiles de flujo gradualmente variado en los afluentes, se construyó una hoja de cálculo electrónica de Excel donde se aplicó el método del paso directo asumiendo los niveles del lecho de cada río. Una vez determinado el perfil de flujo, se procedió a calcular el volumen total de agua almacenado en el tramo final del río correspondiente. Dicho volumen se comparó con el volumen oscilante conocido, verificando que no fueran diferentes, de serlo, se debía proceder al ajuste de los niveles del lecho asumidos y recalcular el perfil de flujo y el volumen total almacenado. Este proceso fue reiterativo hasta lograr una diferencia aceptable entre los dos volúmenes.

La definición de la malla en cuanto a su forma, tamaño y dirección, se estableció teniendo en cuenta el grado de detalle deseado para la representación del sistema físico, el tiempo

computacional requerido y la estabilidad numérica del modelo. La orientación de la malla fue otro aspecto importante tenido en cuenta y se estableció de acuerdo con Malonotte - Rizzoli y otros (1999), Hwu y otros (1999), que recomiendan que la malla en una de sus direcciones (x o y) sea aproximadamente perpendicular a las líneas flujo generadas en la frontera abierta de mar. El área del sistema a modelar se representó a través de una malla de celdas cuadradas ($\Delta x = \Delta y$) y aunque un tamaño de celda muy pequeño permite representar con gran detalle toda la configuración morfológica del sistema, puede implicar un tiempo computacional considerable. De allí la elección, luego de procedimientos de ensayo y error, de una malla de cálculo rectangular, con celdas de igual tamaño (50x50m), con una cantidad total de celdas de 700x600 y un área de 1050 km². Para lograr la perpendicularidad de la malla respecto al patrón de flujo, esta fue ubicada en un ángulo de inclinación de 25° con respecto al eje S-N, con origen en las coordenadas geográficas (-77.2304, 3.5730). Cabe resaltar que el tamaño de la malla (Δx) y el tiempo de cálculo (Δt) establecidos en la modelación, permiten mantener el número de Courant menor a 4, valor recomendado para no afectar la estabilidad del modelo. La malla computacional se presenta en la Figura 11.

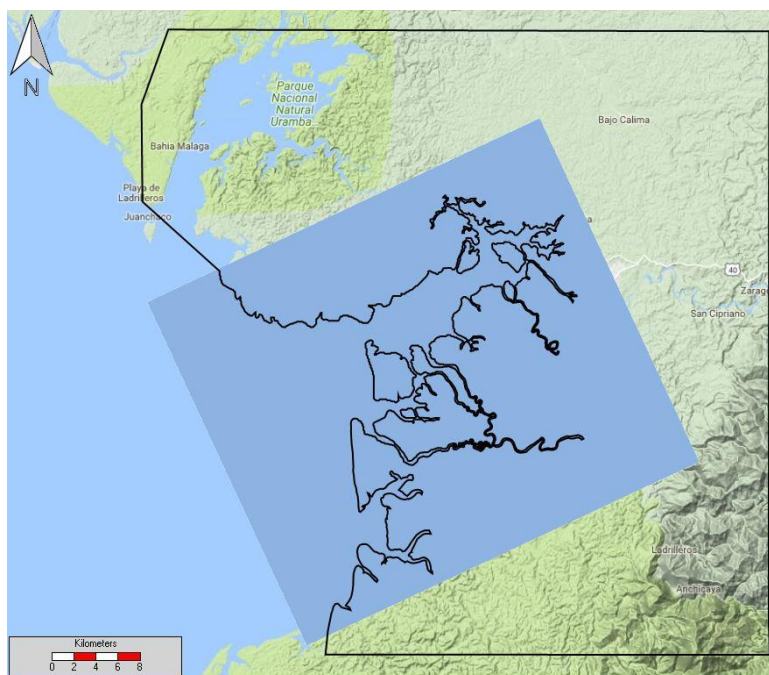


Figura 11. Esquemmatización de la línea de costa de la bahía de Buenaventura y malla de cálculo utilizada en el dominio de la simulación

7.2.2. Esquemmatización de la batimetría

La batimetría se obtuvo de las cartas náuticas 153, 730 y 306 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH); en estas, los niveles del lecho marino están dados con respecto al nivel de sicigia o el promedio de las bajamareas de las mareas vivas. Una vez introducidos los puntos de profundidades en el dominio del modelo, se generó la representación de la batimetría (ver Figura 12). MOHID garantiza, además de la

conversión de la nube de puntos, un método de interpolación entre puntos cercanos que para este caso fue el de triangulación, para completar los valores faltantes de profundidad dentro del dominio de la malla de cálculo.

7.2.3. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera fueron definidas en dos tipos: frontera abierta y frontera cerrada. La primera permite el flujo de propiedades y condiciones desde el exterior del dominio de cálculo (o malla de cálculo) hacia afuera del dominio y viceversa; la segunda, solo permite la entrada de propiedades y condiciones al dominio de cálculo (Leiton, 2018).

La variación de los niveles de marea en la frontera abierta (oceánica), se generó a partir del modelo de pronóstico de mareas FES2004 debido a que no se disponía de registros de campo en esta frontera. La generación de la marea astronómica consistió en la ubicación de 18 nodos, distribuidos de forma intercalada a lo largo de la frontera abierta y a partir de los cuales el modelo realiza la superposición de los principales componentes armónicos de la marea en la costa Pacífica (M_2 , S_2 , K_1 , K_2 , N_2 , O_1 , Q_1 , P_1 y M_4). MOHID realiza la extracción de la solución del Atlas de Mareas FES2004 y brinda los valores de las amplitudes y las fases de dichas componentes en los nodos o puntos de generación. Sin embargo, dichos valores debieron ser ajustados en el proceso de calibración para representar correctamente la onda de marea en el dominio. En la Figura 12 se presenta la ubicación de los nodos sobre la frontera abierta de mar.

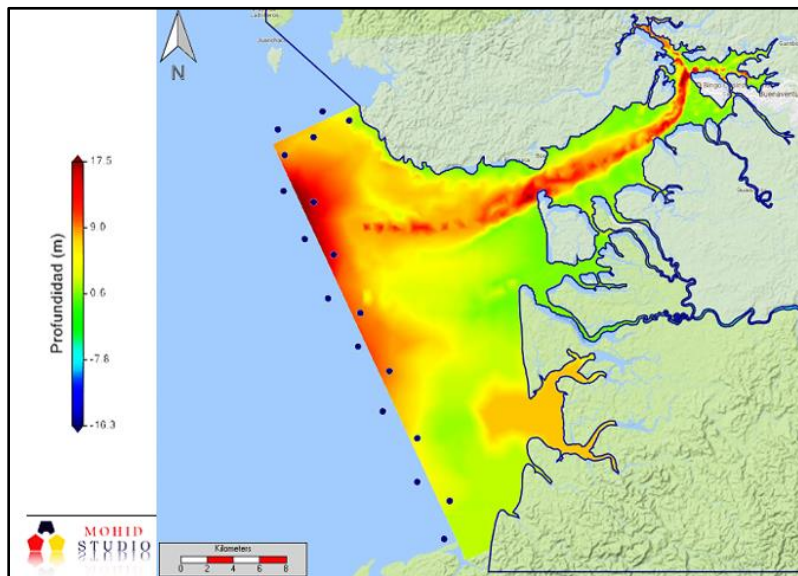


Figura 12. Batimetría y condiciones de frontera en la bahía de Buenaventura

Las fronteras internas del modelo correspondieron a los ríos y esteros, y se localizaron aguas arriba del límite de la influencia mareal. El modelo MOHID los representa como condiciones de borde con propiedades específicas que, para los fines de este estudio, correspondieron a temperatura, salinidad, concentración media de sólidos en suspensión y caudales medios. Dado que el prisma de marea en la Bahía (es decir, el volumen de agua salada que ingresa a

la Bahía durante un ciclo de marea) es muy alto, las descargas de los ríos pueden considerarse constantes a lo largo del tiempo para las condiciones de fronteras internas del modelo (Ramírez, 1995).

7.2.4. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales del modelo son necesarias en todo el dominio y en la frontera del dominio durante toda la simulación para que éste tenga una base en la cual iniciar los cálculos del sistema (Fernández, 2011). Es conveniente que al comienzo de una simulación el modelo pase un cierto tiempo de relajación, denominado “tiempo de calentamiento”, en el cual adquiere un régimen normal. En este tiempo de transición, los parámetros hidrodinámicos se irán adecuando progresivamente a sus valores reales (Montero, 1999).

De este modo y teniendo en cuenta que las diferentes simulaciones se realizaron iniciando en condición de pleamar o bajamar, se adoptó para el campo de velocidades como condición inicial una velocidad de flujo igual a cero en todo el dominio computacional, y un nivel de agua igual a 2.24 m.

Adicionalmente, se consideraron en la bahía de Buenaventura valores constantes de temperatura (26 °C) y de salinidad (28 PSU), teniendo en cuenta su condición de estuario bien mezclado y las variaciones mínimas de temperatura que presenta la zona. Las concentraciones iniciales de sólidos en suspensión en la Bahía fueron asignadas en el modelo a través de cajas, teniendo así una zonificación de la Bahía en tres partes: bahía exterior y bahía interior (zona norte y zona sur); a cada zona se le asignó un valor de concentración de sólidos suspendidos de 20, 25 y 30 mg/L respectivamente (ver Figura 13). Estos valores fueron extraídos de los resultados de la campaña de muestreo realizada por el Grupo de Investigación HIDROMAR (2017).

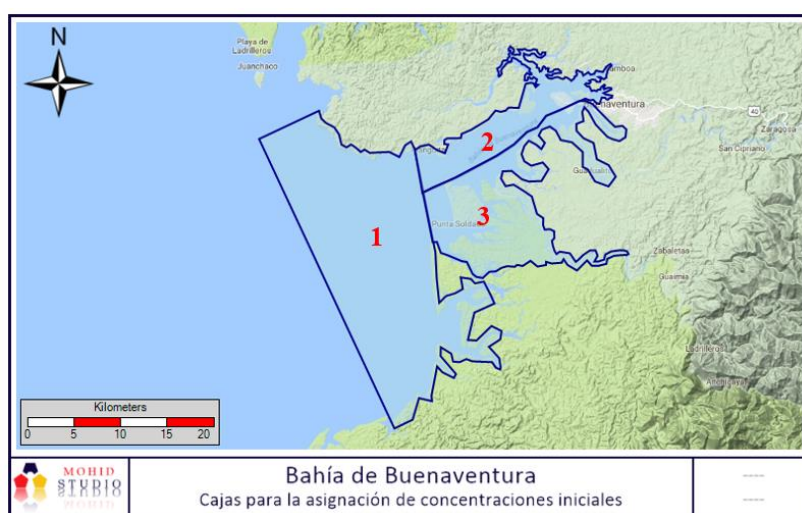


Figura 13. Cajas o “boxes” para la asignación de las condiciones iniciales (temperatura, salinidad y concentración de sólidos en suspensión) en la bahía de Buenaventura. Bahía exterior (1), bahía interior zona norte (2), bahía interior zona sur (3)

Para los ríos y esteros se consideraron condiciones iniciales de caudal, concentraciones de sólidos en suspensión y temperatura, que corresponden a las condiciones medias del flujo o el promedio de los registros históricos identificados en la caracterización (ver Tabla 13).

Tabla 13. Condiciones iniciales en la Bahía y en las descargas fluviales

Descarga fluvial	Caudal medio (m ³ /s)	Concentración de sólidos en suspensión (mg/L)	Temperatura del agua (°C)
Río Anchicayá	182	200	28
Rio Dagua	66	100	28
Estero Aguadulce	80	50	28
Estero San Antonio	20	100	28

7.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

7.3.1. Análisis de sensibilidad hidrodinámico

Los estudios previos de la bahía de Buenaventura (Giraldo, 2017; Leiton, 2018 y otros autores) han establecido que los parámetros más sensibles o influyentes en su hidrodinámica son el coeficiente de rugosidad y la viscosidad turbulenta horizontal. El análisis de sensibilidad consistió en una serie de simulaciones que se realizaron para dos días de modelación (14 y 15 de noviembre de 1997), en las cuales se fue variando sólo un parámetro a la vez. De este modo se determinó la influencia de cada uno de ellos en el comportamiento hidrodinámico de la Bahía. En la Tabla 14 y en la Figura 14 se presenta la ubicación geográfica de los puntos de control donde se obtuvieron los resultados de la modelación.

Tabla 14. Ubicación geográfica de los puntos de control o estaciones al interior de la bahía de Buenaventura

Estación	Coordenadas Geográficas (WGS 84)	
	Longitud (W)	Latitud (N)
La Bocana	77°11'04"	3°49'24"
Isla Cangrejo	77°06'03"	3°52'13"
Aguadulce	77°05'56"	3°54'54"
Delta Dagua	77°04'50"	3°51'59"
Muelle	77°04'45"	3°53'50"
Mareógrafo	77°03'41"	3°53'33"

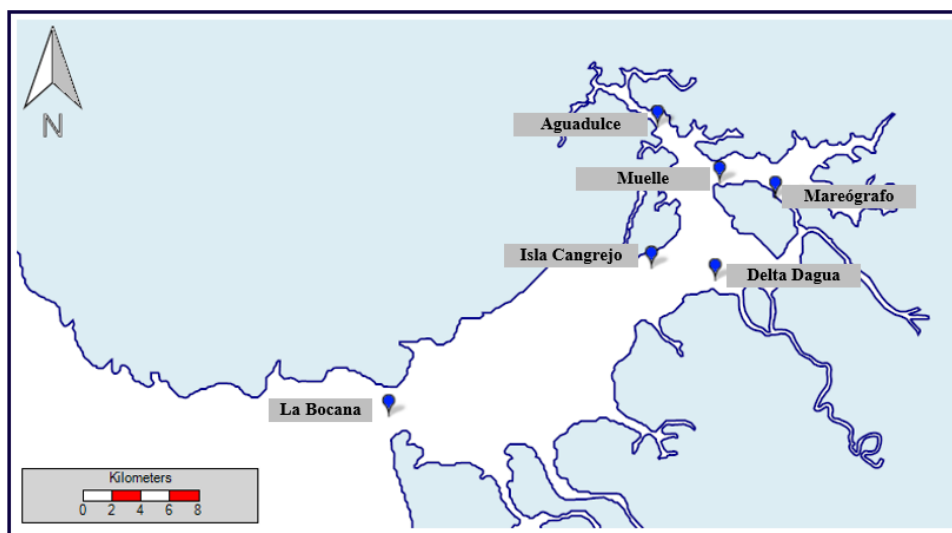
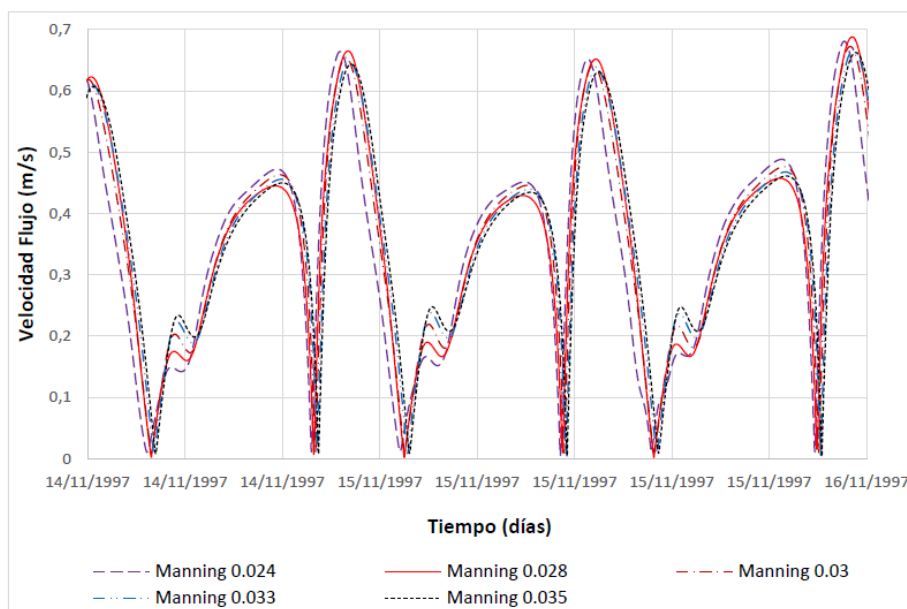


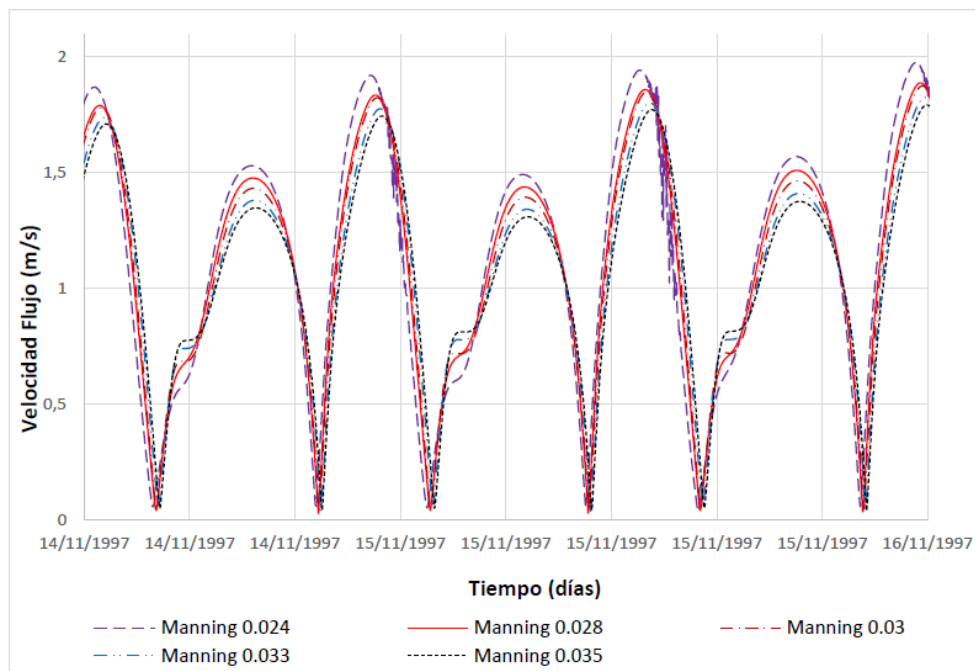
Figura 14. Puntos de control para el análisis de sensibilidad hidrodinámico

Análisis del coeficiente de rugosidad de Manning

De los estudios realizados por Giraldo (2017) y otros autores se concluyó que la rugosidad de Manning no es un parámetro sensible en lo que respecta a los niveles de marea en la bahía de Buenaventura; caso contrario ocurre con las velocidades de flujo porque se aprecian cambios moderados, en sus magnitudes. En los Gráficos 12 y 13 se presentan las velocidades obtenidas en las diferentes simulaciones realizadas en los puntos de control Muelle y La Bocana.



