

**MODELACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL GOLFO DE
URABÁ, COLOMBIA**

LILIANA VELÁSQUEZ MONTOYA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

ASESOR: CARLOS ALEJANDRO ESCOBAR SIERRA

MEDELLÍN

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

MEDELLIN, JUNIO DE 2013

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación Colciencias, a la Universidad EAFIT y al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH) por la aprobación y financiación del proyecto “Erosión costera en Antioquia II: Modelación de la evolución morfológica en el golfo de Urabá”, investigación de la cual hace parte este proyecto de grado.

A Carlos Escobar por su asesoría y apoyo durante mi formación profesional, a los profesores Iván y Juan que con sus enseñanzas sembraron en mí la semilla del gusto por el mar y a todas las personas que de una u otra manera aportaron con su conocimiento para que este proyecto saliera adelante. A Andrés Gómez y Luis Javier Montoya gracias por sus correcciones y valiosos comentarios en favor del mejoramiento de mi trabajo.

A mis compañeros de maestría gracias por los momentos vividos y los recuerdos imborrables de estos años de estudio y aprendizaje, en especial a Pani por convertirse en mi confidente, por sus consejos y por sacarme una sonrisa siempre que lo necesité.

Finalmente, pero no menos importante, gracias a mi familia por su apoyo incondicional, por el amor y la formación que me dieron y por creer siempre en mí. A Carlos por su amor, sus palabras de aliento y por hacer parte de mis motivaciones en todo este proceso y en el que está por venir. A mis amigos que siempre me han alegrado la vida.

CONTENIDO

RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	17
1.3 ÁREA DE ESTUDIO.....	18
2. MARCO DE REFERENCIA.....	21
2.1 SEDIMENTOS.....	21
2.2 DINÁMICA DE SEDIMENTOS.....	25
2.3 DELTAS.....	28
3. MODELO MATEMÁTICO.....	33
3.1 HIDRODINÁMICA.....	33
3.2 TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN.....	36
3.3 SEDIMENTOS COHESIVOS.....	37
3.4 SEDIMENTOS NO-COHESIVOS.....	39
3.5 DOMINIO DE CÁLCULO.....	43
4. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	45
4.1 MORFOLÓGICA.....	45
4.2 CLIMATOLÓGICA.....	46
4.3 HIDROLÓGICA.....	47
4.4 SALINIDAD Y TEMPERATURA.....	48
4.5 OLEAJE Y MAREA.....	49
4.6 SEDIMENTOS.....	49
5. MEDICIONES EN CAMPO.....	52
5.1 EQUIPOS DE MEDICIÓN.....	52
5.2 ESTRATEGIAS DE MEDICIÓN.....	54

5.3 DISCUSIÓN.....	62
6. ANALISIS DE SENSIBILIDAD.....	64
6.1 PARÁMETROS NUMÉRICOS.....	67
6.2 PARÁMETROS FÍSICOS.....	71
6.3 FORZAMIENTOS EXTERNOS.....	81
6.4 DISCUSIÓN.....	83
7. DESEMPEÑO Y EVALUACIÓN DEL MODELO.....	86
7.1 CALIBRACIÓN.....	88
7.2 VALIDACIÓN.....	95
7.3 DISCUSIÓN.....	103
8. APLICACIONES.....	106
8.1 PATRÓN DE DISPERSIÓN DE SEDIMENTOS EN LAS ÉPOCAS SECA Y HÚMEDA.....	107
8.2 CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS ANTE EVENTOS DE ALTA ENERGÍA.....	113
8.3 ZONAS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN A LO LARGO DE LA LINEA DE COSTA DEL GOLFO.....	115
8.4 DISCUSIÓN.....	119
9. CONCLUSIONES.....	122
10 REFERENCIAS.....	125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dragado en la boca Leoncito del río Atrato (izquierda). Erosión en las playas de Turbo (derecha)	16
Figura 2. Ubicación del golfo de Urabá	19
Figura 3. Diagrama de Shields (Modificada de: CSIRO, 2013)	26
Figura 4. Modos de transporte de sedimentos. Modificado de: Allen (1994).....	27
Figura 5. Componentes de los deltas basados en su morfología y ambiente sedimentario.....	30
Figura 6. Pluma del río Atrato. Imagen derecha tomada de: NASA Expedition/16.	32
Figura 7. Equivalencia entre sistema coordenado curvilíneo y rectangular. Tomada de Deltares (2011).....	34
Figura 8. Aproximación de la concentración en el fondo de la capa de referencia según el método de Van Rijn (1993). Modificada de: Deltares (2011a)	41
Figura 9. Malla de cálculo.....	44
Figura 10. Batimetría 3D del golfo de Urabá	46
Figura 11. Ubicación de fuentes de información, tributarios menores y distribución del porcentaje de arenas	51
Figura 12. Equipos de medición. Transductor de ecosonda (izq.) y Botella Niskin y CTD (der.)	53
Figura 13. Estrategias de medición	55

