

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE HIDROCARBUROS DEBIDO A UN POSIBLE
DERRAME EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA COLOMBIA

DANIELA MUÑOZ OSORIO

Proyecto de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniera Agrícola

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

SANTIAGO DE CALI

2015

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE HIDROCARBUROS POR DERRAME ACCIDENTAL
EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA COLOMBIA

DANIELA MUÑOZ OSORIO

DIRECTOR

Mg. Jose Luis Garcia

Ingeniero Civil

CO-DIRECTOR

Mg. Carlos Alberto Ramirez Callejas

Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL AMBIENTE

SANTIAGO DE CALI

2015

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN DE HIDROCARBUROS POR DERRAME ACCIDENTAL
EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA COLOMBIA

Mg. JOSE LUIS GARCIA
DIRECTOR

Mg. CARLOS ALBERTO RAMIREZ
CO-DIRECTOR

Mg. CARLOS OMAR AYALA
JURADO

PhD. JAVIER ERNESTO HOLGUÍN
JURADO

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo general	2
2.2 Objetivos específicos	2
3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	3
3.1 Planteamiento del problema	3
3.2 Justificación.....	4
3.3 Aspectos Generales del Municipio de Buenaventura	5
3.3.1 Población.....	5
3.3.2 Condiciones Sociales	6
3.3.3 Actividades Productivas	7
4. MARCO TEÓRICO	9
4.1 Contaminación por Hidrocarburos.....	9
4.1.1 Los Hidrocarburos	9
4.1.2 Fuentes de Contaminación por Hidrocarburos	10
4.1.3 Consecuencias de la Contaminación por Hidrocarburos en el Mar	10
4.1.4 Planes de Contingencia	11
4.1.5 Modelación Numérica	12
4.2 Modelo MOHID	14
4.2.1 Malla de Cálculo.....	15
4.2.2 Módulo Model.....	16
4.2.3 Módulo Batimétrico	16
4.2.4 Módulo Hidrodinámico	16
4.2.5 Discretización	19

4.2.6	Módulo Geométrico	20
4.2.7	Módulo Lagrangiano	21
4.2.8	Módulo de Turbulencia	23
4.2.9	Módulo Euleriano	23
4.2.10	Módulo Oil.....	24
4.2.11	Módulo de Superficie	26
5.	METODOLOGÍA.....	28
5.1	Recopilación de información	28
5.1.1	Fuentes de Información	28
5.1.2	Procesamiento y análisis	28
5.2	Realización de Curso de MOHID WATER.	28
5.3	Caracterización Física de la Bahía de Buenaventura	28
5.4	Implementación del modelo matemático hidrodinámico.	29
5.5	Estudio de la dispersión de hidrocarburos.	29
5.5.1	Implementación del modelo de trazadores lagrangianos.....	29
5.5.2	Planteamiento de Escenarios de Derrame de Hidrocarburo	30
5.5.3	Simulación de los derrames de Hidrocarburos.	30
5.6	Análisis de Resultados	31
6.	RESULTADOS.....	32
6.1	Caracterización física de la Bahía de Buenaventura.	32
6.1.1	Descripción física de la Bahía de Buenaventura	32
6.1.2	Aspectos Hidrometeorológicos	35
6.1.3	Dinámica Fluvial y Marina.....	38
6.2	Implementación de un modelo matemático hidrodinámico	48
6.2.1	Construcción de la malla de cálculo	48

6.2.2	Esquematzación de la Batimetría	49
6.2.3	Condiciones de Frontera.....	50
6.2.4	Calibración del Modelo.	51
6.2.5	Modelación Hidrodinámica	54
6.3	Implementación de un Modelo de Trazadores Lagrangianos.	60
6.3.1	Escenarios de contaminación por hidrocarburos en la bahía de Buenaventura. 60	
6.3.2	Modelación de Trazadores Lagrangianos	61
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
8.	CONCLUSIONES.....	80
9.	RECOMENDACIONES	84
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y CIBERGRÁFICAS.....	85
	ANEXO A. INFORMACIÓN HISTÓRICA.....	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Causas y Fuentes de contaminación por hidrocarburos en medio marino. -----	10
Tabla 2. Principales Módulos del Software MOHID -----	14
Tabla 3. Funciones del Módulo Model. -----	16
Tabla 4. Características Numéricas del Módulo Hidrodinámico. -----	20
Tabla 5. Escenarios de contaminación por hidrocarburos en la bahía de Buenaventura -----	30
Tabla 6. Temperatura media mensual multianual del Aire en el Municipio de Buenaventura. --	35
Tabla 7. Humedad Relativa Media en el Municipio de Buenaventura. -----	36
Tabla 8. Precipitación y Días Promedio de Lluvia en el Municipio de Buenaventura. -----	36
Tabla 9. Velocidades Medias Mensuales Multianuales del Viento en el Municipio de Buenaventura. -----	37
Tabla 10. Composición de la Cuenca Hidrográfica de la Bahía de Buenaventura. -----	38
Tabla 11. Afluentes y Caudales de Descarga en la Bahía de Buenaventura. -----	39
Tabla 12. Volúmenes Oscilantes en los Afluentes de la Bahía para diferentes Amplitudes de Marea. -----	46
Tabla 13. Características Físicas del Hidrocarburo. -----	60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. A. Colombia, B. Valle del Cauca, C. Buenaventura.	6
Figura 2. Ecuaciones, Variables e Interacciones Consideradas por un Modelo Hidrodinámico y de Calidad. Fuente: MOHID COURSE (2015), MOHID.	13
Figura 3. Tipos de Malla Utilizados por MOHID. Fuente: MOHID Module Horizontal Grid (MOHID, 2014).	15
Figura 4.Aplicación de la Segunda Ley de Newton sobre un volumen infinitesimal de control deformable	17
Figura 5.Flujo de información de entrada y salida del Módulo Geométrico. Fuente: Neves <i>et al.</i> , (2006).	20
Figura 6. Procesos de Envejecimiento de un Derrame de Hidrocarburos. Fuente: ITOPF (2015).	24
Figura 7.Flujo de Información del Módulo de Superficie.....	27
Figura 8. Localización General del Municipio de Buenaventura en el departamento del Valle del Cauca.	32
Figura 9.Bahías Exterior e Interior de Buenaventura.	33
Figura 10.Canal de Acceso al Puerto de Buenaventura.	34
Figura 11. Rosa de los Vientos en el Municipio de Buenaventura.	37
Figura 12.Mapa Hidrográfico de la Bahía de Buenaventura.	39
Figura 13.Localización del Mareógrafo en el puerto de Buenaventura	41
Figura 14.Niveles de Marea en la Bahía de Buenaventura. Enero de 1997 (IDEAM, 1997).	41
Figura 15.Variación del Rango de Marea en el Mareógrafo de Buenaventura. Enero de 1997 (IDEAM 1997)	42
Figura 16.Esquema General del Patrón de Flujo en la Bahía Durante la Marea Entrante o Subiendo.	44
Figura 17.Esquema General del Patrón de Flujo en la Bahía Durante el Reflujo de la Marea (Marea bajando).	45
Figura 18. Línea de Costa.	48
Figura 19.Malla de Cálculo.	49

Figura 20. Dominios de las herramientas utilizadas en la esquematización de la Batimetría, de la Bahía de Buenaventura.....	50
Figura 21. Batimetría de la Bahía de Buenaventura.	50
Figura 22.Puntos de Generación de Marea.....	52
Figura 23.Calibración Hidrodinámica. A.Estacion La Bocana. B.Estacion Isla Cangrejo.	53
Figura 24. Calibración Hidrodinámica. A.Estacion Muelle. B.Estacion Agua Dulce.....	54
Figura 25. Diferentes instantes del ciclo mareal.	55
Figura 26. Velocidad A. Instante T1:6:12 (26/12/2018). B. Instante T2: 12:12 (26/12/2018). C. Instante T3: 18:12 (26/12/2018). D. Instante T4: 0:12 (27/12/2018). E. Instante T5:6:12 (27/12/2018). F. Instante T6:23:57 (31/12/2018). (Ver Figura 30).....	56
Figura 27.Velocidad A. Instante T7:9:22 (26/12/2018). B. Instante T8: 15:22 (26/12/2018). C. Instante T9: 21:22 (26/12/2018). D. Instante T10: 3:22 (27/12/2018). E. Instante T11:9:22 (27/12/2018). F. Instante T12:23:52 (31/12/2018).	57
Figura 28.Velocidad en bajamar. A. Instante T13 12:30 (26/12/2018). B. Instante T14: 18:30 (26/12/2018). C. Instante T15: 00:30 (27/12/2018). D. Instante T16: 6:30 (27/12/2018). E. Instante T17:12:30 (27/12/2018). F. Instante T18:00:00 (01/01/2019).	58
Figura 29.Velocidad durante el flujo de la marea (3 horas después de bajamar). A. Instante T19:15:25 (26/12/2018). B. Instante T20: 21:25 (26/12/2018). C. Instante T21: 03:25 (27/12/2018). D. Instante T22: 9:25 (27/12/2018). E. Instante T23:15:25 (27/12/2018). F. Instante T24:23:55 (31/12/2018).....	59
Figura 30. Instantes de las Velocidades de la modelación hidrodinámica.	60
Figura 31.Sitios de derrame de hidrocarburo.....	61
Figura 32.Derrame de hidrocarburo en TCBUEN en pleamar. A. Hora:6:12 (26/12/2018). B. Hora:12:12 (26/12/2018). C. Hora: 18:12 (26/12/2018). D. Hora: 0:12 (27/12/2018). E.Hora:6:12 (27/12/2018). F.Hora:23:57 (31/12/2018).	62
Figura 33.Derrame de hidrocarburo en TCBUEN durante el refluo de la marea (3 horas después de pleamar). A. Hora:9:22 (26/12/2018). B.Hora: 15:22 (26/12/2018). C. Hora: 21:22 (26/12/2018). D. Hora: 3:22 (27/12/2018). E.Hora:9:22 (27/12/2018). F.Hora:23:52 (31/12/2018).....	64

Figura 34.Derrame de hidrocarburo en TCBUEN en bajamar. A. Hora:12:30 (26/12/2018). B.Hora: 18:30 (26/12/2018). C. Hora: 00:30 (27/12/2018). D. Hora: 6:30 (27/12/2018). E.Hora:12:30 (27/12/2018). F.Hora:00:00 (01/01/2019).	65
Figura 35. Derrame de Hidrocarburo en TCBUEN. A. Hora:23:57 (31/12/2018). B.Hora:23:52 (31/12/2018).....	66
Figura 36.Derrame de hidrocarburo en TCBUEN durante el flujo de la marea (3 horas después de bajamar). A. Hora: 15:25 (26/12/2018). B. Hora: 21:25 (26/12/2018). C. Hora: 03:25 (27/12/2018). D. Hora: 9:25 (27/12/2018). E.Hora:15:25 (27/12/2018). F.Hora:23:55 (31/12/2018).	67
Figura 37. Derrame de Hidrocarburo en TCBUEN. A.Hora:00:00 (01/01/2019). B. Hora:23:55 (31/12/2018).....	68
Figura 38. Derrame de hidrocarburo en el Canal de Acceso en pleamar. A. Hora:6:12 (26/12/2018). B.Hora: 12:12 (26/12/2018). C. Hora: 18:12 (26/12/2018). D. Hora: 0:12 (27/12/2018). E.Hora:6:12 (27/12/2018). F.Hora:23:57 (31/12/2018).....	69
Figura 39.Derrame de hidrocarburo en el Canal de Acceso durante el refluo de la marea (3 horas después de pleamar). A. Hora:9:22 (26/12/2018). B.Hora: 15:22 (26/12/2018). C. Hora: 21:22 (26/12/2018). D. Hora: 3:22 (27/12/2018). E.Hora:9:22 (27/12/2018). F.Hora:23:52 (31/12/2018).	71
Figura 40.Derrame de hidrocarburo en el Canal de Acceso en el instante de marea bajamar. A. Hora: 12:30 (26/12/2018). B.Hora: 18:30 (26/12/2018). C. Hora: 00:30 (27/12/2018). D. Hora: 6:30 (27/12/2018). E.Hora:12:30 (27/12/2018). F.Hora:00:00 (01/01/2019).....	72
Figura 41.Derrame de hidrocarburo en Canal de Acceso durante el flujo de la marea (3 horas después de bajamar). A. Hora: 15:25 (26/12/2018). B.Hora: 21:25 (26/12/2018). C. Hora: 03:25 (27/12/2018). D. Hora: 9:25 (27/12/2018). E.Hora:15:25 (27/12/2018). F.Hora:23:55 (31/12/2018).	73
Figura 42. Derrame de hidrocarburo en Canal de Acceso. A. Hora:23:57 (31/12/2018). B. Hora:23:52 (31/12/2018). C. Hora:00:00 (01/01/2019). D. Hora:23:55 (31/12/2018).	74

INDICE DE FOTOS

Foto 1. Isla Cascajal. 10 de Agosto de 2015.....	3
--	---

INDICE DE ABREVIATURAS

C.V.C.....	Corporación Autónoma del Valle del Cauca.
DANE.....	Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
DIAN.....	Dirección de Aduanas Nacionales.
DIMAR.....	Dirección general marítima.
DWT.....	Tonelaje de porte bruto.
IDEAM.....	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.
IUPAC.....	International Union of Pure and Applied Chemistry.
INVEMAR.....	Instituto de Investigaciones marinas y costeras.
TCBUEN.....	Terminal de Contenedores de Buenaventura.

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a mi madre, Silvia Muñoz por su apoyo incondicional, a mi primo Juan Pablo Cuero por sus buenos consejos y ser mi compañero incansable, a Dios por su constante compañía, a Sebastian Escobar por su dedicación, paciencia y entrega. Es para mi un placer expresar mis agradecimientos particulares a los profesores Jose Luis Garcia y Carlos Alberto Ramirez por sus oportunos consejos y buenos estímulos. Por último, mi especial agradecimiento para Luis Fernandes de Action Modulers por sus buenas recomendaciones.

RESUMEN

En la bahía de Buenaventura se hallan varios terminales marítimos, tales como el Terminal de Contenedores de Buenaventura -TCBUEN, el Muelle Petrolero y el Terminal Marítimo de Buenaventura (de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura); igualmente se encuentran en desarrollo otros terminales. A través de todos estos puertos se moviliza un gran número de embarcaciones, que transportan importantes volúmenes de carga, tanto de importación como de exportación. A la bahía llegan en promedio dos buques al mes con hidrocarburos (Minminas, 2013). Debido a esto existe el riesgo latente de un posible derrame accidental de hidrocarburos, provocado por la colisión de dos embarcaciones en cualquier sitio de la Bahía, alguna falla o accidente durante las actividades de cargue o descargue de hidrocarburos o productos derivados del petróleo o la rotura del tanque de una embarcación en la zona de muelles o en las dársenas de aproximación o en el canal de acceso al puerto.

En la presente investigación se estudió la dispersión de contaminantes de tipo hidrocarburo causada por su posible derrame accidental en dos sitios de la bahía de Buenaventura, como son en la parte media del canal de acceso a los terminales y frente al terminal de TCBUEN. Para ello inicialmente se efectuó la caracterización física de la Bahía, describiendo sus principales aspectos y características oceanográficas (mareas, oleaje y corrientes, entre otros), climáticas (vientos, temperatura, nubosidad y humedad relativa), y los diferentes ríos afluentes y esteros. Posteriormente se implementó el modelo matemático MOHID para simular los procesos hidrodinámicos y de transporte y calidad del agua de la bahía. 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. Finalmente se plantearon, simularon y evaluaron diferentes escenarios de derrame de hidrocarburo, considerando para ello dos posibles sitios de vertimiento y diferentes instantes de marea.

Los resultados obtenidos al simular el posible derrame accidental de hidrocarburo, tanto frente al terminal marítimo de TCBUEN como en la parte media del canal de acceso, muestran que la dispersión del mismo es fuertemente influenciada por la velocidad y dirección de las corrientes mareales existentes durante el derrame y el nivel de marea. Durante las 12 primeras horas, la mayor área contaminada se presenta cuando el vertido del crudo ocurre justamente durante la

pleamar. Después de siete días de ocurrido el derrame accidental del crudo frente a TCBUEN (independientemente de la condición de marea), los esteros más afectados fueron Aguacate y Gamboa y la Isla Cascajal; y cuando el derrame ocurre en la parte media del canal de acceso los sectores más afectados son los ríos Anchicayá y Limones, los esteros Hondo, Humane, y la entrada y la zona media de la Bahía.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación por hidrocarburos es un problema que afecta constantemente el medio marino. Entre sus principales causas se destacan el vertimiento ilegal de materiales oleosos y los derrames accidentales. Según Walker et al. (2003a) el volumen de hidrocarburos vertidos al mar, a nivel mundial, oscila entre los 1.3 y 3.2 millones de toneladas anuales, representando cerca de un 0.05% de la producción de crudo anual, lo cual evidencia la magnitud de este problema.

Las consecuencias de ésta problemática son diversas, pero indudablemente graves. Por ejemplo, en los arrecifes de coral, la presencia de hidrocarburos provoca asfixia, afecta su crecimiento, alimentación, comportamiento y su capacidad para secretar las células mucosas, hasta llevarlos a la muerte (Ipieca, 2003a). En los manglares los hidrocarburos producen daños inmediatos tanto al manglar como a la biota en su entorno. La acumulación de petróleo en las raíces y troncos del mangle ocasiona la muerte de invertebrados, tortugas y peces entre otros. Considerando, la defoliación de las hojas que fueron cubiertas por petróleo y efectos crónicos en la fauna bentónica intermareal (Ipieca, 2003b)

Ahora bien, es importante señalar que en la región del Pacífico Colombiano uno de los problemas ambientales más grandes es la contaminación por hidrocarburos debido a diferentes fuentes de contaminación como actividades portuarias, transporte de embarcaciones, rotura del tanque de embarcaciones y acciones terroristas, que amenaza el bienestar social y económico de la población. Las zonas más afectadas son la Bahía de Buenaventura y Tumaco (INVEMAR, 2004). Por tal motivo, es importante realizar un estudio de la dispersión de hidrocarburos, tomando como área de estudio la bahía de Buenaventura, de esta manera se constituye un insumo para que las entidades ambientales puedan realizar planes de contingencia que sirvan para sus planes de manejo ambiental.

Con el fin de simular la dispersión de contaminantes de tipo hidrocarburo en Buenaventura, en esta investigación se realizó una modelación hidrodinámica y ocho simulaciones de derrame accidental de crudo -4 en Terminal de Contenedores de Buenaventura (TCBUEN) y 4 en el Canal de Acceso a la Bahía- en diferentes condiciones de marea: pleamar, reflujo de la marea (3 horas después de pleamar), bajamar, flujo de la marea (3 horas después de bajamar).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Estudiar la dispersión de contaminantes de tipo hidrocarburo debido a un posible derrame en la Bahía de Buenaventura.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar física de la Bahía de Buenaventura.
- Implementar un modelo matemático hidrodinámico en la Bahía de Buenaventura.
- Implementar un modelo de trazadores lagrangianos en la Bahía de Buenaventura.
- Plantear, simular y analizar diferentes escenarios de contaminación por hidrocarburos en la Bahía, considerando diferentes condiciones de marea y sitios de vertimiento.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

3.1 Planteamiento del problema

La Bahía de Buenaventura, ubicada en el occidente del departamento del Valle del Cauca, presenta un alto grado de contaminación por hidrocarburos, consecuencia de las actividades marítimas y portuarias que se llevan a cabo en ella. Además, esta bahía presenta un alto riesgo de afectación por posibles derrames de hidrocarburos debido a los grandes volúmenes de hidrocarburos que se movilizan en el puerto así como el gran número de embarcaciones que transita a través del puerto de Buenaventura, en el año 2014 el puerto de Buenaventura exportó 1568088.09 Toneladas e importó 6475207.75 Toneladas, lo cual representa el 3.3% de la exportación nacional y el 30.5% de la importación nacional (DIAN,2015), y atiende un promedio de dos buques al mes con hidrocarburos, con una capacidad máxima de 25000 toneladas de DWT (Minminas,2013)

La bahía de Buenaventura se encuentra en constante riesgo de contaminación de sus aguas y todo el ecosistema estuarino (fluvial y marino), debido al potencial derrame de hidrocarburos, amenazando uno de los ecosistemas más biodiversos del mundo (Parques Nacionales Naturales, , 2012), la salud pública de la población de Buenaventura, así como la continuidad de la pesca y el turismo, actividades económicas de las que depende la fracción más vulnerable de la población (Foto 1) (Procuraduría General de la Nación, 2008).



Foto 1. Isla Cascajal. 10 de Agosto de 2015.

Un derrame de hidrocarburo se puede presentar por la colisión de dos embarcaciones en cualquier sitio de la Bahía, o por una falla o accidente durante las actividades de cargue o descargue de hidrocarburos o productos derivados del petróleo, o por una rotura del tanque de una embarcación en la zona de muelles o en las dórsenas de aproximación o en el canal de acceso al puerto. Ante esta problemática, es necesario estudiar y estimar la extensión de los diferentes sectores que podrían resultar afectados por el eventual accidente de un derrame de hidrocarburos en la Bahía de Buenaventura.

3.2 Justificación.

En el municipio de Buenaventura convergen importantes sectores de la economía colombiana, los cuales dependen del movimiento portuario de los terminales marítimos (Santos, 2006), de manera que no es extraño, si se consideran su ubicación y su dinámica, que está sea la zona de mayor proyección geoestratégica a nivel nacional; sin embargo actualmente Buenaventura es el municipio más pobre del Valle del Cauca (Pérez, 2007); su población se encuentra en graves condiciones de vulnerabilidad puesto que no cuenta con una cobertura aceptable de servicios públicos: no tiene garantizada suficiente agua potable, el alcantarillado tiene una cobertura de aproximadamente 60% y es inoperante en importantes sectores y la recolección de basuras es considerada mala y critica (Unal, 1999), entre otros.

El control y la prevención de la contaminación en la Bahía, así como la cobertura de servicios públicos, es muy baja. Específicamente la prevención de la contaminación por hidrocarburos ha sido ignorada por mucho tiempo, hasta tal grado que no se han considerado en detalle los efectos negativos y las graves consecuencias que podrían generar sobre la salud pública del municipio, su medio ambiente y su desarrollo, un posible derrame accidental. Por lo tanto, la contaminación por hidrocarburos en Buenaventura más allá de ser una situación de interés de estudio, es una oportunidad para plantear condiciones de vida más sanas para la población del municipio.

Un primer paso en esta dirección, consistió en la implementación de herramientas jurídicas estatales, como son: el Decreto 3440 del 2004, que modificó el Decreto 3100 del 2003, y la Resolución 2145 de 2005 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente), las cuales obligan a las autoridades ambientales a establecer objetivos de calidad de los cuerpos de agua de acuerdo con su uso, conforme a los planes de ordenamiento del recurso hídrico. Por

ello, las autoridades ambientales están obligadas a reglamentar y monitorear el uso del recurso hídrico. Además, deben realizar el urgente trabajo de modelar la calidad de este recurso, lo que permitiría evaluar posibles condiciones extremas (derrames de petróleo y descargas de contaminantes orgánicos, entre otros) y definir estrategias para mantener condiciones de calidad de agua apropiadas (MinAmbiente, 2004, MinAmbiente, 2005).

Considerando la problemática ambiental de la Bahía de Buenaventura causada por el vertimiento de aguas residuales de todo tipo y los riesgos existentes ante un eventual derrame de hidrocarburos resulta necesario estudiar la dispersión de contaminantes tipo hidrocarburo debido a un posible derrame en la bahía de Buenaventura, empleando el modelo matemático MOHID.

3.3 Aspectos Generales del Municipio de Buenaventura

La Bahía de Buenaventura hace parte de la faja litoral del Valle del Cauca comprendida desde la desembocadura del río San Juan hasta el río Naya, se caracteriza por terrenos bajos, anegadizos con numerosos caños, esteros e islas, cubiertos de manglares. Entre sus accidentes costaneros se destacan la Bahía de Málaga, la Bahía de Buenaventura, donde está construida la ciudad y el principal puerto del país, el Golfo de Tortugas, la Ensenada El Tigre y Punta Soldado. Por su localización geoestratégica, es la puerta de Colombia hacia la cuenca del Pacífico, zona geoeconómica, comercial de mayor dinamismo y potencial en el mundo. Siendo declarada y reglamentada por el alto gobierno como Zona Especial 22 Económica de Exportaciones, Buenaventura se inserta en el reto del nuevo milenio, en busca de un desarrollo ambiental, social y económico.

3.3.1 Población

Buenaventura es el segundo municipio por tamaño de población en el Valle del Cauca. Según el DANE, en 2015, Buenaventura, con 399.764 habitantes, representaba el 8.6% de la población del departamento. La mayor parte de la población del municipio (91%) habita en la zona definida como urbana, que abarca 21.61 Km². Esta cabecera municipal está dividida en dos partes: i) la Isla Cascajal, zona insular que concentra las principales actividades productivas y ii) la continental, principalmente residencial (Figura 1). Éste municipio es el de mayor extensión en el departamento del Valle del Cauca (6297 Km²), la extensión en la zona rural es de 6275.4 Km² y la zona urbana de 21.6 Km². En la extensa zona rural del municipio habitan 48 comunidades

negras, reconocidas como tal por el ministerio del interior, y 22 comunidades indígenas, residentes en 9 cabildos (FEDESARROLLO-CERAC, 2013)



Figura 1. A. Colombia, B. Valle del Cauca, C. Buenaventura.

3.3.2 Condiciones Sociales

Buenaventura es el municipio más pobre del Valle del Cauca. De acuerdo con las estadísticas del DANE, en 2004 la pobreza, medida a través de los ingresos, era del 80.6% y el porcentaje de habitantes de calle era de 43.5% (Governacion del Valle del Cauca, 2005). Los altos niveles de pobreza se explican, entre otras cosas, por la dificultad de los pobladores del municipio para acceder a empleos y oportunidades laborales. Buenaventura presenta grandes niveles de desempleo respecto a la tasa de desempleo nacional; en el año 2014 la tasa de desempleo nacional fue de 9.1% mientras que la de Buenaventura fue de 64 %. Es decir, con una población de 365738 habitantes en la zona urbana, el municipio tenía 234072 personas que no habían logrado conseguir empleo (Pérez, 2007).

La población municipal tiene, además, importantes privaciones en sus servicios públicos, servicios de salud y bajos niveles educativos. Mientras la cobertura departamental en servicios de acueducto y alcantarillado es de 90%, en Buenaventura es sólo de 75.9% para acueducto y 59.6% para alcantarillado, siendo la energía eléctrica (90%) el único servicio que se acerca a la media departamental (98%). En cuanto a salud y educación los resultados no son menos preocupantes, la tasa de alfabetismo es de 83.5% -diez puntos porcentuales inferior a la del país- y 38% de la población no cuenta con ningún tipo de cobertura en salud.

Por último, pero no menos alarmante, es necesario mencionar la alta inseguridad que se vive en el municipio. De acuerdo con la Unidad de Víctimas, actualmente Buenaventura tiene una de las tasas de homicidios más altas del país (entre 101 y 187 por cada 100.000 habitantes) (Presidencia de la República, 2012); además, ha venido viviendo un largo proceso de desplazamiento forzado, tanto interurbano como intraurbano, contándose alrededor de 5.500 personas desplazadas en 10 barrios de la ciudad (COLJURISTAS, 2009).

3.3.3 Actividades Productivas

Por su localización estratégica, Buenaventura es la puerta de Colombia al océano Pacífico, zona geoeconómica comercial de mayor dinamismo y potencial en el mundo. Por ello, no es extraño que a través de su puerto se realicen el 3.3 % de las exportaciones totales del país e ingresen alrededor del 30.5% de las importaciones totales. Estas cifras son evidencia, no sólo de la constante dinámica del puerto sino también de su importancia en la economía del país.

La pesca, una de las actividades económicas tradicionales del municipio, ha venido enfrentando serias dificultades en los últimos años por cuenta de persistentes problemas de violencia e inseguridad. Sin embargo, en Buenaventura aún convergen tanto pescadores artesanales e industriales, como comercializadores y distribuidores, que hacen del sector pesquero de la cuenca Pacífico la más importante del país, con una participación del 93% de la oferta nacional (Alcaldía de Buenaventura, 2012).

Otras actividades productivas que se llevan a cabo en Buenaventura y que contribuyen al sustento de sus habitantes se agrupan en los sectores agropecuario, comercio, servicios y turismo. Las actividades agropecuarias se caracterizan por ser esencialmente extractivas; entre ellas se

destacan los cultivos de chontaduro, borjón, cítricos y la yuca, las explotaciones agroforestales de tagua y la extracción de maderas. Las actividades comerciales y de servicios, a pesar de no ser las que más recursos generan al municipio y de caracterizarse por su alta informalidad (entre 30 y 60%), son las que más mano de obra emplea.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Contaminación por Hidrocarburos

4.1.1 Los Hidrocarburos

Los hidrocarburos son compuestos orgánicos formados por cadenas lineales, ramificadas, abiertas o cerradas que constan únicamente de átomos de carbono e hidrogeno. Independientemente de la numerosa cantidad de hidrocarburos presentes en La Tierra, cada uno tiene propiedades y una estructura química que lo caracterizan, permitiendo clasificarlo de acuerdo a la nomenclatura IUPAC. Paralelamente, los hidrocarburos cuentan con las siguientes propiedades físicas, que al gobernar su movimiento son de especial interés en este trabajo.

- La gravedad específica es la densidad respecto al agua pura. El valor de la gravedad específica afecta a la mancha derramada en su movimiento, su extensión y su dispersión. Una forma de expresar la gravedad específica es mediante la API (American Petroleum Institute, Figura 2), que tiene la siguiente ecuación:

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{\text{gravedad específica} - 131.5}$$

- La Viscosidad es la resistencia a fluir, si hay mayor proporción de fracciones ligeras, menor es la viscosidad. La temperatura también influye en la viscosidad, si la temperatura aumenta la viscosidad disminuye. La viscosidad influye en la velocidad de esparcimiento, el espesor final de la mancha afecta a la eficacia de la dispersión (Laurencio and Delgado, 2007).
- La tensión superficial influye en el grado de extensión del hidrocarburo derramado. Cuanto menor es la tensión superficial, mayor es la velocidad de esparcimiento. Al aumentar la temperatura la tensión superficial disminuye y la velocidad de esparcimiento del líquido derramado aumenta.
- La solubilidad es el proceso por el que una sustancia se disuelve en otra. Los hidrocarburos tienen generalmente una solubilidad en el agua inferior a cinco partes por millón. El punto de fluidez es la temperatura a partir de la cual un líquido deja de fluir. Dependiendo de su valor, los derrames penetran fácilmente en la arena (ARCOPOL, 2011).

4.1.2 Fuentes de Contaminación por Hidrocarburos

La contaminación por hidrocarburos puede ser clasificada de acuerdo con dos conceptos: su origen y su tipo de incidencia (Tabla 1).

Tabla 1. Causas y Fuentes de contaminación por hidrocarburos en medio marino.

Fuentes de Contaminación
- terrestre, debido a actividades humanas ligadas con el medio costero - marítimo, debido al transporte y a las instalaciones en mar abierto - atmosférico, aportación hidrocarburos debido a la lluvia
Causa de Contaminación
- Accidental, representa un suceso puntual en tanto en el espacio como en el tiempo, presumiblemente evitable e involuntario. - Operacional como consecuencia directa del conjunto de actividades humanas que intervienen en el medio. - Natural, impredecibles afloraciones en yacimientos naturales. - Acciones Terroristas.