Gráfica 12. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: velocidades del flujo en el sitio de control Muelle



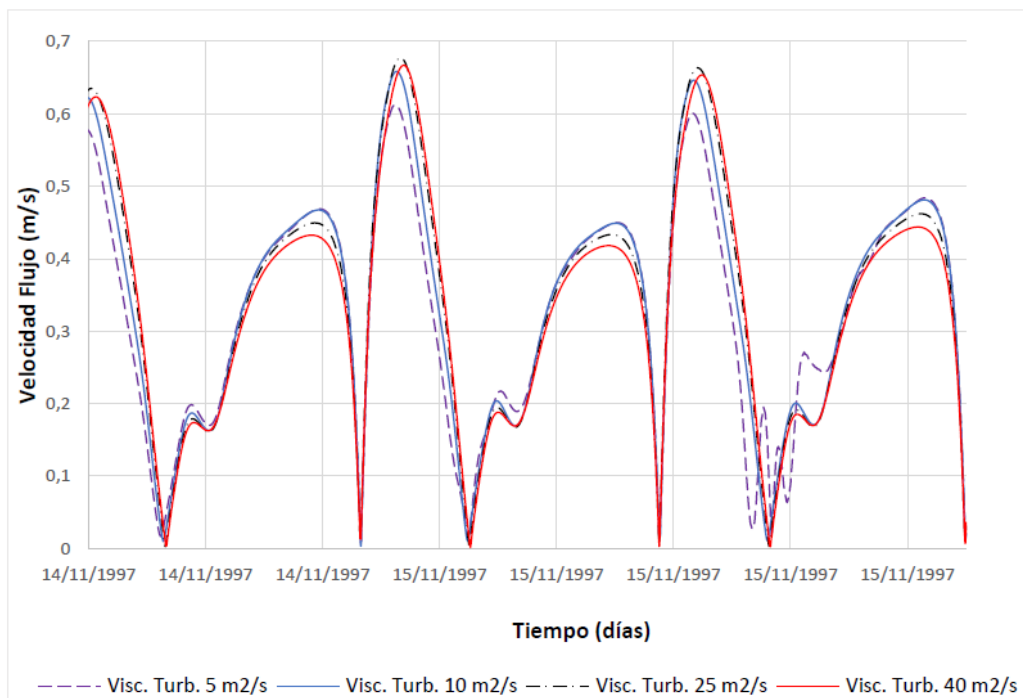
Gráfica 13. Análisis de sensibilidad para el coeficiente de rugosidad: velocidades del flujo en el sitio de control La Bocana

De acuerdo con los resultados, se puede establecer que, aunque la influencia sobre las velocidades de flujo es moderada, durante las corrientes máximas se observan diferencias de hasta 0.2 m/s, empleando rugosidades de Manning entre 0.024 y 0.035 $\text{s/m}^{1/3}$.

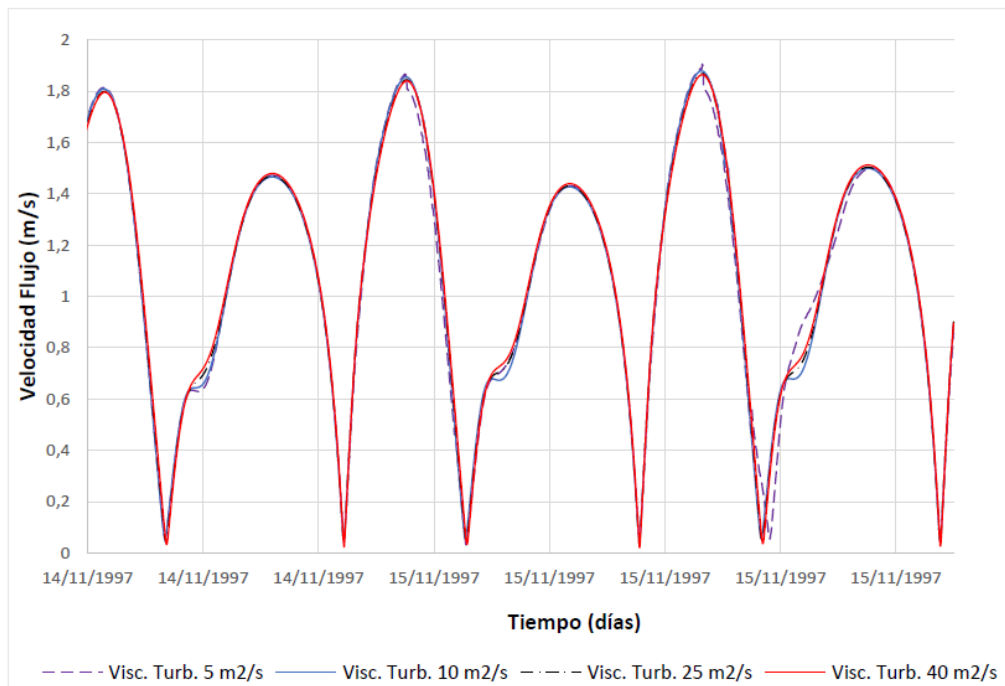
Análisis de la viscosidad turbulenta

Para determinar la influencia de la viscosidad turbulenta en el comportamiento hidrodinámico de la bahía de Buenaventura se realizaron simulaciones variando este parámetro entre 5 y 40 m^2/s . Los resultados se presentan observarse en las Gráficas 14 y 15 donde se evidencia un comportamiento inversamente proporcional entre la velocidad del flujo y la viscosidad turbulenta; sin embargo, estas variaciones son pequeñas, por lo cual se establece una sensibilidad moderada de las velocidades frente a los cambios en el parámetro de viscosidad turbulenta.

De igual manera, como sucedió con el coeficiente de rugosidad de Manning, los niveles de marea no resultaron ser sensibles ante las variaciones de la viscosidad turbulenta.



Gráfica 14. *Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Velocidades del flujo en el sitio de control Muelle*



Gráfica 15. *Análisis de sensibilidad para la viscosidad turbulenta: Velocidades del flujo en el sitio de control La Bocana*

7.3.2. Análisis de sensibilidad del modelo sedimentológico

El análisis de sensibilidad para el modelo sedimentológico se efectuó alrededor de varios parámetros descritos en anteriores estudios como los mayores responsables de las variaciones de los procesos de erosión y sedimentación en la bahía de Buenaventura.

De acuerdo con estudios anteriores en la Bahía, los parámetros que más inciden en los procesos sedimentológicos son las velocidades de sedimentación y erosión de los sedimentos, las tasas de sedimentación y erosión del lecho y la velocidad de caída de las partículas (Universidad del Valle, 1999; Burbano, 2017; Leiton, 2018).

El modelo MOHID realiza el cálculo de las velocidades críticas de sedimentación y erosión y de las respectivas tasas utilizando los datos ingresados al modelo de los esfuerzos cortantes críticos de sedimentación y erosión, valores que dependen a su vez, del diámetro medio de las partículas. En el proyecto realizado por el Grupo de Investigación HIDROMAR en la bahía de Buenaventura (2017) se llevó a cabo el análisis granulométrico de las muestras obtenidas de sólidos en suspensión en los diferentes puntos de medición (ver Figura 15). Los resultados de los diámetros medios (D50) característicos de estas muestras se presentan en la Tabla 15.



Figura 15. Ubicación espacial de los puntos de muestreo de la campaña de campo

Tabla 15. Tamaño medio de los sólidos en suspensión medidos en la bahía de Buenaventura

Punto de muestreo	Coordenadas Geográficas (decimales)		D50 (mm)
	Latitud (N)	Longitud (W)	
Piñal Norte	3.888	-77.0574	0.06
Río Anchicayá	3.8098	-77.1384	0.04
Río Dagua	3.8507	-77.0611	0.04
Canal-3	3.8407	-77.1438	0.28
Zona Muelle	3.8969	-77.0812	0.07
Bocana	3.8251	-77.1813	0.39
Punta Soldado	3.8179	-77.1799	0.03
Canal	3.8863	-77.0882	0.02
Canal-2	3.8807	-77.0877	0.20
PROMEDIO			0.12

En general, las partículas que presentan un diámetro medio cercano a 0.10 mm tendrán una velocidad de caída de 5 mm/s siguiendo la Ley de Stokes (van Rijn, 1993). Con esta información se calculó el esfuerzo cortante crítico de sedimentación (0.04 N/m^2). Ensayos realizados con lodos de lagos y estuarios en Holanda indican, en promedio, un valor para el esfuerzo cortante crítico de erosión de 0.15 N/m^2 (Winterwerp, 1999). Debido a que no se dispone actualmente de una teoría general para estimar este esfuerzo, en el presente estudio se adoptó este mismo valor.

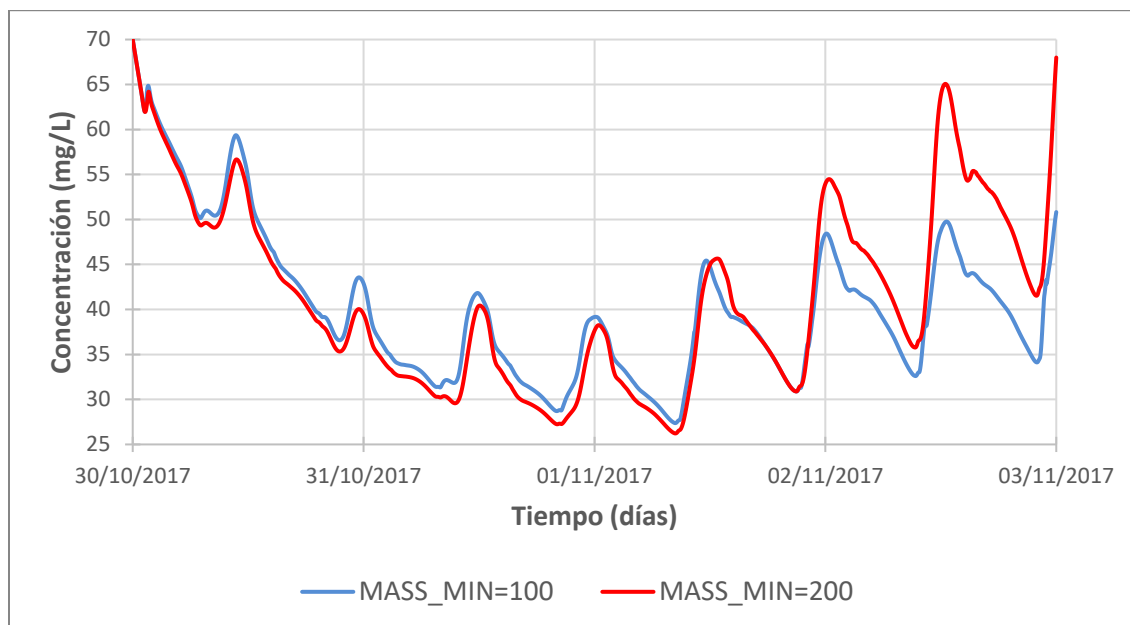
Para calcular la velocidad de sedimentación, el modelo permite escoger uno de dos enfoques diferentes: asignar una velocidad de sedimentación constante o calcularla en función de las concentraciones de sedimentos cohesivos. Para la Bahía se consideró más acertado emplear el segundo método, pues generalmente en medios salinos ocurre el fenómeno de floculación y se presenta la obstaculización de unas partículas con otras durante el proceso de sedimentación.

Otra variable que hizo parte del análisis de sensibilidad sedimentológico fue el coeficiente de erosión o de erodabilidad del lecho. Se ha estudiado su influencia tanto en las concentraciones de sedimentos en suspensión, como en las tasas de sedimentación y erosión en la bahía de Buenaventura (Universidad del Valle, 1999). Este parámetro depende de diferentes características del lecho como su composición mineralógica, el contenido de materia orgánica y la consolidación del lecho. De allí la complejidad de definir un valor que represente con buena aproximación los procesos en la Bahía. Sin embargo, los estudios realizados por la Universidad del Valle en los que se efectuó un análisis de sensibilidad para tres valores diferentes del coeficiente de erosión (0.005 , 0.010 y 0.020 g/s-m^2) demuestran la importancia de este parámetro en el proceso de modelación. Se adoptó finalmente un coeficiente de erosión de 0.02 g/s-m^2 teniendo en cuenta los resultados de estudios anteriores (Burbano, 2017; Leiton, 2018).

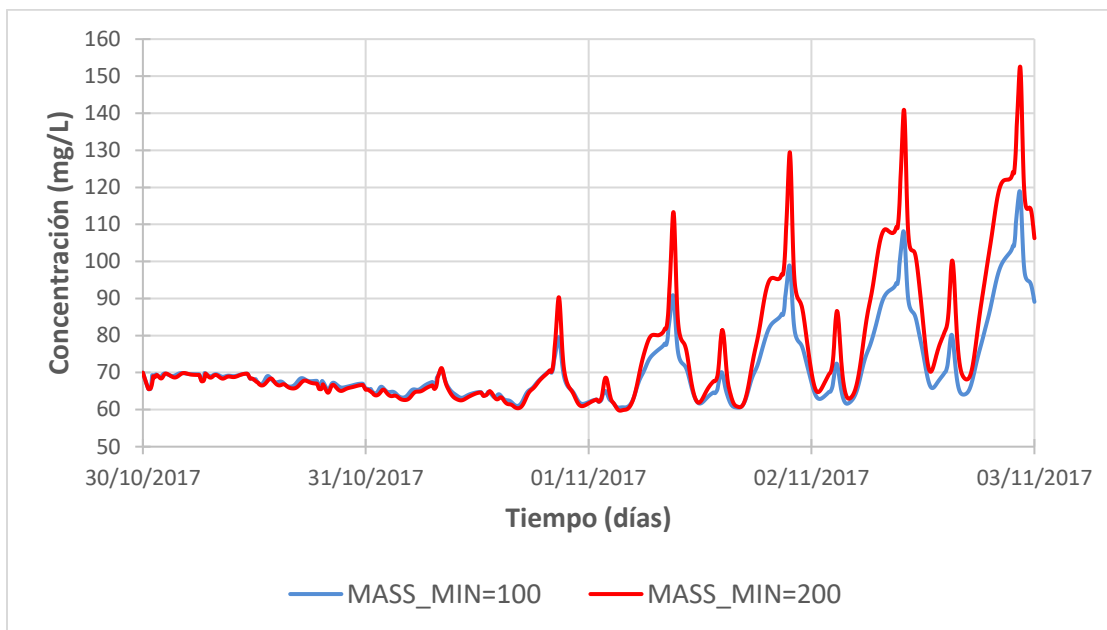
Análisis de la masa mínima de sedimentos

La masa mínima de sedimentos es un parámetro del módulo interfaz sedimento-agua de MOHID y representa una cantidad finita de sedimentos susceptibles a interactuar en toda la columna de agua y con el lecho. A este parámetro se le puede asignar cualquier valor entero. Un estudio realizado para el estuario de Tagus en Portugal demostró que cuando la masa mínima de sedimentos toma un valor de 0 kg/m^2 , el modelo es incapaz de representar de forma correcta los procesos de erosión y sedimentación; Se obtuvieron buenos resultados empleando un valor de 100 kg/m^2 (Franz *et al.*, 2014).

En este estudio se realizaron dos simulaciones empleando valores de la masa mínima de sedimentos de 100 y 200 kg/m^2 , considerando en las descargas los caudales máximos y las concentraciones máximas de sólidos en suspensión. Además, las condiciones iniciales en la Bahía para los sólidos en suspensión se aumentaron a 65, 70 y 75 mg/L para cada una de las zonas definidas en las cajas del dominio. El periodo simulado fue del 30 de octubre al 3 de noviembre de 2017. Los resultados de este análisis de sensibilidad se presentan en los Gráficos 16 y 17 para las estaciones Zona Muelle y La Bocana, respectivamente.



Gráfica 16. Análisis de sensibilidad para la masa mínima de sedimentos: influencia en la concentración de sólidos en suspensión en el punto de control Zona Muelle



Gráfica 17. *Análisis de sensibilidad para la masa mínima de sedimentos: influencia en la concentración de sólidos en suspensión en el punto de control de La Bocana*

En las anteriores gráficas se puede observar que la masa mínima de sedimentos es un parámetro muy sensible para las concentraciones de sólidos en suspensión en la bahía de Buenaventura. Una vez superado el tiempo de calentamiento del modelo (después del 31 de octubre), se evidencia una diferencia superior a 20 mg/L entre las concentraciones obtenidas en las dos simulaciones.