Figura 14. Lugares de medición en campaña de Abril 2010	56
Figura 15. Lugares de medición en campaña de Noviembre 2010.	58
Figura 16. Correlación entre concentración de sedimentos y turbidez. Correlación utilizando todos los puntos muestreados (izquierda) y correlación eliminando tres puntos de los que se sospecha no simultaneidad de muestreo (derecha).....	59
Figura 17. Lugares de medición en campaña de Noviembre - Diciembre 2011....	60
Figura 18. Diagrama metodológico del análisis de sensibilidad	66
Figura 19. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa del número de celdas	68
Figura 20. Número de celdas óptimo	68
Figura 21. Variación espacial del efecto del número de capas en la concentración de sedimentos	69
Figura 22. Número de capas óptimo	69
Figura 23. Variación espacial del efecto del intervalo de cálculo en la concentración de sedimentos.....	70
Figura 24. Intervalo temporal de cálculo óptimo.....	70
Figura 25. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa del coeficiente de rugosidad de Manning	71
Figura 26. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa del cortante crítico de erosión	72
Figura 27. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa del cortante crítico de sedimentación	73

Figura 28. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la tasa de erosión	73
Figura 29. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la velocidad de asentamiento de las partículas cohesivas	74
Figura 30. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la difusividad de remolino horizontal	75
Figura 31. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa la difusividad de remolino vertical.....	75
Figura 32. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la escala Ozmidov	76
Figura 33. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la viscosidad de remolino horizontal.....	76
Figura 34. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la viscosidad de remolino vertical.....	77
Figura 35. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa del coeficiente de dragado del viento a 0 m/s	77
Figura 36. Diferencias instantáneas en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en superficie y fondo a partir de variaciones del coeficiente de rugosidad de Manning.....	79
Figura 37. Diferencias instantáneas en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en superficie y fondo a partir de variaciones del cortante crítico de erosión	79

Figura 38. Diferencias instantáneas en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en superficie y fondo a partir de variaciones de la tasa de erosión....	80
Figura 39. Diferencias instantáneas en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en superficie y fondo a partir de variaciones de la velocidad de asentamiento.....	81
Figura 40. Comparación de perfiles de salinidad medidos y simulados en el golfo de Urabá al final del análisis de sensibilidad.....	82
Figura 41. Variación espacial del efecto del oleaje, los procesos termo-halinos y la descarga del río Atrato en la concentración de sedimentos (Tomada de: Velásquez y Escobar 2012a)	83
Figura 42. Variación espacial del efecto del viento, la marea y los tributarios menores en la concentración de sedimentos en el golfo de Urabá (Tomada de: Velásquez y Escobar 2012a).....	84
Figura 43. Efecto de los forzamientos externos en las concentraciones de sedimentos.....	85
Figura 44. Concentración de sedimentos superficial medida (puntos) y modelada (fondo) y forzamientos externos para el periodo de calibración (Noviembre 2011)	93
Figura 45. Ajuste entre concentraciones simuladas y observadas para el periodo de calibración	95
Figura 46. Perfiles de salinidad y concentración de sedimentos típicos simulados en el periodo de calibración.....	96
Figura 47. Concentración de sedimentos medida (puntos) y modelada (fondo) y forzamientos externos para el primer periodo de validación (Noviembre 2010)....	99