Fuente: (Güemes, 2010)

De acuerdo con estimaciones realizadas por Walker *et al.* (2003b) el volumen medio anual de hidrocarburos vertido en el mar en el mundo oscila entre 1.3 y 3.2 millones de toneladas, el cual representa cerca de 0.05% de la producción anual de crudo a nivel mundial. En el mismo estudio se determinó que la mayor carga contaminante (45%) es de origen terrestre y proviene de aportaciones operacionales, industriales y urbanas.

4.1.3 Consecuencias de la Contaminación por Hidrocarburos en el Mar

Si bien los efectos de la contaminación por hidrocarburos en el medio marino dependen en gran medida de la composición química de los contaminantes, sus consecuencias se pueden clasificar, de forma general, como de tipo agudo o crónico. Siendo la toxicidad aguda resultado de la exposición a una alta concentración de hidrocarburos durante un periodo corto de tiempo, por ejemplo después de un derrame accidental de crudo. En estas circunstancias los organismos más vulnerables son las aves, los mamíferos marinos y los peces, los cuales se exponen a: i) pérdida de la capacidad de aislamiento, por recubrimiento con hidrocarburos y la subsecuente muerte por hipotermia y ii) envenenamiento por absorción o contacto (Ekundayo and Obuekwe, 1997). La toxicidad crónica, en cambio, ocurre por exposición a dosis de contaminantes por periodos prolongados de tiempo. Sus efectos incluyen: i) disminución en la entrada de luz, como

consecuencia de la mancha de petróleo, ii) disminución en la población de organismos fotosintéticos y consecuentemente pérdida de zonas de alimento de peces subadultos, iii) efectos subletales sobre peces, aves y mamíferos que abarcan deformaciones, pérdidas de fertilidad y reducción en la tasa de eclosión de huevos (Marigómez *et al.*, 2013).

En la población humana el contacto con los contaminantes de tipo hidrocarburo se inicia por: i) la absorción por la piel; ii) la ingestión de comida y bebida; y, iii) la inhalación de gases provenientes de los hidrocarburos líquidos a través de la respiración. Y aunque sus efectos abarcan una amplia variedad de afecciones, se destacan efectos inmediatos como la depresión del sistema nervioso central, irritación de las mucosas y la piel, ataques de asma, además del estrés psicológico de la población, debido al gran efecto negativo sobre el modo de subsistencia (Bolt, 2014). Finalmente es importante destacar la correlación entre la contaminación del medio marino por hidrocarburos y perturbaciones que se observan en el largo plazo, como por ejemplo: Cáncer y pérdida de la fertilidad por ingestión de peces y moluscos contaminados con hidrocarburos poliaromáticos (HAPs), lesiones en la médula ósea por exposición prolongada a hidrocarburos gaseosos como benceno, tolueno y xileno, leucemia y tumores hematológicos (McMichael, 1988).

4.1.4 Planes de Contingencia

Un plan de contingencia consiste básicamente en establecer directrices que determinan las acciones de respuesta más apropiadas a un evento de contaminación marina. Su objetivo es el de minimizar las consecuencias del suceso, priorizando la vida humana y la protección del medio ambiente. En Colombia la mayor herramienta jurídica para contrarrestar los impactos del derrame de hidrocarburos es el “Plan Nacional de Contingencia Contra Derrames de Hidrocarburos, Derivados y Sustancias Nocivas en Aguas Marinas, Fluviales y Lacustres” (PNC) adoptado mediante el Decreto 321 de 1999. Entre los objetivos del PNC se destaca:

- Evaluación del riesgo en función de la amenaza de contaminación y la vulnerabilidad del medio.
- Definición de y asignación de funciones en la respuesta contra la contaminación.
- Criterios de operatividad, actuación y coordinación.
- Medios y recursos disponibles.

Dependiendo de la localización y características propias de un eventual suceso el PNC contempla diferentes procedimientos de alerta, recuperación y contención. Por ejemplo en el caso de un vertido masivo, como el objeto de investigación, se contemplan respuestas como contención o limpieza, siendo crucial para ambas labores la observación y el seguimiento de las manchas de hidrocarburos.

4.1.5 Modelación Numérica

En el caso de un vertido de hidrocarburos en el mar se debe comprender, interpretar y reproducir su comportamiento con el fin de diseñar una estrategia de respuesta adecuada y de este modo minimizar su impacto, además de optimizar el uso de los recursos disponibles. Para ello, es indispensable estudiar los procesos circulatorios que se presentan en el mar y su efecto en el transporte y la dispersión de hidrocarburos. Dada la alta complejidad de los fenómenos físicos que intervienen en el mar, así como el gran número de variables involucradas, es necesario recurrir al uso de modelos numéricos que simplifican el volumen de información y dan soluciones aproximadas que son de gran utilidad en la mayoría de los casos.

Específicamente, un modelo se define como cualquier herramienta de análisis que representa un sistema físico mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas o un modelo físico a escala reducida (Rauber and Rünger, 2005). La gran mayoría de modelos numéricos de fluidos derivan sus ecuaciones del principio de continuidad, de la ecuación de Navier-Stokes (2da ley de Newton) y de las ecuaciones de la Termodinámica.

Debido a la importancia de los modelos numéricos como herramientas de investigación, y en la toma de decisiones, existe actualmente una gran variedad de software (libre y comercial) disponible en el mercado. No obstante, en este proyecto se escogió para la modelación del vertimiento de hidrocarburos en la Bahía de Buenaventura, el software MOHID, producido por MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center). Las razones por las que se seleccionó dicho modelo respecto a otros disponibles en el mercado (COHERENS, EFDC, ROMS, CH3D, CCHE2D, etc.) son:

A. Es un software gratuito.

- B. Es aplicable y se ha demostrado su efectividad en el modelado de zonas costeras y estuarinas en numerosos proyectos a nivel mundial.
- C. En él se puede modelar el problema de estudio bidimensionalmente.
- D. Es aplicable a la escala de la zona de estudio de la Bahía de Buenaventura, además de haberse aplicado anteriormente en ella.
- E. Utiliza una interfaz gráfica similar a la suite de Microsoft Office 2013, característica que lo diferencia ampliamente de los demás programas y lo hace más amigable.
- F. Funciona eficientemente en un computador personal, sin altas exigencias de hardware.
- G. La información y documentación disponible para capacitar modeladores es aceptable, ya que se dispone de un manual técnico, el cual es fundamental para entender los aspectos físicos y numéricos del modelo, y un manual de usuario, el cual es una guía fundamental para utilizar el modelo. Además Periodicamente los diseñadores del software ofrecen cursos de capacitación en Latinoamérica.

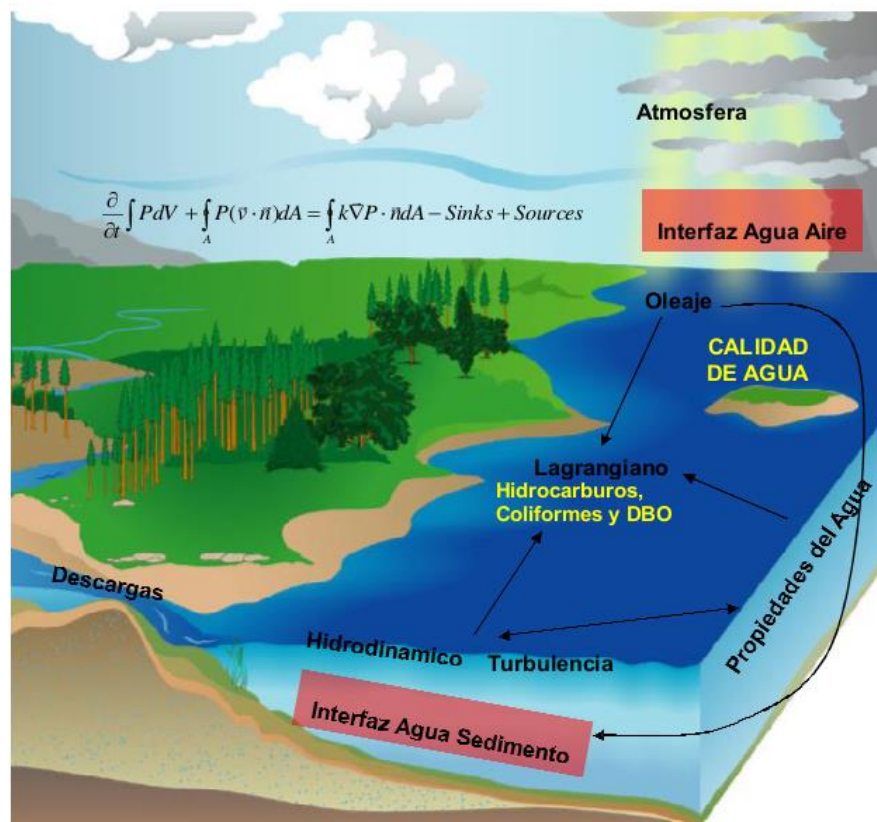


Figura 2. Ecuaciones, Variables e Interacciones Consideradas por un Modelo Hidrodinámico y de Calidad. Fuente: MOHID COURSE (2015), MOHID.

4.2 Modelo MOHID

MOHID es un modelo desarrollado mediante programación orientada a objetos en FORTRAN por MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) en el Instituto Politécnico de Lisboa. Esencialmente, MOHID es un modelo compuesto por un módulo hidrodinámico (tridimensional y/o bidimensional) y más de cuarenta módulos, entre los cuales se destacan los indicados en la tabla 2.

El modelo MOHID permite la adopción de una filosofía integrada de modelación, es decir, en él se pueden emplear diferentes escalas de modelación, permitiendo el uso de mallas, módulos y sistemas anidados (cuencas y estuarios). Además, la incorporación de las herramientas MOHID Water, MOHID Land y MOHID Soil permite al modelador estudiar el ciclo del agua mediante un enfoque integral. Finalmente, es importante indicar que la principal característica de este modelo es su versatilidad, por lo que se considera como un modelo robusto, ya que ha sido aplicado exitosamente en áreas costeras (Martins *et al.*, 2000), estuarios (Cancino and Neves, 1999), mar abierto (Batteen. *et al.*, 2000) y lagos (Antelo *et al.*, 1998), entre otros.

Tabla 2. Principales Módulos del Software MOHID

Nombre del módulo	Descripción
Model	Administra el flujo de información entre el módulo hidrodinámico y los dos módulos de transporte, además de la comunicación entre módulos anidados.
Batimétrico	Almacena la información batimétrica, la procesa y las suministra a los módulos clientes (hidrodinámico, euleriano, lagrangiano, etc).
Hidrodinámico	Calcula el nivel, velocidades y flujos de agua.
Geométrico	Almacena y actualiza información de volúmenes finitos.
Lagrangiano	Simula procesos de gradientes marcados mediante el uso de trazadores cuyas propiedades abarcan parámetros de disciplinas como física, geología, biología química, etc. Lo cual hace que su aplicabilidad sea muy alta.
Euleriano	Coordina la evolución de propiedades del agua (temperatura, salinidad, densidad, etc.)
Oil	Simula la dispersión de hidrocarburos a través de gradientes de espesor y procesos de envejecimiento de los hidrocarburos.
Turbulencia	Modela turbulencia usando la formulación GOTM.

4.2.1 Malla de Cálculo

MOHID describe la naturaleza mediante valores discretos calculados en una malla que puede tener espaciamiento constante o variable, puede ser regular, irregular o curvilínea (Figura 3).

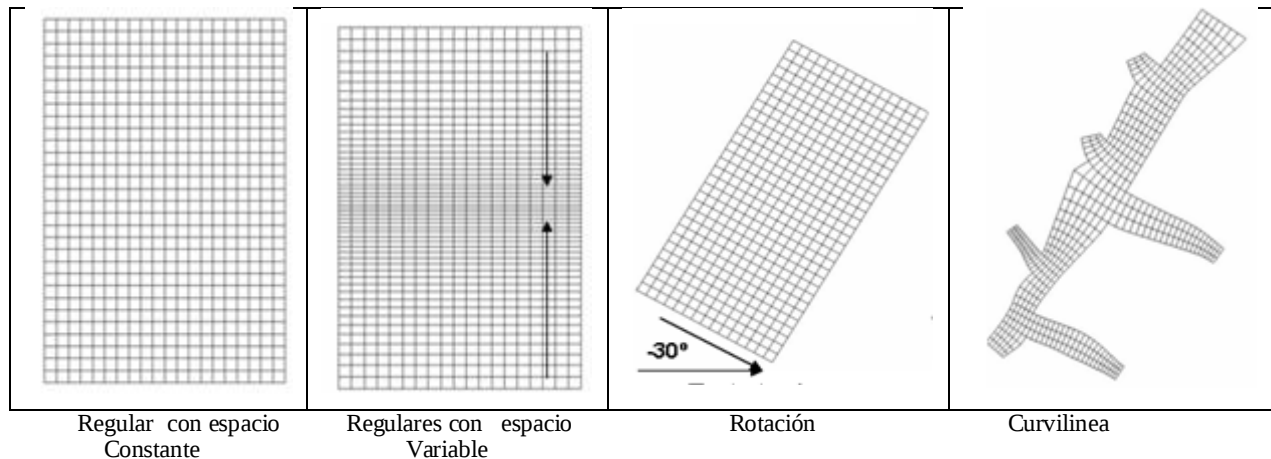


Figura 3. Tipos de Malla Utilizados por MOHID. Fuente: MOHID Module Horizontal Grid (MOHID, 2014).

Las mallas regulares con espaciamiento constante manejan celdas rectangulares, son utilizadas para dar igual importancia a todas las áreas de la región geográfica representada. Este tipo de malla puede ser girada, lo cual permite que el dominio simulado se adapte a la inclinación de las líneas de costa (Finkl and Makowski, 2014). Por otra parte, las mallas regulares con espaciamiento variable son utilizadas cuando determinadas áreas deben ser descritas con diferente resolución; por ejemplo, una malla con espaciamiento variable se puede usar con baja resolución en la frontera con el océano y con una resolución alta en las proximidades de la costa para representar con mayor detalle gradientes geomorfológicos horizontales (Neves, 2013). Para terminar, el uso de las mallas irregulares es menos común, pero sus ventajas en la representación de geometrías complejas como estuarios, lagunas con grandes redes de canales intrincados las convierten en una herramienta de mucha utilidad (Ascione Kenov *et al.*, 2014).

4.2.2 Módulo Model*

El módulo Model es el módulo más alto en la jerarquía del software MOHID y cumple dos funciones: i) la coordinación de la ejecución del módulo hidrodinámico con los módulos de transporte (Lagrangiano y Euleriano) y ii) la coordinación de la comunicación padre-hijo entre modelos anidados (ver Tabla 3).

Tabla 3. Funciones del Módulo Model.

Función	Descripción
Coordinación de la ejecución del Modelo	Consiste en la actualización del tiempo global del modelo, y la sincronización de los módulos hidrodinámico y de transporte (Lagrangiano y Euleriano) en un solo modelo.
Coordinación de la comunicación entre modelos anidados	Coordina el flujo de información entre modelos anidados y sincroniza su ejecución. La sincronización de modelos anidados sigue un orden jerárquico, cada modelo puede tener uno o más modelos anidados, los cuales a su vez pueden tener otros modelos dependientes. Toda la comunicación se realiza en una sola dirección, pasando las condiciones de borde del modelo padre a los modelos hijos.

4.2.3 Módulo Batimétrico

El módulo batimétrico lee la información de batimetría de un archivo ASCII y la envía a todos los módulos que la requieran. La información batimétrica puede ser almacenada en una malla regular, con espaciamiento variable en las direcciones 'x' y 'y', en la que la profundidad de los puntos de la malla debe ser especificada. En cuanto a las coordenadas horizontales, éstas pueden ser suministradas en varios tipos, siendo las coordenadas métricas y las geográficas las más comunes.

4.2.4 Módulo Hidrodinámico

El módulo hidrodinámico tiene la función de calcular niveles, velocidades y caudales de agua, brindando información fundamental para la ejecución de módulos de gran importancia en las diferentes aplicaciones de MOHID. Para cumplir su función, en el módulo hidrodinámico se asume una condición de equilibrio hidrostático, se emplean las aproximaciones de Boussinesq y Reynolds para resolución de las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes, provenientes, a

* No se realizó la traducción del nombre de este módulo para evitar confusiones, ya que si bien éste es parte del modelo MOHID no es propiamente un modelo, como lo indicaría su nombre en español.

su vez, de la aplicación de la segunda ley de Newton a un volumen de control de dimensiones 'dx', 'dy' y 'dz' (Figura 4).

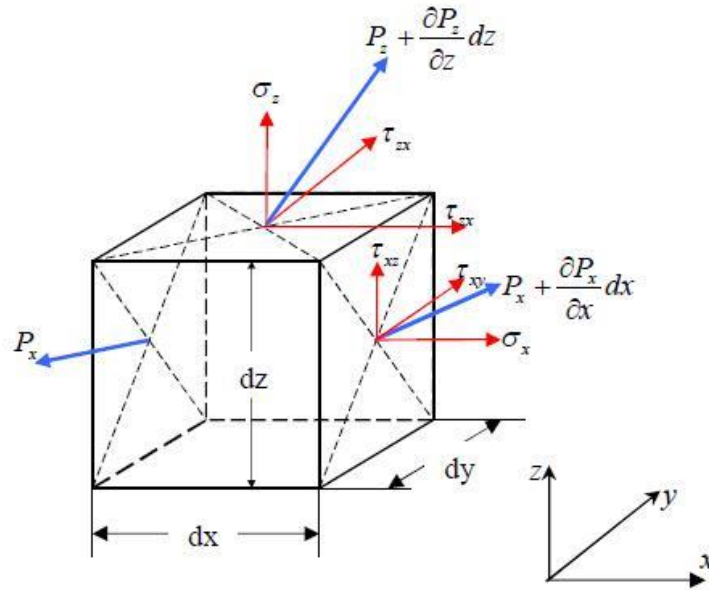


Figura 4. Aplicación de la Segunda Ley de Newton sobre un volumen infinitesimal de control deformable

Las ecuaciones del balance de momentum -procedente de las aproximaciones antes mencionadas- para las velocidades promedio del flujo horizontal, en su forma cartesiana son:

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

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

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

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 viscosidades turbulentas en las direcciones vertical y horizontal, ‘ν’ es la viscosidad cinemática, y ‘p’ es la presión. $\frac{\partial u}{\partial t}$, $\frac{\partial v}{\partial t}$ y $\frac{\partial w}{\partial t}$ 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 (siguiente tres términos) y iv) la difusión turbulenta (últimos tres términos).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Integrando entre el fondo ‘-h’ y la profundidad ‘z’ donde ‘w’ debe ser calculada se obtiene:

$$w(z) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{-h}^z u \, dx \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{-h}^z v \, dx \right]$$

La ecuación del nivel de la superficie libre del agua se obtiene integrando la ecuación de continuidad entre la elevación de la superficie $\eta(x,y)$ libre y el fondo ‘-h’, así:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[\int_{-h}^z u \, dz \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\int_{-h}^z v \, dz \right]$$

Se asume la aproximación hidrostática con:

$$\frac{\partial p}{\partial z} + g\rho = 0$$

donde ‘g’ es la gravedad y ‘ρ’ la densidad del agua. Después, si la presión atmosférica ‘p_{atm}’ es sustraída de ‘p’, la densidad es dividida por una constante de referencia ‘ρ₀’ y una desviación de ‘ρ¹’ de aquella constante de referencia, y luego de integrar de la superficie libre a la profundidad ‘z’, donde la presión es calculada, llegamos a:

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

La ecuación que relaciona la presión a cualquier profundidad con la presión atmosférica al nivel de la superficie, el nivel del mar y la presión anormal generada entre el nivel del mar y el de la superficie libre del agua. Utilizando esta expresión y la aproximación de Boussinesq, el gradiente horizontal de presión en la dirección ‘x_j’ puede ser dividida en tres parámetros:

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

De esta última ecuación se tiene que el gradiente total de presión 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 (última ecuación) en las ecuaciones de la evolución temporal de la velocidad.

4.2.5 Discretización

Debido a que las ecuaciones antes descritas son diferenciales no lineales, y no tienen solución analítica, es necesario recurrir a métodos numéricos que permiten realizar aproximaciones a sus soluciones. El modelo MOHID, por ejemplo, utiliza el método de discretización por volúmenes finitos, el cual consiste en aproximar la solución del problema de estudio mediante su representación en términos de un conjunto discreto de elementos (volúmenes). Es decir, cambia las ecuaciones continuas, descritas en el apartado anterior, por ecuaciones discretas, idóneas para ser evaluadas e implementadas en un computador (Behrens, 2006).

En la tabla 4 se presentan las características numéricas más relevantes del módulo hidrodinámico. Para un análisis más detallado puede consultarse a Neves *et al.*, (2006).

Tabla 4. Características Numéricas del Módulo Hidrodinámico.

Características Principales	
Discretización Espacial	Volúmenes Finitos
Malla Horizontal	Ortogonal
Malla Vertical	Coordenadas Genéricas
Distribución de Puntos Computacionales	Arakawa C
Discretización del Tiempo	ADI
Discretización de Fuerzas	
Fuerzas Calculadas Explícitamente	Coriolis, potencial de corriente, gradiente de presión baroclínica, presión atmosférica y estrés causado por el viento, advección horizontal y difusión del momentum.
Fuerzas Calculadas Implícitamente	Gradiente de presión barotrópica, fricción, advección vertical y difusión del momentum.

Fuente: MOHID Modelling System Description (Neves *et al.*, 2006)

4.2.6 Módulo Geométrico

El módulo geométrico calcula las áreas laterales y los volúmenes del conjunto de volúmenes finitos que el modelo MOHID aproxima al volumen de control estudiado. Para lograr esto, el módulo geométrico se apoya en información suministrada por el módulo batimétrico, e información del nivel del agua suministrada por el módulo hidrodinámico (Figura 5, campos conectados con líneas azules). Los valores calculados por el módulo geométrico son de gran importancia puesto que ellos consisten en información de entrada para los cálculos subsiguientes de los módulos hidrodinámico, lagrangiano, calidad de agua y turbulencia (Figura 5, campos conectados con líneas rojas).

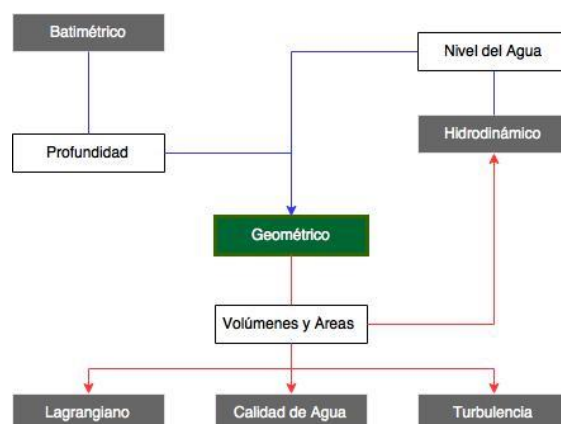


Figura 5. Flujo de información de entrada y salida del Módulo Geométrico. Fuente: Neves *et al.*, (2006).

Como fundamento teórico, el módulo geométrico considera la ley de conservación de una magnitud escalar ‘U’, con términos fuente ‘Q’ en un volumen de control ‘Ω’, así:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{\Omega} U d\Omega \right] + \oint_S \vec{F} d\vec{S} = \int_{\Omega} Q d\Omega$$

donde ‘F’ es el flujo de la magnitud escalar ‘U’ a través de la superficie ‘S’ cubriendo el volumen de control. Luego de discretizar esta expresión en una celda ‘Ω_j’, donde ‘U_j’ está definido de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (U_j \Omega_j) + \sum_{caras} \vec{F} \vec{S} = U_j \Omega_j$$

De esta manera el proceso de resolver las ecuaciones es independiente de la geometría de la celda. De hecho, la celda puede tener casi cualquier forma dado que sólo se requieren los flujos de ‘U’ (Greenberg and Leroux, 1996; Leveque and Yee, 1990). Finalmente, es importante indicar que debido a que los volúmenes pueden cambiar progresivamente, éstos son calculados y actualizados en cada intervalo de tiempo computado por el modelo MOHID, lo cual garantiza la información oportuna en los módulos cliente.

4.2.7 Módulo Lagrangiano

En el software MOHID el módulo Lagrangiano es de especial utilidad para la simulación de una amplia gama de procesos que se caracterizan por tener gradientes muy marcados, como por ejemplo: los emisarios submarinos, la erosión causada por trabajos de dragado y la dispersión de contaminantes, entre otros. El módulo Lagrangiano de MOHID 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, peces, mamíferos y sustancias químicas, entre otros. El movimiento de los trazadores es influenciado principalmente por la velocidad promedio (Boffetta *et al.*, 2004) y, por ello, las coordenadas espaciales de un trazador Lagrangiano ‘j’ están dadas por la definición de velocidad, así:

$$\frac{dx_j}{dt} = u_j(x_j, t)$$

Donde ‘u’ es la velocidad promedio y ‘x’ la posición de la partícula ‘j’ en un instante dado ‘t’. El modelo MOHID aproxima la solución a la anterior ecuación mediante el método explícito:

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

Luego, a partir de la solución aproximada obtenida, el módulo Lagrangiano calcula la velocidad en cualquier punto del volumen de control mediante interpolación lineal entre dos puntos de propiedades conocidas en el módulo hidrodinámico.

4.2.7.1 Tiempo de Residencia

En la química el Tiempo de Residencia es el parámetro que cuantifica el tiempo que una partícula permanece en un sistema dado. También se puede definir como el tiempo que tarda en cambiar significativamente la concentración en un sistema dado (Wolf and Resnick, 1963). El problema con esta definición es su generalidad. Por ello, en el software MOHID, se plantea una definición más específica al campo de la modelación hidrodinámica y considera el tiempo de residencia como el tiempo que el agua permanece en un estuario o en otros cuerpos de agua (Braunschweig *et al.*, 2003).

La importancia del parámetro Tiempo de Residencia radica en su condición de indicador de contaminación y procesos ecológicos; por ejemplo, estuarios con tiempos de residencia cortos permiten el paso de nutrientes y/o contaminantes más rápidamente que estuarios con tiempos de residencia largos, los cuales además estarán en mayor condición de vulnerabilidad (Dettmann, 2001). La metodología empleada por el módulo Lagrangiano para determinar el tiempo de residencia básicamente consiste en dividir el estuario en cajas, que a su vez permiten monitorear la distribución de trazadores en su interior y el flujo de trazadores a través de sus paredes. Una descripción detallada de esta metodología puede ser consultada en detalle en Neves *et al.*, (2006).

4.2.8 Módulo de Turbulencia

Si bien el software MOHID puede calcular de una manera simplificada el transporte turbulento de momentum, masa y calor a través de sus módulos hidrodinámico y Lagrangiano, también puede utilizar, el módulo de turbulencia, denominado modelo GOTM (General Ocean Turbulence Model), el cual agrupa una amplia gama de modelos y parametrizaciones para calcular el flujo turbulento en una forma más realista. El módulo de turbulencia es un modelo unidimensional de la columna de agua que se basa las ecuaciones promedio de Reynolds y las asunciones hidrostáticas de Boussinesq; sin embargo, la turbulencia no es un fenómeno hidrostático, de manera que su solución debe ser parametrizada. Para ello, el modelo GOTM puede utilizar siete metodologías diferentes, cuya descripción y código pueden consultarse en Umlauf *et al.*, (2011).

4.2.9 Módulo Euleriano

El módulo Euleriano, o de propiedades del agua coordina la evolución de propiedades del agua utilizando un enfoque euleriano. Esta coordinación considera procesos como el transporte advectivo, el flujo difusivo, las descargas de agua de ríos o fuentes antropogénicas (resultantes de actividades humanas), el flujo de sedimentos, el flujo de oxígeno y la transferencia de calor, entre otros.

En total, el modelo MOHID, a través de su módulo Euleriano, puede simular hasta 24 propiedades diferentes, entre las cuales se destacan: temperatura, salinidad, densidad, fitoplancton, zooplancton, fosforo orgánico e inorgánico, nitrógeno orgánico e inorgánico, demanda biológica de oxígeno, oxígeno disuelto, sedimentos cohesivos, arsénico y coliformes.

La primera ecuación empleada en el módulo Euleriano es la ecuación de transporte advectivo y flujo difusivo de una propiedad 'A':

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(uA) - \frac{\partial}{\partial y}(vA) - \frac{\partial}{\partial z}(wA) + \frac{\partial}{\partial x}\left(v'_H \frac{\partial A}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v'_H \frac{\partial A}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left((v'_t + v'_A) \frac{\partial A}{\partial z}\right)$$

donde 'u', 'v' y 'w' son las componentes de la velocidad en las direcciones 'x', 'y' y 'z'. 'v'_A' es la difusividad molecular, 'v'_H' es la difusión turbulenta horizontal y 'v'_t' es la difusión turbulenta vertical. Luego, la evolución temporal de 'A' es el balance del transporte advectivo por el flujo

dominante, la turbulencia y la fuente de donde la propiedad proviene. La segunda ecuación del módulo Euleriano es la ecuación simplificada de densidad:

$$\rho = \frac{5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S}{1779.5 + 11.25T - 0.0745T^2 - (3.8 + 0.01T)S + 0.698(5890 + 38T - 0.375T^2 + 3S)}$$

Donde ‘T’ es la temperatura y ‘S’ la salinidad. Esta es una aproximación para aguas someras y su alcance, así como el proceso empírico del cual proviene, pueden ser consultados en Scarlatos, (1996).

4.2.10 Módulo Oil

El módulo Oil tiene la función de predecir y simular la evolución de derrames de múltiples tipos de hidrocarburos, así como las propiedades del agua en tales condiciones. Este módulo puede simular acciones de respuesta al derrame de hidrocarburos, lo que lo hace útil para evaluar estrategias de contención y recuperación. Además, emplea una idealización de partículas de hidrocarburos moviéndose en el agua, las cuales siguen una trayectoria influenciada principalmente por el campo velocidad - calculado por el módulo hidrodinámico - y en menor medida por el viento, la velocidad de difusión y la velocidad aleatoria. Entre los parámetros resultantes de una simulación en el módulo Oil se destacan los siguientes procesos de envejecimiento de los hidrocarburos en el mar: esparcimiento, evaporación, emulsificación, dispersión, disolución, sedimentación y biodegradación.

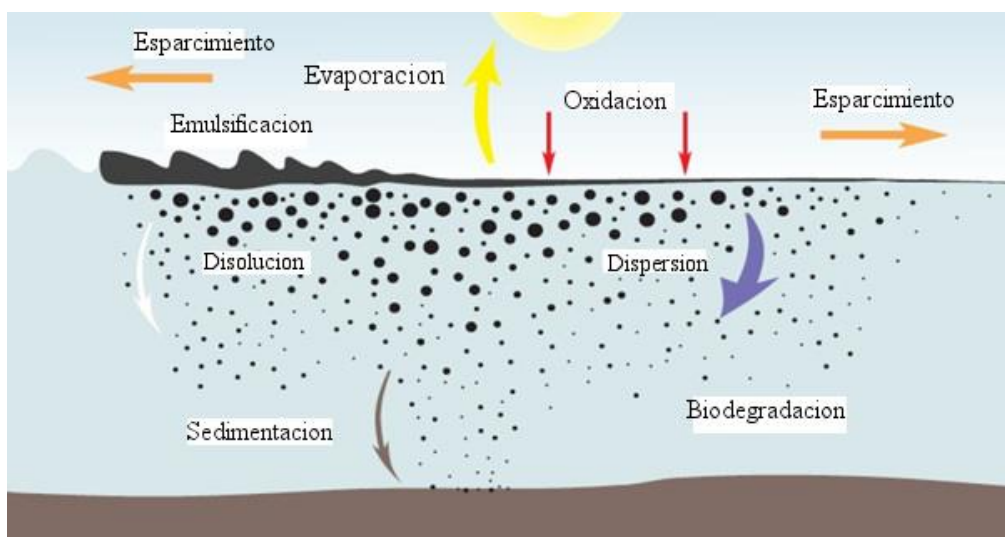


Figura 6. Procesos de Envejecimiento de un Derrame de Hidrocarburos. Fuente: ITOPF (2015).