7.4. CALIBRACIÓN HIDROSEDIMENTOLÓGICA

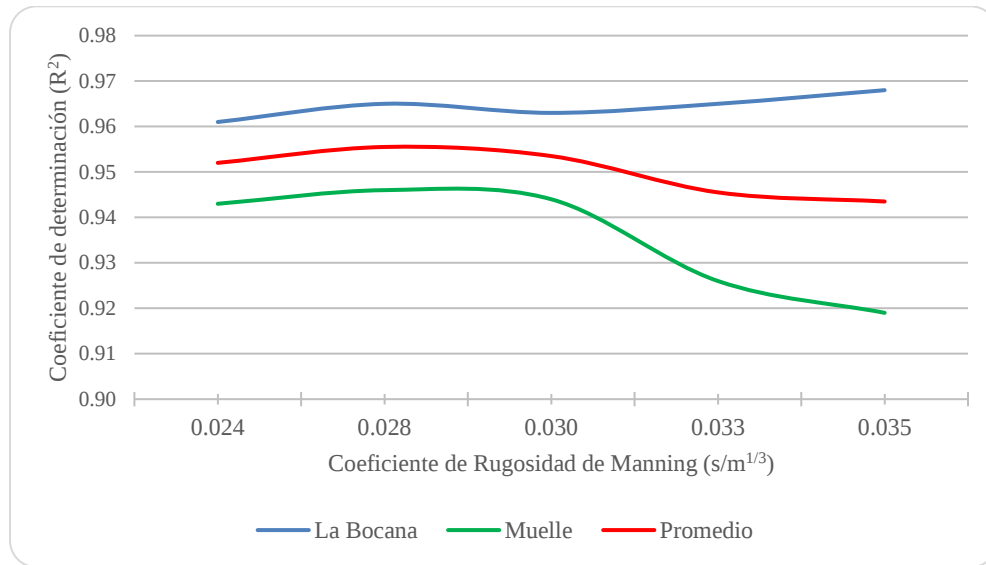
7.4.1. Calibración Hidrodinámica

La calibración hidrodinámica del modelo se llevó a cabo con base en el estudio realizado por Giraldo (2017). A partir del establecimiento de los componentes armónicos más adecuados para la frontera de mar se ajustaron gradualmente el coeficiente de rugosidad de Manning y la viscosidad turbulenta. También se revisaron, cuando el modelo lo requirió, los niveles batimétricos en los sectores próximos a la frontera de mar pues se presentaban inestabilidades numéricas en esos sectores. La calibración hidrodinámica se efectuó con base en el registro de mareas medidas en noviembre de 1997 por la Universidad del Valle y el Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico. Una viscosidad turbulenta de $1 \text{ m}^2/\text{s}$ permitió la mejor representación de los patrones de flujo en toda la Bahía en las simulaciones realizadas.

Para elegir el coeficiente de rugosidad de Manning, se realizaron varias simulaciones en las que se impusieron diferentes valores para este coeficiente. Se hizo un análisis de correlación entre los niveles de marea medidos y los calculados por el modelo en dos sitios de interés (el Muelle y La Bocana). En la Tabla 16 y en la Gráfica 18 se presentan los resultados obtenidos del coeficiente de determinación en los puntos de control, incluyendo los valores promedio.

Tabla 16. Valores del coeficiente de determinación para diferentes coeficientes de rugosidad de Manning

Estación	n = 0.024	n = 0.028	n = 0.030	n = 0.033	n = 0.035
	Coeficiente de determinación (R²)				
La Bocana	0.961	0.965	0.963	0.965	0.968
Muelle	0.943	0.946	0.944	0.926	0.919
Promedio	0.952	0.956	0.954	0.946	0.944

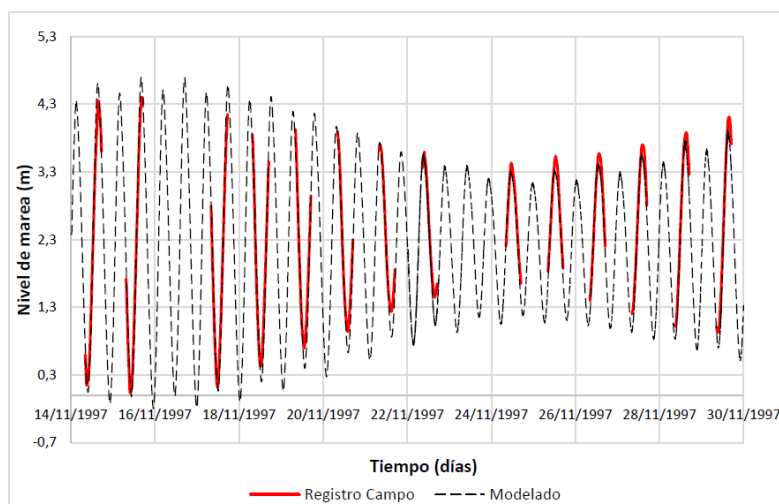


Gráfica 18. Coeficiente de determinación de la relación entre los niveles de mareas medidos y los niveles calculados para diferentes coeficientes de rugosidad de Manning

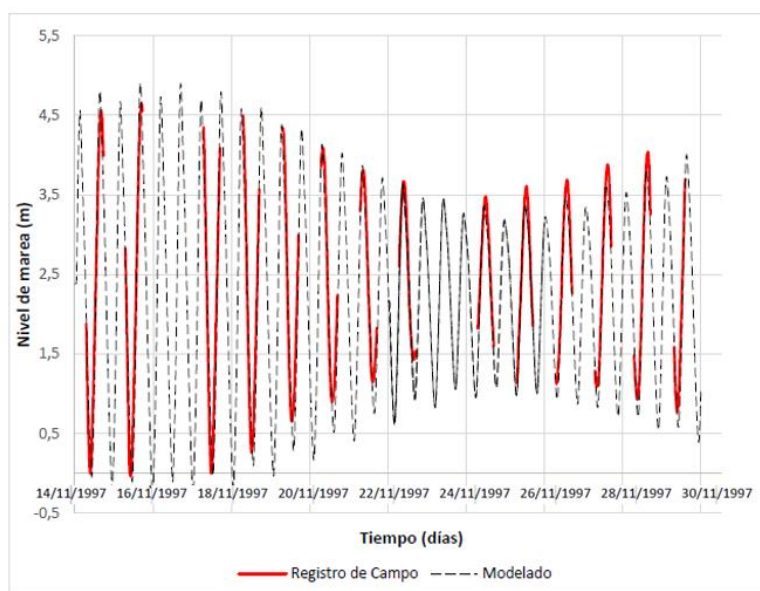
El máximo coeficiente de determinación en la curva correspondiente a los valores promedio se obtuvo para un factor de Manning de 0.028 s/m^{1/3}, siendo este el seleccionado por proyectar una mayor correlación entre los niveles de marea calculados por el modelo y los registrados de las mediciones de campo.

En las Gráficas 19 y 20 se presentan los niveles de marea medidos y calculados en las estaciones de La Bocana y Muelle.

Los resultados permiten afirmar que el modelo representa aceptablemente la hidrodinámica de la Bahía, exhibiendo dos pleamares y dos bajamares en un mismo día, con un periodo aproximado de 12 horas 25 minutos. Además, los niveles del agua simulados se aproximan a los registros de campo. Se encontró que, entre los niveles de marea modelados y medidos, la diferencia máxima fue de cerca de 0.30 m durante la bajamar del día 22/11/1997, lo cual representa una buena aproximación, al considerar que el rango medio de la marea es de 3.11 m y que las profundidades del agua en la Bahía oscilan entre los 10 m y los 20 m.



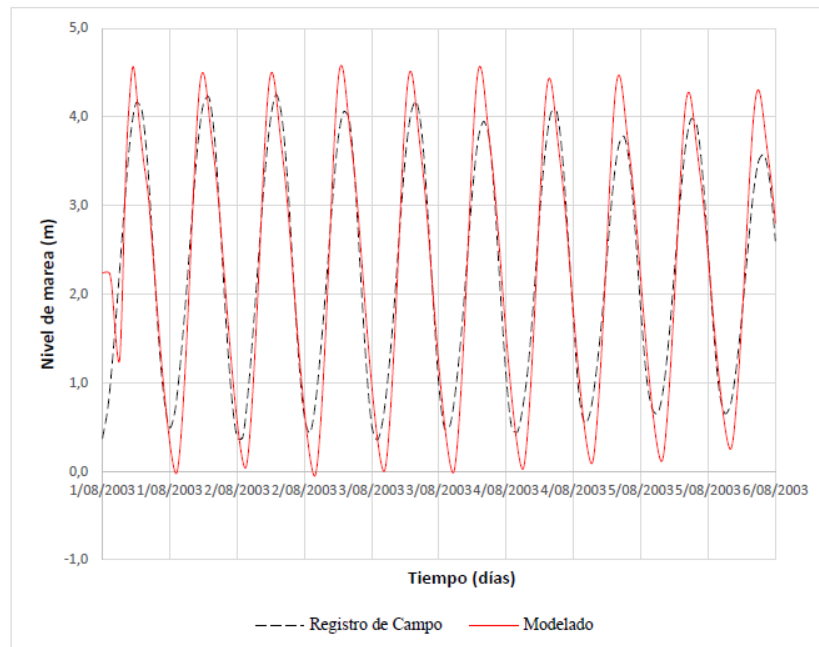
Gráfica 19. Calibración del modelo hidrodinámico. Niveles de marea en el punto de control La Bocana



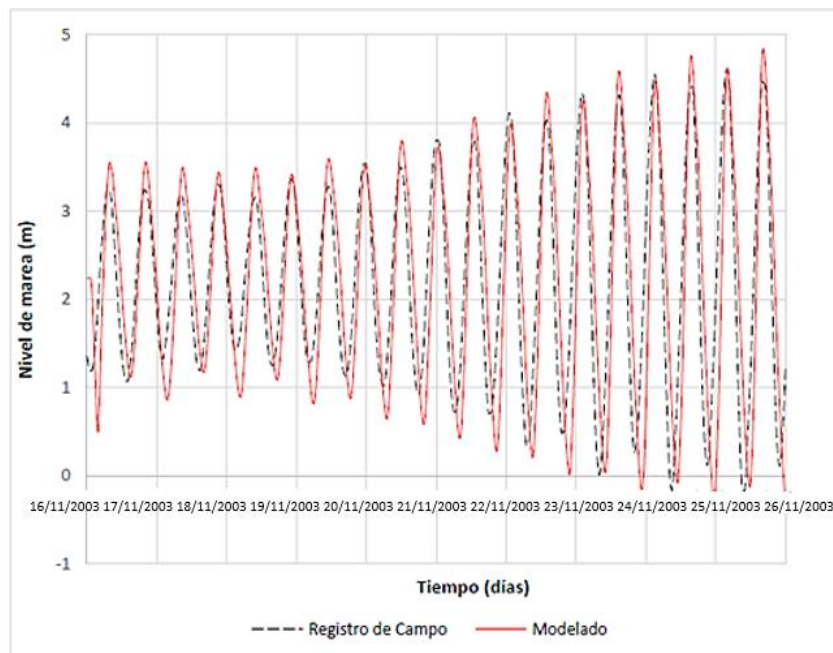
Gráfica 20. Calibración del modelo hidrodinámico. Niveles de marea en el punto de control Muelle

7.4.2. Validación del Modelo Hidrodinámico

La validación del modelo hidrodinámico se realizó para los periodos 01-06 de agosto y 16-26 de noviembre de 2003. En las Gráficas 21 y 22 se presentan los niveles de marea medidos y calculados para el sitio de control Mareógrafo para los dos periodos indicados.



Gráfica 21. Validación del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Mareógrafo (01/08/2003 – 06/08/2003)



Gráfica 22. Validación del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el sitio de control Mareógrafo (16/11/2003 – 26/11/2003)

Los resultados obtenidos se consideran bastante aceptables puesto que las diferencias entre los niveles simulados y registrados en campo son, en promedio, de alrededor de 0.30 m.

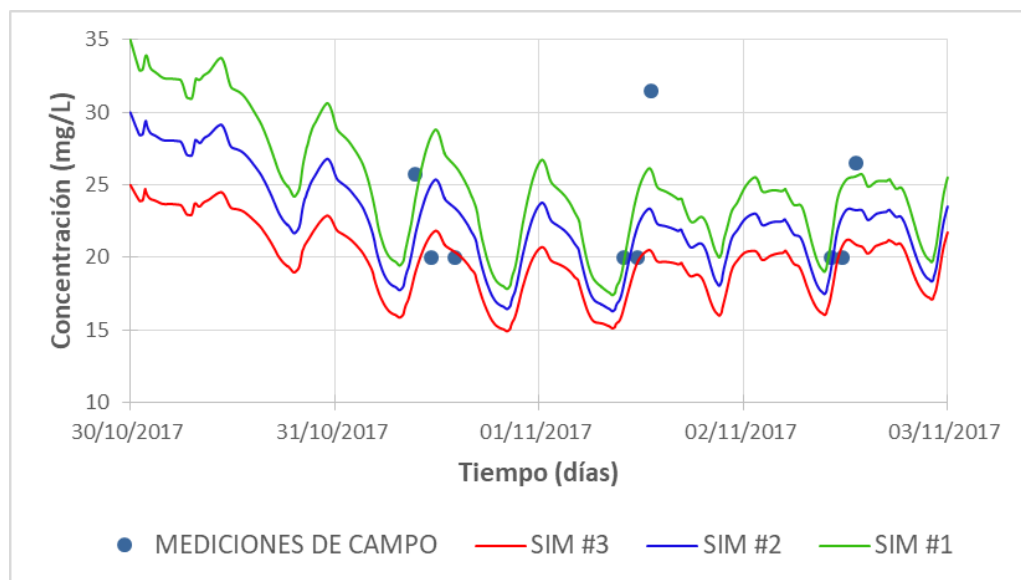
7.4.3. Calibración Sedimentológica

Dadas las condiciones iniciales adecuadas para el estudio de los procesos de transporte de los sólidos en suspensión en la Bahía, se realizaron una serie de simulaciones durante 4 días (30/10/17 – 03/11/17) para lograr el mejor ajuste posible entre los valores de concentraciones de SST medidos en la campaña de campo realizada por el Grupo HIDROMAR y los resultados generados por el modelo para este mismo parámetro. En la Tabla 17 se presenta el consolidado de la información suministrada como línea base para la calibración.

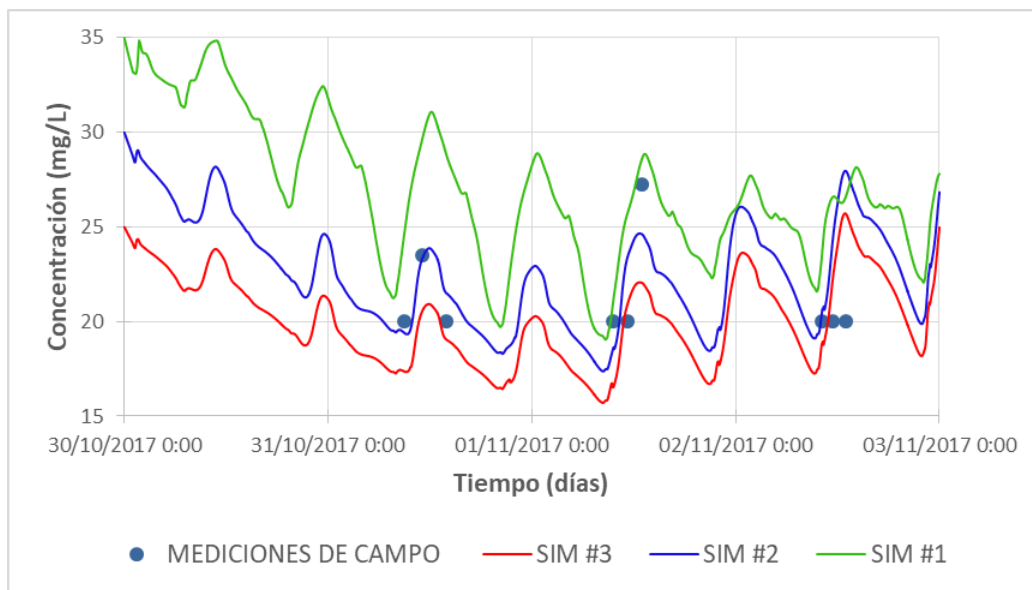
Tabla 17. Condiciones iniciales y variabilidad en las concentraciones asignadas a las cajas, en las diferentes simulaciones realizadas

	PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Línea Base	Esfuerzo cortante crítico de erosión	0.15	N/m ²
	Esfuerzo cortante crítico de sedimentación	0.04	N/m ²
	Coefficiente de erosión	0.020	g/s-m ²
	Masa mínima	100	kg/ m ²
Condiciones Iniciales en las Cajas	Concentración de sólidos en suspensión en la bahía de Buenaventura	SIM #1 SIM #2 SIM #3	20, 35, 40 20, 30, 35 20, 25, 30
			mg/L mg/L mg/L

Los resultados obtenidos de las concentraciones de sólidos suspendidos en dos puntos de control de la Bahía, se presentan en las Gráficas 23 y 24. En los puntos de control denominados Canal y Zona de Muelle, las concentraciones iniciales asignadas para los diferentes sectores de la Bahía influyen de manera significativa en las concentraciones calculadas. Los mejores resultados se obtuvieron en la simulación 3.



Gráfica 23. Calibración del modelo sedimentológico. Concentraciones de SST en el punto de control Canal (30/10/17 – 03/11/17)



Gráfica 24. Calibración del modelo sedimentológico. Concentraciones de SST en el punto de control Zona Muelle (30/10/17 – 03/11/17)

8. PLANTEAMIENTO, MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE ESCENARIOS PARA EL ESTUDIO DE LOS SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES EN LA BAHÍA INTERNA DE BUENAVENTURA

8.1. CONSTRUCCIÓN DE ESCENARIOS

El planteamiento de los escenarios de calidad del agua, en lo concerniente a los vertimientos de agua residual doméstica, se efectuó teniendo como referente las proyecciones y acciones que pretenden realizarse en el Distrito de Buenaventura a partir de la implementación del Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado y el PSMV elaborado por Vallecaucana de Aguas en convenio con la Unión Temporal Aquapozos.