Figura 48. Ajuste entre concentraciones simuladas y observadas para el primer periodo de validación	100
Figura 49. Concentración de sedimentos medida (puntos) y modelada (fondo) y forzamientos externos para el primer periodo de validación (Abril 2010).....	102
Figura 50. Ajuste entre concentraciones simuladas y observadas para el segundo periodo de validación	103
Figura 51. Patrones de concentración y transporte de sedimentos en superficie y fondo para las épocas climáticas del golfo de Urabá e imágenes satelitales MODIS	110
Figura 52. Perfiles transversales de concentración de sedimentos en las épocas seca y húmeda	113
Figura 53. Concentración y transporte de sedimentos en superficie y fondo para tres eventos de alta energía con dirección de oleaje noreste (izq.), norte (centro) y noroeste (der.).....	115
Figura 54. Secciones para el cálculo de balances de sedimentos	117
Figura 55. Zonas de erosión y sedimentación según condiciones climáticas. Finos y arenas (arriba), solo arenas (abajo)	119
Figura 56. Reportes de erosión y acumulación de sedimentos en la costa del golfo. Tomado de (García, 2007) a partir de los estudios realizados por Correa y Vernet (2004); (Bernal Franco et al., 2005) y Velásquez (2000).	120

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Esquema de clasificación de sedimentos Udden- Wentworth y Krumbein	22
Tabla 2. Densidad de minerales comunes en zonas costeras (Modificada de: Masselink y Hughes, 2003)	23
Tabla 3. Características morfológicas y sedimentológicas que diferencian los deltas dominados por la influencia fluvial, de oleaje y mareal. Tomado de: Schwartz (2005). Modificado de: Galloway (1975). Imágenes tomadas de: NASA Expedition/16, Global Land Cover Facility y Restrepo y Lopez (2008).....	31
Tabla 4. Distribución de las capas en profundidad.....	44
Tabla 5. Características de las fuentes de información climática	47
Tabla 6. Caudales de tributarios menores.....	48
Tabla 7. Componentes de marea para el norte del golfo de Urabá extraídas del TMD	49
Tabla 8. Tamaño y parámetros característicos asumidos para los sedimentos del golfo	50
Tabla 9. Caudales y concentración de sedimentos en las bocas del Atrato en Abril 2010	57
Tabla 10. Caudales en las bocas del río Atrato en Noviembre de 2010.....	59
Tabla 11. Caudales y concentración de sedimentos en las bocas del Atrato y el río León en Noviembre 2011	61
Tabla 12. Valores de los parámetros en el análisis de sensibilidad	65

Tabla 13. Relevancia de los parámetros físicos en el cálculo de las concentraciones de sedimentos	78
Tabla 14. Valores de parámetros físicos evaluados en la calibración del modelo.	91
Tabla 15. Parámetros calibrados del modelo	92
Tabla 16. Parámetros estadísticos de la validación distribuidos en profundidad.	100
Tabla 17. Condiciones de simulación para época húmeda, seca y evento de alta energía	108

RESUMEN

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

Se utilizó la plataforma Delft3D desarrollada por W|L Delft Hydraulics que acopla la hidrodinámica, el oleaje y el transporte de sedimentos. El modelo considera la descarga de afluentes y disponibilidad en el lecho de dos tipos de sedimentos: cohesivos y no-cohesivos. Se incluyen además, forzamientos atmosféricos, de marea, oleaje, descarga de ríos y gradientes de densidad.

Los resultados del modelo fueron evaluados para tres temporadas climáticas a partir de mediciones realizadas en campo que variaron en su cobertura espacial. Para este proceso se utilizaron parámetros estadísticos que indicaron que la herramienta logra una representación entre buena y razonable de las concentraciones de sedimentos en suspensión en el golfo.

Se determinaron patrones de concentración de sedimentos para las épocas húmeda y seca. En la primera, la baja energía de los sistemas convergentes genera plumas boyantes que se desplazan hacia el norte, mientras en la segunda, los forzamientos del norte obligan a las partículas a permanecer en la zona central y sur del golfo. Se identificó que la respuesta de las concentraciones de sedimentos está altamente ligada a la fuerza y dirección del viento y el oleaje.

Finalmente, el modelo logró reproducir para una escala temporal de días, tendencias de erosión en la costa este del golfo y cerca al municipio de Acandí, mientras la acumulación de sedimentos tuvo lugar en Bahía Colombia, resultados que coinciden con los reportes previos de variación en la línea de costa del golfo.

ABSTRACT

A sediment transport model was developed for the Gulf of Urabá. The problems of erosion and sedimentation that take place in the zone triggered the construction of a mathematical tool that allows extending the understanding of the sediment dynamics in the Gulf.

The Delft3D modeling platform developed by W|L Delft Hydraulics that couples the hydrodynamics, waves and sediment transport was used. The model accounts for the input and sea bed availability of two types of sediments: cohesive and non-cohesive. There are also included atmospheric forcings, tides, waves, river discharges and density gradients.