4.2.10.1 Esparcimiento

Este proceso es inicialmente el resultado de un desequilibrio de fuerzas internas y externas entre partículas del hidrocarburo y del agua (esparcimiento mecánico). Evoluciona hasta llegar a un estado en el que la capa de hidrocarburos llega a un espesor mínimo -dependiente de la viscosidad y la densidad del tipo de hidrocarburo derramado- en el que el esparcimiento mecánico cesa. Luego de alcanzado el espesor mínimo, la mancha de hidrocarburo se fragmenta y el hidrocarburo derramado puede transportarse más rápido por la corriente, incrementándose el volumen de agua contaminado (Bambase Jr *et al.*, 1994). El módulo Oil puede simular el proceso de esparcimiento de hidrocarburos a través de dos algoritmos, uno asociado a las velocidades aleatorias de esparcimiento, formulado por Proctor *et al.*, (1994), y el otro asociado al espesor de la capa derramada, formulado por Reed *et al.*, (1989), alternando entre ellos, de acuerdo con el tamaño de la malla de cálculo y del volumen de hidrocarburo derramado.

4.2.10.2 Evaporación

Cuando se produce un derrame de petróleo en el mar, paralelamente al proceso de esparcimiento, se da un proceso de evaporación de los componentes más livianos del petróleo (gasolina y kerosene). En la medida en que esto sucede, la mancha de petróleo se hace más densa, llegando incluso a hundirse en el agua. Los factores que influyen en este proceso son el tamaño y la volatilidad del petróleo derramado, el viento, la temperatura y la turbulencia. El módulo Oil considera todos estos factores en el proceso de simulación de la evaporación y emplea dos métodos de cálculo formulados por Fingas (1998), uno para periodos de simulación mayores a dos días y otro para periodos entre uno y dos días.

4.2.10.3 Emulsificación

Algunos hidrocarburos, ante el movimiento turbulento de las olas, tienden a formar emulsiones agua-hidrocarburo más viscosas que el derrame original. Este proceso se considera crítico, ya que causa un incremento sustancial en el volumen de agua contaminado (Lessard and Demarco, 2000). El módulo Oil simula el proceso de emulsificación mediante los algoritmos propuestos por Mackay and McAuliffe (1989) y Rasmussen (1985), respectivamente.

4.2.10.4 Dispersión

Este proceso consiste en la fragmentación de la mancha de petróleo en partículas de diferente tamaño, formando una mezcla petróleo-agua en la parte superior de la columna de agua que finalmente es transportada por efectos de la turbulencia. El algoritmo de simulación de dispersión empleado por el módulo Oil es el propuesto por Delvigne y Sweeney (1988).

4.2.10.5 Sedimentación

Los productos refinados del petróleo que tienen mayor densidad que el agua terminan en el fondo del mar (se sedimentan). Este proceso también se puede dar por la adhesión de partículas de material orgánico a la mancha de petróleo o cuando ocurre un incendio después del derrame, ya que luego de consumida la parte combustible del petróleo se forman residuos que son lo suficientemente densos como para hundirse. El método empleado por el módulo Oil para la simulación de la sedimentación puede consultarse en Payne *et al.* (2003).

4.2.10.6 Disolución

Inmediatamente después de iniciado un derrame de petróleo los componentes solubles se comienzan a disolver en la columna de agua y en los alrededores del derrame. Ahora bien, este proceso tiene un gran impacto ya que por la inmediatez con la que se desarrolla causa rápidamente un incremento en la toxicidad del medio acuoso (González *et al.*, 2006). El método empleado por el módulo Oil para su simulación puede ser consultado en Huang (1983).

4.2.11 Módulo de Superficie

El módulo de Superficie es la parte del software MOHID que almacena las condiciones meteorológicas. Estas condiciones pueden ser: i) especificadas por el modelador, por ejemplo velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, punto de rocío y nubosidad, o ii) calculadas por el módulo, por ejemplo, estrés del viento, radiación solar, calor latente, calor sensible, radiación infrarroja, entre otros. El flujo de información en el módulo de Superficie se ilustra en la Figura 7.

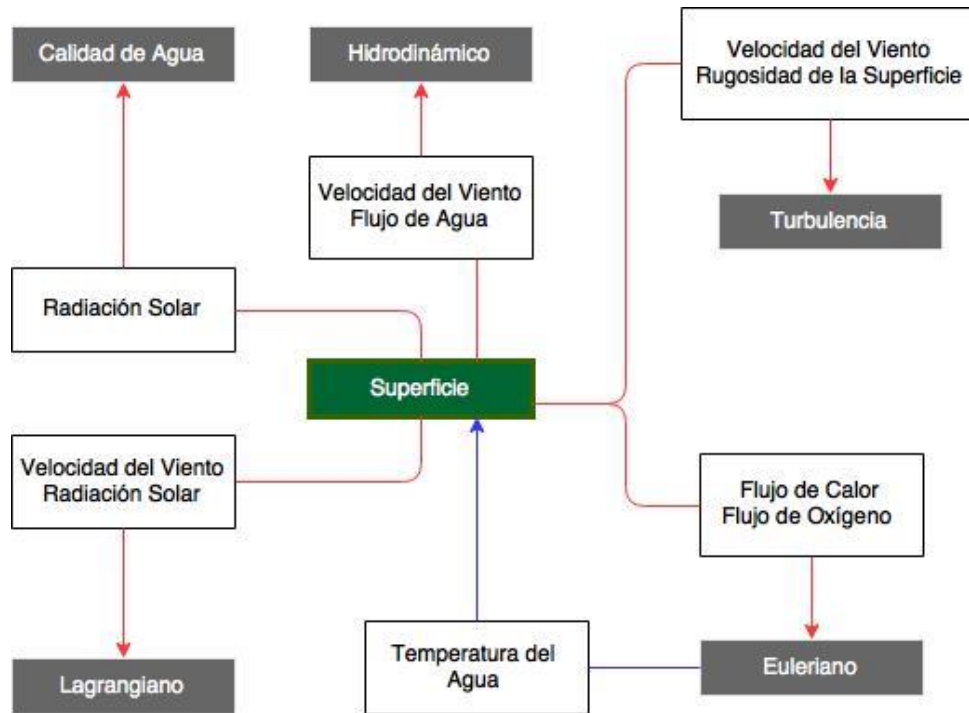


Figura 7. Flujo de Información del Módulo de Superficie.

5. METODOLOGÍA

5.1 Recopilación de información

5.1.1 Fuentes de Información

La información recopilada en este estudio fue de diferentes fuentes:

- i) Pronóstico de Pleamares y Bajamares Costa Pacífica Colombiana. IDEAM 2015.
- ii) Carta Náutica 153 y Carta Náutica 730. Dimar, 2014.
- iii) Herramienta Geográfica SAS Planet-Navionics. 2014
- iv) Manuales del Modelo MOHID.
- v) Volumen derramado por accidente más probable VAN DE WIEL, G. & VAN DORP, J. R. 2011. An oil outflow model for tanker collisions and groundings. *Annals of Operations Research*, 187, 279-304.
- vi) Información de caudales fluviales se obtuvo de Modelo hidráulico de la bahía de Buenaventura. Universidad del Valle 1990.
- vii) Registros históricos de variables hidrometeorológicas, temperatura superficial del mar y salinidad. C.V.C.

5.1.2 Procesamiento y análisis

La información que se obtuvo en el estudio –como cartas náuticas- se digitalizó, se realizó un análisis estadístico de los registros históricos, específicamente de las condiciones iniciales de las descargas de los ríos, temperatura superficial del mar, salinidad, volumen derramado y viento entre otros. Finalmente la información fue ingresada al modelo.

5.2 Realización de Curso de MOHID WATER.

La empresa Action Modulers, ofrece anualmente el curso MOHID WATER en Latinoamérica. Como parte de este trabajo y con el objetivo de capacitarse en el manejo del software MOHID Daniela Muñoz, quien desarrolló este proyecto, asistió al curso que fue ofrecido este año (2015) en la ciudad de México D.F.

5.3 Caracterización Física de la Bahía de Buenaventura

Se realizó una revisión bibliográfica sobre los principales aspectos y características de la bahía de Buenaventura. Inicialmente se realizó la descripción de la Bahía de Buenaventura como la ubicación (la bahía exterior, la bahía interior y el canal de acceso). Luego los aspectos

hidrometeorológicos como la temperatura del aire, la humedad relativa del aire, la precipitación, los vientos, la nubosidad y el brillo. Finalmente la dinámica fluvial y marina como los caudales fluviales, las corrientes, las mareas, flujo de la marea, reflujo de la marea, niveles de referencia de la marea, los volúmenes oscilantes y el oleaje.

5.4 Implementación del modelo matemático hidrodinámico.

Inicialmente se ubicó el área de interés a modelar (Bahía de Buenaventura), luego se descargó de Coastline extractor® la línea de costa, se localizó la frontera abierta y se ingresó la información de las cartas náuticas en formato XYZ. El paso siguiente consistió en la construcción de la malla de cálculo; para lo cual fue necesario definir la orientación y el tamaño de la malla. Después de tener la elevación de los puntos en nivel de sicigia, la línea de costa y la malla de cálculo, se construyó la batimetría por medio de interpolación por triangulación. Por otro lado, la marea se generó con el modelo FES 2004. Luego se realizó la modelación hidrodinámica solo con mareas, posteriormente, se ingresaron todas las descargas de los ríos y de nuevo, se realizó la modelación hidrodinámica. Finalmente, se realizó la calibración de la modelación hidrodinámica y se identificó la sensibilidad de la modelación. El modelo tiene varios parámetros de sensibilidad como son la rugosidad de manning y el tamaño de la celda.

5.5 Estudio de la dispersión de hidrocarburos.

5.5.1 Implementación del modelo de trazadores lagrangianos.

Posteriormente, se implementó la modelación de trazadores lagrangianos. El módulo lagrangiano es el mejor para representar un derrame de hidrocarburo. Entonces, primero, se activó el módulo lagrangiano, dentro de éste, se activó el módulo oil y se ingresaron todas las propiedades físicas del hidrocarburo a modelar. Finalmente, se realizó la modelación de trazadores lagrangianos acoplada al modelo hidrodinámico.

5.5.2 Planteamiento de Escenarios de Derrame de Hidrocarburo

Se plantearon los escenarios para el estudio de la dispersión de hidrocarburos debido a un posible derrame de hidrocarburos en la bahía de Buenaventura, en dos lugares, durante diferentes instantes de marea (Tabla 5).

Tabla 5. Escenarios de contaminación por hidrocarburos en la bahía de Buenaventura

Lugar	Escenario	Fecha Simulada	Condición de Marea	Volumen Derramado [†]	Latitud	Longitud
TCBUEN	1	26/12/2018 Hora: 6:12:00	Pleamar	1365.3 m ³	3.8951	-77.0439
		26/12/2018 Hora: 9:22:00	Pleamar a Bajamar		3.8951	-77.0439
		26/12/2018 Hora: 12:30:00	Bajamar		3.8951	-77.0439
		26/12/2018 Hora: 15:25:00	Bajamar a Pleamar		3.8951	-77.0439
CANAL DE ACCESO	2	26/12/2018 Hora: 6:12:00	Pleamar		3.8372	-77.1377
		26/12/2018 Hora: 9:22:00	Pleamar a Bajamar		3.8372	-77.1377
		26/12/2018 Hora: 12:30:00	Bajamar		3.8372	-77.1377
		26/12/2018 Hora: 15:25:00	Bajamar a Pleamar		3.8372	-77.1377

5.5.3 Simulación de los derrames de Hidrocarburos.

Inicialmente se ubicó geográficamente los sitios de derrame de hidrocarburos en coordenadas WGS84, luego se ingresó la características del hidrocarburo (en todas las simulaciones se ingresaron las mismas características del hidrocarburo) en el modulo oil dentro del módulo lagrangiano, además se ingresaron cada una de las fechas de las simulaciones con sus respectivas horas. Finalmente, se realizó la modelación de cada simulación acoplado al modelo hidrodinámico.

[†] Volumen derramado por accidente más probable VAN DE WIEL, G. & VAN DORP, J. R. 2011. An oil outflow model for tanker collisions and groundings. *Annals of Operations Research*, 187, 279-304.

5.6 Análisis de Resultados

Se analizaron los resultados de la modelación hidrodinámica; la velocidad en la entrada en la bahía y en el muelle y la ampliación de la marea desde la bocana hasta el muelle, entre otros. Además se analizaron los resultados de la modelación de derrame de hidrocarburos en cada sitio, la condición de marea que mayor área contamina y los lugares hasta donde el hidrocarburo puede desplazarse, entre otros.

6. RESULTADOS

6.1 Caracterización física de la Bahía de Buenaventura.

6.1.1 Descripción física de la Bahía de Buenaventura

La Bahía de Buenaventura se encuentra ubicada en la región sur-occidental de Colombia sobre la Costa Pacífica, en el departamento de Valle del Cauca, a una latitud de 3°50' Norte y longitud 77°06' Oeste. Se encuentra en el municipio del mismo nombre, el cual es el de mayor extensión del departamento del Valle del Cauca. La longitud total es de aproximadamente 33.0 km y ancho variable entre 2.3 km y 4.5 km, aproximadamente (Figura 8).

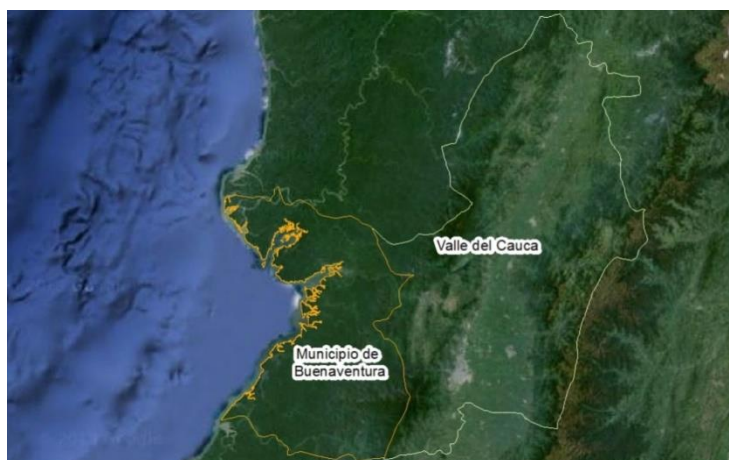


Figura 8. Localización General del Municipio de Buenaventura en el departamento del Valle del Cauca.

La Bahía de Buenaventura tiene dos grandes áreas bien definidas, como son, la bahía exterior y la bahía interior, comunicadas entre sí por un canal de acceso, el cual permite el tránsito desde mar afuera hasta el Terminal Marítimo de Buenaventura. Cabe señalar que la zona presenta características estuarinas, desarrollándose en ella fenómenos fluvio-marítimos dependientes de las acciones del mar, los ríos y los esteros que desembocan en ella.

6.1.1.1 Bahía exterior

La bahía exterior se encuentra en comunicación directa con el mar abierto, por lo cual es influenciada permanentemente por las acciones del mismo. Presenta una longitud aproximada de 18 km, 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 (Figura 9). Entre sus principales características se encuentra su fondo arenoso;

particularmente el extenso banco de arena situado a unos 10.0 km frente a La Bocana, que limita el acceso a la navegación hacia el Terminal Marítimo.

La sección de entrada a la bahía interior (La Bocana - Punta Soldado) se considera como la sección de equilibrio entre las acciones fluvio-marítimas y marítimas, lo cual se refleja en la permanencia de esta sección en el tiempo. A través de esta bocana se efectúa el tránsito de las masas de agua hacia o desde la bahía interior. En la costa norte de la bahía exterior se pueden identificar los siguientes accidentes geográficos: bahía Málaga (delimitada por la Punta Magdalena y Punta Sande), Ensenada del Tigre (delimitada por Punta Sande y Punta Piedra), Punta Barca, Maguipi, Punta Vigía de San Pablo y Punta Bazán.

En la costa sur de la bahía exterior se pueden identificar los siguientes accidentes geográficos y ríos tributarios: Boca Cajambre (desembocadura río Cajambre), Punta San Antonio, Golfo Tortugas, desembocadura río Mayorquín, Bocana Raposo (desembocadura río Raposo), Punta Arenosa, Punta Chucha (Isla Santa Bárbara) y una desembocadura de río Anchicayá (uno de sus brazos descarga directamente en la bahía exterior, al sur de Punta Soldado en la isla Soldado).



Figura 9. Bahías Exterior e Interior de Buenaventura.

6.1.1.2 Canal de acceso

El puerto de Buenaventura y los nuevos terminales marítimos existentes en la actualidad cuentan con un canal navegable común que comunica la bahía interior con la exterior (Figura 10). Su longitud es de aproximadamente 30 km, de los cuales 15 km se hallan en la bahía exterior y los otros 15 km restantes en la bahía interior. El canal de acceso empieza mar afuera en la boya de mar (localizada en el punto de coordenadas latitud $3^{\circ} 47' 39''$ N y longitud $77^{\circ} 19' 08''$ O) a unos 15 km del sitio conocido como La Bocana y continúa por la bahía interior en una extensión de 15 km hasta la boya No. 38 (localizada en el punto de coordenadas latitud $3^{\circ} 53' 07.5''$ N y longitud $77^{\circ} 05' 01''$ O), donde se inicia el acceso a los muelles del terminal marítimo de Buenaventura. Cada puerto nuevo que se instale al interior de la bahía le corresponderá construir desde la finalización del canal en la boya No. 40 su canal de acceso hasta la zona de maniobras y los atraques de sus respectivos muelles, ya que el estado colombiano tiene como compromiso con las Sociedades Portuarias el dragado del canal de acceso delimitado entre la boya de mar y la boya No. 40.

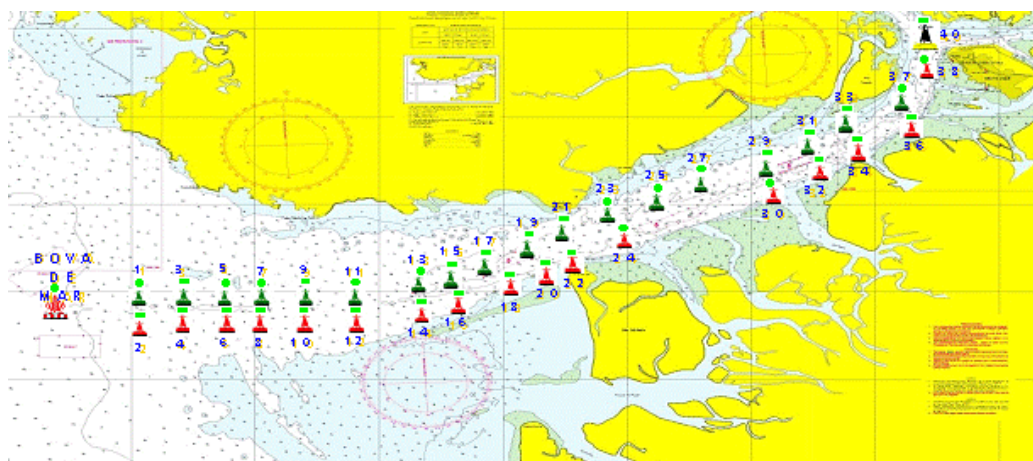


Figura 10. Canal de Acceso al Puerto de Buenaventura.

6.1.1.3 Bahía Interior

La bahía interior de Buenaventura es considerada un estuario bien mezclado debido a la combinación del agua salada del Océano Pacífico con el agua dulce de los ríos y esteros que en ella desembocan. Su longitud es de unos 15 km y su ancho varía aproximadamente entre unos 2.2 km y 4.5 km. El sistema del estuario de Buenaventura consiste de una gran ensenada rodeada por una red complicada de canales con régimen de marea, alimentados por varios ríos de agua dulce.

La bahía interior 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 innumerables ríos y arroyos en los que la marea penetra largamente. A unos 10 km de La Bocana, se estrecha abruptamente a un ancho de cerca de 2000 m., conformándose esta área por zonas planas, donde finalmente se localiza Isla de Cascajal, isla en la que se encuentra asentado el Terminal Marítimo que lleva su nombre. 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, o sea los volúmenes de agua que se mueven por efecto de la subida y bajada de la marea. Por lo tanto, la bahía presenta las características de un estuario bien mezclado la mayor parte del tiempo.

6.1.2 Aspectos Hidrometeorológicos

6.1.2.1 Temperatura del Aire

El municipio de Buenaventura pertenece al piso térmico cálido, debido a su baja altura respecto al nivel del mar. La temperatura promedio mensual multianual del aire en la Bahía de Buenaventura es de 26.2°C. Las variaciones de la temperatura durante el año son mínimas debido al alto contenido de vapor de agua en la atmósfera. Evaluando los registros de la temperatura media del aire correspondiente a las estaciones Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos se obtienen los valores medios mensuales que se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Temperatura media mensual multianual del Aire en el Municipio de Buenaventura.

ESTACIÓN	PERIODO	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (°C)												
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Media Anual
Aeropuerto	1946-2014	25.9	26.1	26.4	26.5	26.3	26.1	26.0	26.0	25.9	25.7	25.6	25.6	26.0
Colpuertos	1969-2000	26.4	26.8	27.0	27.1	27.2	26.5	26.3	26.1	26.1	25.9	25.5	25.8	26.4

6.1.2.2 Humedad Relativa del Aire

En la Bahía de Buenaventura la humedad relativa del aire mantiene niveles próximos al de saturación, originando altas condiciones de humedad en la región. El régimen de humedad durante el año es muy homogéneo, pudiendo oscilar entre 76 y 87% en la estación Colpuertos y entre 78 y 87% en la estación del Aeropuerto de Buenaventura. Sin embargo, el análisis de los valores promedio históricos indica que la humedad relativa media en el municipio es de 87%. En la Tabla 7 se pueden apreciar los valores encontrados para cada una de las estaciones meteorológicas de acuerdo con el período de medición.

Tabla 7. Humedad Relativa Media en el Municipio de Buenaventura.

ESTACIÓN	PERÍODO	HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (%)												
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Media multianual
Aeropuerto	1946-2014	88	88	88	87	88	88	88	88	89	89	90	89	88
Colpuertos	1969-2000	86	87	86	87	87	88	87	88	89	86	87	87	87

6.1.2.3 Precipitación

El municipio de Buenaventura presenta un régimen de lluvias bimodal, en el cual se distinguen dos periodos de mayor pluviosidad, como son los meses de mayo y octubre. Para el análisis de la información se utilizaron los registros históricos de las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura en los periodos 1969-2001 y 1970-2014. Para caracterizar el comportamiento pluvial de Buenaventura se estudiaron las condiciones medias de los totales de precipitación y número de días de lluvia media mensual multianual, encontrándose los resultados que se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Precipitación y Días Promedio de Lluvia en el Municipio de Buenaventura.

ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN MEDIA (mm)			DIAS PROMEDIO DE LLUVIA	
	PERIODO	MEDIA MENSUAL	MEDIA ANUAL	MEDIA MENSUAL	MEDIA ANUAL
Aeropuerto	1946-2014	601.4	6947.5	23	273
Colpuertos	1969-2000	647.87	7690.93	26	314

6.1.2.4 Vientos

La dirección, frecuencia y velocidad del viento son parámetros determinantes en las predicciones de oleaje, el cual incide de manera importante en la dinámica de las masas de agua y en la morfología costera. Esencialmente, la acción del viento puede crear un oleaje fuerte o moderado, además de causar variaciones en el nivel de la superficie libre del agua. La velocidad media anual del viento en la Bahía de Buenaventura, de acuerdo con mediciones históricas en las dos estaciones de monitoreo, es de 0.7 m/s. En la Tabla 9 se registran las velocidades medias mensuales multianuales del viento en el municipio de Buenaventura.

Tabla 9. Velocidades Medias Mensuales Multianuales del Viento en el Municipio de Buenaventura.

ESTACIÓN	PERIODO	VELOCIDAD MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DEL VIENTO (m/s)												
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Media
Aeropuerto	1946-2012	0.90	0.95	0.83	0.83	0.96	0.72	0.83	0.90	0.96	0.93	0.94	0.90	0.89
Colpuertos	1969-2000	0.70	2.00	0.90	0.20	0.10	0.10	0.40	0.50	0.40	0.20	0.20	0.60	0.53

De acuerdo con las mediciones realizadas en las estaciones Colpuertos y Aeropuerto Buenaventura las direcciones más frecuentes de ocurrencia del viento son las suroeste (SW) y oeste (W), con valores de 47.13% y 34.39%, respectivamente (Figura 11), de modo que la dirección predominante es SW. Se destaca que el alineamiento del canal de entrada a la Bahía de Buenaventura también presenta esta orientación SW.

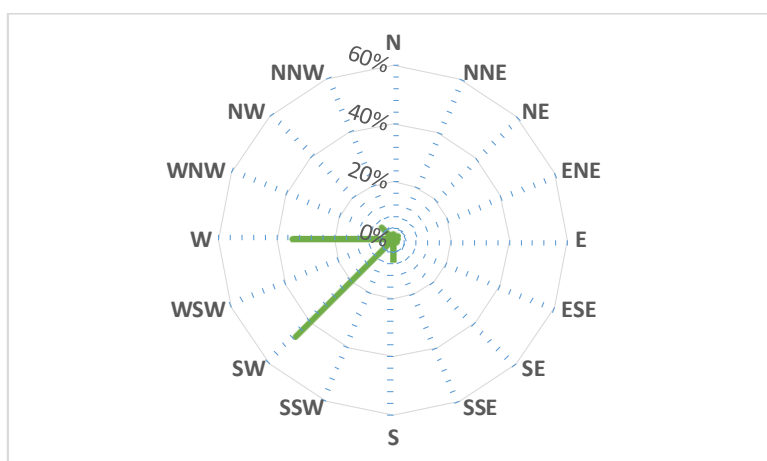


Figura 11. Rosa de los Vientos en el Municipio de Buenaventura.

6.1.2.5 Nubosidad

Según mediciones realizadas en las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura en los periodos discontinuos 1992-2000 y 1964-2011, la nubosidad presenta un valor máximo multianual de 7 octas, un valor medio multianual de 6 octas y un valor mínimo de 4 octas durante todos los meses del período. De acuerdo con estos resultados se puede afirmar que el municipio de Buenaventura permanece semicubierto de nubes durante todo el año.

6.1.2.6 Brillo Solar

Buenaventura presenta un valor medio multianual de brillo solar de 1290.5 horas por año, siendo julio y agosto los meses de mayor brillo solar. Cabe mencionar que el brillo solar que se presenta en la región es alto, a pesar de su alta nubosidad, la cual contribuye absorbiendo y reflejando gran parte de la radiación proveniente del sol.

6.1.3 Dinámica Fluvial y Marina

6.1.3.1 Cuenca Hidrográfica de Buenaventura

La cuenca hidrográfica de la Bahía de Buenaventura tiene una extensión aproximada de 2956.10 km², dividida en tres grandes subcuencas, así: cuenca del río Anchicayá, cuenca del río Dagua y la cuenca interior de la Bahía de Buenaventura, en la cual se agrupan esteros y otros canales (ver Tabla 10).

Tabla 10. Composición de la Cuenca Hidrográfica de la Bahía de Buenaventura.

Cuenca	Área (km ²)
Cuenca del río Anchicayá	1311.99
Cuenca del río Dagua	1422.01
Cuenca Interior Bahía Buenaventura	222.1
Estero Aguadulce	73.0
Estero Gamboa	31.3
Estero Aguacate	16.8
Estero San Antonio	34.0
Estero Hondo	35.0
Río Limones	32.0

6.1.3.2 Caudales Fluviales

En la Bahía de Buenaventura descargan o confluyen en total 10 tributarios, entre ríos, brazos y esteros (Figura 12), cuyos caudales mínimos, medios y máximos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Afluentes y Caudales de Descarga en la Bahía de Buenaventura.

RÍOS O ESTEROS	CAUDAL (m ³ /s)		
	MÍN	MED	MAX
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	4.0	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
Río Limones	15.0	30.0	60.0

Fuente: Universidad del Valle (1990)

El volumen de agua dulce descargado por estos afluentes varía entre el 3% y el 6% del prisma mareal, lo cual denota la gran influencia de las mareas en la hidrodinámica al interior de la bahía de Buenaventura.



Figura 12. Mapa Hidrográfico de la Bahía de Buenaventura.

6.1.3.3 Corrientes en la Bahía de Buenaventura

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. Localmente la corriente de Colombia recorre la costa de sur a norte, hasta mezclarse con las aguas del Golfo de Panamá.

A pesar de que las velocidades de estas corrientes son reportadas en las “Cartas para Pilotos del Océano Pacífico Norte” para lugares lejos de la costa, en la zona próxima a la Bahía la dinámica de las corrientes y su interacción con las corrientes mareales que entran y salen de la Bahía no es conocida suficientemente. No obstante, al interior de la Bahía se considera que las corrientes están influenciadas principalmente por las mareas, las descargas de los ríos, los vientos, el oleaje, las lluvias y la configuración del fondo del mar, siendo la marea el factor de mayor importancia, influyendo de manera determinante en el régimen de corrientes a lo largo de la bahía y en los esteros.

6.1.3.1 Mareas en la Bahía de Buenaventura

Los niveles del mar son registrados en el mareógrafo de Buenaventura, localizado en el muelle de graneles líquidos del Terminal Marítimo en la isla de Cascajal, en el sitio de coordenadas latitud 3° 54' N y longitud 77° 05' W (Figura 13). Los niveles del mar en un instante dado pueden estar determinados por la marea astronómica y la marea meteorológica (principalmente por la presión y el viento), aunque las descargas de los ríos y las marejadas producidas por las tempestades pueden afectarlos ocasionalmente.

En la bahía de Buenaventura la marea es del tipo semidiurno regular, presentando específicamente dos pleamares y dos bajamares, con un período medio de 12 horas y 25 minutos. El rango medio de la marea es de 3.11 metros, con fluctuaciones máximas registradas históricamente de 1.4 y 5.4 metros. En la Figura 14 se presenta la variación de los niveles de pleamar y bajamar durante un mes completo, pudiéndose apreciar claramente dos periodos de rangos de mareas máximas (denominadas mareas vivas) y dos periodos de rangos mínimos (denominadas mareas muertas). Durante las mareas vivas se presentan las pleamares máximas y

las bajamares mínimas, mientras que durante las mareas muertas ocurren las pleamares mínimas y las bajamares máximas, tal como puede apreciarse en la misma figura.