En la proyección de los vertimientos se tuvo en cuenta el crecimiento poblacional, la infiltración de agua a través de las redes de alcantarillado, la influencia mareal, las zonas de expansión, las PTAR y el emisario submarino. En todos los escenarios se utilizaron las concentraciones máximas de los SST presentadas en la caracterización del ARD de Buenaventura y se ingresaron en el modelo las series de caudales medidos en cada vertimiento.

No obstante, cada escenario presenta particularidades relacionadas con las concentraciones de sólidos en suspensión asignadas a las descargas fluviales, las alternativas planteadas para lograr la recolección de los vertimientos en colectores generales y el nivel de tratamiento una vez construidas las dos PTAR proyectadas y el emisario submarino. En la Tabla 18 se especifican las condiciones de los escenarios modelados. Cabe destacar que en el escenario #4 el análisis se centró en los procesos de transporte de los sólidos en suspensión utilizando el método Lagrangiano.

Tabla 18. Escenarios de simulación para el estudio de los procesos de transporte de los SST en la bahía interna de Buenaventura

ESCENARIO	AÑO	Nº DE VERTIMIENTOS	GRADO DE TRATABILIDAD
Escenario 1	2016	6	Sin tratamiento
Escenario 2	2047	6	Sin tratamiento
Escenario 3	2047	2	Sin tratamiento
Escenario 4	2047	1	Pretratamiento

8.1.1. Escenario 1 (año 2016): alternativa con seis sistemas de alcantarillado independientes

En la modelación de la condición actual se tuvo como línea base el año 2016, puesto que las caracterizaciones de los vertimientos fueron realizadas en el primer semestre de ese año y, además, la información más completa relacionada con redes de drenaje y sitios de vertido se tiene para este año.

El número de descargas de agua residual doméstica de Buenaventura en el año 2016 superaba los 700 puntos; no obstante, realizar una modelación para el número total de vertimientos resultaba inviable para los objetivos de este estudio, además de la falta de información sobre el destino final del agua vertida en numerosos puntos. Por esta razón, se optó por considerar como línea base una de las primeras alternativas planteadas en el PSMV, la cual consiste en la unión de los sistemas independientes de drenaje urbano y del trazado de interceptores que en la actualidad tiene Buenaventura. En la Figura 16 se presenta dicha configuración.

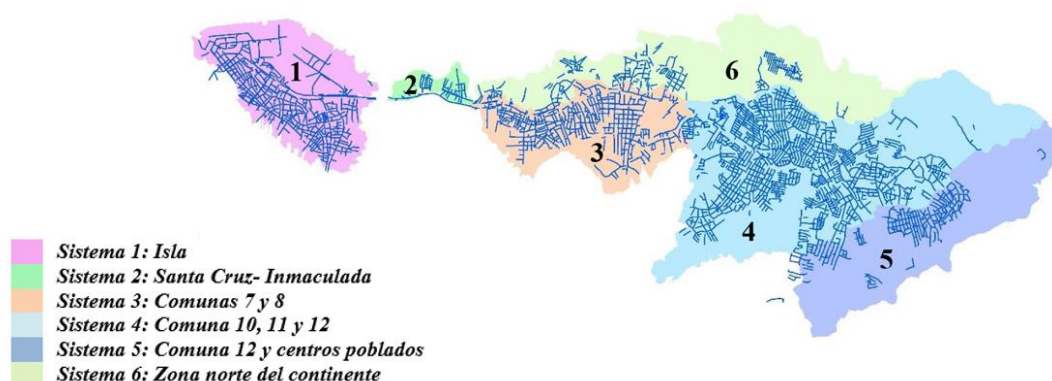


Figura 16. Alternativa con seis sistemas de alcantarillado independientes

Fuente: Adaptado de Vallecaucana de Aguas – Unión Temporal Aquapozos (2017)

La ubicación geográfica, los caudales de diseño, el sitio de descarga y la concentración máxima de SST de cada vertimiento, se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Identificación de vertimientos correspondientes al Escenario 1 (año 2016)

Nombre del vertimiento	Coordenadas Geográficas (decimales)		Caudal (L/s)	Concentración máxima de SST (mg/L)	Sitio de descarga
	Longitud (W)	Latitud (N)			
Sistema 1	-77.0591	3.8722	459.40	150	Bahía
Sistema 2	-77.0543	3.8860	9.60	176	Bahía
Sistema 3	-77.0339	3.8701	301.73	393	Estero San Antonio
Sistema 4	-77.0209	3.8707	776.33	486	Estero San Antonio
Sistema 5	-77.0020	3.8500	95.24	486	Estero San Antonio
Sistema 6	-77.0262	3.8894	102.44	490	Estero Aguacate

En la Figura 17 se presenta la localización de los puntos de vertimiento en el dominio de la simulación.

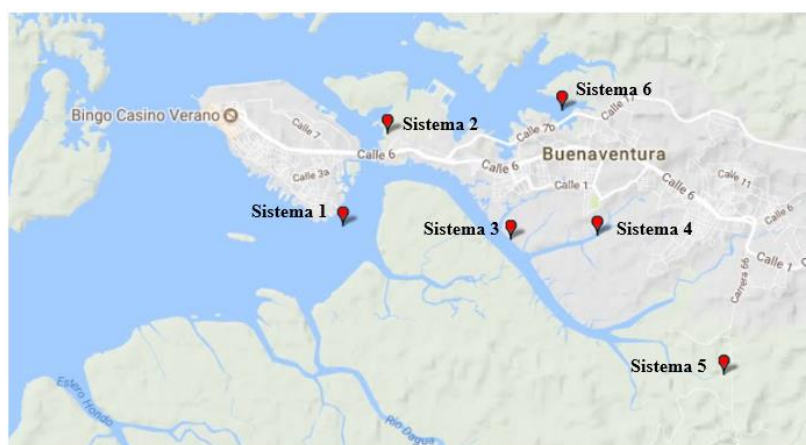


Figura 17. Localización de los seis puntos de vertimiento de sistemas de alcantarillado independientes para el Escenario 1 (año 2016)

Especificando las condiciones presentadas en la Tabla 21, se modelaron 15 días del 2 al 17 de febrero del año 2016. Durante estos días, Analquim Limitada llevó a cabo parte de la campaña de campo y análisis de muestras provenientes de la bahía de Buenaventura.

8.1.2. Escenario 2 (año 2047): alternativa con seis sistemas de alcantarillado independientes

Se realizó la modelación para el mismo periodo de días en el mes de febrero, pero proyectando las cargas contaminantes asociadas a cada sistema de vertimiento al año 2047, considerando entonces que no habrá en ese año un tratamiento del agua residual doméstica y que ésta seguirá siendo vertida a través de los seis colectores. Lo anterior se llevó a cabo utilizando las proyecciones de población y consumos en el marco de la formulación del

PSMV para Buenaventura. En este plan se tuvo en cuenta lo estipulado en el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000), Resolución 1096 y la Resolución 2320 del 27 de noviembre de 2009 del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. La ubicación de los seis sistemas de drenaje se conserva idéntica a la del Escenario 1. Las principales variaciones en el Escenario 2, fueron los caudales proyectados de acuerdo con el crecimiento poblacional y consecuentemente, el incremento de los consumos esperados 30 años después (2047). En la Tabla 20 se presentan las características de los vertimientos para el Escenario 2 de modelación.

Tabla 20. Identificación de vertimientos correspondientes al Escenario 2 (año 2047)

Nombre del vertimiento	Coordenadas Geográficas (decimales)		Caudal (L/s)	Concentración máxima de SST (mg/L)	Sitio de descarga
	Longitud (W)	Latitud (N)			
Sistema 1	-77.0591	3.8722	574	150	Bahía
Sistema 2	-77.0543	3.8860	12	176	Bahía
Sistema 3	-77.0339	3.8701	377	393	Estero San Antonio
Sistema 4	-77.0209	3.8707	970	486	Estero San Antonio
Sistema 5	-77.0020	3.8500	119	486	Estero San Antonio
Sistema 6	-77.0262	3.8894	128	490	Estero Aguacate

8.1.3. Escenario 3 (año 2047): alternativa con dos sistemas de alcantarillado independientes

En este escenario, también al año 2047, se evaluó la posibilidad de recolectar el agua residual doméstica proveniente de Buenaventura en dos sistemas de alcantarillado independientes. Uno de ellos descargando en la Bahía cerca de la comuna 3, y el otro vertiendo el agua residual en el estero San Antonio. La agrupación de dichos sistemas de drenaje se presenta en la Figura 18.

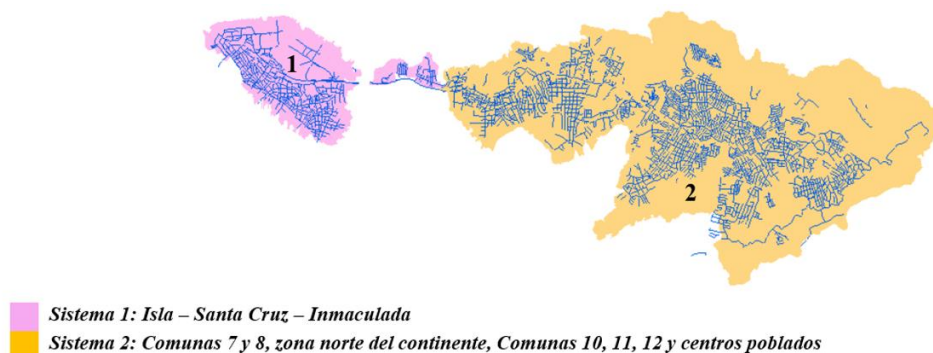


Figura 18. Alternativa con dos sistemas de alcantarillado independientes

Fuente: Adaptado de Vallecaucana de Aguas – Unión Temporal Aquapozos (2017)

La ubicación geográfica, el caudal de diseño, el sitio de descarga y la concentración máxima de SST de cada vertimiento se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. Identificación de vertimientos correspondientes al Escenario 3 (año 2047)

Nombre del vertimiento	Coordenadas Geográficas (decimales)		Caudal (L/s)	Concentración máxima de SST (mg/L)	Sitio de descarga
	Longitud (W)	Latitud (N)			
Sistema 1	-77.0591	3.8722	586	176	Bahía
Sistema 2	-77.0339	3.8701	1595	490	Estero San Antonio

En la Figura 19 se presenta la localización de los puntos de vertimiento en el dominio de la simulación.



Figura 19. Localización de los dos puntos de vertimiento de los sistemas de alcantarillado independientes para el Escenario N°3 (año 2047)

8.1.4. Escenario 4 (año 2047): sistema de alcantarillado con dos plantas de tratamiento de agua residual doméstica y un emisario submarino

En el marco del PSMV y el Plan Maestro de Alcantarillado del Distrito de Buenaventura se espera para el año 2047 contar con dos plantas de tratamiento de agua residual doméstica (PTAR's Lleras y Olímpico), con tratamiento preliminar o secundario según se establezca posteriormente. Para este escenario se consideró el funcionamiento de ambas PTAR, cuyos efluentes son recolectados por el emisario y llevados a la bahía de Buenaventura. El vertimiento es descargado a través de una serie de difusores que promueven la dispersión de los contaminantes residuales y de este modo se reducen sus concentraciones. En la Figura 20 se presenta el trazado proyectado del emisario en su paso por las dos PTAR, hasta llegar al punto de descarga en la Bahía, al sur de la isla Cangrejo.

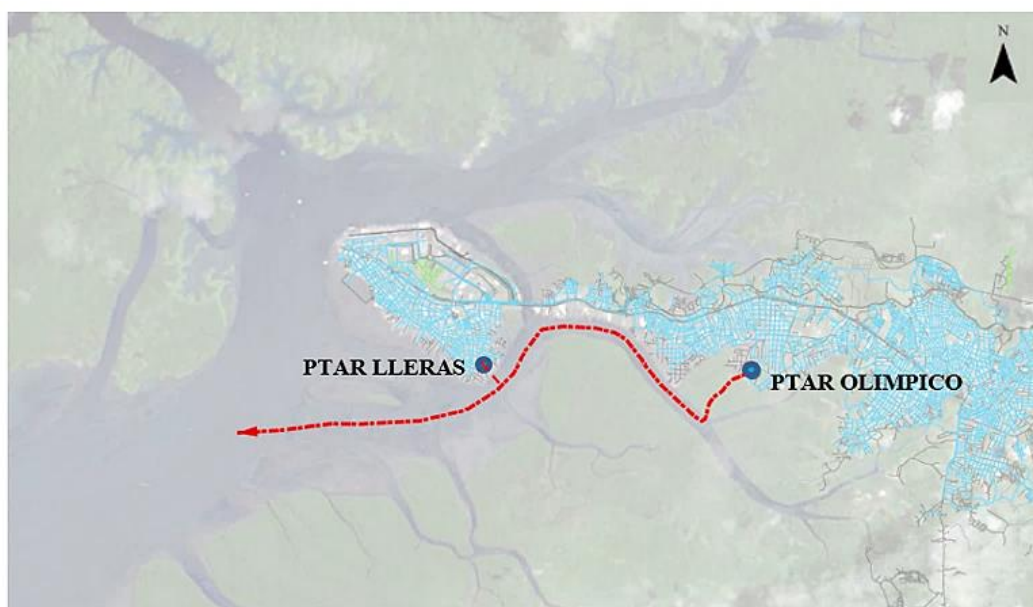


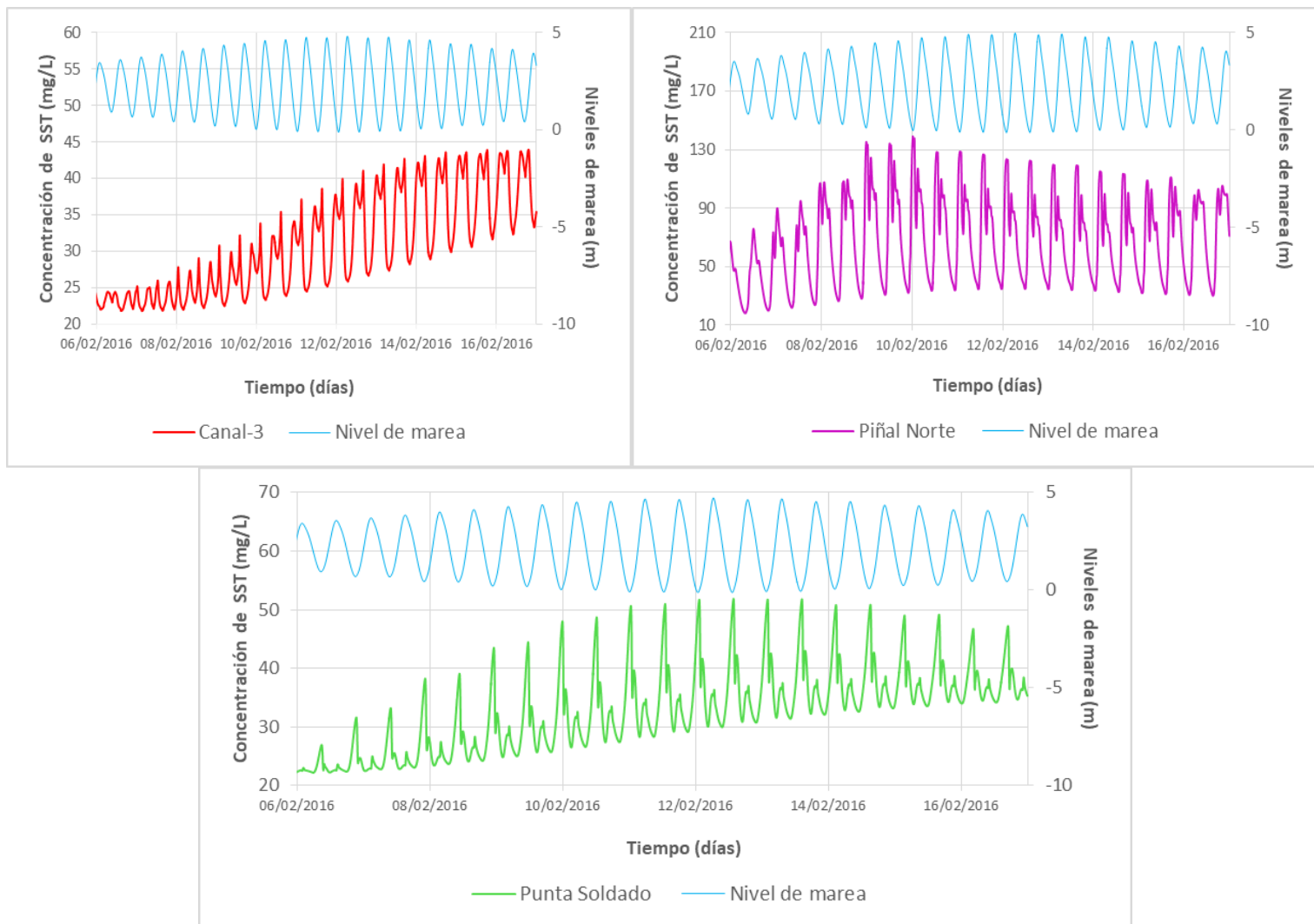
Figura 20. Recorrido del emisario submarino en la bahía de Buenaventura y localización de las PTAR Lleras y Olímpico

En este escenario se buscó modelar el desplazamiento de las partículas sólidas emitidas por el emisario durante un ciclo cuasi-quincenal de mareas y bajo condiciones medias de descarga en los tributarios y esteros. Este procedimiento se realizó a través de la implementación de un módulo de trazadores lagrangianos en MOHID, el cual permitió observar el desplazamiento neto de las partículas emitidas por el emisario, considerando un vertimiento puntual. Las partículas fueron caracterizadas en el módulo lagrangiano como sedimentos cohesivos susceptibles a los fenómenos de advección y dispersión. Adicionalmente, se ingresó una concentración inicial de 150 mg/L para el efluente del emisario, teniendo en cuenta que este es el valor esperado para el agua residual doméstica que ha sido expuesta a un pretratamiento en las PTAR.