The model results were evaluated in three climatic periods using field measurements that varied in their spatial coverage. In the evaluation process, statistical parameters indicated that the tool attained an overall reasonable to good prediction of suspended sediment concentrations in the Gulf.

Sediment concentrations patterns for the rainy and dry seasons were determined. In the former period, the low energy of the converging systems generates northward directed buoyant plumes, while in the second season, the northerly forcings maintain the particles in the central and southernmost zone of the Gulf. It was also identified that the response of the sediment concentrations is highly related to the force and direction of the wind and waves.

Finally, the model reproduced in a daily temporal scale, erosion trends in the east coast of the Gulf and near Acandí, while accumulation was predicted in Bahía Colombia. These results coincide with the previous reports of shore line variation of the Gulf.

1. INTRODUCCIÓN

El golfo de Urabá se considera una región estratégica a nivel nacional y regional tanto por su ubicación geográfica en la esquina suroeste del Caribe, como por los planes de la construcción de un puerto multipropósito que amplíe las posibilidades de intercambios mercantiles entre Colombia, Canadá, Estados Unidos y Europa (BIRD, 2010 y Cámara De Comercio De Medellín Para Antioquia, 2006).

La posibilidad de tener un puerto más cercano al centro del país, donde se encuentran las grandes ciudades, facilitaría la entrada y salida de productos y reduciría el costo final de los mismos. Lastimosamente, en la actualidad no se cuenta con la infraestructura necesaria para el intercambio mercantil a gran escala y el movimiento portuario de la región se reduce al cargue del banano, producto de exportación por excelencia de la región.

La construcción del puerto y los proyectos de desarrollo costero de la región dependen además de los planes de los gobiernos de paso, de estudios técnicos que respalden el conocimiento de la dinámica del golfo, lugar complejo desde el punto de vista ambiental, geológico, oceanográfico y social. Razón por la cual, estudios referentes a estas temáticas se han venido realizando en la región y han permitido ampliar el entendimiento de algunos de los fenómenos que tienen lugar allí.

Ejemplos de algunos de los proyectos más recientes que se han adelantado en el golfo son: (1). Expedición Antioquia 2013, con participación de entidades estatales y la academia, (2) Estudio de la dispersión de sedimentos del río Atrato y sus impactos sobre la problemática ambiental costera del Golfo de Urabá llevado a cabo por la Universidad Nacional de Colombia y (3) El proyecto de Investigación Erosión Costera en Antioquia en sus fases I y II, con participación de la Universidad EAFIT, Nacional, de Antioquia y el CIOH.

El estudio que se presenta a continuación hace parte del último de estos proyectos en su segunda fase y pretende aportar al conocimiento en el área del transporte de sedimentos, sirviéndose de herramientas matemáticas para describir la dinámica estacional de los sedimentos al interior del golfo y generar una herramienta referente, que a futuro permita llegar al planteamiento de soluciones ingenieriles a las problemáticas de erosión y sedimentación que aquejan esta zona costera.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el golfo de Urabá tienen lugar dos procesos contrastantes referentes a la dinámica de sedimentos. El primero de ellos es la sedimentación generalizada en el delta del Atrato y en la zona más resguardada del cuerpo de agua, Bahía Colombia; el segundo, es la erosión que afecta el costado oriental del golfo, donde las tasas de retroceso han alcanzado valores medios superiores a 0,5 m/año (Morton y Correa, 2004 y Correa et al., 2005).

Ambos procesos se consideran problemas que retrasan el desarrollo de la región, ya sea por la colmatación de los canales de ríos como el Atrato y el León que dificulta el transporte marítimo-fluvial de pasajeros y carga, o por la pérdida de terrenos y destrucción de infraestructura que ocasiona la erosión (Figura 1).



Figura 1. Dragado en la boca Leoncito del río Atrato (izquierda). Erosión en las playas de Turbo (derecha)

Esta problemática lleva no solo a cambios morfológicos acelerados en la región, sino que está directamente relacionada con cuantiosas inversiones económicas en dragados y construcción de obras de defensa costera que se han venido realizando sin un conocimiento técnico ni científico de la dinámica de los sedimentos en el golfo (Correa y Vernet, 2004).

Partiendo de esta problemática surge la pregunta ¿Cómo es la dinámica de sedimentos en el golfo de Urabá?. Para responderla se propone la modelación matemática del transporte de sedimentos en esta región para identificar los patrones de dispersión de las partículas, de modo que se amplíe el conocimiento de la dinámica de las mismas y que a futuro se cuente con una herramienta para el planteamiento de soluciones que lleven a un adecuado desarrollo del territorio.