Figura 13. Localización del Mareógrafo en el puerto de Buenaventura

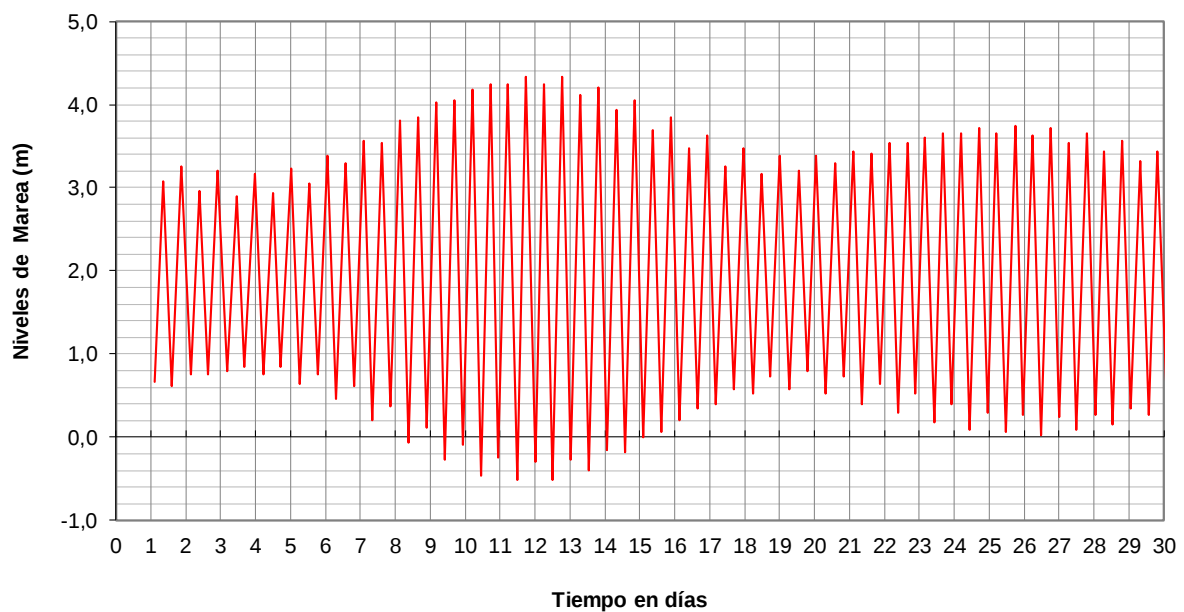


Figura 14. Niveles de Marea en la Bahía de Buenaventura. Enero de 1997 (IDEAM, 1997).

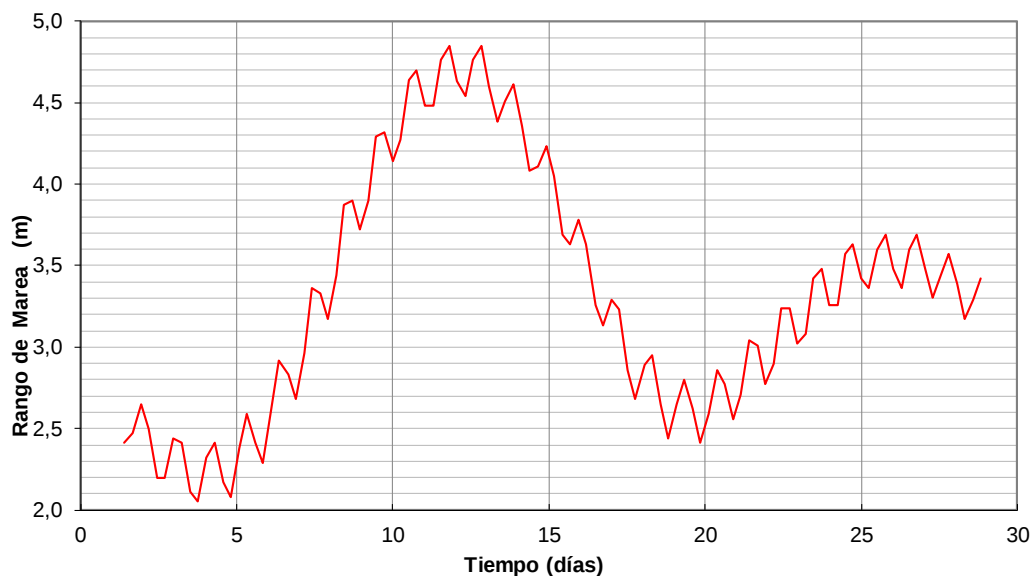


Figura 15. Variación del Rango de Marea en el Mareógrafo de Buenaventura. Enero de 1997 (IDEAM 1997)

La diferencia de amplitudes entre dos mareas consecutivas es muy pequeña (aproximadamente menor del 10%). En la Figura 15 se presenta la variación del rango de marea según los registros del mareógrafo del puerto de Buenaventura en el mes de enero de 1997, pudiéndose observar cómo va aumentando el rango de la marea hasta alcanzar un valor máximo (punto en el cual se presenta la marea viva máxima) y luego comienza a disminuir gradualmente hasta alcanzar un rango de marea mínimo (marea muerta mínima).

Es importante señalar que el periodo correspondiente al flujo o subida de la marea es casi 30 minutos más largo que el periodo de reflujo o bajada de la marea. En general, las características de la marea en la Bahía de Buenaventura son similares a las del resto de la costa Pacífica Colombiana, con pequeñas variaciones en los valores de rango de marea. Esto se debe a fenómenos, tales como, resonancia, reflexión, difracción, refracción, cambios de velocidad de la onda de marea en aguas a diferentes profundidades, etc., los cuales se producen a medida que la marea penetra en la Bahía. Así pues, en la entrada de la Bahía (sector Punta Bazán) se tienen amplitudes ligeramente inferiores a las del sector de la Isla de Cascajal. Según (Otero 2005), este aumento en la amplitud de la marea 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.

De registros de campo realizados en diferentes periodos se conoce que la onda de marea en la bahía se amplifica moderadamente; el rango de marea se incrementa a medida que ésta ingresa a la bahía, pero no es totalmente claro todavía si la tendencia de esos incrementos es independiente del rango mareal debido al reducido número de datos disponibles. Los porcentajes de incremento del rango mareal entre La Bocana y la Isla Cascajal varían entre un 5% y un 12.5 %, siendo en promedio de un 7.8 %. Si se expresa mediante una relación lineal el rango de marea en el mareógrafo del puerto de Buenaventura (localizado sobre la Isla Cascajal) ($RM_{\text{Mareógrafo}}$) con respecto al rango mareal en La Bocana (RM_{Bocana}), se obtiene la siguiente ecuación con un coeficiente de determinación R^2 de 0.99:

$$RM_{\text{Bocana}} = 0.9211 \times RM_{\text{Mareógrafo}}$$

Los desfases en la ocurrencia de bajamares y pleamares entre La Bocana y la Isla Cascajal se ha encontrado que en promedio, está entre 15 y 20 minutos. De acuerdo con las observaciones de campo disponibles, la estoa de la marea - o momento en el que el nivel permanece fijo constante en la pleamar o en la bajamar- es del orden de máximo 30 minutos.

El periodo o duración del reflujo de la marea (marea saliendo de la bahía) es menor que el del flujo de la marea (marea entrando a la bahía); por lo general, el reflujo de la marea tiene una duración de cerca de 6 horas mientras el flujo de la marea presenta una duración de aproximadamente 6 horas y 25 minutos.

6.1.3.2 Flujo de la marea (marea subiendo o marea entrante)

En términos generales, cuando la marea entra a la bahía (marea subiendo) el patrón de flujo es bastante similar en las diferentes profundidades que se tienen en la Bahía. De acuerdo con el informe “Campaña de Mediciones” del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (agosto 1980), las velocidades máximas se presentan en los tramos estrechos y en los sectores de mayores profundidades (zona del canal de navegación) aproximadamente en el período comprendido entre las 2.5 y las 4.0 horas después de los bajamares.

En la Figura 16 se puede apreciar que el flujo de agua durante la marea entrante o subiendo sigue el alineamiento del canal de navegación hasta alcanzar el sector de Isla Cangrejo, donde el flujo se divide en dos: una buena parte se dirige hacia la zona de los muelles y el estero Aguadulce, y la otra fracción se dirige hacia el sur de la isla, continuando hacia el río Dagua, el estero Hondo, el estero Piñal Sur y el estero San Antonio. Al norte de la Isla Cascajal, el flujo avanza en sentido noreste y se dirige hacia el estero Gamboa, observándose un flujo de menor intensidad hacia el estero Aguacate.



Figura 16.Esquema General del Patrón de Flujo en la Bahía Durante la Marea Entrante o Subiendo.

6.1.3.3 Reflujo de la Marea (marea bajando o marea saliente)

Durante el reflujo de la marea, las corrientes del estero San Antonio se dirigen hacia los esteros Piñal Norte y Piñal Sur (Figura 17), así: al comienzo el agua se dirige en mayor proporción hacia el estero Piñal Sur, disminuyendo gradualmente este flujo y aumentando el flujo de salida hacia el estero Piñal Norte. Hacia el final de la marea saliente, el flujo descarga en mayor proporción hacia el estero Piñal Norte.

El flujo vaciante del estero Aguacate se dirige hacia el sector de los muelles encontrándose con el flujo proveniente del estero Piñal Norte. Algunas trayectorias de corriente que provienen del

estero Aguacate siguen a lo largo de la zona muelles, mientras que otras se dirigen hacia el sector de los Muelles Nuevo y Petrolero.

Durante la fase final del refluo, en algunas zonas se observan remolinos, tales como en el sector del Muelle Nuevo y el muelle de la Bodega 9, y en proximidades de la Bodega 2. Desde el sector de la Isla Cangrejo (Sección Coco) hasta la entrada de la Bahía el flujo saliente presenta un comportamiento bastante ordenado, siguiendo trayectorias más o menos paralelas al canal de navegación. Los flujos vaciantes del Río Dagua y el estero Hondo se dirigen hacia la zona del canal de navegación, orientándose finalmente en el mismo sentido del eje del canal hacia la entrada de la bahía.

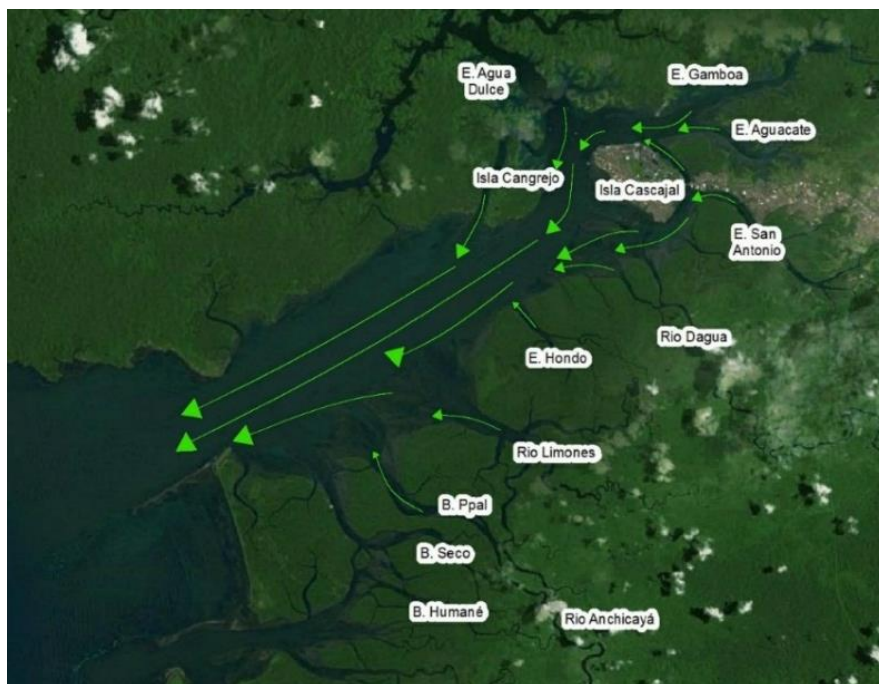


Figura 17. Esquema General del Patrón de Flujo en la Bahía Durante el Reflujo de la Marea (Marea bajando).

6.1.3.4 Niveles de Marea de Referencia

Debido a la variación continua en los niveles del mar ocasionados por las mareas, se han adoptado niveles de referencia para indicar las elevaciones de la superficie libre del agua, además de los perfiles batimétricos del fondo del mar. Los niveles indicados por el IDEAM en el “Pronóstico de Pleamares y Bajamares en la Costa Pacífica Colombiana para el año 2015” están referidos al nivel medio de las bajamares vivas o nivel de Sicigia, que es el nivel de referencia

más utilizado para fines de navegación (cartas náuticas). En la Bahía de Buenaventura se cuenta con los siguientes niveles promedio de marea, obtenidos de los registros horarios del mareógrafo de Buenaventura y presentados por el IDEAM en el período 1975 a 1997:

- Nivel medio del mar (MSL): 2.24 m
- Nivel de marea Media (MTL): 2.125 m
- Nivel de Pleamar Media (MHW): 3.67 m
- Nivel de Bajamar Media (MLW): 0.540 m
- Nivel de Pleamar Media Superior (MHHW): 3.74 m
- Nivel de Bajamar Media Inferior (MLLW): 0.449 m
- Amplitud de marea Media (Mn): 3.165 m
- Pleamar Máxima registrada: 5.40 m (Año 1997)
- Bajamar Mínima registrada: -0.82 m (Año 1993)

6.1.3.5 Volúmenes Oscilantes en los Afluentes

Los volúmenes oscilantes para las amplitudes de marea de 2.33, 2.89 y 3.46m, que corresponden a las probabilidades de ocurrencia de 75, 50, y 25% respectivamente - de acuerdo con el “Estudio Sedimentológico – fase B” del Laboratorio Central de Hidráulica de Francia (LCHF, 1974), así como el volumen oscilante correspondiente a una marea máxima de 5.4m, se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Volúmenes Oscilantes en los Afluentes de la Bahía para diferentes Amplitudes de Marea.

RÍO / ESTERO	RANGO DE MAREA (m)			
	2.33	2.89	3.46	5.4
	VOLÚMENES OSCILANTES ($\times 10^6 \text{ m}^3$)			
RÍO DAGUA	1.4	1.8	2.1	3.3
RÍO ANCHICAYÁ-BRAZO PPAL	13.5	16.8	20.1	31.3
RÍO ANCHICAYÁ-BRAZO SECO	4.4	7.4	10.5	20.9
RÍO LIMONES	1.1	3.5	5.9	14.2
ESTERO AGUADULCE	25.2	31.2	37.4	58.3
ESTERO GAMBOA	6.9	8.2	9.5	13.8
ESTERO AGUACATE	6.8	7.4	8.0	10.2
ESTERO SAN ANTONIO	8.2	10.2	12.2	19.0

El volumen oscilante total correspondiente a los ríos afluentes y esteros principales es aproximadamente el 24% del volumen oscilante total que entra y sale de la Bahía de Buenaventura, mientras que el volumen oscilante del canal de navegación corresponde al 47% del volumen total, y el de los esteros secundarios y las zonas de manglares corresponde aproximadamente al 29% del volumen oscilante total de la bahía.

6.1.3.6 Oleaje

El oleaje generado mar afuera de la Bahía de Buenaventura está determinado principalmente por la corriente Ecuatorial Marina del Sur y los vientos alisios del noreste. Como resultado de esto, las olas presentan variaciones en su dirección e intensidad, relacionadas directamente con el desplazamiento anual de los vientos de la zona de convergencia. El oleaje generado por los vientos locales, denominado “Sea Waves”, presenta una frecuencia media anual del 51 % en la dirección suroeste y del 13 % en la dirección sur, con idéntico porcentaje en la dirección oeste, mientras que la frecuencia media anual de calma es del 7%, y el valor máximo de frecuencia en un año es de 66 % en la dirección suroeste (DIMAR, 2010).

Paralelamente, el oleaje oceánico que ha progresado más allá del área de generación, conocido como “Swell”, también presenta las mayores frecuencias en la dirección suroeste, seguido en frecuencias en las direcciones sur y oeste, respectivamente. Sin embargo, se diferencia de las “Sea waves” por una frecuencia media anual de calma del 30 % (4.28 veces mayor) (DIMAR, 2010).

El oleaje de 3.0 y más metros de altura que eventualmente puede presentarse durante períodos muy cortos mar afuera de la Bahía de Buenaventura, al propagarse hacia la zona costera (atravesando la barra localizada justamente al exterior de la bahía), reduce rápidamente su altura debido a la disipación de energía por efectos de la fricción del fondo. Como resultado de esto, la altura máxima de las olas es de aproximadamente 0.9 m cerca a la entrada de la bahía (sector de La Bocana - Punta Soldado). Las olas generadas en el área costera misma alcanzan alturas máximas de unos 0.6 m. Finalmente, dentro de la Bahía de Buenaventura, las olas (de alturas reducidas) que se propagan hacia el interior, así como las generadas por vientos locales, pierden rápidamente altura debido a las pérdidas de energía por fricción, de tal manera que en la zona del Terminal Marítimo el oleaje es casi nulo (Palacios & Quirós, 2006).

6.2 Implementación de un modelo matemático hidrodinámico

6.2.1 Construcción de la malla de cálculo

Inicialmente se ubicó el área de interés (Bahía de Buenaventura) y se delimitó la línea de costa (Figura 18 línea azul), para posteriormente seleccionar el sitio donde se localizarían las fronteras abiertas. Luego, se localizó la frontera abierta al mar a 15 Km de La Bocana, se pudo generar con mayor precisión la marea con el modelo FES 2004. Las fronteras en los ríos y esteros se localizaron en los puntos hasta donde se contaba con información batimétrica, puntos donde además se generaron los volúmenes oscilantes (representados por las áreas de forma cuadrada delimitados por línea azul en la figura 18).

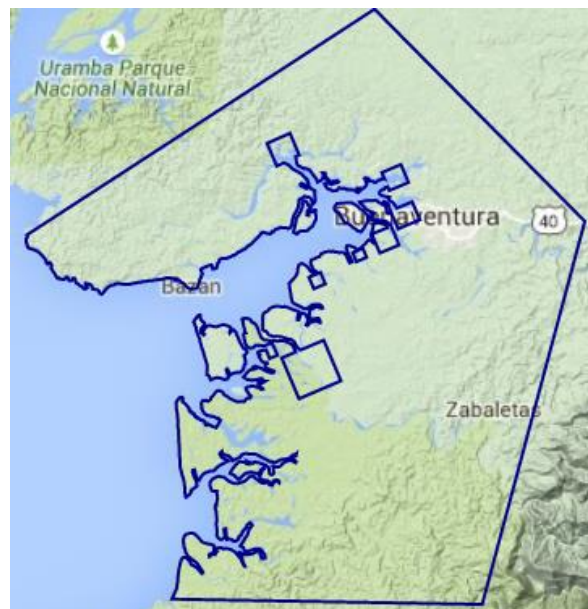


Figura 18. Línea de Costa.

La orientación de la malla de cálculo se estableció de modo que la dirección principal de las líneas de flujo fueran aproximadamente perpendicular a la frontera. Esto siguiendo las recomendaciones de Malanotte-Rizzoli et al., 1999, Hwu *et al.* (1999), con el fin de evitar posibles errores en el patrón de flujo en la frontera de mar. Finalmente se procedió a seleccionar

el tamaño de la malla, cuidando que no se afectara la estabilidad del modelo, teniendo en cuenta el número de Courant:

$$\sqrt{gh_{\max}} \frac{\Delta t}{\Delta x} < 4$$

En la modelación, el número de Courant fue siempre inferior a 4, que el tiempo de cálculo (dt) no fuera excesivo (15 s) y que el grado de detalle fuera apropiado a la región de interés. De esta manera, se logró generar una malla constante, inclinada 23° con respecto al eje S-N, con celdas de igual tamaño (100m * 100m), con una cantidad total de celdas de 317*550 y un área de 1743.5 km² (Figura 19).

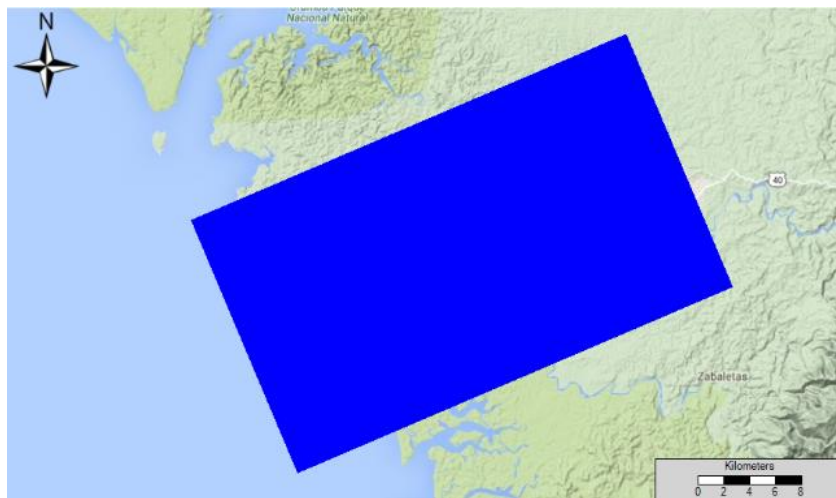


Figura 19. Malla de Cálculo.

6.2.2 Esquematización de la Batimetría

La batimetría fue generada a partir de la digitalización de las cartas náuticas 153 y 730 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe, y utilizando herramientas geográficas como SAS Planet y Navionics, cuyos dominios pueden ser observados en la Figura 20.



Figura 20. Dominios de las herramientas utilizadas en la esquematización de la Batimetría, de la Bahía de Buenaventura.

Todos los datos fueron proyectados en coordenadas geográficas WGS 84 y las profundidades referenciadas utilizando como cero el nivel de Sicigia (0m), el nivel de sicigia es el promedio de las bajamares de las mareas vivas. La batimetría varía con valores negativos por encima del nivel de Sicigia y positivos por debajo del mismo. La batimetría resultante se puede observar en la Figura 21; esta tiene un área de 665 km² con una cantidad total de celdas de 190*350.

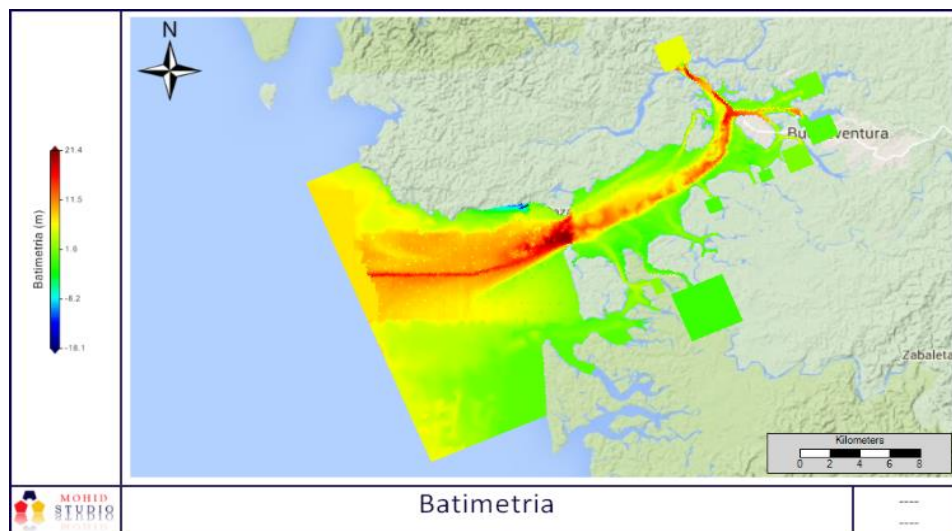


Figura 21. Batimetría de la Bahía de Buenaventura.

6.2.3 Condiciones de Frontera

La frontera con el mar está ubicada a 15 Km de La Bocana y tiene un perímetro de 33.21 Km por lo que fue necesario definir 34 puntos para la generación de la marea (Figura 21). Por otra parte, no se contó con información batimétrica de los ríos y esteros hasta los límites de

influencia mareal, lo cual obligó a establecer las fronteras internas del modelo en secciones cercanas a las desembocaduras. No obstante, para no ignorar el efecto de los volúmenes en agua de ríos y esteros almacenados en los tramos desde la frontera hasta la zona de influencia mareal, en las simulaciones realizadas se incluyeron tanques de volúmenes oscilantes correspondientes (representadas por las áreas de forma cuadrada en la Figura 22).

6.2.4 Calibración del Modelo.

En un principio se realizaron múltiples simulaciones iniciales, con diferentes valores de rugosidad, viscosidad horizontal e intervalo de tiempo. Para la rugosidad del lecho de la bahía se realizaron simulaciones considerando valores del coeficiente de manning variando entre 0.025 a 0.045; para la viscosidad horizontal se realizaron simulaciones considerando diferentes valores entre 5 y 10 m^2/s ; para el intervalo de tiempo se realizaron simulaciones considerando diferentes valores entre 5 a 15 s. A partir de las simulaciones se observó que no hay variaciones radicales en los resultados del modelo con cambios en los valores de los parámetros mencionados. Entonces los valores que se escogieron para cada parámetro fueron: Rugosidad de Manning = 0.033, Viscosidad Horizontal = $10\text{m}^2/\text{s}$, Intervalo de tiempo = 15 s, Tamaño de celda = 100 m.

Además de los parámetros anteriores, la esquematización inicial de la batimetría debió ser revisada y ajustada en la frontera con el mar, ya que el modelo generaba inestabilidades numéricas repetidamente en aquel sitio. La calibración del modelo se realizó con información de series de tiempo de mareas medidas en noviembre de 1997 por la Universidad del Valle. En las figuras 22 y 23 pueden observarse la velocidad y los niveles de marea modelados, además, los niveles medidos el día 22/11/1997 y 24/11/1997, en las estaciones la bocana, isla cangrejo, agua dulce y muelle. Al comparar los resultados mostrados en las figuras 23 y 24, se puede observar que la modelación se aproxima a la realidad hidrodinámica de la Bahía, porque ésta simula dos pleamares y dos bajamares en un mismo día, con un periodo aproximado de 12 horas 25 minutos, los niveles del agua simulados se aproximan aceptablemente a los medidos tanto en amplitud como en frecuencia. La diferencia máxima observada entre los niveles de marea medidos y calculados fue de cerca de 0.20 m, durante la bajamar del día 22/11/1997, valor bastante aceptable teniendo en cuenta las grandes profundidades de agua en la Bahía (del orden de 10 a 20 metros).

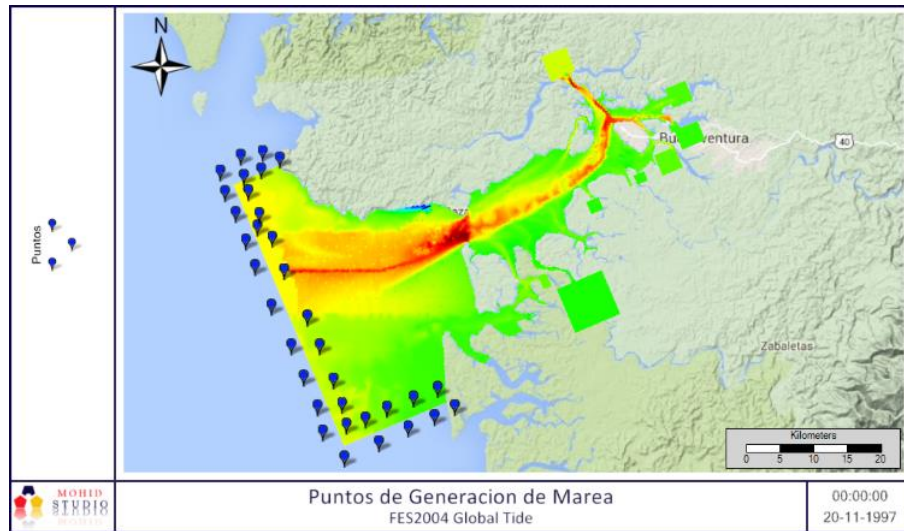
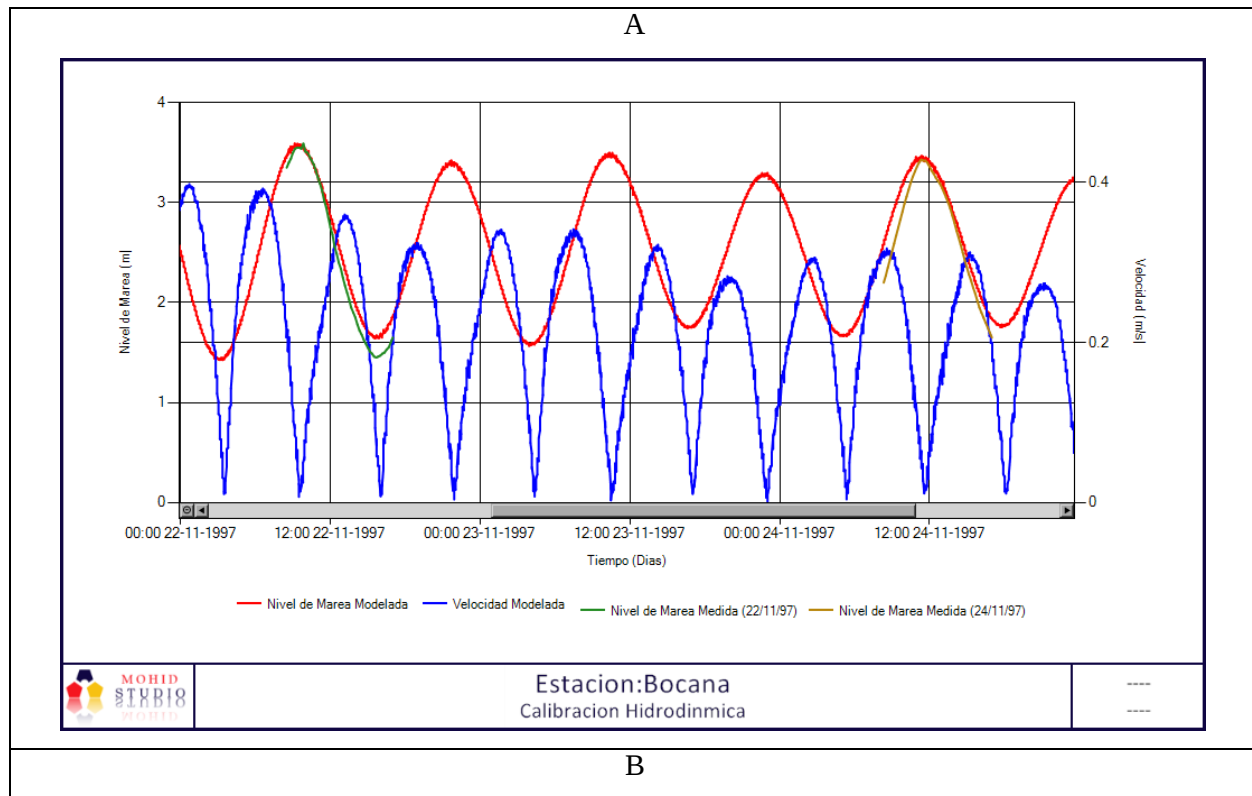


Figura 22. Puntos de Generación de Marea.