8.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE ESCENARIOS

8.2.1. Escenario 1 (año 2016): alternativa con seis sistemas de alcantarillado independientes

Los resultados de la simulación en las estaciones Piñal Norte, Canal-3 y Punta Soldado de la concentración de sólidos en suspensión se presentan en la Gráfica 25.



Gráfica 25. Variación de las concentraciones de SST en los puntos de control Canal-3, Piñal Norte y Punta Soldado para el Escenario 1 (año 2016 y seis sistemas de alcantarillado independientes)

En las Figuras 21A y 21B se presenta la distribución espacial de los SST en el instante de bajamar viva para dos condiciones en las descargas de tributarios y esteros: una en la que las concentraciones de SST corresponden a los valores medios y otra en la cual los caudales vertidos presentan una concentración de 0 mg/L de sólidos en suspensión. Esto último se realizó con el propósito de estimar la influencia de los vertimientos de ARD en términos de las concentraciones de SST en la Bahía. También se presenta el patrón de flujo en la Bahía.

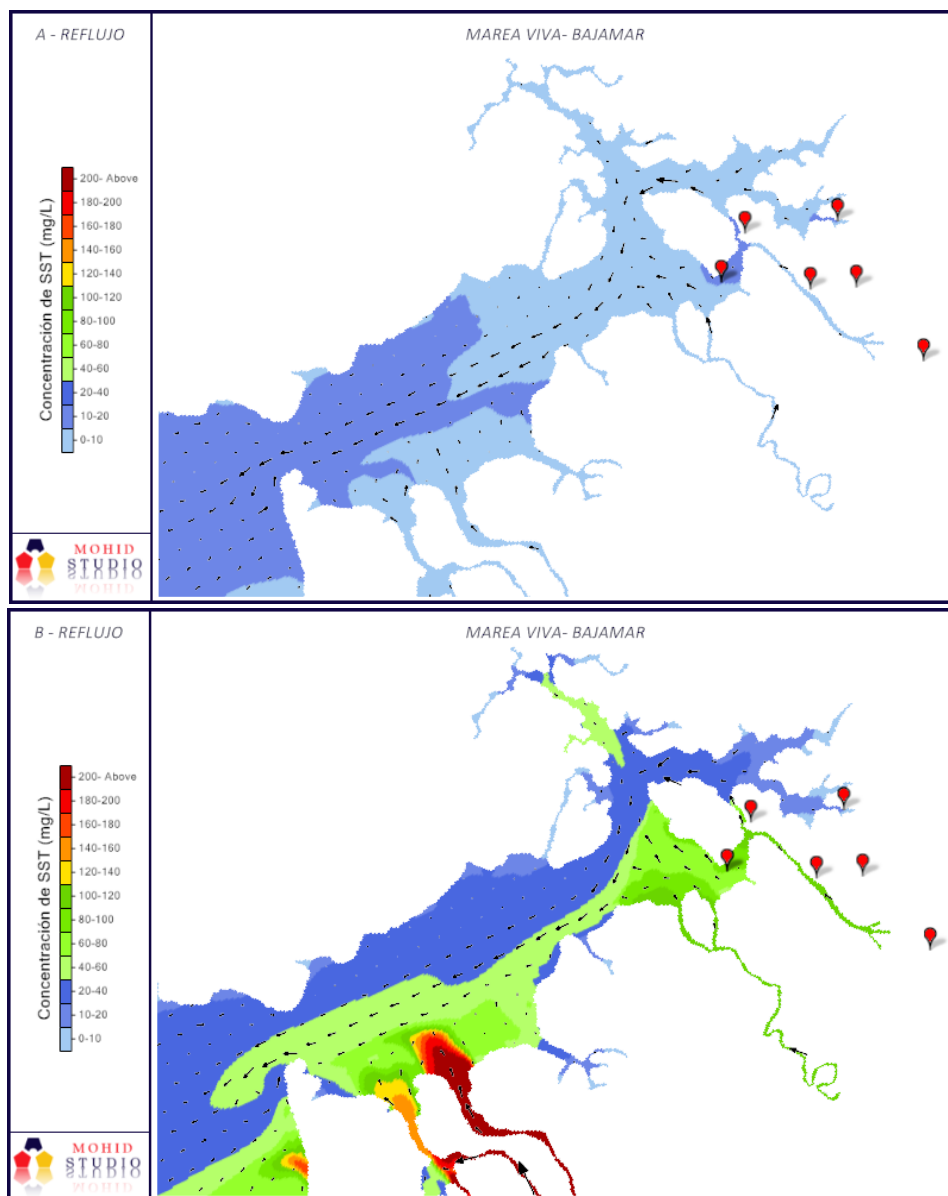
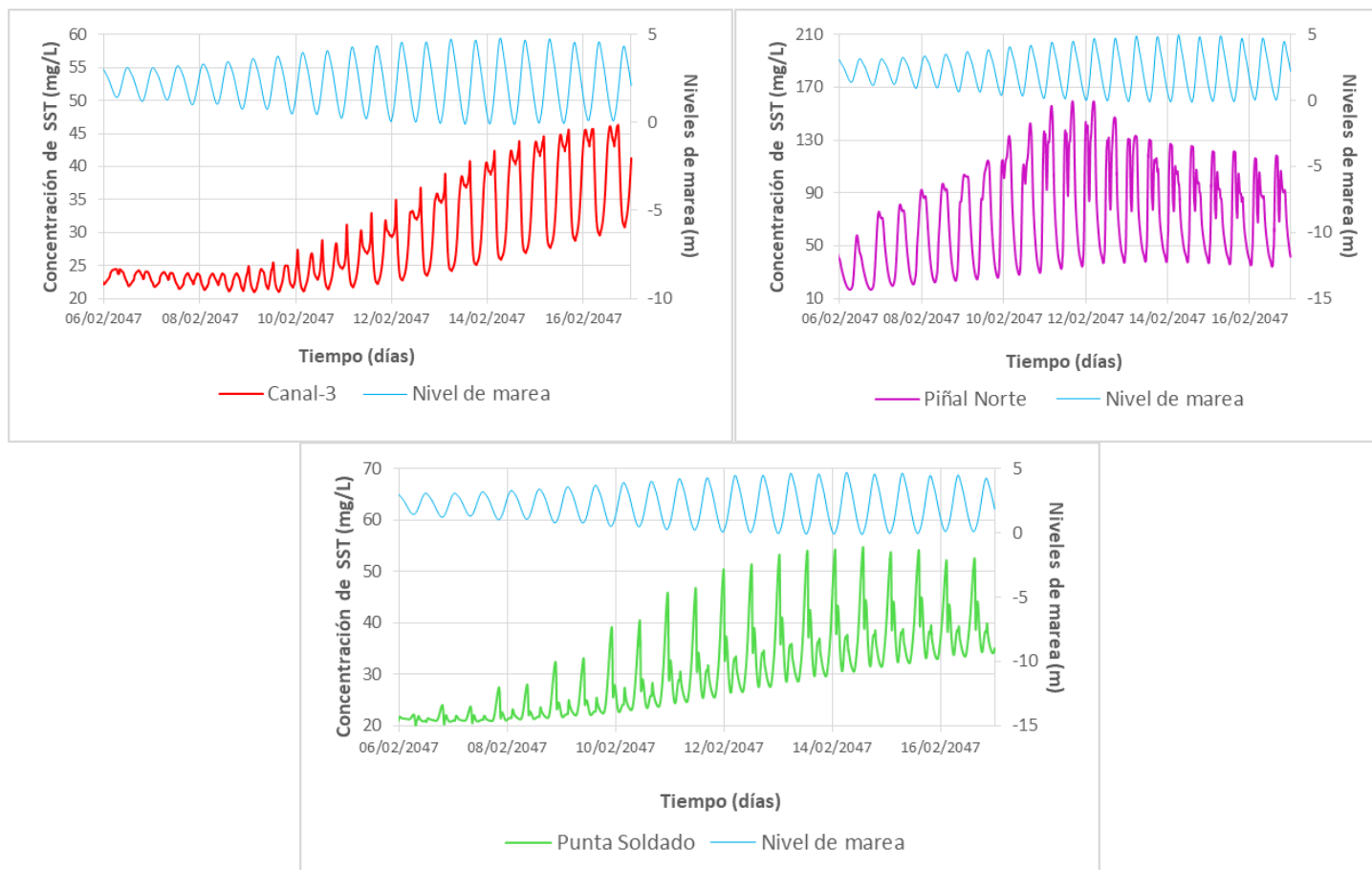


Figura 21. Concentraciones de SST en la bahía de Buenaventura para el Escenario 1(año 2016 y seis sistemas de alcantarillado independientes). Condición de bajamar viva: (A) sin considerar SST en descargas fluviales y (B) considerando SST en descargas fluviales

8.2.2. Escenario 2 (año 2047): alternativa con seis sistemas de alcantarillado independientes

Los resultados de la simulación para este escenario se presentan en la Gráfica 26 y en la Figura 22.



Gráfica 26. Variación de las concentraciones de SST en los puntos de control Canal-3, Piñal Norte y Punta Soldado para el Escenario 2 (año 2047 y seis sistemas de alcantarillado independientes)

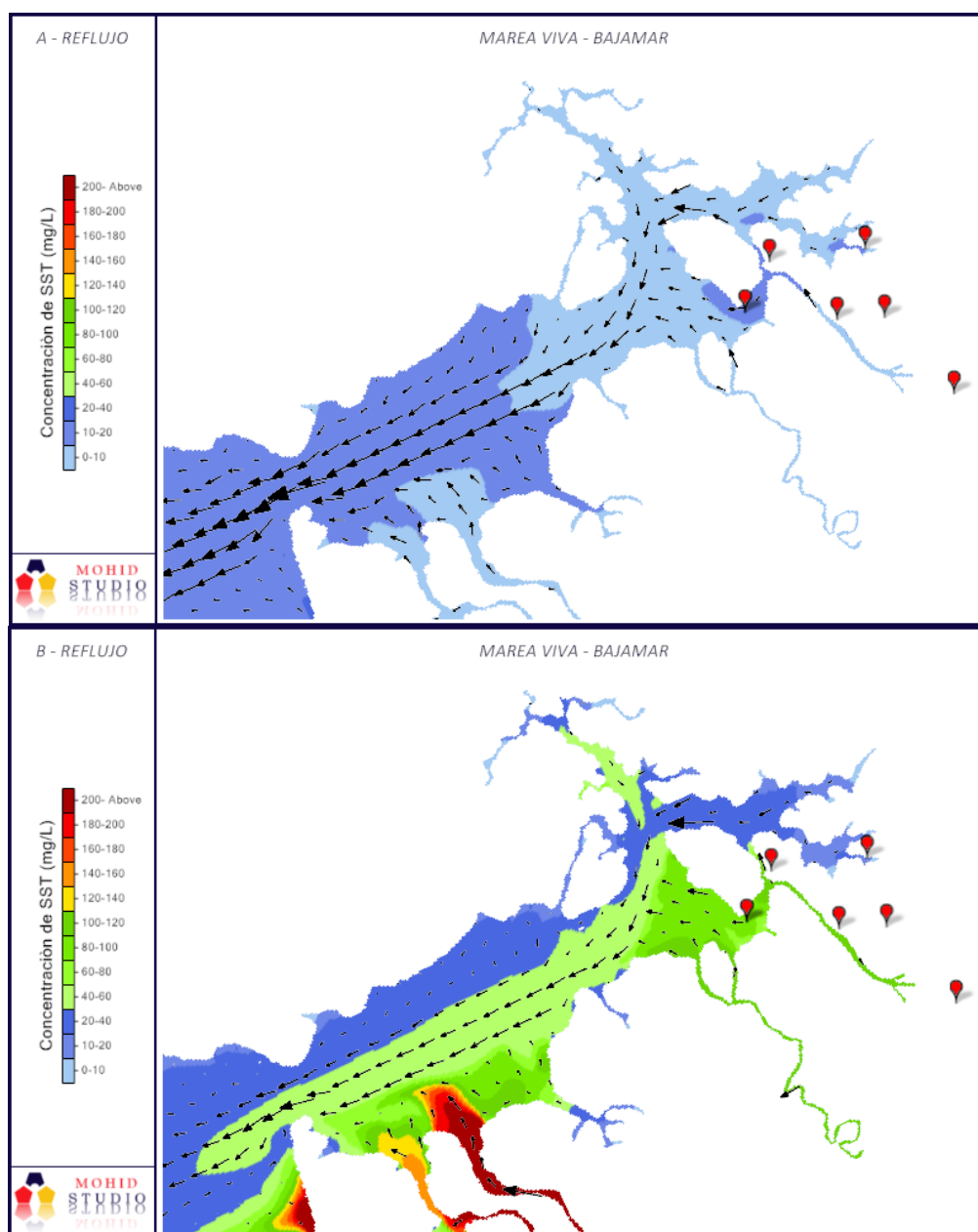
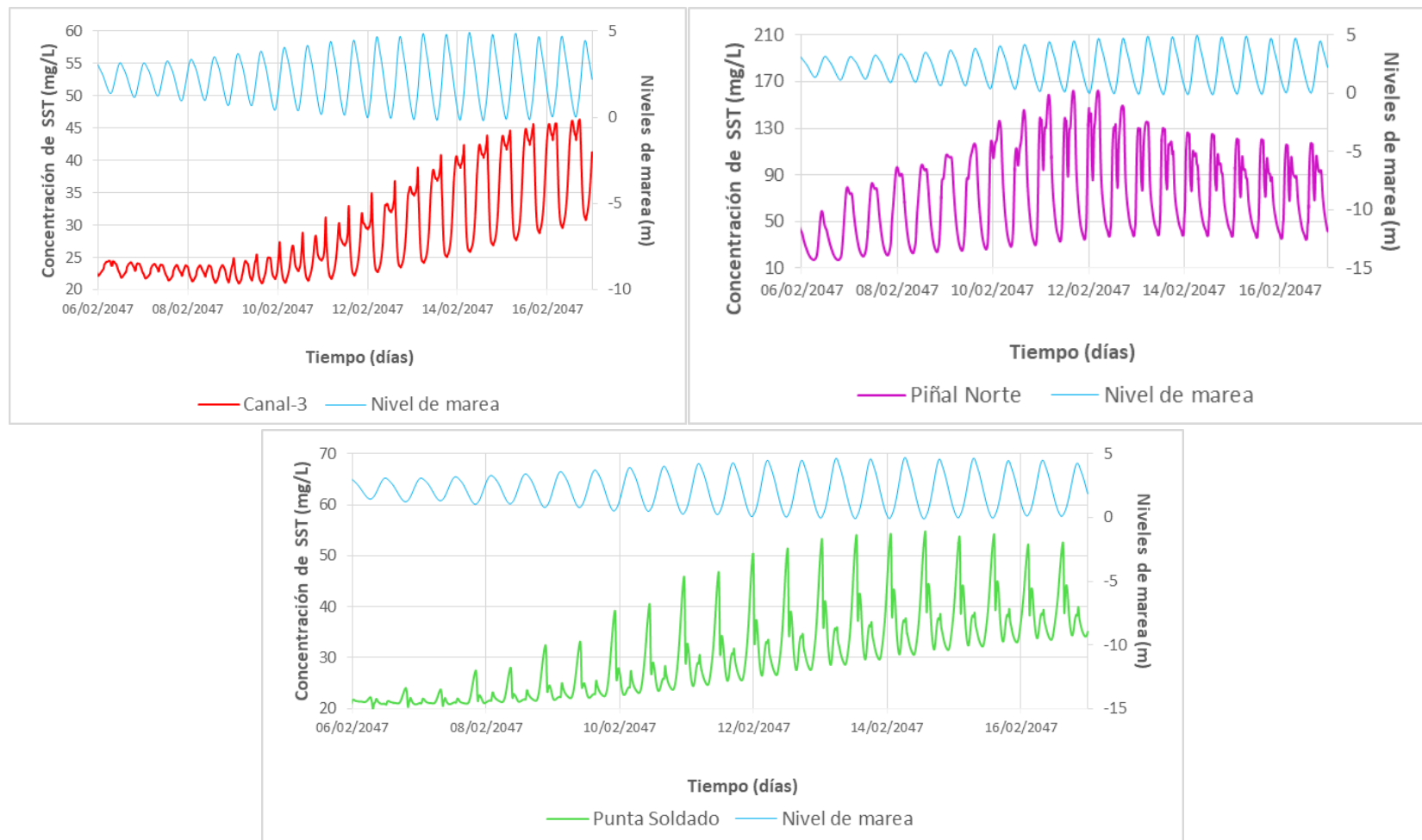


Figura 22. Concentraciones de SST en la bahía de Buenaventura para el Escenario 2 (año 2047 y seis sistemas de alcantarillado independientes). Condición de bajamar viva: (A) sin considerar SST en descargas fluviales y (B) considerando SST en descargas fluviales

8.2.3. Escenario 3 (año 2047): alternativa con dos sistemas de alcantarillado independientes

Los resultados de la simulación para este escenario se presentan en la Gráfica 27 y en la Figura 23.