1.2 OBJETIVOS

Desarrollar un modelo matemático de transporte de sedimentos en la plataforma Delft3D, como una herramienta computacional que permita ampliar el conocimiento de la dinámica de sedimentos en el golfo de Urabá.

Siguiendo la premisa anterior se plantean los siguientes objetivos específicos:

- (a). Calibrar y validar el modelo de transporte de sedimentos con información de campo referente a concentraciones de sedimentos.
- (b). Identificar, a partir de modelación numérica, los patrones de concentración de sedimentos en el golfo de Urabá para las dos temporadas climáticas características de la región (época seca y húmeda).
- (c). Simular la respuesta en las concentraciones de sedimentos ante condiciones meteorológicas extremas.
- (d). Localizar zonas de pérdida y ganancia de sedimentos y determinar los factores físicos que influyen en el transporte de las partículas al interior del golfo.

1.3 ÁREA DE ESTUDIO

El golfo de Urabá (Figura 2) es el más grande y meridional del Caribe colombiano; su extremo noroeste, conocido como Cabo Tiburón, marca el límite con la República de Panamá y el inicio de Sur América. Regionalmente, el golfo se enmarca entre los departamentos de Antioquia y Chocó.

El golfo se encuentra en la zona de interacción de las placas de Nazca, Suramérica y Caribe y se considera una zona de actividad sísmica significativa. En su costado oeste las pendientes son abruptas y en la costa opuesta las pendientes son suaves. El fondo está compuesto en su mayoría por partículas finas de origen terrígeno (Chevillot et al., 1993), en especial en las zonas más profundas donde representan el 100% de los sedimentos. Las arenas abundan en las aguas someras del costado noroeste del golfo donde llegan a representar más del 70% de los sedimentos de fondo (García, 2007).

El ancho del golfo varía entre 48,5 y 5,9 km, su estrechamiento máximo es consecuencia de la desembocadura del río Atrato por siete distributarios principales, que conforman un delta en forma de “pata de pájaro” y que según la clasificación de Galloway (1975) es dominado por la influencia fluvial.

El río Atrato, afluente principal del golfo, aporta al sistema un caudal líquido medio aproximado de $4540 \text{ m}^3/\text{s}$ y uno sólido de 350 Kg/s , ambos valores obtenidos en sus bocas principales a partir de tres aforos realizados en diferentes épocas climáticas entre los años 2010 y 2011 (véase sección 5). Estos caudales coinciden aproximadamente con los reportados en la desembocadura por Lonin y Vasquez (2005) y la Comisión Técnica Francesa (1984), cada uno de 4750 y $4500 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente. No se incluyen los datos de estaciones de aforo como Riosucio, Domingodó y Bellavista, dado que estas se encuentran a más de 100 km aguas arriba de la desembocadura.