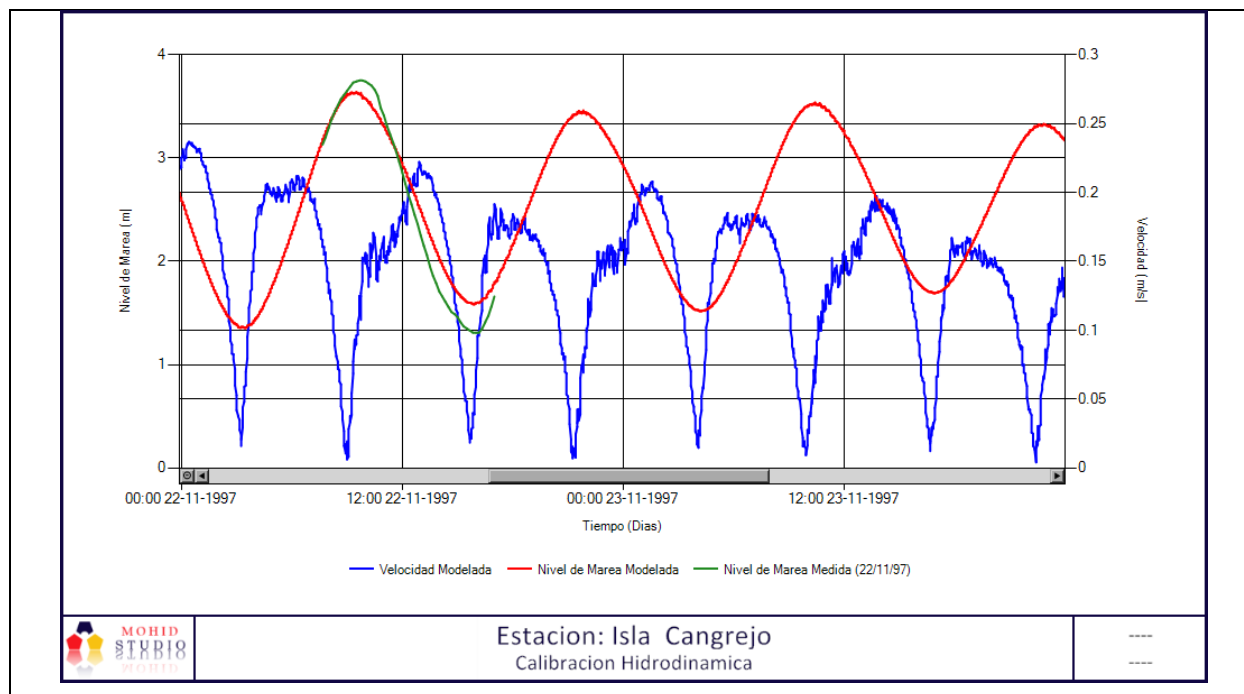
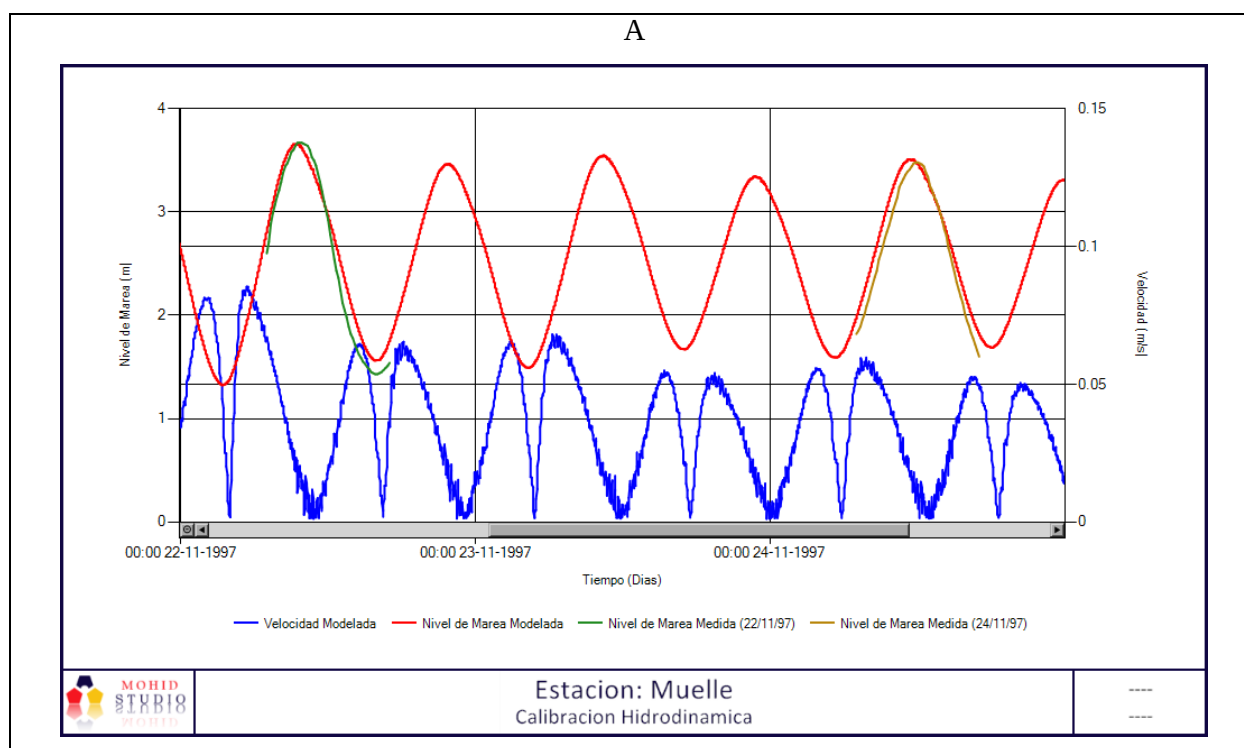


Figura 23. Calibración Hidrodinámica. A. Estacion La Bocana. B. Estacion Isla Cangrejo.



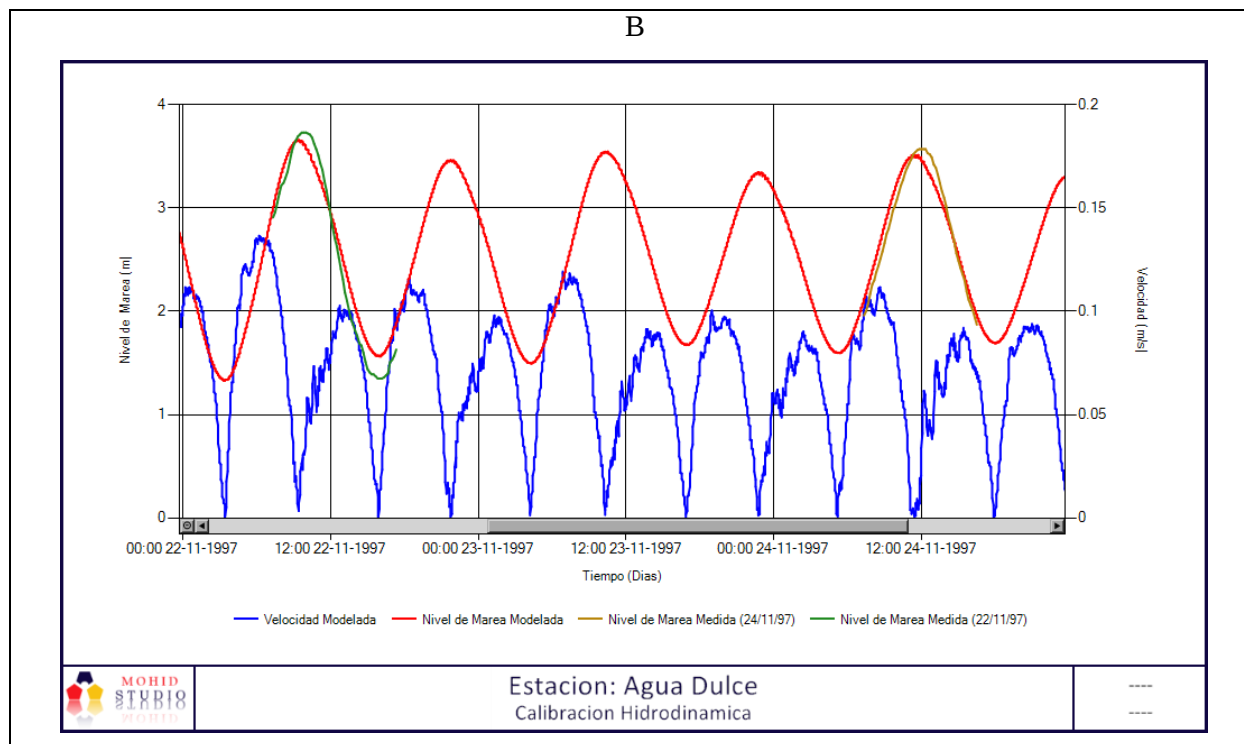


Figura 24. Calibración Hidrodinámica. A.Estacion Muelle. B.Estacion Agua Dulce.

6.2.5 Modelación Hidrodinámica

La modelación hidrodinámica se realizó para diferentes instantes del ciclo de marea para el día 26 de diciembre de 2018 (Figura 25).

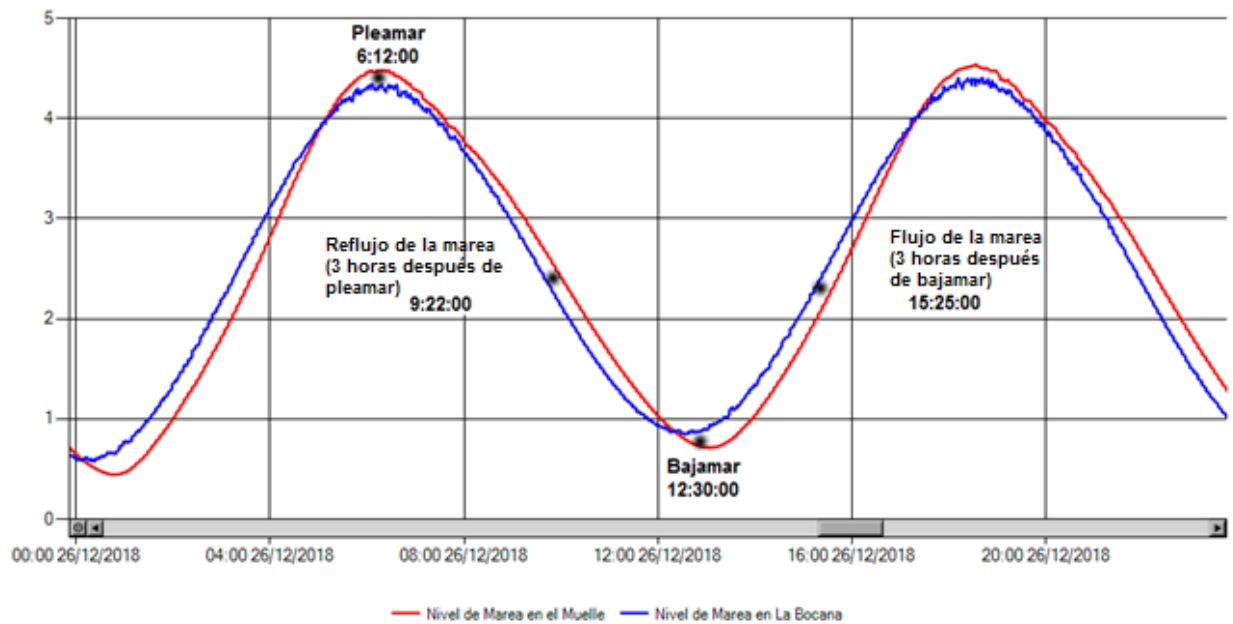


Figura 25. Diferentes instantes del ciclo mareal.

En la figura 26 se observa las velocidades en pleamar, en la figura 27 se observa las velocidades durante el reflujo de la marea (3 horas después de pleamar), la figura 28 se observa las velocidades en bajamar y en la figura 29 se observa las velocidades durante el flujo de la marea (3 horas después de bajamar). Como resultado, en cualquier instante del ciclo de marea, se determinó que existe mayor velocidad en la zona de la bocana en la entrada a la Bahía de Buenaventura con un valor de velocidad aproximado de 0.91 m/s y menor velocidades en la zona de isla cascajal con un valor de velocidad aproximado de 0.17 m/s

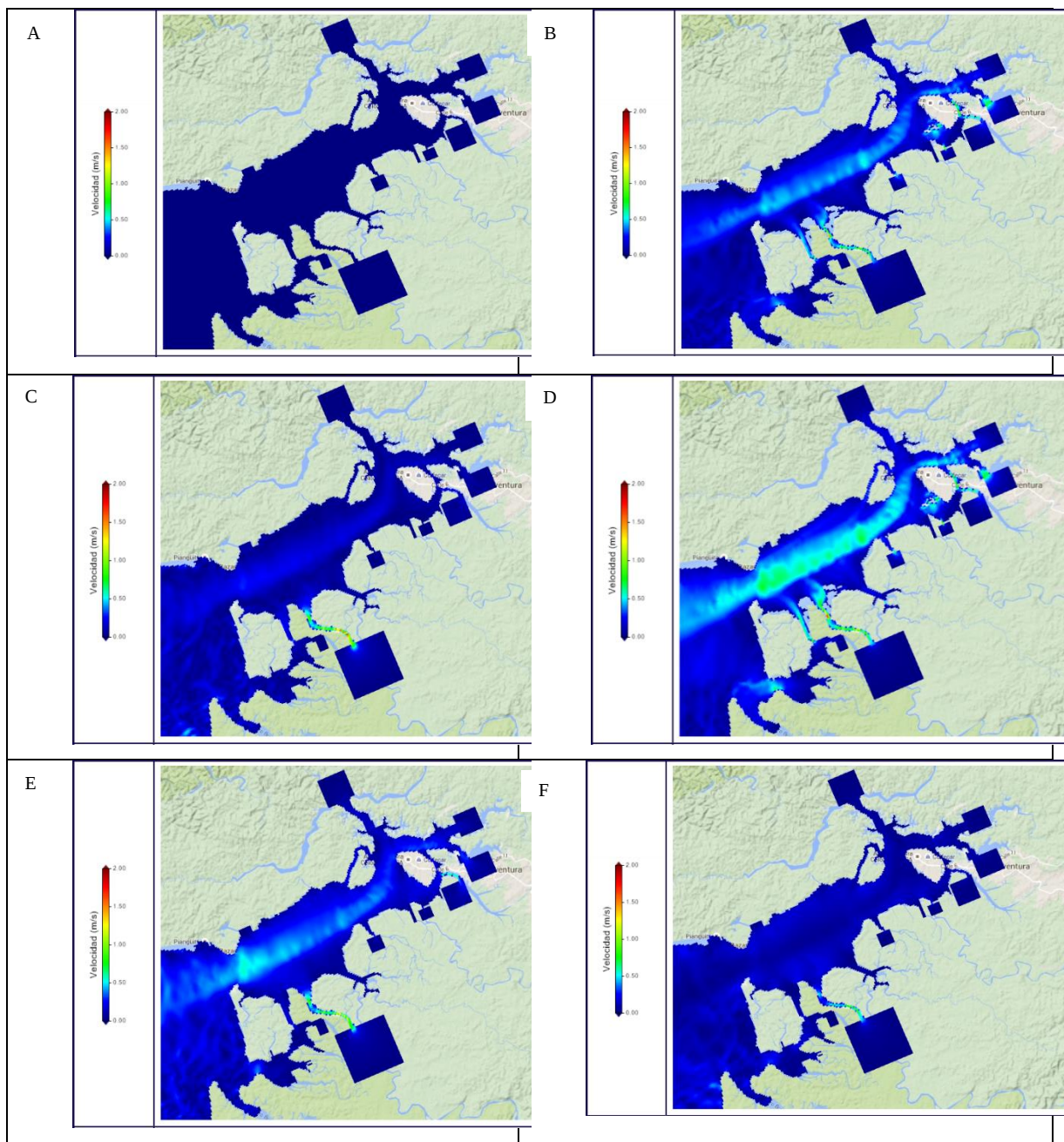
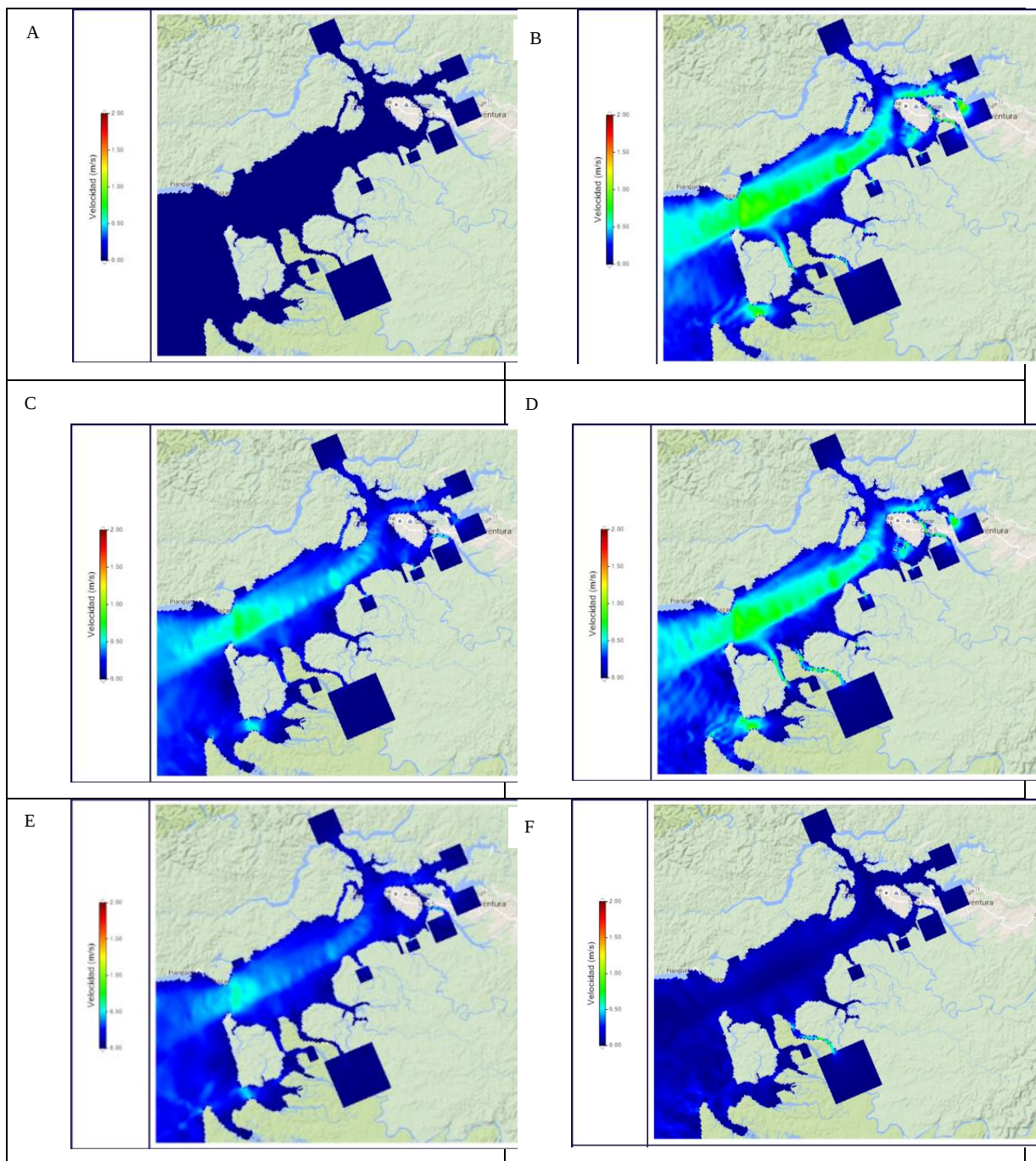


Figura 26. Velocidad A. Instante T1:6:12 (26/12/2018). B. Instante T2: 12:12 (26/12/2018). C. Instante T3: 18:12 (26/12/2018). D. Instante T4: 0:12 (27/12/2018). E. Instante T5:6:12 (27/12/2018). F. Instante T6:23:57 (31/12/2018). (Ver Figura 30)



**Figura 27.Velocidad A. Instante T7:9:22 (26/12/2018). B. Instante T8: 15:22 (26/12/2018). C. Instante T9: 21:22 (26/12/2018). D. Instante T10: 3:22 (27/12/2018). E. Instante T11:9:22 (27/12/2018). F. Instante T12:23:52 (31/12/2018).
(Ver Figura 30)**

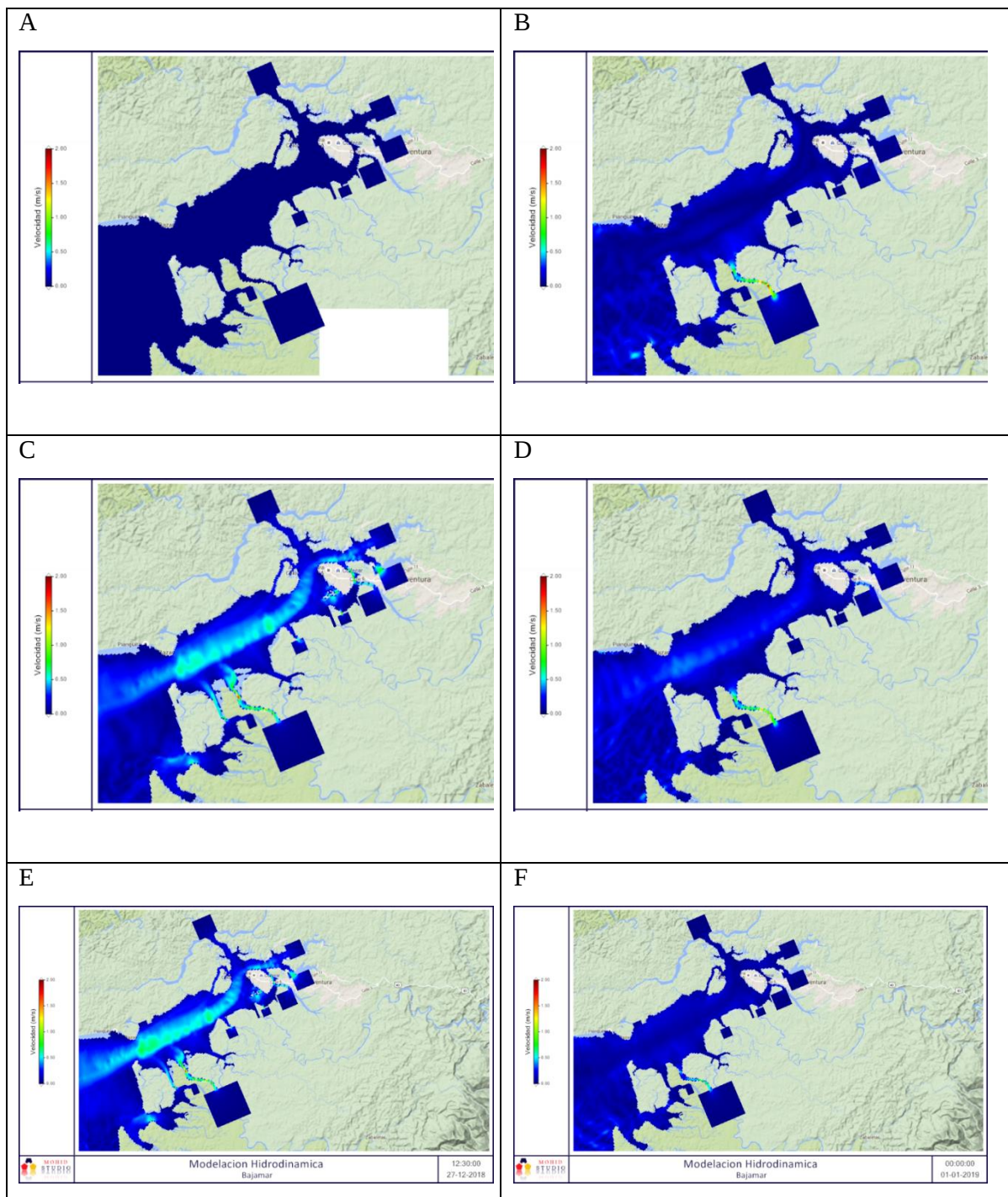


Figura 28. Velocidad en bajamar. A. Instante T13 12:30 (26/12/2018). B. Instante T14: 18:30 (26/12/2018). C. Instante T15: 00:30 (27/12/2018). D. Instante T16: 6:30 (27/12/2018). E. Instante T17:12:30 (27/12/2018). F. Instante T18:00:00 (01/01/2019).

(Ver Figura 30)

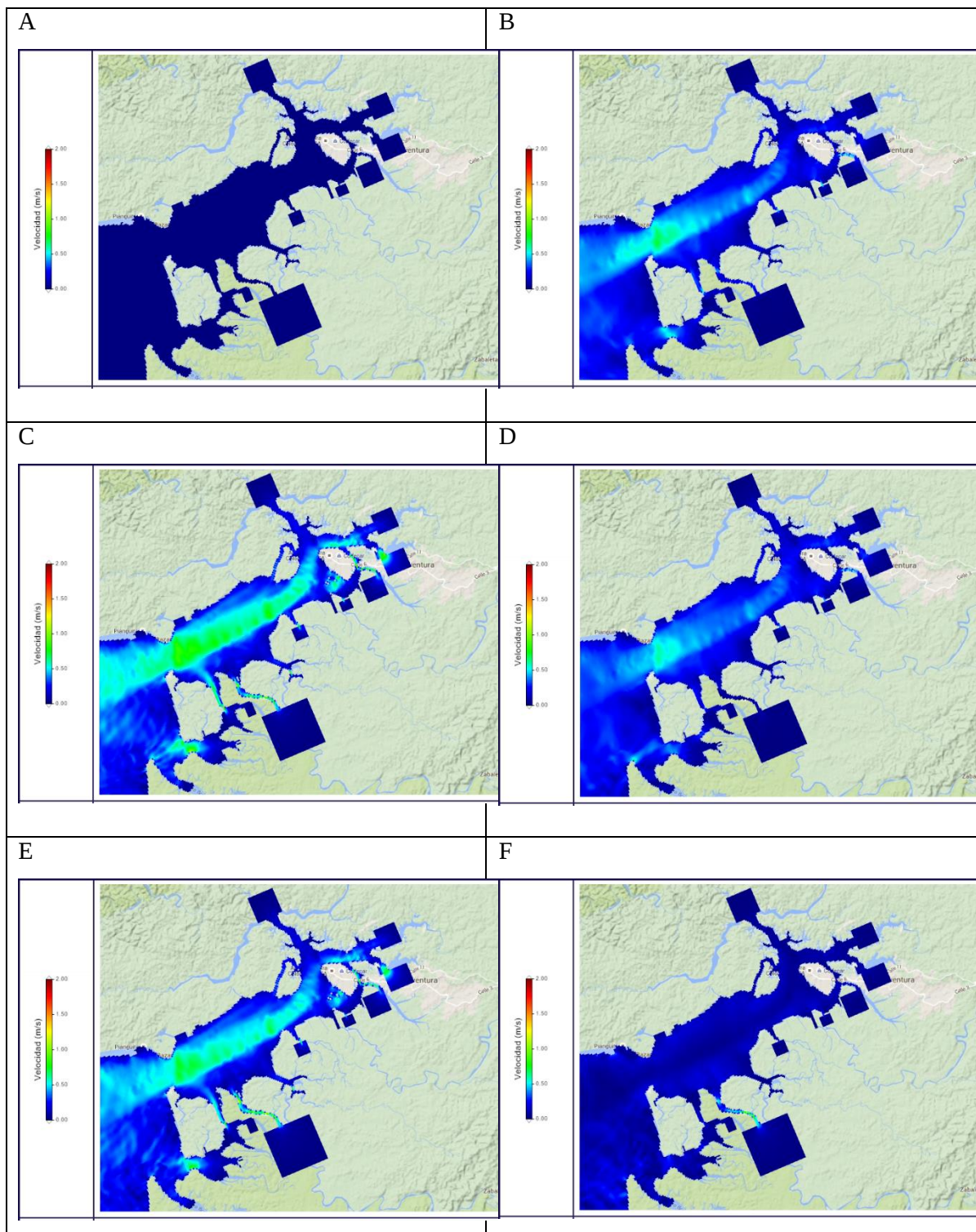


Figura 29. Velocidad durante el flujo de la marea (3 horas después de bajamar). A. Instante T19:15:25 (26/12/2018). B. Instante T20:21:25 (26/12/2018). C. Instante T21:03:25 (27/12/2018). D. Instante T22:09:25 (27/12/2018). E. Instante T23:15:25 (27/12/2018). F. Instante T24:23:55 (31/12/2018). (Ver Figura 30)

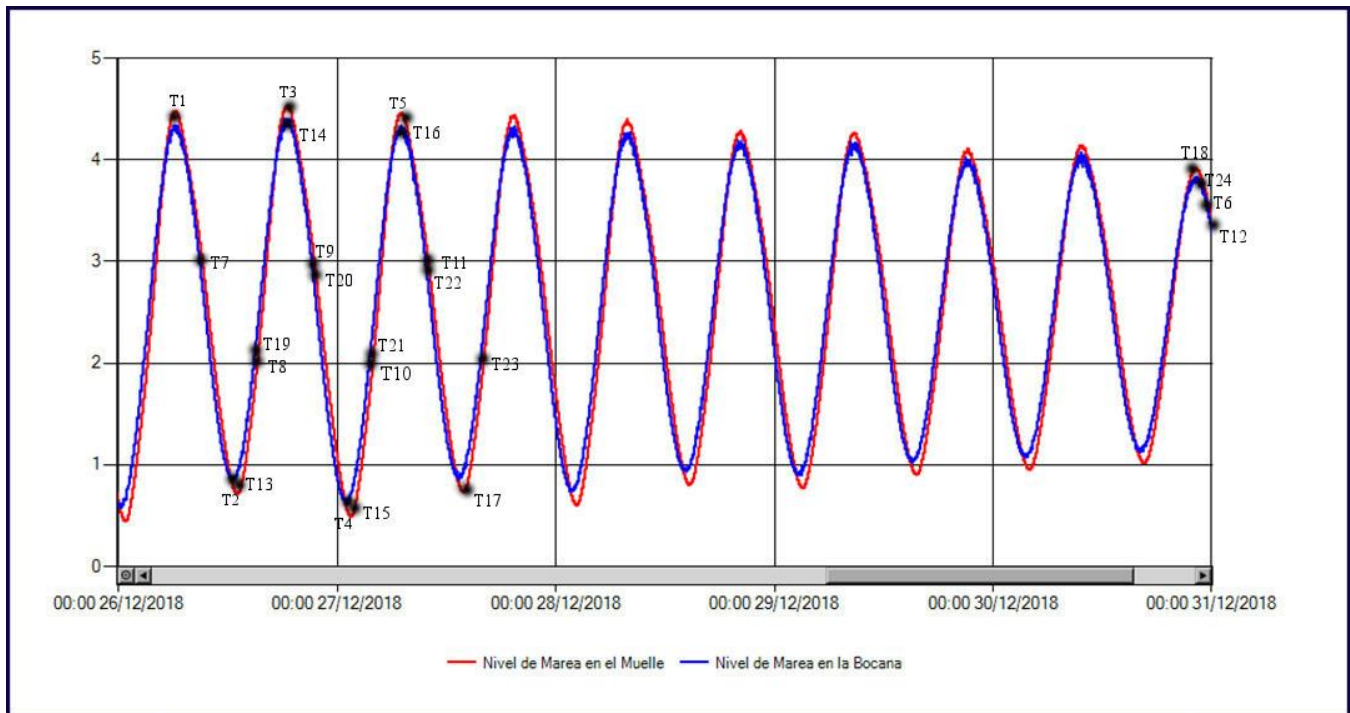


Figura 30. Instantes de las Velocidades de la modelación hidrodinámica.