Gráfica 27. Variación de las concentraciones de SST en los puntos de control Canal-3, Piñal Norte y Punta Soldado para el Escenario 3 (año 2047 y dos sistemas de alcantarillado independientes)

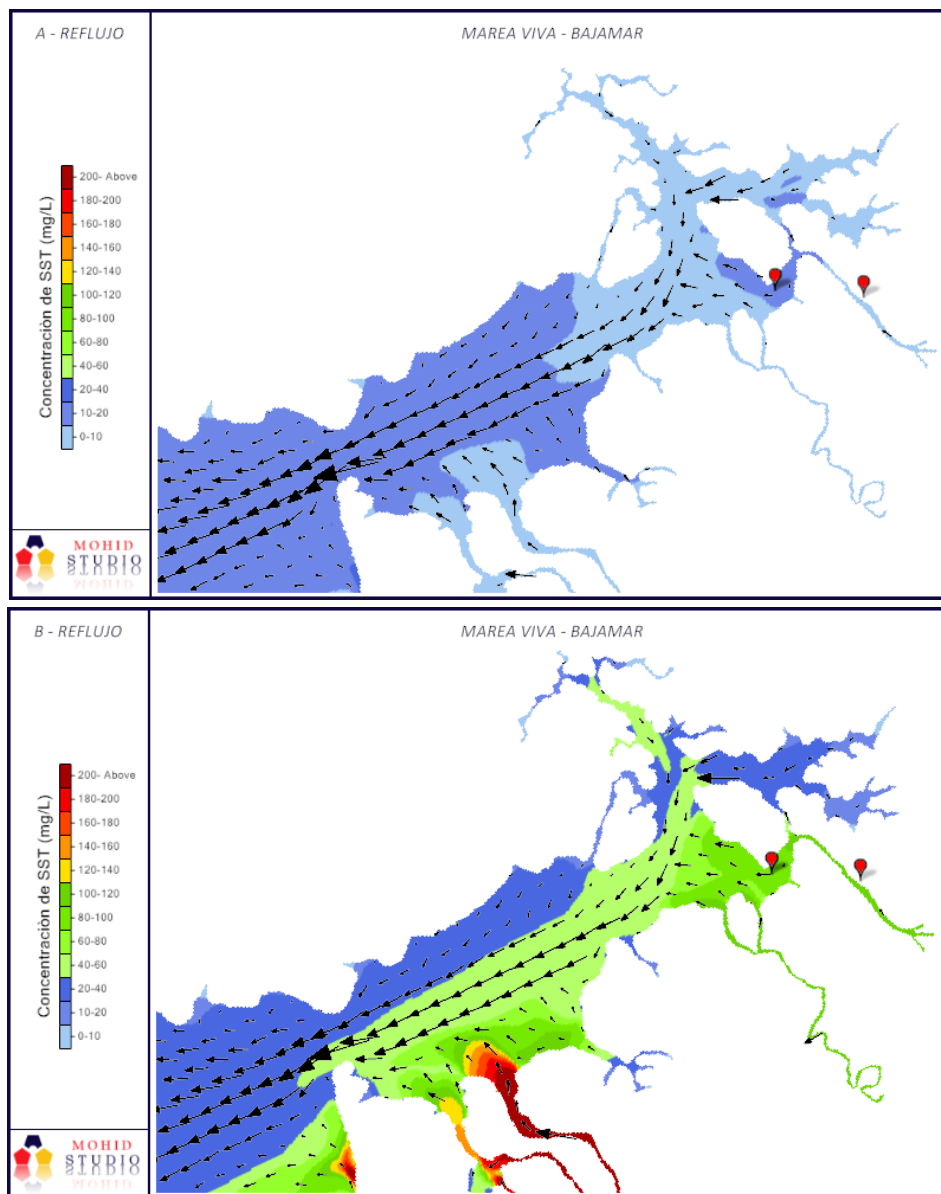
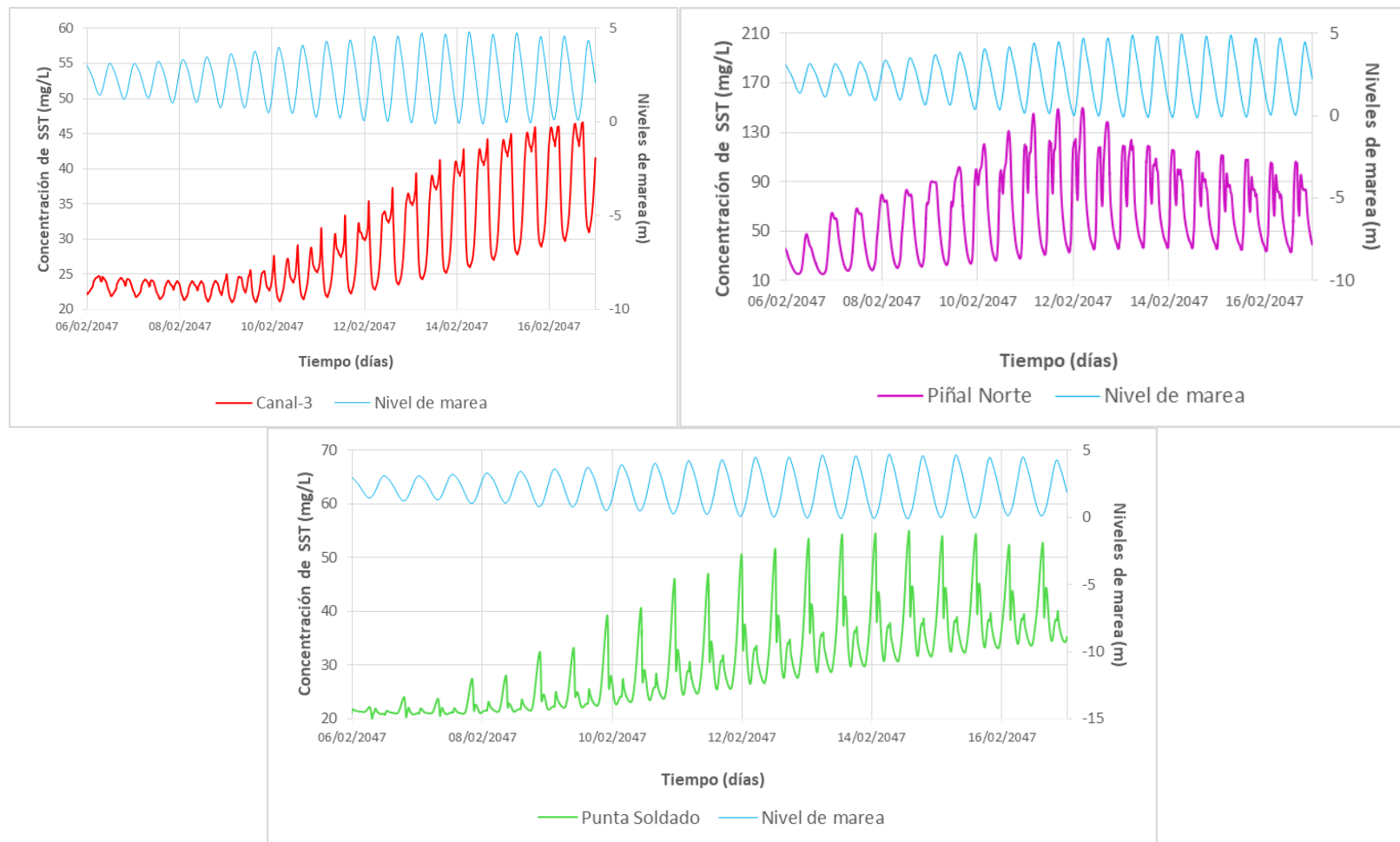


Figura 23. Concentraciones de SST en la bahía de Buenaventura para el Escenario 3 (año 2047 y dos sistemas de alcantarillado independientes). Condición de bajamar viva: (A) sin considerar SST en descargas fluviales y (B) considerando SST en descargas fluviales

8.2.4. Escenario 4 (año 2047): sistema de alcantarillado con dos plantas de tratamiento de agua residual doméstica y un emisario submarino

Los resultados de la simulación para este escenario se presentan en la Gráfica 28 y en la Figura 24. Adicionalmente para este escenario se realizó una modelación del desplazamiento neto de los sólidos suspendidos desde el centro de emisión del emisario submarino a los 5, 10 y 15 días de la descarga (ver Figura 25).



Gráfica 28. Variación de las concentraciones de SST en los puntos de control Canal-3, Piñal Norte y Punta Soldado para el Escenario 4 (sistema de alcantarillado con dos PTAR y un emisario submarino)

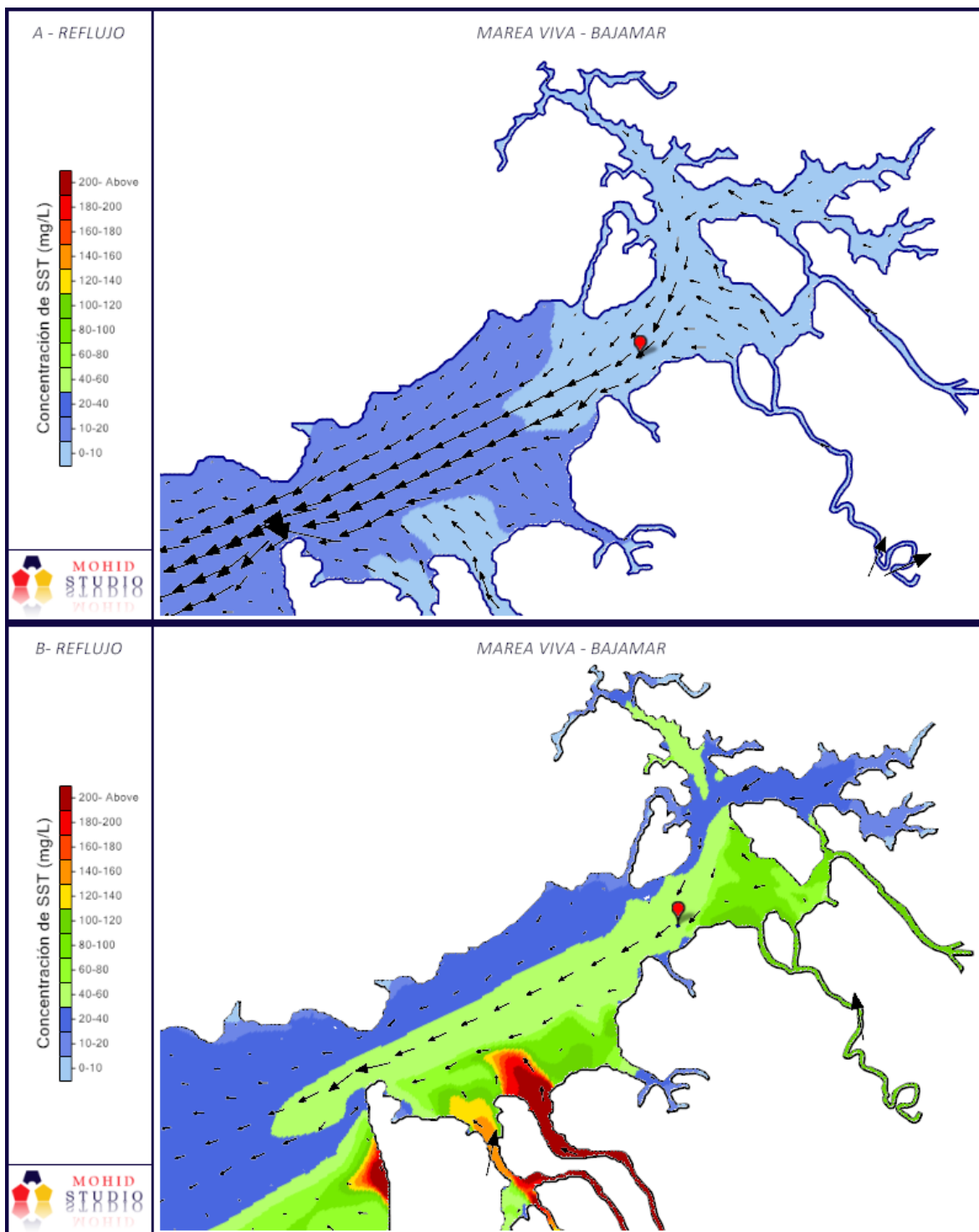


Figura 24. Concentraciones de SST en la bahía de Buenaventura para el Escenario 4 (año 2047, sistema de alcantarillado con dos PTAR y un emisario submarino). Condición de bajamar viva: (A) sin considerar SST en descargas fluviales y (B) considerando SST en descargas fluviales

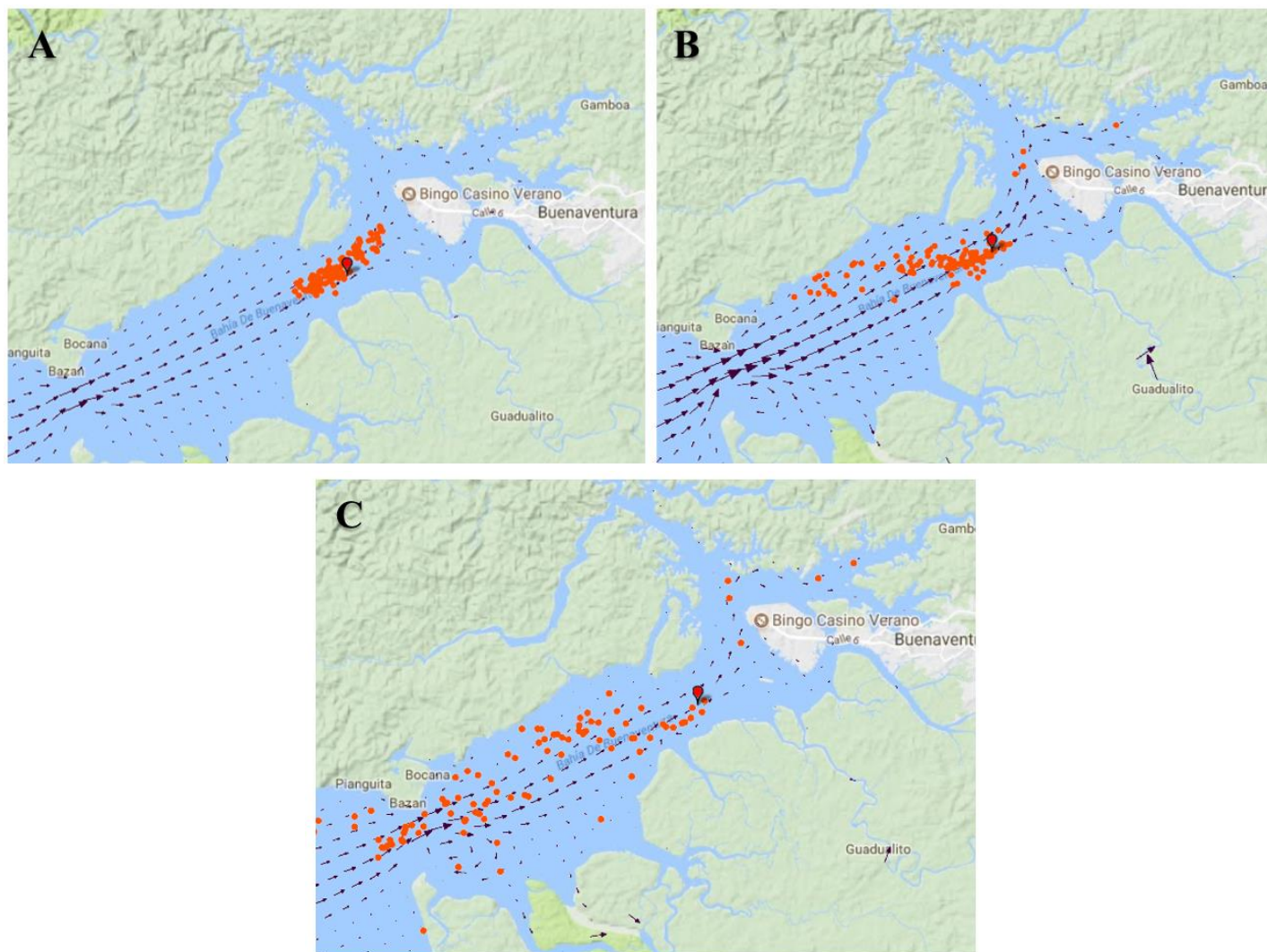


Figura 25. Desplazamiento neto de las partículas vertidas desde el emisario submarino a los (A) 5 días, (B) 10 días y (C) 15 días

8.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En general y como era de esperarse, las mayores concentraciones se presentan en los instantes de las bajamares vivas y muertas, siendo el instante de bajamar viva el más crítico debido al menor volumen de agua presente en la Bahía. En el análisis espacial se aprecia claramente que las descargas de los ríos Dagua y Anchicayá incrementan de manera importante las concentraciones de SST en toda la zona sur de la Bahía, incluyendo el sector del canal de navegación, las zonas de confluencia de estos ríos, el sector suroccidental de la isla Cascajal (especialmente el río Dagua puesto que descarga directamente en este sector) y el estero San Antonio.

La modelación del Escenario 1 mostró que existe una mayor tendencia a la acumulación de sólidos suspendidos en la zona sur de la Bahía y los alrededores de la isla Cascajal debido a la influencia mareal y a las descargas provenientes de ríos y esteros, especialmente los ríos Dagua y Anchicayá y el estero San Antonio. Luego de transcurridos 10 días, la influencia mareal y las corrientes residuales asociadas resultaron determinantes para la remoción gradual de los sólidos suspendidos presentes en la desembocadura del río Anchicayá y en el sector del canal de navegación hacia la bahía exterior. Sin embargo, al finalizar el ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas-mareas muertas, al interior de la bahía de Buenaventura se observan elevadas concentraciones de sedimentos en suspensión, las cuales superaron los 60 mg/L la mayor parte del tiempo y se concentraron especialmente en los sectores de la isla Cascajal, isla Cangrejo, deltas de los ríos Dagua y Anchicayá, el estero San Antonio y el canal de navegación. Las mayores concentraciones presentadas en los puntos de control correspondieron a 140 mg/L en Piñal Norte, 52 mg/L en Punta Soldado y 44 mg/L en Canal-3.