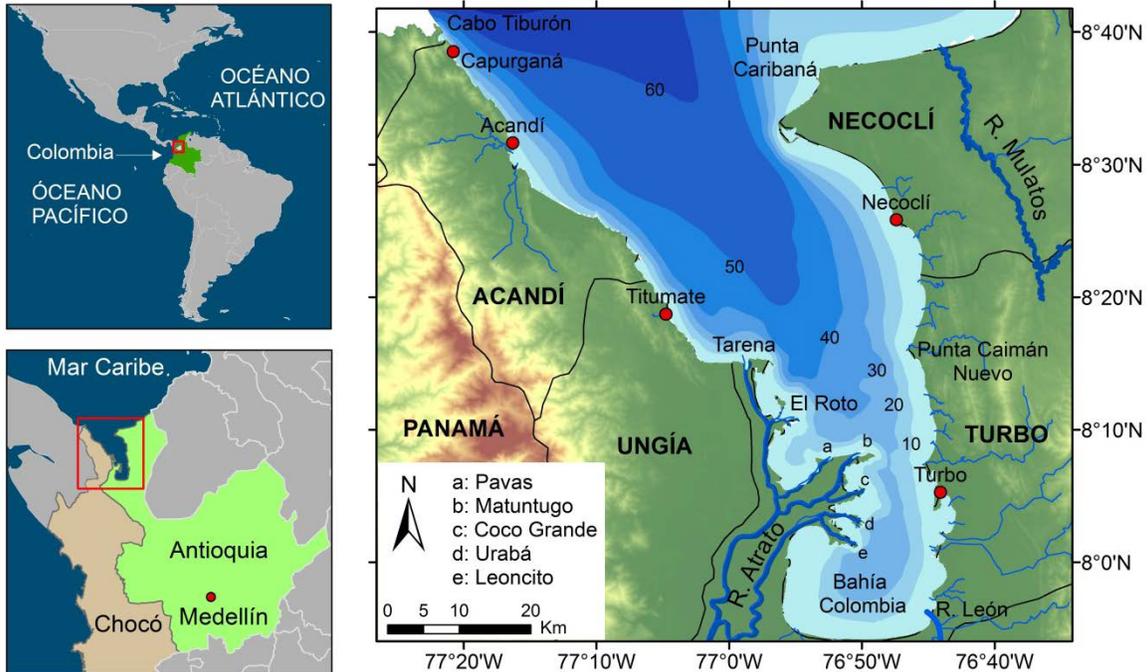


Figura 2. Ubicación del golfo de Urabá

De las siete bocas principales del río Atrato, los aforos indicaron que El Roto aporta aproximadamente el 65% del total de la descarga del río. Leoncito, Matuntugo y Coco Grande, aportan el 17, 13 y 3,5% respectivamente, mientras Tarena, Urabá y Pavas no supera el 1% cada una.

El segundo afluente en importancia para la región es el río León con un caudal medio de $75,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en su desembocadura estimado por Roldán (2008). A través de este río se transporta el banano de exportación desde las zonas de embarque (Zungo y Nueva Colombia) hasta los buques que esperan fondeados en bahía Colombia. Adicionalmente, en el golfo descargan sus aguas varias decenas de tributarios secundarios, entre los cuales cabe destacar el Currulao, Turbo, Caimán Nuevo y Caimán Viejo en el costado este del golfo (detalles en la sección 4.3).

Los valores medios anuales de temperatura del aire, humedad relativa, precipitación y cobertura de nubes son $27,2 \text{ }^\circ\text{C}$, 85%, 2500 mm/año y 69,8%

respectivamente (García, 2007; Roldán, 2008; Montoya, 2010). Sin embargo, el clima de la región lo rige el desplazamiento latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical, el cual genera dos épocas climáticas diferenciadas entre sí por cambios considerables en los patrones de las lluvias y los vientos (Restrepo y Lopez, 2008).

La época seca abarca el periodo comprendido entre los meses de Diciembre y Abril en los cuales los vientos del norte y noreste pueden alcanzar valores críticos superiores a 9 m/s (Chevillot et al., 1993; Roldán, 2008). Por su parte, en la época húmeda predominante el resto de meses del año, son típicos el incremento en las lluvias y vientos débiles de dirección variable.

En el golfo se presenta un régimen micro-mareal de tipo mixto semidiurno, con amplitudes que no superan los 40 cm (Vernette et al., 2002). El oleaje en la zona norte del golfo depende de las condiciones marinas del mar Caribe y al sur de las condiciones climáticas locales (Osorio et al., 2010). Según los resultados del modelo WAVEWATCH III ® (Tolman, 1997), alturas significativas medias de 1,6 m se presentan en la época seca, mientras en la húmeda el valor corresponde a 0,8 m.

La circulación de las aguas en el golfo sigue el patrón de circulación estuarina como consecuencia de la interacción de las corrientes marinas y las fluviales provenientes del río Atrato (Montoya, 2010; Escobar et al., En revisión). Dicho patrón es más marcado durante la época húmeda donde el chorro de salida del Atrato viaja superficialmente recostado sobre el costado este.

2. MARCO DE REFERENCIA

El marco de referencia que se presenta a continuación está dentro del contexto del transporte de sedimentos en zonas costeras y no se limita al área fluvial. Se describen los conceptos y antecedentes teóricos de los sedimentos y su transporte de mayor relevancia para el presente estudio.

2.1 SEDIMENTOS

Los sedimentos son partículas movidas por agentes físicos como el viento, las olas, las corrientes y la gravedad. Según su origen, pueden ser autóctonos o alóctonos, los primeros son aquellos que se generan por la degradación de rocas locales o que consisten en granos derivados de partes del cuerpo de organismos que habitan en las zonas costeras (v.gr. carbonato biogénico y sílica). Por su parte, los sedimentos alóctonos se derivan de la meteorización física y química de rocas continentales que forman granos compuestos por un mineral o una mezcla de minerales, los más comunes en zonas costeras son el cuarzo y la arcilla (vr.g illita, caolinita y montmorillonita) (Masselink y Hughes, 2003).