6.3 Implementación de un Modelo de Trazadores Lagrangianos.

6.3.1 Escenarios de contaminación por hidrocarburos en la bahía de Buenaventura.

Con el propósito de estimar la dispersión de hidrocarburos vertidos en la bahía de Buenaventura debido al posible derrame accidental de los mismos se plantearon, simularon y analizaron diferentes escenarios. En éstos se consideraron dos sitios derrame (en el canal de acceso al puerto ($x -77.1377$, $y 3.8372$) en coordenadas geográficas WGS 84, y frente al terminal marítimo TCBUEN) (Figura 31) y durante diferentes instantes del ciclo mareal (Pleamar, durante el reflujo de la marea (3 horas después de pleamar), Bajamar y durante el flujo de la marea (3 horas después de bajamar)). Las propiedades físicas del hidrocarburo se pueden observar en la tabla 13.

Tabla 13. Características Físicas del Hidrocarburo.

Propiedad	Valor
API	44.1
Viscosidad (cp)	33
σ (dyn/cm)	30
Retención de agua (%)	70
Coeficiente de Emulcificación (s^{-1})	$1.60 \cdot 10^{-6}$



Figura 31. Sitios de derrame de hidrocarburo.

6.3.2 Modelación de Trazadores Lagrangianos

6.3.2.1 Derrame de Hidrocarburo en TCBUEN

6.3.2.1.1 Derrame de Hidrocarburo en TCBUEN en el Instante de Marea Pleamar

El movimiento en la bahía ocasiona que luego de 6 horas el hidrocarburo afecte la entrada al estero aguacate y cerca de la zona norte de la isla cascajal (Figura 32. B), pasadas 12 horas de ocurrido el derrame, el hidrocarburo es desplazado hacia los esteros Aguacate, Gamboa, la entrada del estero Aguadulce, isla Cascajal y estero San Antonio (Figura 32, C). Luego a las 18 el hidrocarburo afecta la zona norte de la isla cascajal, los esteros Aguacate, Gamboa y San Antonio (Figura 32, D). Aproximadamente 24 horas después el hidrocarburo es desplazado hacia la zona norte de la isla cascajal, los esteros San Antonio, Aguacate, Gamboa y la entrada al estero aguadulce (Figura 32, E). Después de una semana la contaminación se extiende, afectando la entrada a la zona interior de la bahía, la isla Cascajal, los esteros Aguacate, Gamboa, la entrada a los esteros Aguadulce y San Antonio. Es importante mencionar que parte del hidrocarburo queda en las orillas de los esteros mencionados (Figura 32F y Figura 35, A).

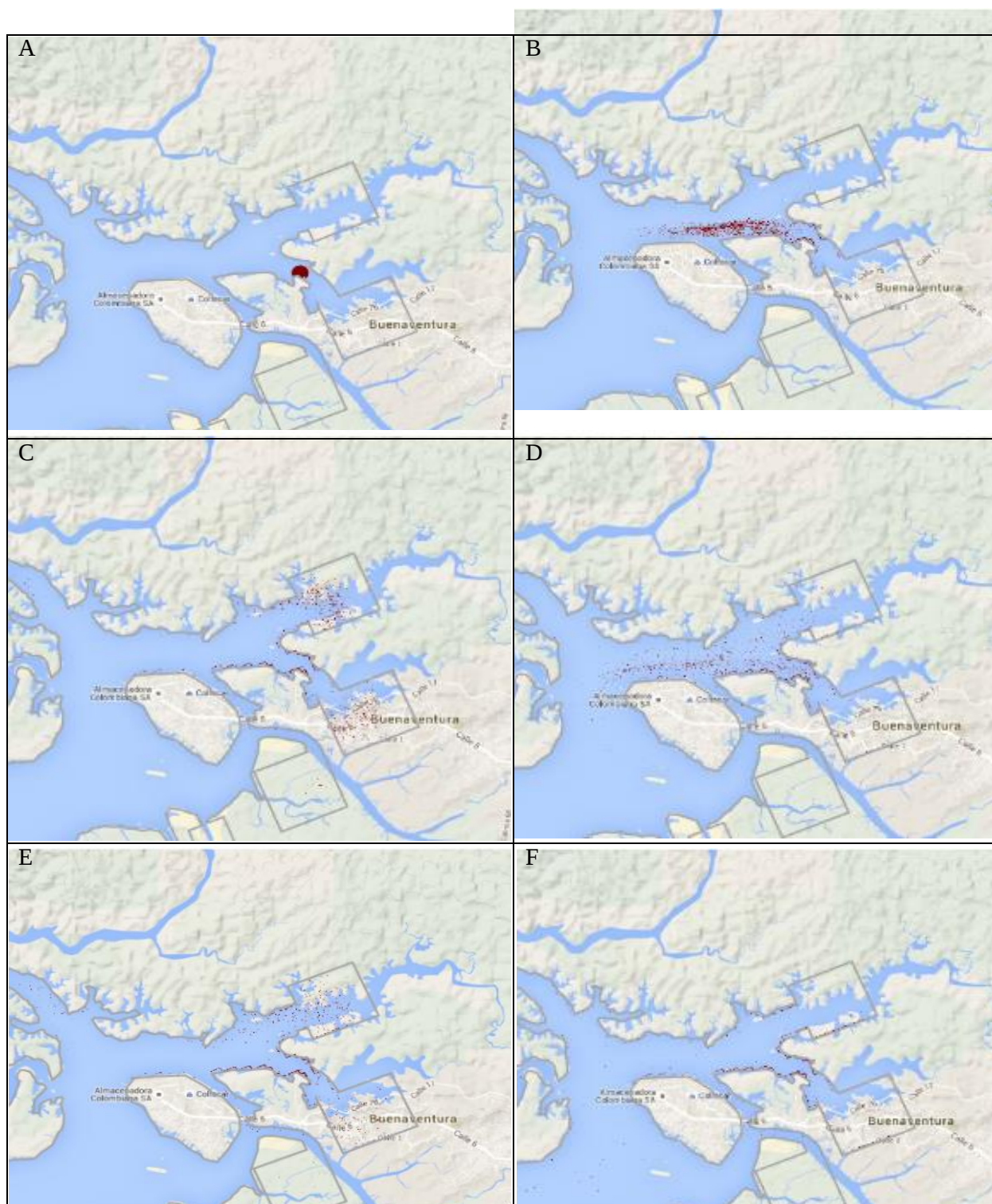


Figura 32. Derrame de hidrocarburo en TCBUEN en pleamar. A. Hora:6:12 (26/12/2018). B. Hora:12:12 (26/12/2018). C. Hora: 18:12 (26/12/2018). D. Hora: 0:12 (27/12/2018). E. Hora:6:12 (27/12/2018). F. Hora:23:57 (31/12/2018).

6.3.2.1.2 Derrame de Hidrocarburo en TCBUEN Durante el Reflujo de la Marea (3 horas después de pleamar).

El movimiento en la bahía causa que a las 6 horas el hidrocarburo afecte la zona norte de la isla Cascajal, la entrada de los esteros Aguacate y Gamboa (Figura 33. B), pasadas 12 horas afecta la zona norte de la isla Cascajal, los esteros San Antonio, Gamboa y Aguacate (Figura 33, C). Después a las 18 horas el hidrocarburo es desplazado hacia los esteros San Antonio, Aguacate y Gamboa (Figura 33, D). Alrededor de las 24 horas después el hidrocarburo es desplazado hacia la zona norte de la isla cascajal, los esteros Gamboa, San Antonio, Aguacate y la entrada al estero aguadulce (Figura 33, E). Durante una semana la contaminación se extiende, afectando la entrada a la zona interior de la bahía, la isla Cascajal, los esteros Aguacate, Gamboa, San Antonio y la entrada a los esteros Aguadulce. Es importante mencionar que parte del hidrocarburo queda en las orillas de los esteros mencionados (Figura 33, F y Figura 35, B).

6.3.2.1.3 Derrame de Hidrocarburo en TCBUEN en el instante de marea Bajamar

El movimiento en la bahía causa que a las 6 horas el hidrocarburo afecte los esteros Aguacate y Gamboa (Figura 34. B), pasadas 12 horas afecta la zona norte de la isla cascajal, el estero aguacate y la entrada al estero Gamboa (Figura 34, C). Luego a las 18 horas el hidrocarburo afecta la zona norte de la isla Cascajal, la entrada al estero Aguadulce, los esteros Aguacate, Gamboa y San Antonio (Figura 34, D). Cerca de las 24 horas después el hidrocarburo es desplazado hacia la zona norte de la isla cascajal, los esteros Gamboa y Aguacate (Figura 34, E). Durante una semana la contaminación se extiende, afectando la entrada a la zona interior de la bahía, la isla Cascajal, los esteros Aguacate y Gamboa, la entrada a los esteros Aguadulce y San Antonio. Es importante mencionar que parte del hidrocarburo queda en las orillas de los esteros mencionados (Figura 34, F y Figura 37, A).

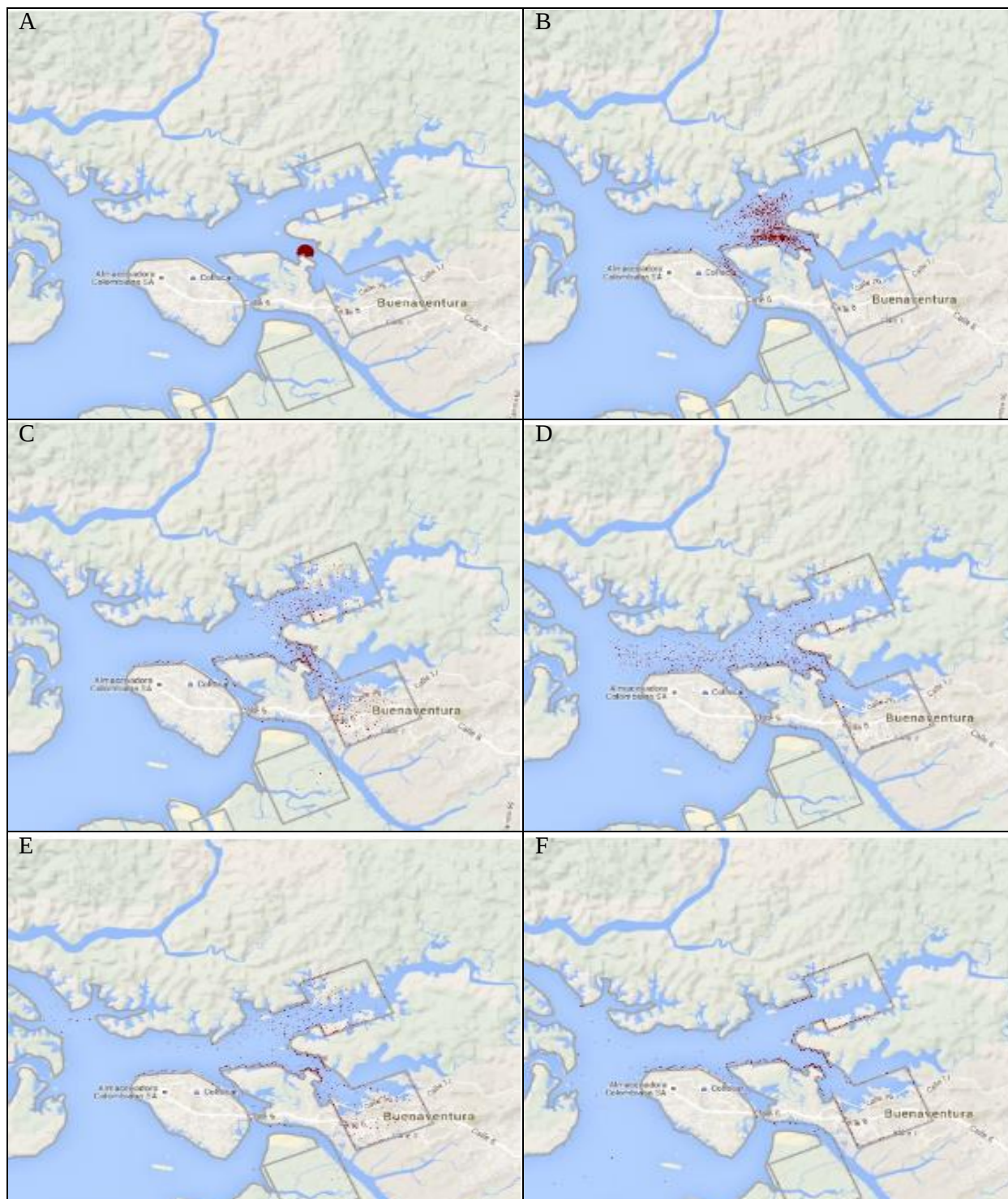


Figura 33. Derrame de hidrocarburo en TCBUEN durante el refluo de la marea (3 horas después de pleamar). A. Hora: 9:22 (26/12/2018). B. Hora: 15:22 (26/12/2018). C. Hora: 21:22 (26/12/2018). D. Hora: 3:22 (27/12/2018). E. Hora: 9:22 (27/12/2018). F. Hora: 23:52 (31/12/2018).



Figura 34. Derrame de hidrocarburo en TCBUEN en bajamar. A. Hora: 12:30 (26/12/2018). B. Hora: 18:30 (26/12/2018). C. Hora: 00:30 (27/12/2018). D. Hora: 6:30 (27/12/2018). E. Hora: 12:30 (27/12/2018). F. Hora: 00:00 (01/01/2019).

6.3.2.1.4 Derrame de hidrocarburo en TCBUEN durante el flujo de la marea (3 horas después de bajamar)

El movimiento en la bahía causa que a las 6 horas el hidrocarburo afecte al estero aguacate (Figura 36. B). Luego, pasadas las 12 horas el hidrocarburo afecta el estero Aguacate, la entrada al estero Gamboa y la zona norte de la isla cascajal (Figura 36, C). Después de las 18 horas el hidrocarburo afecta la zona norte de la isla Cascajal, la entrada al estero Aguadulce, los esteros Aguacate, Gamboa y San Antonio (Figura 36, D). Aproximadamente 24 horas después el hidrocarburo es desplazado hacia la zona norte de la isla cascajal, los esteros Gamboa y Aguacate (Figura 36, E). Durante una semana la contaminación se extiende, afectando la entrada a la zona interior de la bahía, la isla Cascajal, los esteros Aguacate y Gamboa, la entrada a los esteros Aguadulce y San Antonio. Es importante mencionar que parte del hidrocarburo queda en las orillas de los esteros mencionados (Figura 36, F y Figura 37, B).

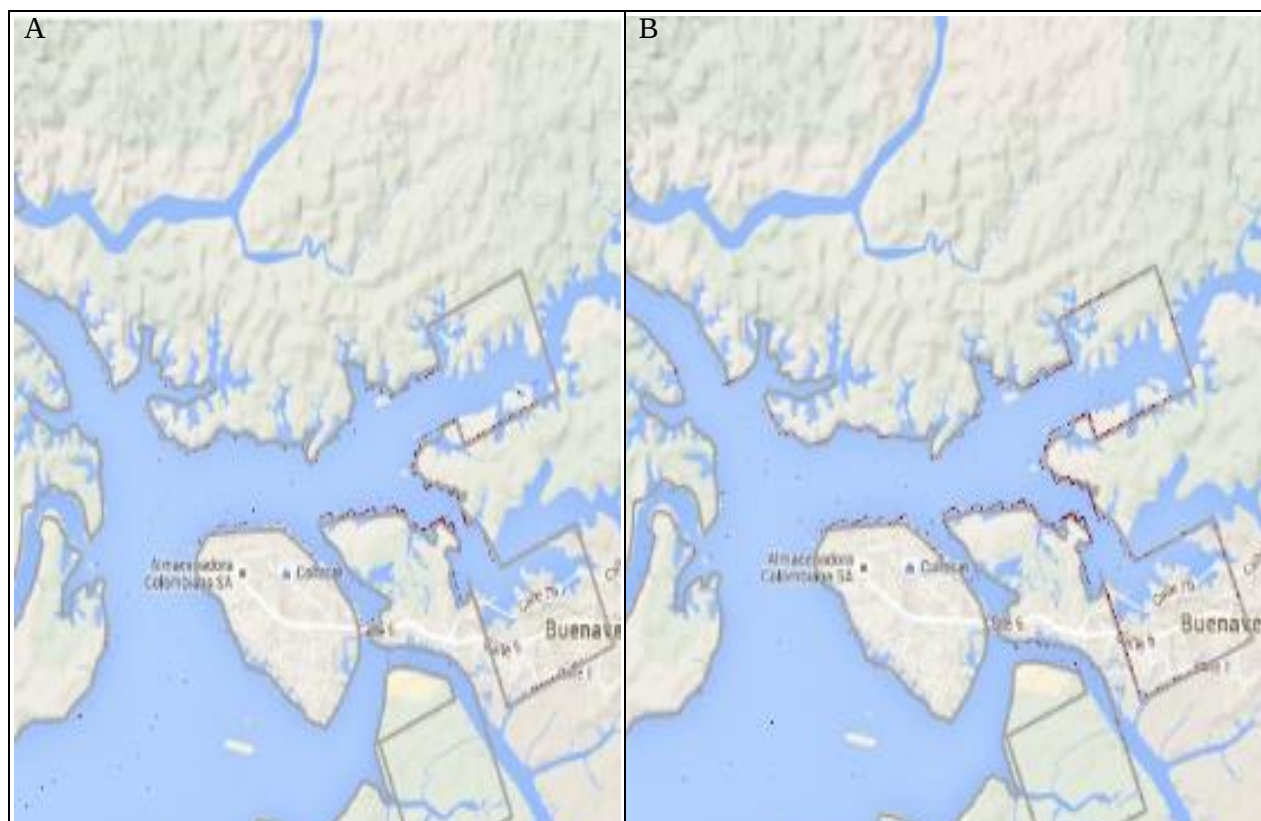


Figura 35. Derrame de Hidrocarburo en TCBUEN. A. Hora:23:57 (31/12/2018).

B.Hora:23:52 (31/12/2018).



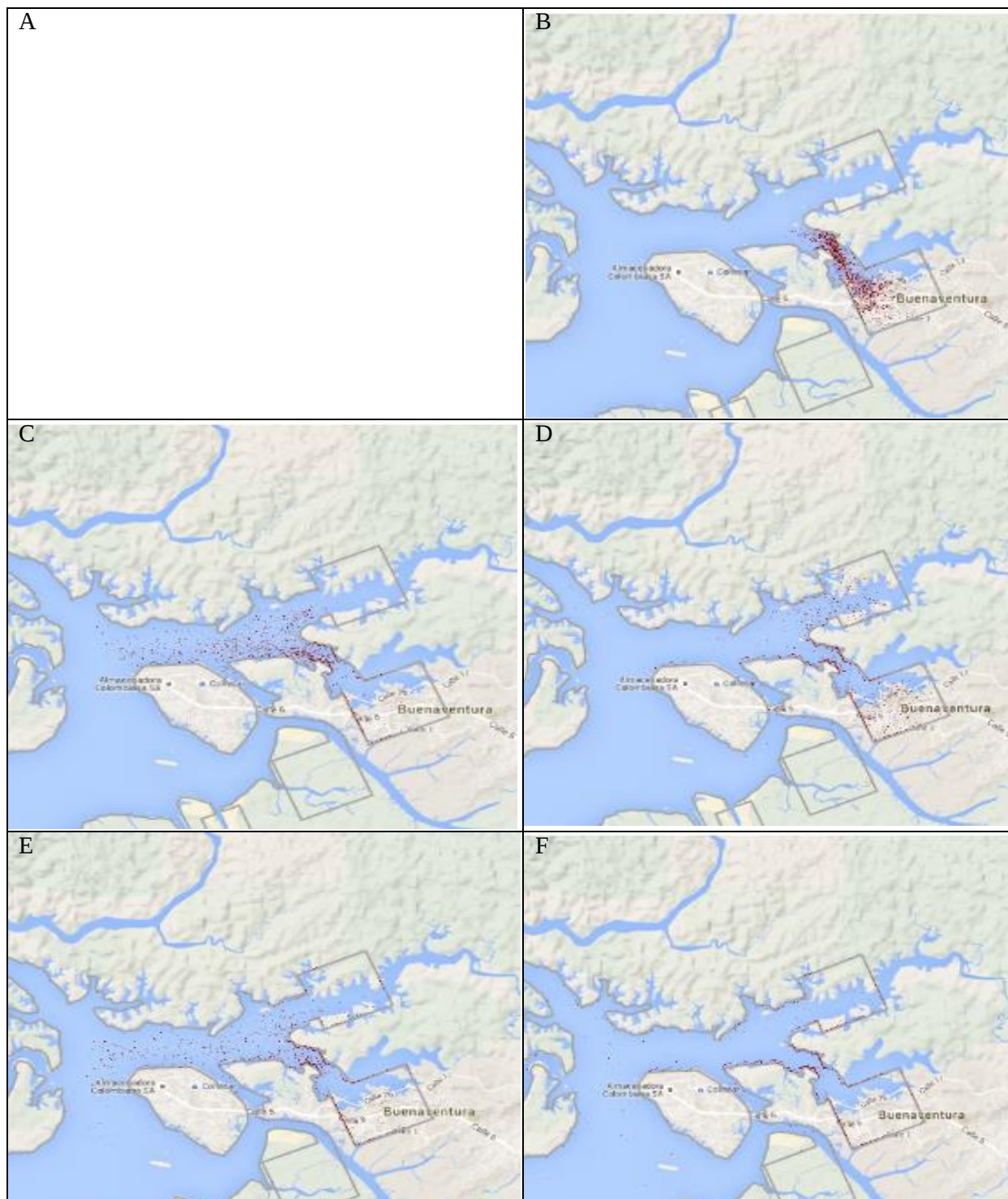
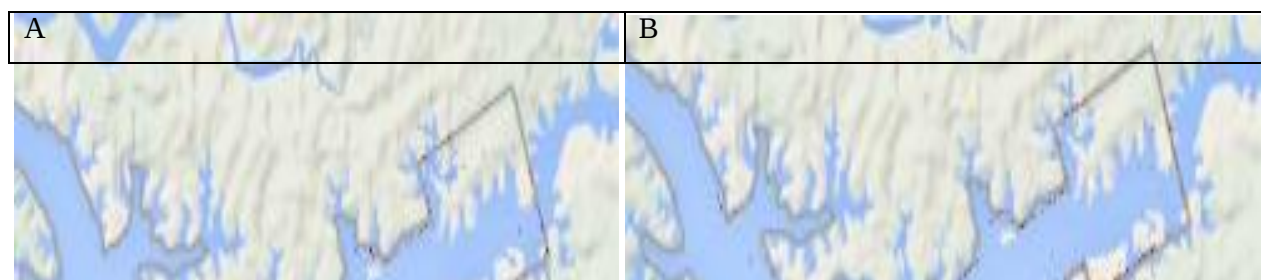


Figura 36. Derrame de hidrocarburo en TCBUEN durante el flujo de la marea (3 horas después de bajar).

A. Hora: 15:25 (26/12/2018). B. Hora: 21:25 (26/12/2018). C. Hora: 03:25 (27/12/2018). D. Hora: 9:25 (27/12/2018). E. Hora: 15:25 (27/12/2018). F. Hora: 23:55 (31/12/2018).



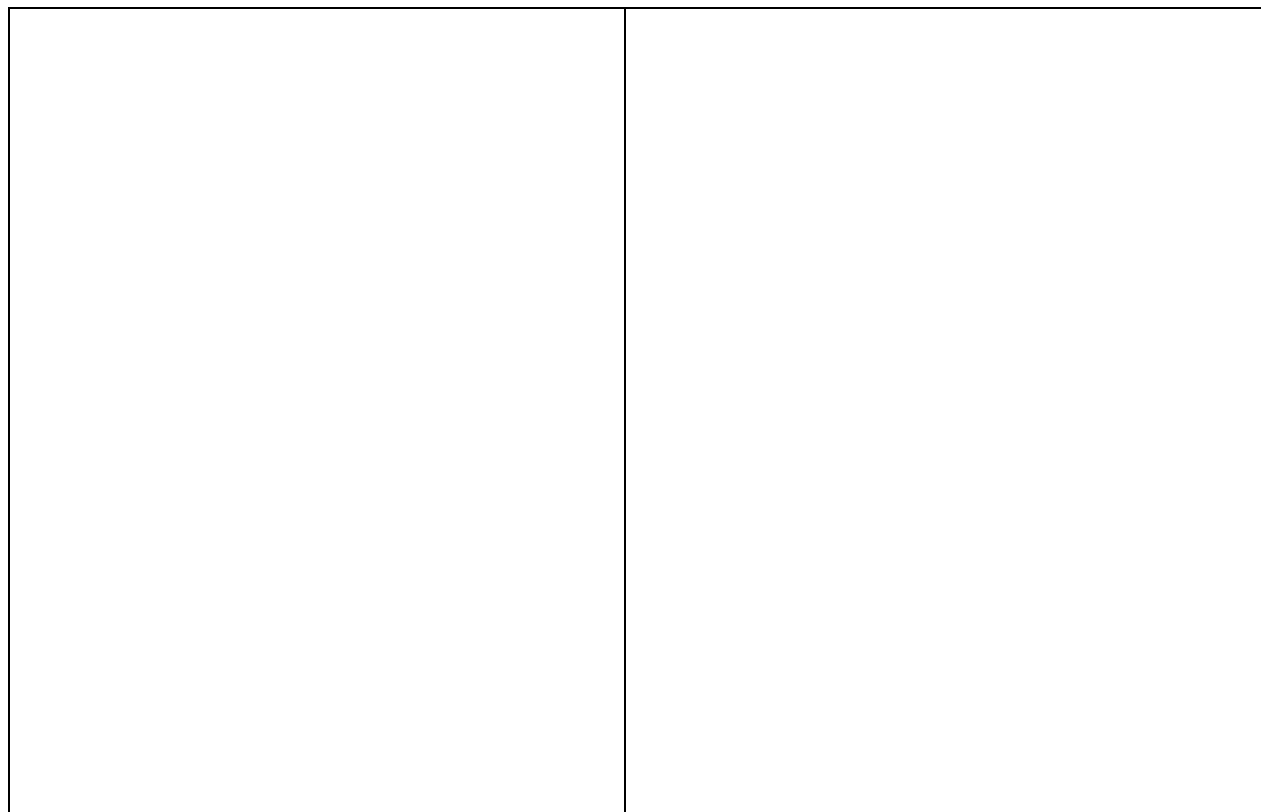


Figura 37. Derrame de Hidrocarburo en TCBUEN. A.Hora:00:00 (01/01/2019).

B. Hora:23:55 (31/12/2018).

6.3.2.2 Derrame de hidrocarburo en el Canal de Acceso

6.3.2.2.1 Derrame de hidrocarburo en Canal de Acceso en Pleamar

El movimiento en la bahía causa que a las 6 horas el hidrocarburo afecte la entrada a la bahía entre Punta soldado y Punta Bazán (Figura 38, B). Después a las 12 horas el hidrocarburo afecta la zona media de la bahía, la entrada del río Anchicayá y la zona este de isla soldado (Figura 38, C). Luego a las 18 horas afecta la entrada a la bahía, la zona este de isla Soldado, río Anchicayá y Punta Limones (Figura 38, D). Alrededor de las 24 horas, el hidrocarburo es desplazado hacia la zona media de la bahía, Punta Limones, La Playita, río Anchicayá y la zona este de la isla Soldado (Figura 38, E). Después de una semana la contaminación se extiende, afectando: desde la entrada hasta la zona media de la bahía, la entrada del río Anchicayá e isla Soldado. Por último, es importante señalar que parte del hidrocarburo queda en las orillas de los ríos y sitios mencionados (Figura 38, F y Figura 42, A).

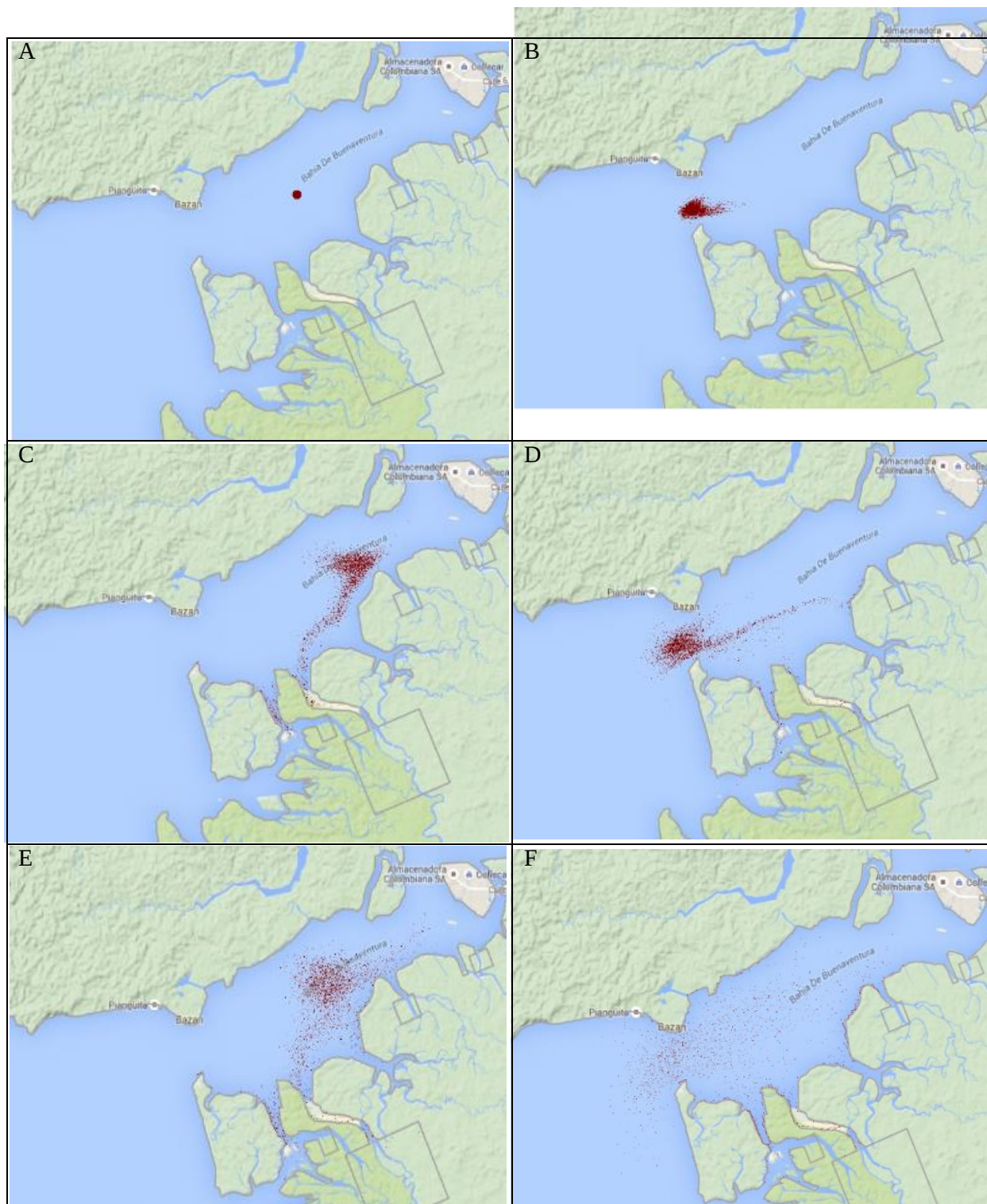


Figura 38. Derrame de hidrocarburo en el Canal de Acceso en pleamar. A. Hora:6:12 (26/12/2018). B.Hora: 12:12 (26/12/2018). C. Hora: 18:12 (26/12/2018). D. Hora: 0:12 (27/12/2018). E.Hora:6:12 (27/12/2018). F.Hora:23:57 (31/12/2018).