Los sólidos suspendidos provenientes de los seis colectores de agua residual doméstica, descargan a la Bahía iniciándose los procesos de transporte y de dispersión (disminuyendo significativamente las concentraciones de los SST). Como consecuencia de este proceso, no se presentan cambios significativos en las concentraciones de sólidos suspendidos en el medio marino. Este fenómeno fue notable en el Escenario 1 y 2. No obstante, debe advertirse la amplia dispersión que experimentan estos vertimientos, la cual se extiende sobre todo el estero San Antonio y en la zona sur de la isla Cascajal. Esto puede generar un escenario de riesgo en zonas más amplias, debido a la presencia de diferentes contaminantes (microorganismos patógenos, metales pesados provenientes de la explotación minera, disruptores endocrinos, entre otros).

Para el Escenario 2 las concentraciones de SST se incrementan con respecto al Escenario 1, lo cual es de esperarse debido al aumento en las cargas contaminantes de los vertimientos. El mayor incremento se observa en la estación Piñal Norte, donde la concentración máxima pasa de 140 mg/L en el Escenario 1 a 160 mg/L en el Escenario 2. En las otras estaciones de control el aumento es muy moderado, pasando de 44 mg/L a 46 mg/L en Canal-3 y de 52 mg/L a 55 mg/L en Punta Soldado. En los otros sectores de la Bahía las concentraciones de SST prácticamente no difieren del Escenario 1, lo cual se explica por los grandes volúmenes

de agua que ingresan a la Bahía desde mar afuera que generan una rápida dispersión de los sedimentos sobre toda la extensión de la bahía de Buenaventura.

Al comparar la Figura 22A y 22B, al igual que en el Escenario 1, se aprecia la fuerte influencia de los ríos Dagua y Anchicayá en la variación espacial de las concentraciones de SST, pues sus descargas incrementan de manera importante las concentraciones de sedimentos en suspensión en toda la parte sur de la Bahía, los deltas de estos ríos y el sector sur de la isla Cascajal.

En lo que respecta a la calidad del agua de los vertimientos, el incremento de los caudales de ARD ocasiona un aumento sustancial de las cargas contaminantes. Si se considera que no habrán cambios significativos en las cargas orgánicas presentes en el agua residual doméstica, esto representará de igual manera, una condición de riesgo higiénico-sanitario en los puntos de vertimiento y en aquellas zonas donde las corrientes son bajas y, por tanto, los procesos de dispersión no son apreciables, tales como los sectores del estero San Antonio, la isla Cascajal y cercanías a la desembocadura del río Dagua.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el Escenario 3, en Piñal Norte se alcanza una concentración máxima de 162 mg/L, la cual es ligeramente superior a la obtenida para el Escenario 2 (160 mg/L), lo cual indica que realizar los vertimientos de agua residual doméstica a través de sólo dos sistemas de alcantarillado independientes, ocasiona un ligero incremento en las concentraciones de SST en los sectores próximos a los sitios de descarga. Por otra parte, en Canal-3 y Punta Soldado las concentraciones de sólidos en suspensión sufrieron variaciones mínimas, conservando los valores máximos observados en el Escenario 2 de 46 y 55 mg/L, respectivamente.

El análisis espacial para el Escenario 3, muestra una condición de mayor impacto sobre el estero San Antonio (Figura 23). En esta puede apreciarse un cambio en el rango de concentraciones de SST en el punto de descarga del Sistema 2 con respecto al Escenario 1 y 2. Esto da muestra nuevamente, de la compleja hidrodinámica de la Bahía que facilita la dispersión de los contaminantes, pero también llama la atención respecto a los inconvenientes que presenta esta alternativa de agrupación del sistema de alcantarillado del Distrito, siendo en términos de concentración de sólidos en suspensión más perjudicial, en comparación con la alternativa de seis puntos de vertimiento. Lo anterior lleva a evaluar la pertinencia de disminuir el número de vertimientos a dos sistemas, cuando estos no están siendo tratados; en este caso, será preferible optar por una agrupación del sistema de alcantarillado en seis vertimientos, los cuales generarán un menor impacto sobre el estero San Antonio en términos de cargas contaminantes. No obstante, tener pequeños puntos de vertimiento descargando en múltiples cuerpos hídricos, como en efecto ocurre en Buenaventura, incrementa el riesgo de contacto de la población con agua contaminada; además, no permite llevar un control adecuado sobre otros parámetros de interés en términos sanitarios y ambientales, tales como grasas y aceites, detergentes, materia orgánica y nutrientes, los cuales afectan la vida acuática y el equilibrio ecológico de los ecosistemas.

En el Escenario 4 se obtuvieron concentraciones de SST inferiores en el sector del Piñal Norte (150 mg/L), en comparación con el Escenario 2 (160 mg/L) y el Escenario 3 (162

mg/L). El punto de control en Canal-3 sufrió un ligero incremento en las concentraciones de sólidos en suspensión, alcanzando un valor máximo de 47 mg/L, mientras que en Punta Soldado se obtuvo un valor máximo cercano a los 55 mg/L. Lo anterior puede deberse en principio, a la ubicación de la descarga del emisario submarino, la cual alcanza profundidades de más de 10 m fomentando los fenómenos advectivos y difusivos en la columna de agua. Además, el pretratamiento contemplado para el ARD también es un factor importante que favorece la disminución en las concentraciones de SST en el vertimiento.

Los resultados obtenidos a partir de la implementación del módulo Lagrangiano, indican una concentración de partículas en el sector de La Bocana, el canal de navegación y alrededores de la isla Cascajal al finalizar el periodo de simulación. De acuerdo con estudios realizados en esta zona para una condición promedio de rango de mareas vivas, los vertimientos que sean realizados en el sector sur de la isla Cangrejo o en cercanías de la isla Cascajal, permanecerán hasta 90 días en la bahía interior, transportándose de acuerdo con las corrientes predominantes y siendo atrapadas en algunas zonas muertas y sectores de remolino existentes, especialmente en aquellos sectores donde las magnitudes de las velocidades son medias (0.63 m/s) y las profundidades son bajas, como la zona sur de la isla Cascajal (Moreno & Perdomo, 2017). Asimismo, estudios realizados de las corrientes residuales lagrangianas en la bahía interior de Buenaventura, las cuales están definidas por el desplazamiento neto de las partículas, indican una dirección ligeramente dominante hacia el exterior de la Bahía (Giraldo, 2017); lo anterior es consecuente con lo representado en la modelación de la descarga del emisario submarino, donde puede observarse una tendencia de las partículas de ser arrastradas por las corrientes de reflujo predominantes hacia el exterior de la Bahía. Sin embargo, este transporte no es función exclusiva de las corrientes residuales eulerianas o de la dirección preponderante de los vectores de velocidad; existen en la Bahía fenómenos de transporte aleatorios relacionados con la turbulencia del flujo y con el comportamiento individual de las partículas que determinan la posición final del sedimento.

Los diferentes estudios disponibles de la bahía de Buenaventura indican que se tiene una corriente residual neta en dirección hacia afuera de la Bahía, no obstante, la fuerte turbulencia existente ocasiona que alguna fracción del vertimiento realizado a través del emisario submarino se desplace hacia el sector de la isla Cascajal, afectando la calidad del agua en este sector. Lo anterior permite afirmar que el sitio proyectado para la descarga del emisario no es el más apropiado, siendo recomendable llevarlo a la bahía exterior (mar afuera).

9. USOS ACTUALES Y FUTUROS DEL AGUA DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA (ANÁLISIS DEL PARÁMETRO SST)

Después del análisis de los escenarios anteriores, resulta relevante discutir acerca de las restricciones en el uso del agua de la Bahía que podrían generarse por las elevadas concentraciones de sólidos suspendidos totales y otros parámetros de calidad del agua asociados como los coliformes termotolerantes y la turbiedad.

En la actualidad, las zonas afectadas por vertimientos de agua residual doméstica en la bahía de Buenaventura, son: Cascajal, Canal y el sector de La Bocana. Los usos actuales identificados por INVEMAR en estos sectores en el año 2015 se presentan en la Tabla 22.

Tabla 22. Usos actuales del agua en la bahía de Buenaventura determinados por INVEMAR (2015)

SECTOR	DESCRIPCIÓN	USOS ACTUALES
CASCAJAL	Comprende el sector de las islas Cascajal y Cangrejo, los esteros Aguadulce, Gamboa y San Antonio y la desembocadura del río Dagua.	Navegación y Transporte Acuático Preservación de flora y fauna Pesca
CANAL	Comprende desde isla Cangrejo y el estero Limoncito hasta isla Bárbara y Bazán Bocana.	Navegación y Transporte Acuático Preservación de flora y fauna Pesca
BOCANA	Comprende las playas de La Bocana, Piangüita y Magüipi.	Recreativo Navegación y Transporte Acuático

A nivel nacional no existe en la actualidad una normativa que establezca los valores límites permisibles de SST de acuerdo con los potenciales usos del agua en la bahía de Buenaventura. Sin embargo, se cuenta con algunas directrices internacionales que sirven como referentes de límites máximos permisibles de sólidos en suspensión para cada uso potencial del agua en zonas costeras y estuarinas. Debido a esto, se tuvieron en cuenta los escenarios más críticos anteriormente descritos para evaluar el cumplimiento de esas normativas y directrices en el año 2047. En la Tabla 23 se presentan los límites máximos permisibles de acuerdo con cada uso actual del agua en la Bahía y se comparan con las concentraciones que se tendrían en los sectores priorizados. Este análisis se realizó teniendo seis sistemas de alcantarillado independientes (Escenario 2 de modelación).

De acuerdo con las normativas internacionales, el agua de la bahía de Buenaventura en el sector del Piñal Norte, no será apta para ser utilizada con fines recreativos, de pesca y de navegación y transporte; además, las concentraciones de SST que se tendrán en el año 2047, representan un riesgo para la preservación de la flora y fauna de los ecosistemas, especialmente aquellos ubicados en los sectores del Canal, Punta Soldado y alrededores de la isla Cascajal, donde se sobrepasan los valores máximos recomendados por las entidades internacionales.

Tabla 23. Cumplimiento de la normativa internacional respecto a valores máximos permisibles de sólidos suspendidos totales para cada uso potencial del agua

USO: NAVEGACIÓN Y TRANSPORTE ACUÁTICO				
SECTOR	VALOR MÁXIMO CALCULADO (mg/L)	VALOR DE REFERENCIA (mg/L)	NORMATIVA	CUMPLIMIENTO
Cascajal – Piñal Norte	160	80	ASEAN (2008)	NO
Canal – Canal-3	46			SI
Bocana- Punta Soldado	55			SI
USO: PRESERVACIÓN DE FLORA Y FAUNA				
SECTOR	VALOR MÁXIMO CALCULADO (mg/L)	VALOR DE REFERENCIA (mg/L)	NORMATIVA	CUMPLIMIENTO
Cascajal – Piñal Norte	160	30	ASEAN (2008)	NO
Canal – Canal-3	46			NO
Bocana- Punta Soldado	55			NO
USO: PESCA				
SECTOR	VALOR MÁXIMO CALCULADO (mg/L)	VALOR DE REFERENCIA (mg/L)	NORMATIVA	CUMPLIMIENTO
Cascajal – Piñal Norte	160	80	CONAMA (2008)	NO
Canal – Canal-3	46			SI
Bocana- Punta Soldado	55			SI
USO: RECREATIVO PRIMARIO				
SECTOR	VALOR MÁXIMO CALCULADO (mg/L)	VALOR DE REFERENCIA (mg/L)	NORMATIVA	CUMPLIMIENTO
Cascajal – Piñal Norte	160	≤75 mg/L	Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca Mexicana (1996)	NO
Canal – Canal-3	46			SI
Bocana- Punta Soldado	55			SI

10. CONCLUSIONES

En este proyecto se estudiaron los procesos de transporte de los sólidos suspendidos totales en la bahía de Buenaventura mediante la aplicación del modelo matemático hidrodinámico y sedimentológico MOHID. Las conclusiones más destacadas del estudio son las siguientes:

- La bahía interior de Buenaventura corresponde a un sistema estuarino bien mezclado debido a los grandes prismas mareales presentes en comparación con los aportes fluviales; es un sistema altamente dinámico y complejo teniendo en cuenta la diversidad de fenómenos y procesos presentes en ella, tales como la influencia mareal, las descargas fluviales, las corrientes, el oleaje, las elevadas precipitaciones, los fenómenos de floculación y la interacción entre las partículas sedimentables, entre otros. Esto se ve representado en la baja variabilidad de parámetros como la salinidad y la temperatura a lo largo de la columna de agua.
- Las diferentes simulaciones realizadas mostraron una tendencia a la acumulación de sólidos suspendidos en la zona sur de la Bahía y los alrededores de la isla Cascajal

debido a la influencia mareal y a las descargas provenientes de ríos y esteros, especialmente el río Dagua puesto que descarga directamente en este sector y el estero San Antonio. Las corrientes residuales que ocurren en la Bahía tienden a generar la remoción gradual de los sólidos suspendidos presentes en la desembocadura del río Anchicayá y en el sector del canal de navegación hacia la bahía exterior. Sin embargo, al finalizar el ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas - mareas muertas, al interior de la bahía de Buenaventura se observan aún elevadas concentraciones de sedimentos (superiores a 60 mg/L), principalmente en los sectores de la isla Cascajal, la isla Cangrejo, los deltas de los ríos Dagua y Anchicayá, el estero San Antonio y el canal de navegación.

- Los resultados de las simulaciones realizadas para los escenarios al año 2047 realizando descargas en seis o dos zonas distintas en los sectores de la zona sur de la isla Cascajal y en el estero San Antonio, indican que la permanencia de las aguas en estas zonas es prolongada y la pluma de contaminación se desplaza hacia el interior del estero, lo que representa un riesgo para la población asentada en sus alrededores, las actividades productivas, comerciales e industriales y para la preservación de los ecosistemas acuáticos.
- Al comparar la situación actual de la bahía de Buenaventura con el escenario futuro sin algún tipo de tratamiento del agua residual municipal (particularmente el agua residual doméstica para este estudio), se prevé un deterioro considerable de las condiciones de la Bahía en términos sanitarios y ambientales, generando perjuicios a los usos actuales del agua que representan una fuente de sustento para la comunidad de Buenaventura y en general, para el país. Debido al incremento de las cargas contaminantes en los vertimientos de agua residual doméstica, para el año 2047 se espera un aumento de por lo menos un 15% en las concentraciones de los SST presentes en el sector de Piñal Norte.
- La reducción del número de sistemas de alcantarillado independientes, aunque puede llegar a disminuir el riesgo por contacto con agua residual doméstica, representaría un mayor impacto para el ecosistema puesto que se incrementa la extensión de la zona afectada por el recorrido de las plumas contaminantes y por el aumento de las cargas contaminantes. De allí que deban evaluarse integralmente las alternativas planteadas y conforme a ello, tomar las mejores decisiones para un adecuado PSMV que contemple el tratamiento mayoritario de todos los vertimientos de agua residual municipal que descarguen a los tributarios y a la bahía de Buenaventura.

11. RECOMENDACIONES

La modelación hidrodinámica y sedimentológica de la bahía de Buenaventura, es un proceso complejo, de cuya eficacia depende en gran medida, la disponibilidad, la continuidad y la rigurosidad de las mediciones de campo de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

utilizados en las simulaciones. Debido a las limitaciones existentes en la información de campo, en el presente estudio debieron realizarse algunas suposiciones y simplificaciones, en aras de representar de la manera más precisa, los procesos de transporte de los sólidos suspendidos totales en la Bahía. Por ende, en la búsqueda de una mejor calibración hidrodinámica y sedimentológica del modelo MOHID utilizado en esta investigación, se hacen las siguientes recomendaciones a tener en cuenta para la realización de futuros estudios en la bahía de Buenaventura:

- Se deben efectuar campañas de medición continuas y simultaneas, durante un ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas – mareas muertas en la bahía de Buenaventura que involucren parámetros como: velocidad en la vertical, niveles de marea, concentración de sólidos suspendidos totales (a diferentes profundidades en la columna de agua y no sólo en superficie), salinidad, coliformes termotolerantes, etc. Se recomienda priorizar para las campañas de campo, aquellos sectores que en este estudio han sido identificados como zonas críticas de contaminación por SST (alrededores de la isla Cascajal, estero San Antonio, canal de navegación y deltas de los ríos Dagua y Anchicayá).
- Se recomienda realizar batimetrías periódicas en la bahía de Buenaventura, incluyendo los esteros en toda su longitud y los ríos hasta al menos, las zonas de influencia mareal.
- En el proceso de modelación resultó de gran relevancia la utilización del parámetro de masa mínima de los sedimentos cohesivos para ajustar el modelo sedimentológico. Se recomienda por tanto, realizar mediciones altimétricas del lecho de la Bahía para tener información más precisa sobre el espesor de la capa de fondo de sedimentos.
- En la actualidad, no se han realizado investigaciones que apunten a la determinación del coeficiente de erodabilidad más representativo de los fenómenos de erosión en la Bahía. Se recomienda realizar investigaciones que permitan la definición de este parámetro de gran importancia en el proceso de calibración sedimentológica, especialmente en los sectores de La Bocana, el canal de navegación y alrededores de la isla Cascajal.
- Para modelaciones futuras y en la medida que se cuenta con información de campo para ello, debe procurarse una modelación tridimensional en aras de describir de forma más precisa, los fenómenos de transporte de los sedimentos en suspensión y las plumas de contaminación generadas por emisarios submarinos. Estudios más rigurosos deberán contemplar también los posibles efectos del cambio climático y de la degradación de las cuencas hidrográficas de los principales tributarios de la bahía de Buenaventura, además de los vertimientos de agua residual municipal provenientes de actividades industriales y comerciales, los cuales no fueron tenidos en cuenta en este estudio.