Las propiedades que definen a los sedimentos son el tamaño de las partículas, su densidad y forma. Todas estas, determinan en gran medida la respuesta de los granos ante las fuerzas que tienden a moverlos ya sea en aire o en el agua y, a su vez, se relacionan de manera directa con variables como la velocidad de caída vertical, la porosidad y la dureza.

2.1.1 Tamaño

Dada su irregularidad, se hace necesario aproximar la forma de los sedimentos a una esfera, asumiendo su diámetro como el eje de longitud intermedia (b) de la partícula. De acuerdo a este diámetro se creó el esquema de clasificación Udden-Wentworth y la escala Krumbein ϕ , una modificación logarítmica de la primera. En

la Tabla 1 se observan ambas clasificaciones y los rangos de tamaño de sedimentos gruesos y finos.

Tabla 1. Esquema de clasificación de sedimentos Udden- Wentworth y Krumbein

Nombre	Rango de tamaños		$\Phi = -\text{Log}_2\left(\frac{1}{D}\right)$
	(mm) (D)	(μm)	
Cantos rodados grandes	256-128		-8
Cantos rodados pequeños	128-64		-7
Grava muy gruesa	64-32		-6
Grava gruesa	32-16		-5
Grava media	16-8		-4
Grava fina	8-4		-3
Grava muy fina	4-2		-2
Arena muy gruesa	2-1	2000-1000	-1
Arena gruesa	1-0,5	1000-500	0
Arena media	0,5-0,25	500-250	1
Arena fina	0,25-0,125	250-125	2
Arena muy fina	0,125-0,062	125-62	3
Limo grueso	0,062-0,031	62-31	4
Limo medio	0,031-0,016	31-16	5
Limo fino	0,016-0,008	16-8	6
Limo muy fino	0,008-0,004	8-4	7
Arcilla gruesa	0,004-0,002	4-2	8
Arcilla media	0,002-0,001	2-1	
Arcilla fina	0,001-0,0005	1-0,5	
Arcilla muy fina	0,0005-0,00024	0,5-0,24	

Las arenas, materiales no cohesivos o friccionantes, están compuestas por partículas sueltas cuyo tamaño varía entre 62 y 2000 μm . Mientras las partículas fino granulares varían entre 0,24 y 62 μm y a su vez se subdividen en limos y arcillas, ambos caracterizados por experimentar fuerzas cohesivas y por la plasticidad de los suelos que conforman.

2.1.2 Forma

La forma de los sedimentos influencia su arrastre y caída. Partículas planas tienden a ser más difíciles de mover y se asientan más lentamente con respecto a

las redondeadas (Schoklitsch, 1914). El factor de forma relaciona el eje de longitud máxima (a), el de longitud intermedia (b) y el de longitud mínima (c), tres ejes mutuamente perpendiculares, por medio de la ecuación 1.

$$F.F = \frac{c}{\sqrt{ab}} \quad (1)$$

Un valor de cero del factor de forma corresponde a una partícula plana, mientras que un valor de uno representa una esfera perfecta.

2.1.3 Densidad y peso específico

La densidad de los sedimentos corresponde a la masa por unidad de volumen y su valor depende en gran medida de su mineralogía. De un material se puede determinar su densidad en estado natural, en estado seco, saturado y sumergido. En la Tabla 2 se presentan las densidades de minerales que conforman sedimentos que se encuentra comúnmente en zonas costeras.

Tabla 2. Densidad de minerales comunes en zonas costeras (Modificada de: Masselink y Hughes, 2003)

Mineral	Densidad (kg/m ³)
Aragonita	2940
Calcita	2715
Dolomita	2860
Ilita	2600 – 2900
Caolinita	2610 – 2680
Montmorillonita	2000 – 2300
Plagioclasa	2620 – 2760
Cuarzo	2650
Augita	2960 – 3520
Horblenda	3020 – 3500
Piroxeno	3200 – 3550
Magnetita	5200

El peso específico equivale al peso de un material por unidad de volumen, la gravedad específica o densidad relativa es una medida adimensional y se calcula como la densidad del material respecto a la densidad del agua.