6.3.2.2.2 Derrame de hidrocarburo en Canal de Acceso durante el reflujo de la marea (3 horas después de pleamar)

El movimiento en la bahía causa que a las 6 horas el hidrocarburo afecte parcialmente la zona media de la bahía (Figura 39. B). Después a las 12 horas afecte la zona media de la bahía, Punta Limones y el río Anchicayá (Figura 39, C). Luego a las 18 horas afecta la entrada a la bahía hasta la zona media y Punta Limones (Figura 39, D). Cerca de las 24 horas, el hidrocarburo es desplazado hacia la zona media de la bahía, La Playita, Punta Limones, río Anchicayá y la zona este de la isla Soldado (Figura 39, E). Después de una semana la contaminación se extiende, afectando: desde la entrada hasta la zona media de la bahía, la entrada del río Anchicayá e isla Soldado. Es importante señalar que parte del hidrocarburo queda en las orillas de los ríos y sitios mencionados (Figura 39, F y Figura 42, B).

6.3.2.2.3 Derrame de hidrocarburo en Canal de Acceso en Bajamar

El movimiento en la bahía causa que a las 6 horas el hidrocarburo afecte la zona media de la bahía cerca a Punta Limones y La Playita (Figura 40. B). Luego, pasadas 12 horas el hidrocarburo afecta la entrada a la bahía hasta Punta Limones (Figura 40, C). Después de las 18 horas el hidrocarburo afecta la zona media de la bahía, Punta Limones, Río Potedo, entrada del Río Anchicayá, la Playita y la zona este de la isla Soldado (Figura 40, D). Aproximadamente a las 24 horas, el hidrocarburo es desplazado desde la entrada hasta la zona media de la bahía, La Playita, Punta Limones, Río Potedo, Río Anchicayá y la zona este de la isla Soldado (Figura 40, E). Después de una semana la contaminación se extiende, afectando: desde la entrada hasta la zona media de la bahía, la entrada del Río Anchicayá e isla Soldado. Es importante señalar que parte del hidrocarburo queda en las orillas de los ríos y sitios mencionados (Figura 40,F y Figura 42, C).

6.3.2.2.4 Derrame de hidrocarburo en Canal de Acceso durante el flujo de la marea (3 horas después de bajamar).

El movimiento en la bahía causa que a las 6 horas el hidrocarburo afecte parcialmente la zona media de la bahía (Figura 41. B), pasadas 12 horas el hidrocarburo afecta la entrada a la bahía hasta cerca de Punta Limones (Figura 41, C). Luego de las 18 horas el hidrocarburo afecta la zona media de la bahía, Punta Limones, río Anchicayá y la zona este de la isla Soldado (Figura 41, D). Alrededor de las 24 horas, el hidrocarburo es desplazado desde la entrada hasta Punta

Limones, río Anchicayá La Playita y la zona este de la isla Soldado (Figura 41, E). Después de una semana la contaminación se extiende, afectando: desde la entrada hasta la zona media de la bahía, la entrada del Río Anchicayá e isla Soldado. Es importante señalar que parte del hidrocarburo queda en las orillas de los ríos y sitios mencionados (Figura 41, F y Figura 42, D).

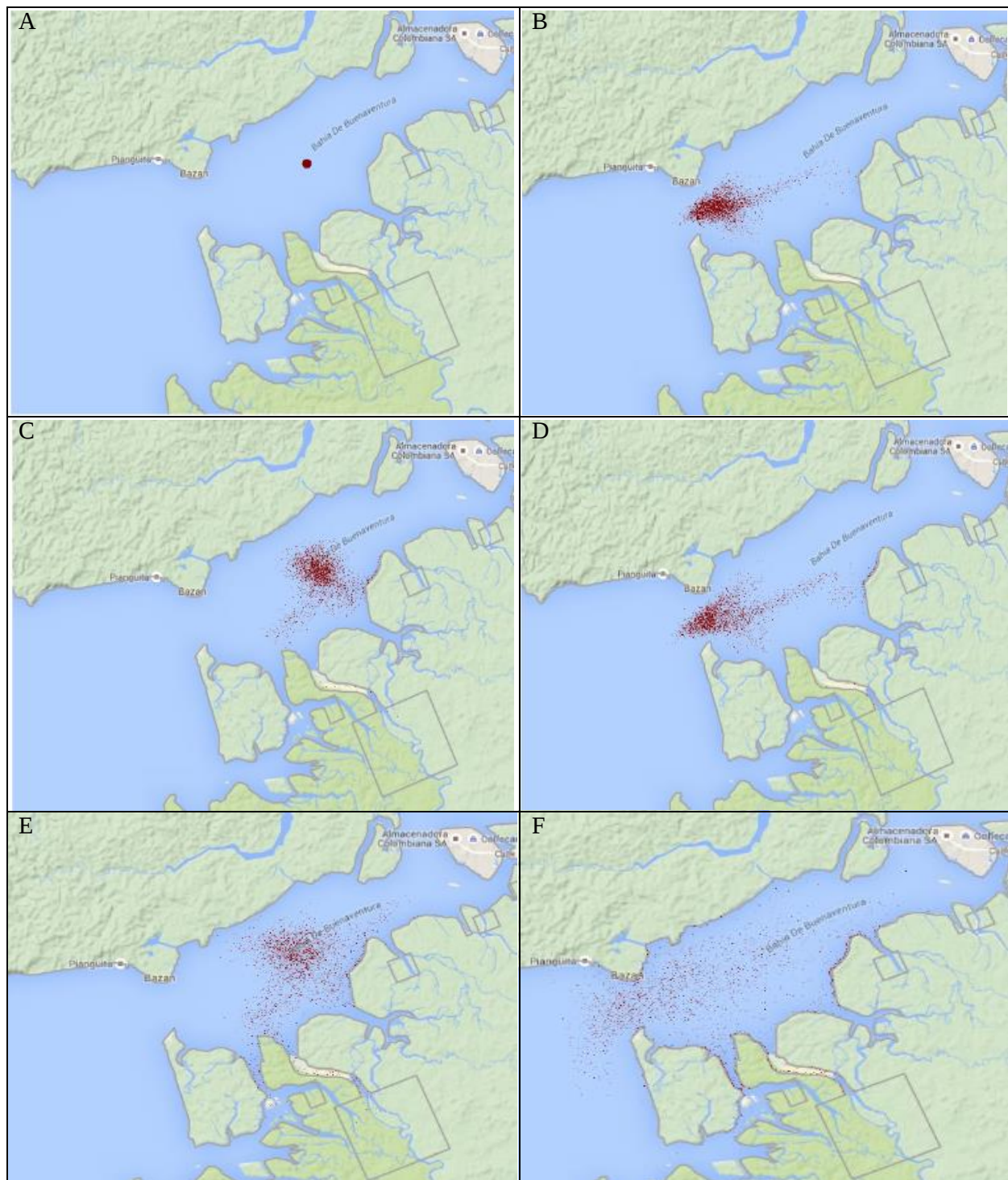


Figura 39. Derrame de hidrocarburo en el Canal de Acceso durante el reflujo de la marea (3 horas después de pleamar). A. Hora: 9:22 (26/12/2018). B. Hora: 15:22 (26/12/2018). C. Hora: 21:22 (26/12/2018). D. Hora: 3:22 (27/12/2018). E. Hora: 9:22 (27/12/2018). F. Hora: 23:52 (31/12/2018).

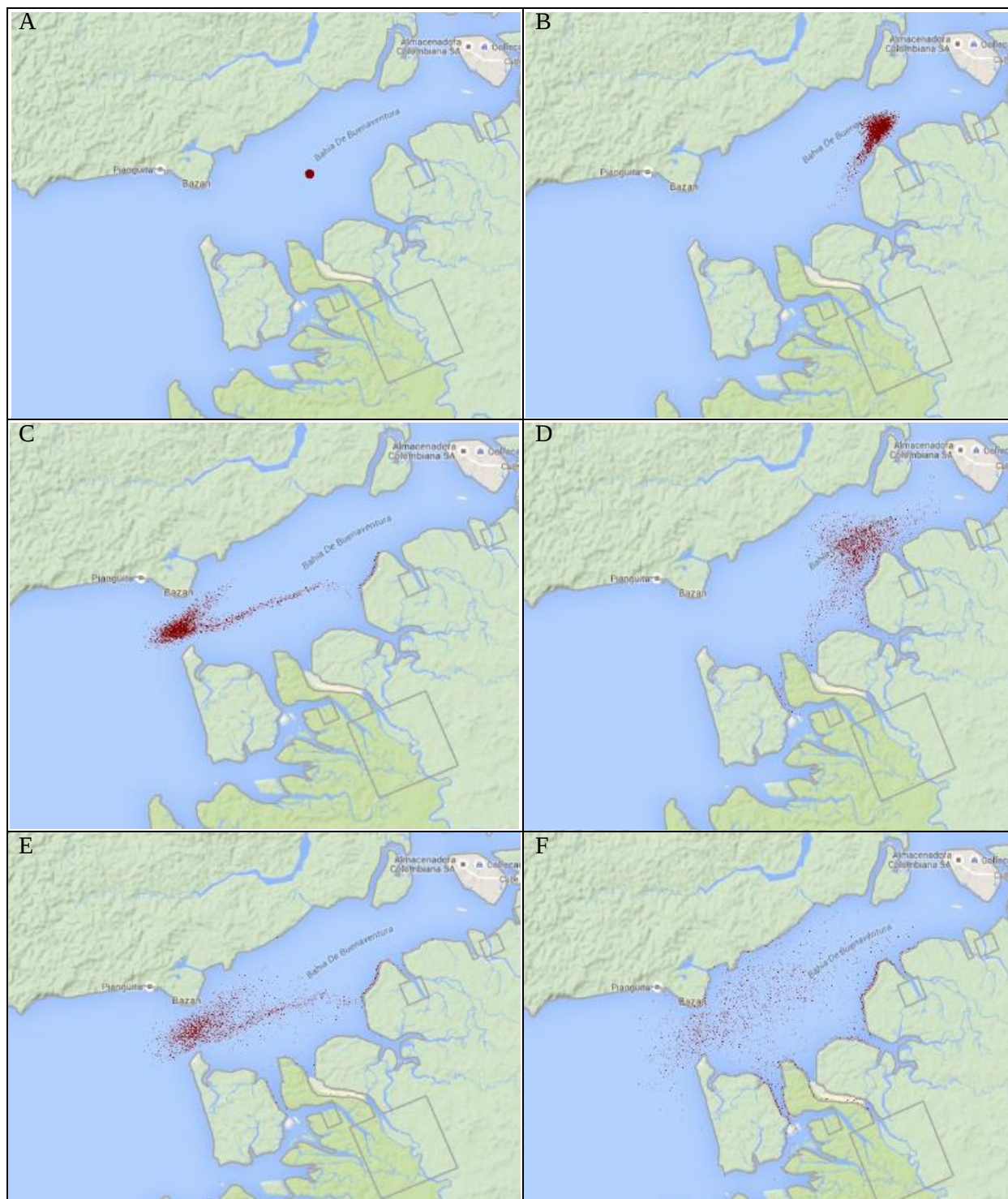


Figura 40. Derrame de hidrocarburo en el Canal de Acceso en el instante de marea bajamar. A. Hora: 12:30 (26/12/2018). B. Hora: 18:30 (26/12/2018). C. Hora: 00:30 (27/12/2018). D. Hora: 6:30 (27/12/2018). E. Hora: 12:30 (27/12/2018). F. Hora: 00:00 (01/01/2019).

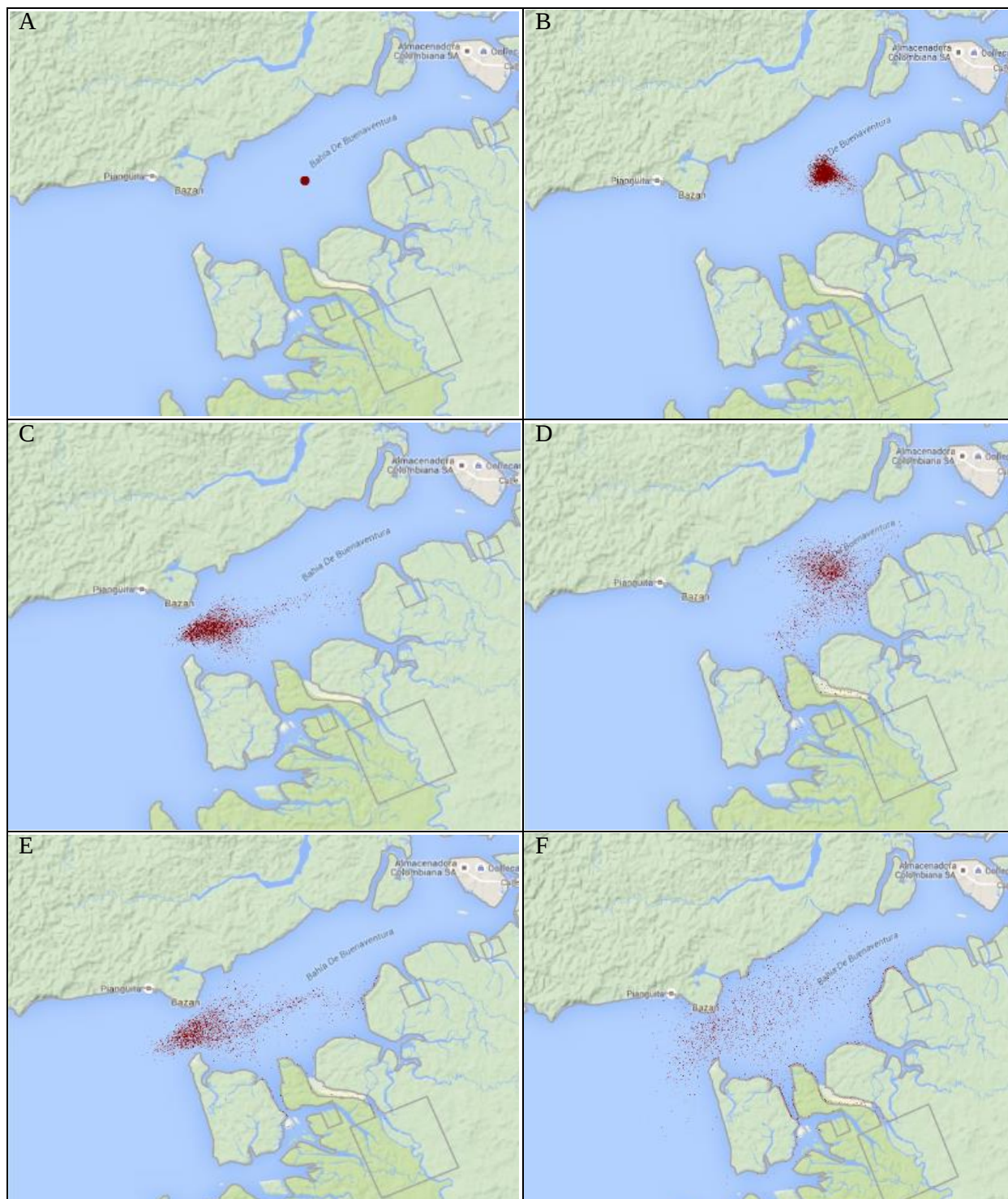


Figura 41. Derrame de hidrocarburo en Canal de Acceso durante el flujo de la marea (3 horas después de bajar). A. Hora: 15:25 (26/12/2018). B. Hora: 21:25 (26/12/2018). C. Hora: 03:25 (27/12/2018). D. Hora: 9:25 (27/12/2018). E. Hora: 15:25 (27/12/2018). F. Hora: 23:55 (31/12/2018).



Figura 42. Derrame de hidrocarburo en Canal de Acceso. A. Hora:23:57 (31/12/2018). B. Hora:23:52 (31/12/2018). C. Hora:00:00 (01/01/2019). D. Hora:23:55 (31/12/2018).

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La Bahía de Buenaventura está dividida en dos grandes zonas bien delimitadas, la bahía interior y la bahía exterior, comunicadas entre sí por un canal de acceso. Sus características hidroclimatológicas son las de un bosque tropical húmedo, por lo que su vegetación es densa y cuenta con una gran biodiversidad en fauna y flora; la bahía se caracteriza por una alta precipitación anual debido a la corriente de Humboldt y los vientos predominantes del sur que ocasionan la condensación del aire húmedo contra las estribaciones occidentales de la cordillera (Univalle, 1999). En cuanto al canal de acceso, éste permite el tránsito de embarcaciones de diferente calado desde mar afuera hasta la zona interior, donde se encuentran diferentes terminales marítimos, como son: el Terminal de Contenedores de Buenaventura -TCBUEN, el Muelle Petrolero y el Terminal Marítimo de Buenaventura (de propiedad de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura).

Debido a la dinámica económica de la Bahía y el tráfico relativamente alto de embarcaciones petroleras existe el riesgo latente de un posible derrame accidental de petróleo. Ahora bien, un accidente de este tipo puede ocurrir de múltiples formas, como pueden ser: por una colisión, por el hundimiento de un navío petrolero o por una fuga en su tanque de almacenamiento (Stewart and Leschine, 1986). De acuerdo con Van de Wiel and Van Dorp (2011) el valor más probable de volumen de hidrocarburo derramado en un accidente de este tipo es de 1365.3 m^3 ; por ello, en esta investigación se asumió, para las diferentes simulaciones y escenarios planteados, un volumen de hidrocarburo derramado utilizado en todas las simulaciones de esta.

Si bien un derrame accidental de hidrocarburo puede ocurrir en cualquier sitio al interior de la bahía de Buenaventura, en la presente investigación se seleccionaron dos sitios: i) TCBUEN, terminal marítimo de servicio especializado en manejo de contenedores, el cual maneja aproximadamente el 50% de los contenedores que llegan a la bahía (TCBUEN, 2015), y ii) la zona media del canal de acceso, lugar por el que pasan todas las embarcaciones que entran y salen de la Bahía.

Las simulaciones realizadas en este trabajo tuvieron como base un modelo hidrodinámico de la bahía de Buenaventura desarrollado en el software MOHID. En éste las mareas se generaron mediante el modelo de pronóstico FES2004 y los ríos y los esteros afluentes se representaron mediante el método de volúmenes oscilantes. Debido a las fuertes limitaciones en la información de campo disponible reciente, para la calibración y la verificación del modelo hidrodinámico se utilizaron mediciones de campo obtenidas por el LPHP en noviembre de 1997 (Universidad del Valle, 1997).

La aplicación del modelo hidrodinámico permitió estimar, entre otros aspectos, el patrón de circulación de las corrientes y las velocidades máximas en diferentes sectores; así, por ejemplo, en la zona de La Bocana la velocidad máxima de la corriente mareal es 0.91 m/s y en el muelle del Terminal Marítimo la velocidad máxima es 0.17 m/s. Además, las velocidades cambian de orientación entre bajamar y pleamar, siendo saliente desde La Bocana hacia la frontera durante bajamar, y entrante desde la frontera hacia el interior de la Bahía en pleamar, lo cual concuerda con los resultados obtenidos en diferentes estudios (Otero, 2005, Universidad del Valle, 1990; Universidad del Valle, 1999; Palacios and Quirós, 2006; y, Moffatt & Nichol Int., 1998). Otro resultado que indicó el funcionamiento correcto del modelo fue la amplificación moderada de la onda de marea (8%) desde la entrada de la Bahía (La Bocana) hasta la zona de muelles (Universidad del Valle, 1999).

Para la simulación de los diferentes escenarios planteados se adoptó un periodo de tiempo de una semana, teniendo como referencia los resultados obtenidos por diferentes investigadores (Bolt, 2014; Boniewicz-Szmyt and Pogorzelski, 2008; y, González *et al.*, 2006), quienes encontraron que los derrames accidentales de crudo generalmente cesan de dispersarse y comienzan a sedimentarse luego de una semana de ocurrido el accidente.

Para cada uno de los escenarios planteados (derrame de hidrocarburo en el sector de TCBUEN y derrame en la parte media del canal de acceso) se consideraron diferentes instantes de ocurrencia del accidente: (1) durante la Pleamar, (2) durante el reflujo de la marea (3 horas después de pleamar), (3) durante la Bajamar y (4) durante el flujo de la marea (3 horas después de bajamar).

En el primer escenario considerado -derrame de crudo en los muelles de TCBUEN- se encontró que el instante en el cual ocurre el vertimiento accidental (y por consiguiente, los niveles de marea y la dirección de las corrientes mareales) influye directamente en el movimiento del hidrocarburo durante las primeras 12 horas después de presentarse el derrame, transportándolo con la misma velocidad y dirección que las corrientes de marea existentes en ese instante. En las 4 simulaciones realizadas (Pleamar, reflujo de la marea, Bajamar y flujo de la marea) la dispersión del hidrocarburo presentó un comportamiento diferente durante las primeras 12 horas, llegando a contaminar una mayor área cuando el derrame ocurre justo durante la pleamar y disminuyendo gradualmente el área de contaminación en el siguiente orden: reflujo de la marea (3 horas después de pleamar), flujo de la marea (3 horas después de bajamar) y bajamar.

No obstante, luego de una semana de haber ocurrido el derrame accidental, los resultados de la localización y la extensión de las áreas ocupadas por el hidrocarburo en las 4 simulaciones son muy similares, siendo los esteros Aguacate, Gamboa y la isla Cascajal los más afectados. Esta tendencia puede explicarse por diferentes factores tales como los mismos procesos de advección-dispersión de las partículas de hidrocarburo y la volatilización de algunos componentes del hidrocarburo lo cual lo torna más denso, comenzando así el proceso de sedimentación (Rodríguez, 2008). En síntesis, un derrame de hidrocarburo en el sector de TCBUEN afecta los esteros aledaños de Aguacate y Gamboa (los cuales se hallan densamente cubiertos por manglares) y la Isla Cascajal.

En el segundo escenario considerado - derrame de crudo en la parte media del Canal de Acceso- se obtuvieron que en las 4 simulaciones efectuadas (Pleamar, Reflujo de la marea, Bajamar y Flujo de la marea) la dispersión del hidrocarburo presentó comportamientos diferentes entre simulaciones durante las doce primeras horas, llegando a contaminar mayor área en la condición de Pleamar, y disminuyendo gradualmente el área de contaminación en el siguiente orden: Reflujo de la marea, Bajamar y Flujo de la marea. Asimismo, luego de una semana de ocurrido el vertido accidental del hidrocarburo, la localización y extensión de las áreas finalmente afectadas por el derrame de hidrocarburo durante los diferentes instantes de la marea considerados son casi idénticas, comportamiento que se explica por los mismo factores del escenario 1. Por otra parte,

el área afectada en el escenario 2, fueron los esteros Hondo, Humane, los ríos Anchicaya, Limones, la entrada y zona media de la Bahía respectivamente.

No obstante que identificar los impactos negativos sobre el ecosistema de la bahía superan los alcances de la presente investigación, sí es posible afirmar con certeza que el principal impacto ambiental se daría: i) en el escenario en los manglares de los esteros Aguacate y Gamboa y la Isla Cascajal; y, ii) en el escenario 2 en todo el cuerpo de agua desde la entrada de la bahía hasta su zona media, y los ríos Anchicayá, Limones y Potedó, además de los esteros Hondo y Humané, ya que al subir la marea, la mancha de hidrocarburo entra a los manglares y queda depositada sobre las raíces, y el hidrocarburo cubre los poros, asfixiando finalmente el manglar (Tansel et al., 2015). De forma paralela, un derrame de este tipo afectaría la fauna de la bahía, reconocida por su alta biodiversidad, siendo los peces y las aves los primeros afectados por pérdida en la capacidad de aislamiento y asfixia; además, no se pueden descartar los posibles efectos en el mediano plazo sobre la capacidad de reproducción de los organismos mencionados y sus depredadores (ITOPF, 2014).

El derrame de hidrocarburos al interior de la bahía también puede generar un impacto negativo considerable sobre la salud pública, pudiéndose evidenciar principalmente en el mediano y largo plazo (Li *et al.*, 2015; Anejionu *et al.*, 2015); sin embargo, el riesgo de contacto físico por parte de la población con el agua contaminada, así como el consumo de alimentos (principalmente peces) contaminados es altamente probable, por lo que no se descartan casos de enfermedades como cáncer, infertilidad y lesiones en la médula ósea por exposición prolongada a hidrocarburos (McMichael, 1988). De otro lado, el impacto económico estaría dado por afectaciones en la navegación, que representa el 80% de los ingresos del municipio, llegando a afectar el comercio, incluso en lugares distantes (ej, Cali, Bogotá, Medellín) que necesitan del puerto para movilizar sus mercancías.

En resumen, es innegable que los dos escenarios de derrame accidental de crudo en la Bahía de Buenaventura considerados y simulados en esta investigación, implicarían afectaciones apreciables a nivel ambiental, social y económico, las cuales estarían determinadas por el área

total contaminada, el instante de la marea durante el cual ocurre el derrame, la naturaleza temporal y el movimiento del crudo analizados en esta investigación. Por ello se recomienda a los entes gubernamentales, con el fin de prevenir tales afectaciones y minimizar su impacto, considerar en sus planes de contingencia los fenómenos aquí descritos y formular estrategias que en lo posible puedan llegar a controlar el accidente durante las primeras 12 horas, ya que durante este tiempo la dispersión es máxima.

8. CONCLUSIONES

En esta investigación se estudió la dispersión de contaminantes de tipo hidrocarburo debido a un posible derrame en la Bahía de Buenaventura. Para ello inicialmente se efectuó la caracterización física de la Bahía, describiendo sus principales aspectos y características oceanográficas (mareas, oleaje y corrientes, entre otros), climáticas (vientos, temperatura, nubosidad y humedad relativa), y los diferentes ríos afluentes y esteros. Posteriormente se implementó el modelo matemático MOHID para simular los procesos hidrodinámicos y de transporte y calidad del agua de la bahía. 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. Finalmente se plantearon, simularon y evaluaron diferentes escenarios de derrame de hidrocarburo, considerando para ello dos posibles sitios de vertimiento y diferentes instantes de marea. Las conclusiones más relevantes del estudio son las siguientes:

Caracterización Física de la Bahía de Buenaventura

- La bahía corresponde a un sistema estuarino, con una hidrodinámica muy compleja, donde interactúan mareas, corrientes mareales, oleaje, descargas de aguas continentales, vientos, la configuración del lecho marino y los accidentes geomorfológicos. Como consecuencia de esto, la dinámica de los procesos de transporte de sedimentos y las diferentes sustancias contaminantes que llegan a la bahía (a través de ríos y esteros y vertimientos de aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales) también resulta altamente compleja.
- En la Bahía de Buenaventura la marea es de tipo semidiurno regular, presentando aproximadamente dos pleamares y dos bajamares por día, con un período medio de 12 horas y 25 minutos. El ciclo completo de mareas vivas (o máximas) – mareas muertas (o mínimas) es de 14 días. La amplitud media de marea en la bahía es 3.16 m y las amplitudes máxima y mínima registradas son 5.4 m y 5.4 m, respectivamente.
- Al interior de la bahía la onda de marea se amplifica moderadamente, aumentando su amplitud entre 6 y 8% desde la entrada (La Bocana-Punta Soldado) hasta la isla Cascajal. Esto debido a factores como la reducción en la sección hidráulica hacia el interior de la bahía y la baja resistencia mareal. Las corrientes del refluo mareal (marea saliendo) son ligeramente más

rápidas y de menor duración que las corrientes del flujo mareal (marea entrando). El desfase en la ocurrencia, tanto de bajamares como de pleamares, entre la entrada de la bahía y la isla Cascajal se halla entre 15 y 20 minutos.

- En la bahía confluyen varios ríos tributarios importantes, como son los ríos Anchicayá, Dagua y Limones, y los esteros Aguadulce, Gamboa, Aguacate, San Antonio, Hondo y Humane, los cuales almacenan volúmenes significativos de agua durante el flujo de la marea. Por otra parte, los ríos Dagua y Anchicayá descargan apreciables volúmenes de sedimentos a la bahía, los cuales son arrastrados por las corrientes mareales a diferentes sectores de la bahía, generando dificultades para la navegación.

Modelación Hidrodinámica y de Trazadores Lagrangianos

- Para la modelación de los procesos hidrodinámicas y de transporte se implementó el modelo matemático MOHID, el cual permitió incluir los diferentes factores más relevantes en la hidrodinámica al interior de la bahía, tales como, las mareas, las condiciones climáticas (temperatura, nubosidad, humedad relativa y radiación solar), las descargas fluviales y la interacción de ríos tributarios y esteros con las corrientes mareales.
- La extensión del área simulada de la bahía fue de 1743.5 km², que van desde 15 km en la bahía exterior, hasta incluir todos los esteros y ríos afluentes. La malla computacional del área simulada tiene un total de 317 x 550 celdas, todas ellas de igual tamaño (100 m x100 m). Sin embargo, la extensión del área cubierta con agua fue de 665 km² debido a que la batimetría tenía 190 x 350 celdas. Debido a que no se disponía de la información batimétrica de los ríos tributarios y los esteros, estos se esquematizaron por medio tanques de volúmenes oscilantes. El volumen oscilante total correspondiente a esteros y ríos afluentes representa el 24% del volumen del prisma mareal que entra y sale de la bahía.
- La calibración del modelo hidrodinámico se realizó con base en la información de campo disponible en la Universidad del Valle (1997) debido a que no se dispone de información de campo actualizada y suficiente para este propósito. La rugosidad del lecho de la bahía adoptada (coeficiente de Manning $n=0.033 \text{ s/m}^{1/3}$) y la viscosidad turbulenta de 10 m²/s permitieron

representar de manera aceptable las condiciones hidrodinámicas al interior de la bahía. La diferencia máxima obtenida entre los niveles de marea medidos y los calculados por el modelo fue de cerca de 0.20 m.

- El modelo hidrodinámico implementado permitió representar igualmente la ligera amplificación de la onda de marea (8%, en promedio) desde la entrada de la bahía hasta la isla Cascajal. El modelo también permite representar las velocidades máximas de las corrientes mareales en la bahía, las cuales se presentan en los sitios de mayores profundidades (es decir, en todo el sector del canal de acceso a los terminales marítimos).

Planteamiento, simulación y análisis de los diferentes escenarios de derrame de hidrocarburo.

- Se plantearon en total 8 escenarios de derrame accidental de hidrocarburo al interior de la bahía: (i) 4 escenarios corresponden al vertido de crudo frente al muelle del Terminal Marítimo de Contenedores TCBUEN y (ii) los 4 escenarios restantes corresponden al vertido del crudo en la parte media del canal de acceso al puerto de Buenaventura. Cada uno de los escenarios considerados corresponde a diferentes instantes de ocurrencia del accidente: (1) durante la Pleamar, (2) durante el reflujo de la marea (tres horas después de pleamar), (3) durante la Bajamar y (4) durante el flujo de la marea (tres horas después de bajamar). Para la simulación de los diferentes escenarios planteados se adoptó un periodo de tiempo de siete días, lapso al final del cual el crudo cesa de dispersarse y comienza a sedimentarse (según diferentes investigadores).