- Se recomienda que la ubicación del emisario submarino sea replanteada por las entidades correspondientes y se considere su ubicación en la bahía exterior de Buenaventura (mar afuera).
- Para cualquier escenario futuro las descargas de agua residual en la Bahía deberán realizarse previo tratamiento de las mismas.
- En la definición de las alternativas más favorables dentro de la gestión del agua residual municipal de Buenaventura, deberán tenerse en cuenta la hidrodinámica compleja de la Bahía y los tiempos de residencia del agua y de los sólidos en suspensión, los cuales al ser susceptibles a procesos de floculación, consolidación, resuspensión y sedimentación, pueden albergar otros contaminantes asociados de interés sanitario y ambiental, tales como microorganismos patógenos y metales pesados. Se recomienda realizar nuevos estudios sobre la posible afectación de los sólidos suspendidos totales a la productividad primaria de los organismos fotosintéticos de aguas marinas y salobres de las costas colombianas.
- Para estudios más rigurosos y con mayor acceso a equipos especializados de cómputo, se recomienda que el tamaño de la malla de cálculo sea inferior a la utilizada en esta investigación, de modo que la modelación de la zona de estudio pueda realizarse de forma más detallada.

12. BIBLIOGRAFÍA

- ALCALDÍA DE BUENAVENTURA. (2001), Plan de Ordenamiento Territorial. Convivencia Pacífica desde la Diversidad, Oficina de Planeación y Ordenamiento Territorial.
- ÁLVAREZ, A. M. T., & TRENTO, A. E. (2004). Transporte de metales pesados en cursos fluviales. En *Mecánica Computacional*. Volumen 23. 1–15 p.
- BANCO DE LA REPÚBLICA, COLECCIÓN DE ECONOMÍA REGIONAL, EDITOR JOAQUÍN VILORIA DE LA HOZ. (2008). Economías del Pacífico Colombiano. Cartagena, Colombia. ISBN: 978-958-664-204-0.182 p.
- BARRETO, I., EZZATTI, P. & FOSSATI, M. (2009). Estudio inicial del modelo MOHID. Reporte Técnico RT 09-10. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.
- BOYES S. & ELLIOTT M. (2006). Organic matter and nutrient inputs to the Humber Estuary, England. En *Mar Pollut Bull*. Vol. 53. 1-4 p.
- BURBANO, Y. (2017). Planteamiento y evaluación de diferentes medidas estructurales para reducir las tasas de sedimentación en el canal de acceso y las zonas de aproximación a los

- terminales marítimos en la bahía de buenaventura (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Cali.
- CADENA M. (2012). Nivel del mar y régimen de marea en las estaciones mareográficas de Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Subdirección de Meteorología. Bogotá, Colombia. Recuperado el 6 de julio de 2018 de: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/23877/Caracteristicas+Mareas.pdf/55110c0b-9bd6-4c97-ab2e-c99807e3fc01>
- CAMPUZANO, F. J., & MARÍN BRIANO, V. (2008). Un Modelo Hidrodinámico-Barotrópico para los Fiordos Australes de Chile entre los 41° S y los 46° S. En *Ciencia y Tecnología del Mar*. Volumen 31. 125-136 p.
- CENTRO DE INVESTIGACIONES OCEANOGRÁFICAS E HIDROGRÁFICAS DEL PACÍFICO (CCCP). (2015). Boletín Meteomarinero del Pacífico Colombiano. N° 30. Tumaco, Nariño.
- CHAO X., JIA Y., ESCUDOS F., WANG S., COOPER C. (2007). Numerical modeling of water quality and sediment related processes. En *Ecological Modelling*. Volumen 201. 385-397 p.
- COLLAZOS, M. (2014). Definición de objetivos de calidad de vertimientos en la bahía de Buenaventura desarrollo de la fase 1, (tesis de pregrado). Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. p. 12.
- CONSORCIO DRAGADO BUENAVENTURA. (2015). Estudio y diseño del dragado de profundización del canal de acceso al puerto de Buenaventura. Valle del Cauca. Estudios Modelo de Simulación Hidrosedimentológico. Documento: 2838-00-HY-RP-001. Revisión No. 01.
- CORPORACIÓN BIOPARQUE - TCBUEN, TERMINAL DE CONTENEDORES DE BUENAVENTURA. (2012). Modificación de la Licencia Ambiental para las Obras de Ampliación del Canal de Acceso, Dársena de Giro, Zona de Maniobras, Construcción de una Piña de Atraque y Ajuste de Coordenadas. Capítulo N° 3 Caracterización del Área de Influencia del Proyecto. Buenaventura, Colombia. 31 p.
- CVC, CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA-INVEMAR, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS “JOSÉ BENITO VIVES DE ANDRÉIS”. (2015). Proyecto Determinación de Objetivos de Calidad por Usos del Recurso Hídrico en la bahía de Buenaventura – Sector Cascajal, a través de la Modelación de Coliformes y DBO para Definir Diferentes Escenarios de Calidad de Agua. Informe de Modelación Hidrodinámica y de Calidad de Agua de la bahía de Buenaventura, Santa Marta, Colombia. 112 p.

- DÁVILA M. (2009). Validación de los métodos DQO, DBO₅ y sólidos suspendidos totales en el análisis de aguas residuales para el laboratorio de aguas y alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia. 63 p.
- FERNÁNDEZ, M., SANTERO, P., FOSSATI, M., DUFRECHOU, E. & EZZATTI, P. (2011). Estudio de un modelo hidrodinámico sobre arquitecturas multi-core. Reporte Técnico RT 11-16. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.
- FRANZ G., PINTO L., ASCIONE I., MATEUS M., FERNANDES R., LEITÃO P., NEVES R. (2014). Modelling of cohesive sediment dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal. En: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Portugal. Volumen 151. 34 - 44 p.
- GIRALDO, C. (2017). Estudio de las corrientes residuales en la bahía de Buenaventura, Colombia (tesis de pregrado). Universidad del Valle. Cali.
- GÓMEZ, M. & PADILLA, E. (1990). Geología, geomorfología y geofísica, Volumen 2, 50 p. En: Prefactibilidad y declaratoria ambiental Puerto Industrial de Aguadulce. Universidad del Valle, Sede Regional Pacífico, Comité de Acción Ecológica CAE, Alcaldía de Buenaventura, Cali.
- HIDROCARIBE LTDA. (2005). Estudio de Impacto Ambiental, Proyecto Complejo Portuario Industrial- CPI, Buenaventura. Volumen I, Informe Principal. 48 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICA. (2010). Modelos Matemáticos Hidrodinámicos de Calidad de Aguas. Gobierno de Chile.
- INVEMAR, INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS “JOSÉ BENITO VIVES DE ANDRÉIS”. (2016). Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras del Caribe y Pacífico colombianos. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia – REDCAM. Informe técnico 2015. Santa Marta. 265 p.
- LABORATORIO DE PROYECTOS HIDRÁULICOS DEL PACÍFICO (1998). Estudio para la modelación matemática hidrodinámica y sedimentológica de la bahía de Buenaventura. Programa de campo Hidrosedimentológico. Ministerio de Transporte Dirección General de Transporte Marítimo. Universidad del Valle.
- LEITON P. (2018). Estudio hidrodinámico y sedimentológico de la bahía de Buenaventura empleando el modelo matemático bidimensional MOHID (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Cali.
- MARCÓ, L., AZARIO R., METZLER C. Y GARCÍA M. (2004). La turbidez como indicador básico de calidad de aguas potabilizadas a partir de fuentes superficiales.

- Propuestas a propósito del estudio del sistema de potabilización y distribución en la ciudad de Concepción del Uruguay (Entre Ríos, Argentina). En *Revista Higiene y Sanidad Ambiental*. España. Volumen 4. 72-82 p.
- MARTÍNEZ – AGUILAR T., GIRALDO A., RODRÍGUEZ E. (2010). Ictioplancton en la zona costera del Pacífico colombiano durante la fase terminal de El Niño 2006-2007. En: *Latin american journal of aquatic research*. Volumen 38. 151 – 166 p.
- MOFFATT & NICHOL INT. (1998). Estudio de la factibilidad y diseño para la profundidad del canal de acceso al puerto de Buenaventura. Hidroestudios. Santafé de Bogotá, Valle del Cauca.
- MONERRIS, M. M., & DOMENECH, P. (1997). Modelación de la Calidad del Agua. Universidad Técnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 210 p.
- MONTERO, P. (1999). Estudio de la hidrodinámica de la ría de Vigo mediante un modelo de volúmenes finitos. Universidad de Santiago de Compostela.
- MORENO, S. & PERDOMO, E. (2017). Determinación de los tiempos de residencia de las aguas en la bahía de Buenaventura. Universidad del Valle, Cali.
- MUÑOZ, D. (2015). Estudio de la dispersión de hidrocarburos por derrame accidental en la bahía de Buenaventura, Colombia (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Cali.
- OTERO E., MOSQUERA L., SILVA G., GUZMÁN J. (2002). Golfos y bahías de Colombia. Bogotá: Banco de Occidente. ISBN 978-958-95504-2-7. Consultado el 10 de julio de 2016.
- PALACIOS, C., QUIRÓS, L. (2006). *Caracterización hidrodinámica de la bahía de Buenaventura*. Universidad del Valle (tesis de pregrado). Cali. 151 p.
- PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE BUENAVENTURA (2001). Secretaria de Planeación y Ordenamiento Territorial, Diagnóstico General y Prospectiva. Volumen 1.
- PROCOLOMBIA – EXPORTACIONES, TURISMO, INVERSIÓN, MARCA PAÍS. (2015). Infraestructura logística y transporte de carga en Colombia.
- RAMIREZ, C. (1995). Hydrodynamics and sediment transport processes in Buenaventura Bay, Colombia (tesis de maestría inédita). International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering. Delft, The Netherlands, 162 p.
- SOSA D. (2010). *Simulación de dispersión de contaminantes a futuro en la playa de Puerto Escondido Oaxaca* (tesis de pregrado). Universidad del Mar, Oaxaca, México. 146 p.

- UNIVERSIDAD DEL VALLE. (1999). Estudio hidrodinámico y sedimentológico de la bahía de Buenaventura mediante la implementación del modelo matemático Mike21. Ministerio de Transporte. Dirección General de Transporte Marítimo, Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- VALLECAUCANA DE AGUAS S.A. E.S.P. – UNIÓN TEMPORAL AQUAPOZOS. (2017). Formulación del Plan Maestro para el Sistema de Alcantarillado del Distrito de Buenaventura. Contrato No. 200-13-04-010-2015. Buenaventura, Colombia.
- VAN RIJN, L. C. (1993). Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Amsterdam, The Netherlands: AQUA PUBLICATIONS. 690 p.
- VELÁSQUEZ, L. (2013). Modelación del transporte de sedimentos en el golfo de Urabá, Colombia (tesis de maestría). Universidad EAFIT, Escuela de Ingeniería, Departamento de Geología. Medellín, Colombia. 132 p.
- VIVAS-AGUAS, L.J., SÁNCHEZ J., CADAVID B., BETANCOURT J., QUINTERO M., MORENO Y., SANTANA C., CUADRADO I., IBARRA K., RÍOS M., OBANDO P. Y SÁNCHEZ D. (2014). Diagnóstico y evaluación de la calidad de las aguas marinas y costeras del Caribe y Pacífico colombianos. Serie de publicaciones del INVEMAR No. 4. Red de vigilancia para la Conservación y Protección de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia (REDCAM). Informe Técnico 2013, INVEMAR, Santa Marta. 314 p.
- WINTERWERP, J. (1999). On the Dynamics of High-Concentrated Mud Suspensions (tesis de doctorado). Delft University of Technology: Delft, the Netherlands, ISBN 0169-6548.
- ZHEN – GANG J. (2008). Hydrodynamics and Water Quality, Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries. En *Wiley-Interscience*. Hoboken, New Jersey. 702 p.

13. ANEXOS

ANEXO 1. INFORMACIÓN HISTÓRICA DE CAMPAÑAS DE MEDICIÓN REALIZADAS POR LA CVC

Tabla 1. Concentración de sólidos suspendidos totales en los sitios de muestreo de la CVC en la bahía de Buenaventura, en el primer semestre de cada año. Los espacios sin datos (-) corresponden a los puntos no muestreados a partir del año 2013

		Concentración de sólidos suspendidos totales (mg/L)									
Sitio de muestreo		Año									
		2016	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005
Entrada a la bahía	3	<11.6	12.5	23.5	55.6	8	14.7	14.17	9.4	12.2	5.3
	24	-	-	64.5	35	9.8	19	12.25	8.6	17	12
	50	-	-	25.3	16	6.63	8.66	62	15.8	22.2	5
	67	-	-	14.3	34.4	13.7	5.78	23.33	7.4	12.4	8.5
	69	25.5	57	18.3	28.5	11.4	7.88	15.17	16.8	17.1	6
	113	27.5	23	13	33.6	14.5	14.1	13.29	6	9.25	5.3
	132	38.7	49	11.7	42.3	17.2	6.13	25.2	5.5	12.9	3.3
Canal medio de la bahía	151	-	-	9	19.5	17.7	10.4	14.5	6	10	7
	155	-	-	14	23.3	21.5	12.4	45	11.4	7.9	6.3
	163	-	-	17.3	92.2	13	10.9	14.57	13.5	16.6	6.2
	172	-	-	13.7	28	6.33	9.15	14.83	4.6	3.8	6.6
	178	73.1	20	7.5	28.7	8.57	10.4	21.2	12.8	11.1	8.3
	183	-	-	8	55	3.86	8.88	24	11.4	4.75	11.6
	189	-	-	7.5	10.3	7.67	8.86	10	15.2	9.85	12.3
	190	27.5	11.4	9.8	24.5	4	6.63	20	8.4	8.72	16.6
	191	-	-	8	21.1	12.7	9.71	18.2	22.3	22.4	17.2
	192	-	-	7.3	28.1	13	12.9	9	11.4	11.4	10.3
	197	20.5	42	8.5	10.3	8.99	8.25	12.43	11	16.2	7
	200	19.5	11.4	15.3	26.1	4.67	8.38	19.89	35.5	20.15	28
	206	34	17.5	17.7	19.3	11.2	8.57	18	5.6	9.5	10
Alrededor Isla Cascajal	210	-	-	9	41.4	7.16	9.11	15.29	28.6	15.8	20
	211	19.2	12.5	9	33	12.7	6.13	11.86	5.8	15.6	5.3
	213	18	35	9.7	30	24.5	10	6.72	24.6	87	15.6
	217	<11.6	23	18	32.5	25.8	8.11	20.2	11.3	17	10
	221	-	-	10.8	19	38.3	15.5	11	14.3	61.5	11
	223	-	-	12.7	64.5	38	8	15.83	33.5	10.6	9.4
	227	<11.6	13.5	22.8	23.1	28	13.2	63	26.3	19.8	14.7
	229	-	-	8	32	15.5	7	14.33	4.6	11.25	10.3
	232	12	18.5	25.7	33.3	21.8	11	47	8	37.15	18.2

Tabla 2. Concentración de sólidos suspendidos totales en los sitios de muestreo de la CVC en la bahía de Buenaventura, en el segundo semestre de cada año. Los espacios sin datos (-) corresponden a los puntos no muestreados a partir del año 2013

Sitio de muestreo		Concentración de sólidos suspendidos totales (mg/L)									
		Año									
		2016	2013	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005
Entrada a la bahía	3	17.2	71.7	12	35	12.3	52	14.8	16.1	14.4	24
	24	-	-	12.5	16.3	22.7	11.8	16.5	20.5	11.2	20
	50	-	-	18.5	23.5	21.5	13.4	16.5	20	9.8	25.3
	67	-	-	12.5	14	11.9	42.7	14.6	30	14.1	18.8
	69	26.7	40	21.5	19	14.4	18	13	19.5	41	17.8
Canal medio de la bahía	113	17	35	17.5	21	16	16.7	10.8	9.1	6.3	14.9
	132	38	164	15.5	8.33	17.5	18.2	9.65	11.4	7.7	14
	151	-	-	16.5	22	13.9	20.6	34.6	9.5	3.8	13.9
	155	-	-	28.5	89	14.2	18	15.3	2.6	10.3	19.8
	163	-	-	31	16.3	24.4	17.4	14.8	21	7.3	40.5
	172	-	-	17.5	2	10.4	8.33	12.8	13.5	7.1	6.3
	178	<11.6	51	13	174	12	13.6	22	9.5	8.6	23.8
	183	-	-	17.5	185	17	45.3	17.8	14.5	9.7	13.7
	189	-	-	16	8.33	7.86	10.5	19	12.4	4.7	9
	190	16	33	31	35	24	9.83	13.8	11.1	5.6	8.8
	191	-	-	21.5	64	46.5	229	14.8	15	8.4	47
	192	-	-	19.5	224	9	29	9.8	12.6	8.2	21.1
Alrededor Isla Cascajal	197	<11.6	45.5	36	14	15	20.6	20.8	13.4	11	9.7
	200	17	74	27	74	22.8	15.3	21.8	21.7	21.7	30.2
	206	15.3	46.5	22	15.3	11.6	14	20.5	19.1	6.9	11
	210	-	-	28.5	9.7	10.2	22.3	7.15	15.2	13.8	16.8
	211	22	32.5	20.5	13	8.6	17.8	9.65	14.3	7.2	11.1
	213	20.5	34.5	29.5	69	22.6	9.2	14.8	25	10.6	32
	217	24	35.5	12	39	37.8	34.5	25.5	10.9	137	9.4