- En los primeros cuatro escenarios considerados -derrame de crudo en los muelles de TCBUEN- se encontró que el instante en el cual ocurre el vertimiento accidental (y por consiguiente, los niveles de marea y la dirección de las corrientes mareales) influye directamente en el movimiento del hidrocarburo durante las primeras 12 horas después de presentarse el derrame, transportándolo con la misma velocidad y dirección que las corrientes de marea existentes en ese instante. En las 4 simulaciones realizadas (Pleamar, Reflujo de la marea, Bajamar y Flujo de la marea) la dispersión del hidrocarburo presentó un comportamiento diferente durante este lapso de tiempo, llegando a contaminar una mayor área cuando el derrame ocurre justo durante la

pleamar y disminuyendo gradualmente el área de contaminación en el siguiente orden: refluo de la marea (3 horas después de pleamar), fluo de la marea (3 horas después de bajamar) y bajamar.

- Sin embargo, después de 7 días del derrame accidental de hidrocarburo los resultados de la localización y la extensión de las áreas ocupadas por el hidrocarburo en las 4 simulaciones efectuadas son muy similares, siendo los esteros Aguacate y Gamboa y la isla Cascajal los más afectados. Esta tendencia puede explicarse por diferentes factores tales como los mismos procesos de advección-dispersión de las partículas de hidrocarburo y la volatilización de algunos componentes del hidrocarburo (haciéndolo más denso), iniciándose de esta forma su proceso de sedimentación. En síntesis, un derrame de hidrocarburo en el sector de TCBUEN afecta los esteros aledaños de Aguacate y Gamboa (los cuales se hallan densamente cubiertos por manglares) y la Isla Cascajal.

- En los siguientes cuatro escenarios considerados -derrame de crudo en la parte media del Canal de Acceso al Puerto- se encontró que durante las doce primeras horas la dispersión del hidrocarburo presenta comportamientos diferentes, dependiendo del instante de la marea durante el cual ocurre el vertido accidental del crudo (Pleamar, Refluo de la marea, Bajamar y Flujo de la marea), llegándose a contaminar mayor área en la condición de Pleamar, y disminuyendo gradualmente el área de contaminación en el siguiente orden: Refluo de la marea, Bajamar y Flujo de la marea. Asimismo, luego de una semana de ocurrido el vertido accidental del hidrocarburo, la localización y extensión de las áreas afectadas por el derrame de hidrocarburo (durante los diferentes instantes de la marea considerados) son casi idénticas, comportamiento que se explica por los mismo factores del escenario 1. Los sectores finalmente afectados después de siete días de ocurrido el derrame accidental de crudo son los siguientes: los esteros Hondo y Humane, los ríos Anchicayá y Limones y la entrada y la zona media de la Bahía.

- En síntesis, es posible afirmar que el posible derrame accidental de crudo en la Bahía de Buenaventura (en cualquiera de los dos sitios considerados) implicaría afectaciones apreciables a nivel ambiental, social y económico, las cuales estarían determinadas por el área total contaminada, el instante de la marea durante el cual ocurre el derrame, la naturaleza temporal y el movimiento del crudo analizados en esta investigación.

9. RECOMENDACIONES

Ante el desarrollo de nuevos terminales marítimos en la zona interna de la Bahía de Buenaventura, así como el aumento en el tráfico de embarcaciones previsto por la autoridad nacional, el riesgo de un accidente se incrementa y, por ello, se deben considerar y evaluar otros escenarios de derrame accidental de hidrocarburos, en cuanto a posibles sitios de vertimiento y diferentes instantes y condiciones de marea. Esto contribuirá a que las autoridades ambientales diseñen e implementen los planes de contingencia correspondientes, los cuales, al estar soportados en información predictiva precisa y confiable, resultarán más eficaces y eficientes.

Con el fin de complementar y actualizar el modelo matemático desarrollado en el presente estudio se recomienda a los entes gubernamentales realizar con mayor frecuencia (trimestralmente) mediciones de campo en la Bahía de Buenaventura, ríos y esteros. La mediciones deben ser continuas y simultaneas, incluyendo variables tales como el perfil de velocidades, la variación de los niveles de agua, los patrones de flujo de las corrientes mareales en toda la extensión de la bahía, la calidad del agua, los caudales, la temperatura y la salinidad. Las mediciones deben abarcar, por lo menos, el ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas – mareas muertas. Igualmente y considerando que la bahía de Buenaventura es un estuario altamente dinámico se recomienda realizar batimetrías periódicas de toda la Bahía, la cual debe incluir todos los esteros y los tramos finales de los ríos afluentes (hasta el límite de influencia mareal).

Para futuros estudios es importante considerar la posibilidad de realizar un modelación tridimensional de un derrame de hidrocarburos en la Bahía, lo que permitiría obtener el comportamiento en todas las direcciones (x,y,z) y además, analizar el comportamiento del hidrocarburo durante su sedimentación. De esta manera, se podría investigar los posibles efectos del hidrocarburo sobre la flora y la fauna en los sectores donde ocurre este proceso. No obstante, es preciso señalar que una modelación tridimensional requerirá de mayores esfuerzos (en tiempo y recursos) en la recolección de información de campo, especialmente en lo relacionado con la medición de las componentes de las velocidades de las corrientes mareales en las tres direcciones; todo ello con el fin de disponer de la información suficiente para realizar la calibración del modelo matemático.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y CIBERGRÁFICAS

- ALCALDIA. 2012. PLAN DE DESARROLLO DISTRITAL 2012-2015. Alcaldia Distrital Buenaventura. URL: http://salud.univalle.edu.co/pdf/procesos_de_interes/Planes_Desarrollo/1_Plan_de_Desarrollo_20122015_Buenaventura.pdf.
- ANEJIONU, O. C. D., AHIARAMMUNNAH, P.-A. N. & NRI-EZEDI, C. J. 2015. Hydrocarbon pollution in the Niger Delta: Geographies of impacts and appraisal of lapses in extant legal framework. *Resources Policy*, 45, 65-77.
- ANTELO, L. T., GÓMEZ-GESTEIRA, M., MONTERO, P., PREGO, R., PÉREZ-VILLAR, V., RUIZ-VILLARREAL, M. & SANTOS, A. M. P. 1998. Evaluation of the seasonal variations in the residual circulation in the Ria of Vigo (NW Spain) by means of a 3D Baroclinic model.
- ARCOPOLE 2011. Envejecimiento del hidrocarburo derramado en el medio marino.
- ASCIONE KENOV, I., CAMPUZANO, F., FRANZ, G., FERNANDES, R., VIEGAS, C., SOBRINHO, J., DE PABLO, H., AMARAL, A., PINTO, L., MATEUS, M. & NEVES, R. 2014. Advances in Modeling of Water Quality in Estuaries. In: FINKL, C. W. & MAKOWSKI, C. (eds.) *Remote Sensing and Modeling*. Springer International Publishing.
- BAMBASE JR, M. E., PECTOR, A. C., VALDERRAMA, A. L., RACHO, C. G., EL JIRIE, N. B., SANCHEZ, L. A. M., DIZON, L. S. H., MAGADIA JR, R. V. & SOTTO JR, R. 1994. Hydrodynamic Modeling of Oil Leakage in Pipeline.
- BATTEEN., M. L., MARTINEZ., J. R., BRYAN., D. W. & BUCH., E. J. 2000. A modeling study of the coastal eastern boundary current system off Iberia and Morocco. *Journal of Geophysical Research*, 105, 14173–14195
- BEHRENS, J. 2006. Discretization of Conservation Laws. *Adaptive Atmospheric Modeling*. Springer Berlin Heidelberg.
- BOFFETTA, G., DAVOUDI, J., ECKHARDT, B. & SCHUMACHER, J. 2004. Lagrangian Tracers on a Surface Flow: The Role of Time Correlations. *Physical Review Letters*, 93, 134501.
- BOLT, H. 2014. Fighting oil spills at sea and toxicology of complex mixtures. *Archives of Toxicology*, 88, 541-542.
- BONIEWICZ-SZMYT, K. & POGORZELSKI, S. J. 2008. Crude oil derivatives on sea water: Signatures of spreading dynamics. *Journal of Marine Systems*, 74, Supplement, S41-S51.
- BRAUNSCHWEIG, F., MARTINS, F., CHAMBEL, P. & NEVES, R. 2003. A methodology to estimate renewal time scales in estuaries: the Tagus Estuary case. *Ocean Dynamics*, 53, 137-145.
- CANCINO, L. & NEVES, R. 1999. Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems: Part I: Description of the numerical models. *Journal of Marine Systems*, 22, 105-116.
- COLJURISTAS. (2009). Informe sobre la situación de derechos humanos y desplazamiento forzado de la población afrocolombiana que ocupa el territorio de Bajamar de Buenaventura (Valle del Cauca). Bogotá: Comision Colombiana de Juristas.
- DELVIGNE, G. A. L. & SWEENEY, C. E. 1988. Natural dispersion of oil. *Oil and Chemical Pollution*, 4, 281-310.

- DETTMANN, E. 2001. Effect of water residence time on annual export and denitrification of nitrogen in estuaries: A model analysis. *Estuaries*, 24, 481-490.
- DIAN.2015. Exportaciones e Importaciones en el Municipio de Buenaventura, Valle del Cauca.
- DIMAR. (2010). Comportamiento del oleaje sobre la franja marítima pacífico -colombiana. período Nov2010 –Nov2011. San Andrés de Tumaco (Colombia) diciembre de 2011.
- EKUNDAYO, E. O. & OBUEKWE, C. O. 1997. EFFECTS OF AN OIL SPILL ON SOIL PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF A SPILL SITE IN A TYPIC PALEUDULT OF MIDWESTERN NIGERIA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 45, 209-221.
- FEDESARROLLO-CERAC. (2013). Hacia un desarrollo integral de la ciudad de Buenaventura y su área de influencia”. En Bogotá (Ed.1).
- FINGAS, M. F. 1998. Studies on the evaporation of crude oil and petroleum products II. Boundary layer regulation. *Journal of Hazardous Materials*, 57, 41-58.
- FINKL, C. W. & MAKOWSKI, C. 2014. *Remote Sensing and Modeling: Advances in Coastal and Marine Resources*, Springer International Publishing.
- GONZÁLEZ, J. J., VIÑAS, L., FRANCO, M. A., FUMEGA, J., SORIANO, J. A., GRUEIRO, G., MUNIATEGUI, S., LÓPEZ-MAHÍA, P., PRADA, D., BAYONA, J. M., ALZAGA, R. & ALBAIGÉS, J. 2006. Spatial and temporal distribution of dissolved/dispersed aromatic hydrocarbons in seawater in the area affected by the Prestige oil spill. *Marine Pollution Bulletin*, 53, 250-259.
- GOBERNACION, D. V. D. C. (2005). Diagnostico socio economico de Buenaventura. In V. d. Cauca (Ed.1). Cali.
- GREENBERG, J. M. & LEROUX, A. Y. 1996. A Well-Balanced Scheme for the Numerical Processing of Source Terms in Hyperbolic Equations. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 33, 1-16.
- GÜEMES, A. S. 2010. *MODELADO NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DE LOS VERTIDOS DE HIDROCARBUROS VERTIDOS AL MAR*. Ingeniería Marítima, Universitat Politècnica de Catalunya.
- HUANG, J. C. 1983. A REVIEW OF THE STATE-OF-THE-ART OF OIL SPILL FATE/BEHAVIOR MODELS. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 1983, 313-322.
- HWU, W., SOROOSHIAN, S., GAO, X. & FAMIGLIETTI, J. S. 1999. Intercomparisons of ECMWF ERA and TOGA data with observations for the 1993 Great Flood. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104, 19367-19382.
- IDEAM, I. D. H., METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. (1997). PRONÓSTICO DE PLEAMARES Y BAJAMARES EN LA COSTA PACÍFICO COLOMBIANA. BOGOTÁ D.C.: República de Colombia.Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
- INVEMAR 2004. Información del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia.
- IPIECA 2003a. Impactos Biológicos de la Contaminación por Hidrocarburos: Arrecifes de Coral. 3.
- IPIECA 2003b. Impactos Biológicos de la Contaminación por Hidrocarburos: Manglares. 3.
- ITOPF 2014. Effects of oil pollution on fisheries and mariculture. *Technical Information Paper (TIPS)*. 1 ed.: International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF).
- LAURENCIO, H. & DELGADO, Y. 2007. Propiedades Reológicas de Emulsiones de Petróleo Pesados en Agua.
- LESSARD, R. R. & DEMARCO, G. 2000. The Significance of Oil Spill Dispersants. *Spill Science & Technology Bulletin*, 6, 59-68.

- LEVEQUE, R. J. & YEE, H. C. 1990. A study of numerical methods for hyperbolic conservation laws with stiff source terms. *Journal of Computational Physics*, 86, 187-210.
- LI, X., YANG, Y., XU, X., XU, C. & HONG, J. 2015. Air pollution from polycyclic aromatic hydrocarbons generated by human activities and their health effects in China. *Journal of Cleaner Production*.
- LCHF. (1974). Estudio Sedimentológico –fase B. In A. N. d. C.-L. C. d. H.d. Francia (Ed).
- MACKAY, D. & MCAULIFFE, C. D. 1989. Fate of hydrocarbons discharged at sea. *Oil and Chemical Pollution*, 5, 1-20.
- MALANOTTE-RIZZOLI, P., EREMEEV, V. N. & DIVISION, N. A. T. O. S. A. 1999. *The Eastern Mediterranean as a Laboratory Basin for the Assessment of Contrasting Ecosystems*, Springer Netherlands.
- MARIGÓMEZ, I., GARMENDIA, L., SOTO, M., ORBEA, A., IZAGIRRE, U. & CAJARAVILLE, M. 2013. Marine ecosystem health status assessment through integrative biomarker indices: a comparative study after the Prestige oil spill “Mussel Watch”. *Ecotoxicology*, 22, 486-505.
- MARTINS, F., LEITÃO, P., SILVA, A. & NEVES, R. 2000. 3D modelling in the Sado estuary using a new generic vertical discretization approach. *Oceanologica Acta*, 24-1, 51-62.
- MCMICHAEL, A. J. 1988. Carcinogenicity of benzene, toluene and xylene: epidemiological and experimental evidence. *IARC scientific publications*, 3-18.
- MINISTERIO DE AMBIENTE 2004. Decreto 3440 del 2004.
- MINISTERIO DE AMBIENTE 2005. Resolución 2145 del 2005.
- MINISTERIO DE MINAS 2013. Cadena del Petróleo.
- MOFFATT & NICHOL INT. 1998. Estudio de factibilidad y diseño para la profundidad del canal de acceso al Puerto de Buenaventura. *Hidroestudios*. Santafé de Bogotá, Valle del Cauca.
- MOHID. 2006. *MOHID Hydrodynamics* [Online]. Sección de Ambiente e Energia, Dep. de Mecânica
Avenida Rovisco Pais, 1049 - 001 Lisboa
Portugal: Maretec - Instituto Superior Técnico. Available:
<http://www.mohid.com/Hydrodynamics.htm> [Accessed 08/07/2015 2015].
- MOHID. 2014. *MOHID Module Horizontal Grid* [Online]. Lisboa. Available:
<http://www.mohid.com/wiki/index.php?title=Grid> 2015].
- MOHID. 2015. Mohid Course.
- NEVES, R. 2013. THE MOHID CONCEPT. *Ocean modelling for coastal management – Case studies with MOHID*.
- NEVES, R., LEITÃO, P. C., BRAUNSCHWEIG, F., VILLARREAL, M. & PINA, P. 2006. *MOHID Modelling System Description*.
- OTERO, L. J. 2005. Aplicación de un Modelo Hidrodinámico Bidimensional para Describir las Corrientes y la Propagación de la Onda de Marea en la Bahía de Buenaventura. *oleón Científico CCCP*, 12, 9-21.
- PALACIOS, C. J. & QUIRÓS, L. 2006. *Caracterización hidrodinámica de la bahía de Buenaventura*. Ingeniero Civil, Universidad del Valle.
- PARQUES NACIONALES NATURALES 2012. Región Pacífico.
- PAYNE, J. R., CLAYTON JR, J. R. & KIRSTEIN, B. E. 2003. Oil/Suspended Particulate Material Interactions and Sedimentation. *Spill Science & Technology Bulletin*, 8, 201-221.
- PEREZ, G. 2007. Historia, geografía y puerto como determinantes de la situación social de Buenaventura.

- PRESIDENCIA. (2012). Valle del Cauca: Informe departamental de Hechos Victimizantes a 2012 Bogotá: Presidencia de la Republica de Colombia.
URL: <http://rni.unidadvictimas.gov.co/sites/default/files/Documentos/Valle-del-Cauca.pdf>.
- PROCTOR, R., ELLIOT, A. J. & FLATHER, R. A. 1994. Forecast and hindcast simulations of the Braer oil spill. *Marine Pollution Bulletin*, 28, 219-229.
- PROCURADURIA GENERAL DE LA NACIÓN 2008. Construcciones palafíticas sobre bienes de Uso Público.
- RASMUSSEN, D. 1985. OIL SPILL MODELING—A TOOL FOR CLEANUP OPERATIONS. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 1985, 243-249.
- RAUBER, T. & RÜNGER, G. 2005. Exploiting Multiple Levels of Parallelism in Scientific Computing. In: NG, M., DONCESCU, A., YANG, L. & LENG, T. (eds.) *High Performance Computational Science and Engineering*. Springer US.
- REED, M., GUNDLACH, E. & KANA, T. 1989. A coastal zone oil spill model: Development and sensitivity studies. *Oil and Chemical Pollution*, 5, 411-449.
- RODRÍGUEZ, J. M. S. 2008. *Manual de lucha contra la contaminación por hidrocarburos*, Universidad de Cádiz, Servicio de Publicaciones.
- SANTOS, A. 2006. Evaluación de la contaminación por hidrocarburos aromaticos totales en aguas y sedimentos marinos en la Bahía de Buenaventura sector Isla Cascaja., 18-30-49.
- SCARLATOS, P. D. 1996. Estuarine Hydraulics. In: SINGH, V. & HAGER, W. (eds.) *Environmental Hydraulics*. Springer Netherlands.
- STEWART, T. R. & LESCHINE, T. M. 1986. Judgment and Analysis in Oil Spill Risk Assessment. *Risk Analysis*, 6, 305-315.
- TANSEL, B., ARREAZA, A., TANSEL, D. Z. & LEE, M. 2015. Decrease in osmotically driven water flux and transport through mangrove roots after oil spills in the presence and absence of dispersants. *Marine Pollution Bulletin*.
- UMLAUF, L., BURCHARD, H. & BOLDING, K. 2011. *GOTM Sourcecode and Test Case Documentation*.
- UNAL 1999. Buenaventura.
- UNIVERSIDAD DEL VALLE 1990. Modelo hidráulico de la bahía de Buenaventura. 1 ed. Cali
- UNIVERSIDAD DEL VALLE 1997. Notas de Campo Buenaventura 1997. In: HIDROMAR, G. D. I. (ed.). Santiago de Cali: Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y Medio Ambiente (EIDENAR).
- UNIVERSIDAD DEL VALLE 1999. Estudio hidrodinamico y sedimentologico de la Bahía de Buenaventura mediante la implementacion del modelo matematico MIKE 21. Cali.
- VAN DE WIEL, G. & VAN DORP, J. R. 2011. An oil outflow model for tanker collisions and groundings. *Annals of Operations Research*, 187, 279-304.
- WALKER, D., COLEMAN, J., MICHEL, K. & MICHEL, J. 2003a. Oil in the Sea. *International Oil Spill Conference*.
- WALKER, D., MICHEL, K., COLEMAN, J. C. & MICHEL, J. 2003b. Oil in the Sea: Changes in the Nature of Sources and Inputs Since 1985. *International Oil Spill Conference Proceedings*, 2003, 669-673.
- WOLF, D. & RESNICK, W. 1963. Residence Time Distribution in Real Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 2, 287-293.

ANEXO A. INFORMACIÓN HISTÓRICA

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (°C) (Aeropuerto-Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Annual
1970-1997	25.60	25.70	26.10	26.00	25.90	25.80	25.70	25.70	25.50	25.60	25.60	25.50	25.70
1998	27.40	27.40	27.30	27.20	27.10	26.50	26.00	25.80	26.00	25.60	25.30	25.10	26.39
1999	25.40	25.50	25.90	25.80	25.60	25.30	25.30	25.40	25.20	25.10	24.70	24.90	25.34
2000	24.70	25.30	25.70	25.80	25.90	25.70	25.40	25.70	25.30	25.70	25.30	-	25.50
2001	25.70	26.20	26.10	26.50	26.00	25.80	26.00	26.10	25.60	25.60	25.60	25.60	25.90
2002	25.80	26.20	26.40	26.20	26.40	25.80	25.60	25.90	25.90	25.80	25.70	26.00	25.98
2003	25.90	25.90	26.60	26.10	25.80	25.70	25.60	25.80	25.40	25.30	25.50	25.90	25.79
2004	26.00	26.40	26.50	25.90	26.00	25.90	25.90	25.70	25.80	25.90	26.00	26.30	26.03
2005	26.20	26.00	26.70	27.40	27.10	26.50	26.50	26.30	26.30	25.70	25.50	25.60	26.32
2006	25.70	26.00	26.30	26.10	26.20	25.90	26.10	26.40	26.20	26.40	26.20	26.20	26.14
2007	26.50	26.40	25.60	26.20	25.80	25.70	25.70	25.20	25.40	25.20	25.20	24.80	25.64
2008	24.90	25.60	26.30	26.70	26.50	26.10	26.00	26.00	26.10	25.90	25.50	25.60	25.93
2009	25.50	26.10	25.90	26.40	26.40	26.20	26.40	26.40	26.60	25.90	26.30	26.10	26.18
2010	26.50	26.90	27.10	27.10	26.80	26.30	25.70	25.90	25.70	25.60	24.80	24.90	26.11
2011	25.60	26.10	26.50	26.60	26.50	26.30	26.00	26.50	26.10	25.30	25.40	25.20	26.01
2012	25.70	25.80	26.30	26.50	26.40	26.30	26.20	26.30	26.20	25.80	26.20	26.10	26.15
2013	26.40	26.10	26.70	27.30	26.40	26.20	26.00	26.00	-	26.20	26.10	26.10	26.32
2014	26.30	26.50	26.70	27.10	27.00	27.30	27.40	26.30	-	-	-	-	26.83

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (%) (Aeropuerto-Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Annu al
1970-1997	87	86	86	86	86	87	86	88	87	88	87	87	87
1998	87	86	88	87	87	87	88	88	87	88	89	89	88
1999	86	87	86	88	88	88	88	88	88	89	90	89	88
2000	88	88	88	86	90	88	89	89	89	89	90	-	89
2001	81	87	88	88	89	90	89	90	89	91	90	91	89
2002	90	89	90	89	89	90	91	90	89	89	89	89	90
2003	89	90	87	89	90	89	89	88	90	90	89	89	89
2004	88	87	89	90	91	88	88	89	89	89	88	88	89
2005	89	88	87	86	86	87	88	90	90	88	89	88	88
2006	88	89	88	89	90	91	91	89	90	90	90	90	90
2007	91	89	93	90	82	93	91	91	91	92	92	92	91
2008	92	88	86	87	87	89	87	87	88	88	90	89	88
2009	89	88	88	87	88	89	88	88	88	90	89	90	89
2010	90	89	89	87	88	81	89	88	87	89	91	90	88
2011	89	89	84	85	88	90	87	86	88	88	89	89	88
2012	87	87	88	86	88	81	88	88	89	89	88	89	87
2013	89	89	89	85	88	90	89	88	-	89	89	89	89
2014	87	88	85	86	85	85	84	81	-	-	-	-	85

VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (m/s) (Aeropuerto-Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Annual
1946-2005	-	-	0.8	0.6	0.9	0	0.6	0.5	0.9	0.8	0.9	0.7	0.7
2006	1.1	0.8	0.7	0.7	-	0.8	0.8	0.9	0.6	0.7	0.7	0.4	0.7
2007	-	0.9	0.9	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.1	1.0
2008	0.9	1.0	1.0	1.1	1.0	-	-	-	-	-	0.8	1.2	1.0
2009	1.0	1.1	0.9	-	-	1.0	-	1.1	-	-	1.1	-	1.0
2010	0.9	-	1.0	1.0	1.1	-	-	-	1.1	-	0.9	-	1.0
2011	0.6	-	0.5	0.7	0.9	0.8	-	-	1.1	1.0	1.1	1.1	0.9
2012	0.9	0.7	0.4	0.4	0.5	-	-	-	-	-	-	-	

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (mm) (Aeropuerto-Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Annual
1970-1997	543.2												6518.9
1998	487.5	576.0	400.3	358.0	549.0	372.1	386.0	792.0	791.0	718.0	968.0	535.0	6932.9
1999	374.0	378.0	330.0	765.0	595.0	829.0	676.0	955.0	501.0	828.0	674.0	960.0	7865.0
2000	319.0	415.0	466.0	283.9	601.4	518.3	744.9	836.0	865.0	1124.0	489.0	-	6662.5
2001	151.0	377.0	335.0	406.3	771.9	514.8	671.0	699.9	749.6	814.2	1120.0	692.6	7303.3
2002	593.8	237.8	436.0	511.1	635.0	430.2	686.4	767.1	777.1	731.9	529.4	558.8	6894.6
2003	646.7	365.6	461.0	658.9	647.9	527.3	359.6	1064.0	776.7	759.2	478.2	710.3	7455.4
2004	332.9	108.9	239.9	478.2	832.6	521.6	639.9	602.2	1033.0	869.7	604.7	433.0	6696.6
2005	574.3	248.6	361.8	415.4	767.4	673.5	999.6	591.3	690.6	959.1	902.6	432.0	7616.2
2006	339.9	182.6	658.8	755.8	736.5	732.7	558.2	760.7	763.3	742.9	852.4	511.0	7594.8
2007	582.4	192.2	330.3	755.8	870.6	381.6	748.1	611.2	957.0	871.9	640.6	656.3	7598.0
2008	370.1	270.1	442.9	401.2	480.7	528.7	499.4	635.9	616.6	1150.0	755.1	-	6150.7
2009	404.3	320.8	475.9	371.3	742.7	599.4	486.0	951.3	617.5	966.7	888.5	705.4	7529.8
2010	237.2	385.8	476.7	371.5	610.5	421.3	730.4	922.5	1189.0	941.7	858.6	909.3	8054.5
2011	183.4	105.3	213.3	477.0	464.3	615.9	555.5	560.8	919.2	659.2	913.4	798.9	6466.2
2012	234.9	200.1	494.8	529.1	554.8	697.5	538.3	929.3	587.4	1063.0	682.1	723.7	7235.0
2013	208.1	502.5	347.2	229.9	862.4	-	416.2	775.8	832.2	1169.0	482.9	937.4	6763.6
2014	458.7	170.9	385.1	674.2	533.5	374.4	413.6	707.3	-	-	-	-	3717.7

DIRECCION DEL VIENTO (Aeropuerto-Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
2004	-	-	-	-	-	-	-	-	SW	SE	S	S	
2005	E	SW	S	W	W	W	W	W	W	-	-	-	
2006	SW	SW	W	SW	-	W	W	W	W	W	W	W	
2007	SW	W	W	SW	SW	SW	SW	SW	SW	W	SW	SW	
2008	SW	SW	W	W	W	NE	SW	-	-	-	SW	W	
2009	W	W	NW	NW	W	W	W	W	W	W	W	SW	
2010	W	N	W	W	W	W	W	W	W	NE	NW	W	
2011	W	-	NW	NW	W	SW	SW	-	SW	SW	SW	SW	
2012	SW	SW	SW	SW	SW	SW	-	-	-	-	-	-	

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (°C) (Colpuertos)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Annual
1969-1997	26.0 0	26.4 0	26.5 0	26.5 0	26.4 0	26.2 0	26.1 0	25.9 0	25.7 0	25.6 0	25.6 0	25.8 0	26.06
1998	28.1 0	28.1 0	28.1 0	28.3 0	28.0 0	27.1 0	26.5 0	26.4 0	26.6 0	26.3 0	25.6 0	25.9 0	27.08
1999	25.6 0	25.7 0	26.2 0	26.0 0	-	26.1 0	26.3 0	26.1 0	26.0 0	25.7 0	25.3 0	25.7 0	25.88
2000	25.6 0	26.7 0	26.6 0	27.4 0	27.2 0	26.6 0	-	-	-	-	-	-	26.68

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (%) (Colpuertos)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Annual
1969-1997	87.0 0	86.0 0	86.0 0	86.0 0	86.0 0	87.0 0	86.0 0	88.0 0	87.0 0	88.0 0	87.0 0	87.0 0	87.00
1998	83.0 0	84.0 0	83.0 0	85.0 0	85.0 0	86.0 0	87.0 0	87.0 0	87.0 0	89.0 0	91.0 0	90.0 0	86.42
1999	91.0 0	90.0 0	89.0 0	92.0 0	-	88.0 0	87.0 0	88.0 0	88.0 0	88.0 0	89.0 0	81.0 0	88.27
2000	87.0 0	83.0 0	85.0 0	84.0 0	86.0 0	86.0 0	-	-	-	-	-	-	85.17

VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (m/s) (Colpuertos)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Annual
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	

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (mm) (Colpuertos)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Vr. Annual
1992	786.40	296.70	486.20	276.10	653.80	274.80	669.70	736.70	1146.00	761.30	351.00	793.90	7232.60
1993	646.80	256.00	361.20	571.20	788.70	513.70	509.20	1258.00	987.90	978.80	785.80	1070.00	8727.30
1994	446.30	287.00	374.50	373.20	712.70	628.00	650.00	616.60	1126.00	872.10	791.60	303.40	7181.40
1995	199.70	300.00	380.40	963.80	788.20	587.50	630.00	701.60	1061.00	713.60	998.10	1124.00	8447.90
1996	531.60	260.90	451.90	799.60	1048.00	549.30	905.30	1001.00	1305.00	733.40	1070.00	902.10	9558.10
1997	187.70	181.10	240.50	535.10	496.50	445.10	486.70	409.40	424.70	502.00	274.90	239.40	4423.10
1998	224.60	280.90	409.30	310.90	613.40	558.80	465.90	619.60	835.90	1018.00	1149.00	744.40	7230.70
1999	372.20	409.30	381.70	876.90	-	758.50	1008.00	1282.00	575.90	926.40	758.10	1039.00	8388.00
2000	375.90	272.50	544.90	392.30	559.20	444.90	809.70	846.30	712.50	904.50	571.70	548.20	6982.60
2001	472.90	412.20	323.90	433.50	894.10	606.70	795.80	866.60	974.10	964.30	1372.00	699.20	8815.30

DIRECCION DEL VIENTO (Aeropuerto-Buenaventura)													
Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
1992	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	
1993	SW	SW	SW	W	SW	W	-	-	-	-	-	-	
1994	-	-	-	-	SW	SW	SW	SW	SW	-	-	-	
1995	SW	SW	SW	SW	SW	SW	SW	W	-	SW	S	W	
1996	SW	SW	SW	SW	SW	W	S	W	S	SW	S	SW	
1997	W	W	SW	NW	NW	S	NE	NW	NW	-	-	W	
1998	E	W	-	W	SW	SW	SW	SE	SW	-	-	-	
1999	-	-	-	-	-	-	-	-	W	W	SW	-	
2000	-	-	-	-	-	-	-	N	-	-	-	-	
2001	-	-	-	-	-	-	-	-	N	SW	S	S	