2.1.4 Sedimentos no-cohesivos

Los sedimentos no-cohesivos o friccionantes tienen tamaños superiores a $62\ \mu\text{m}$ y como su nombre lo dice no sufren el efecto de la cohesión. Entre las propiedades que caracterizan este tipo de sedimentos se encuentra el ángulo de fricción interna (ϕ), el cual equivale al ángulo máximo de inclinación que adquiere una masa de sedimentos justo antes de que éstos comiencen a caer por efecto de la gravedad.

El ángulo de fricción interna depende del tamaño de las partículas, de su forma, su textura y la forma en la que están organizadas en grupo. Generalmente, los ϕ para arenas naturales están entre 34 y 37° . Valores inferiores a este rango están asociados a partículas esféricas con un grado de organización bajo, mientras que valores superiores se asocian a granos angulares densamente organizados.

2.1.5 Sedimentos cohesivos

Debido a las fuerzas de Van der Waals y a la atracción electrostática entre partículas, los sedimentos cohesivos tienden a unirse y formar unidades más grandes de baja densidad, conocidas como flóculos. La floculación es un proceso que depende del tipo de sedimento, del tipo y la concentración de iones en el agua y las condiciones del flujo (Mehta et al., 1989).

Los flóculos aumentan en tamaño al chocar con otras partículas y otros flóculos, pero también pueden romperse debido a esfuerzos turbulentos. La estructura de los flóculos (tamaño, densidad y forma) determina su velocidad de asentamiento y por ende adquiere gran importancia en los procesos de transporte y sedimentación de los sedimentos finos.

La probabilidad de que se formen flóculos en agua fresca es baja porque la carga negativa de las caras de las partículas hace que éstas se repelan entre sí. En el caso de agua de mar la probabilidad de que se atraigan aumenta considerablemente. El agua salada es un fuerte electrolito que ayuda a neutralizar

las caras negativas de los sedimentos y como resultado facilita la atracción entre ellos.

Una partícula de arcilla individual puede tener un tamaño del orden de 1 μm , un flóculo individual varía en tamaño entre 10 y 20 μm y un agregado o grupo de flóculos puede tener tamaños que van desde los 50 a los 200 μm (Eisma, 1993).

2.2 DINÁMICA DE SEDIMENTOS

El comportamiento de los sedimentos en un fluido en movimiento está fuertemente influenciado por el tamaño de las partículas. Las arenas con diámetros desde los 62 μm se pueden mover de manera individual, mientras que los sedimentos finos experimentan cohesión a causa de fuerzas electro estáticas, por lo que su comportamiento depende del contenido de agua y el tamaño de los flóculos que puedan conformar según sus características químicas y las del fluido en el que se encuentran.

2.2.1 Iniciación del movimiento

Los sedimentos sumergidos y en reposo sobre un lecho experimentan aceleración debido a un desequilibrio en las fuerzas que actúan sobre ellos: el peso, la fuerza boyante, la fuerza de arrastre y aquellas fuerzas que le puedan ejercer la superficie del fondo y/o las partículas circundantes. En condiciones turbulentas, la velocidad del flujo varía en espacio y tiempo. Esta variabilidad, junto con la aleatoriedad del tamaño de las partículas, su forma y posición, hacen que el inicio del movimiento sea considerado un fenómeno estocástico (Zanque, 2003).

Debido a la dificultad de cuantificar en campo la fuerza boyante y la de dragado, Shields (1936) estudió el inicio del movimiento de las partículas en flujo permanente mediante experimentos en laboratorio; posteriormente Soulsby (1997) lo hizo para flujos oscilatorios. Los estudios de ambos llevaron a la relación entre

el número de Reynolds en la frontera fondo-agua (R_*) y el esfuerzo cortante crítico requerido para que se produzca el movimiento en las partículas (τ_*).

De la Figura 3 se puede concluir que para flujos con R_* inferior a 10, se requiere un mayor cortante para iniciar el movimiento de los sedimentos debido a que corresponden a limos y arcillas que experimentan cohesión y por ende atracción al fondo, a su vez se puede interpretar como la necesidad de un mayor esfuerzo a medida que se reduce el tamaño de las partículas. Cuando el R_* supera el umbral de 10, el tamaño de las partículas es lo suficientemente grande para no generar cohesión y para interrumpir el flujo cerca al fondo, lo que expone a los sedimentos al flujo turbulento y hace que la correlación entre las variables R_* y τ_* se torne positiva.

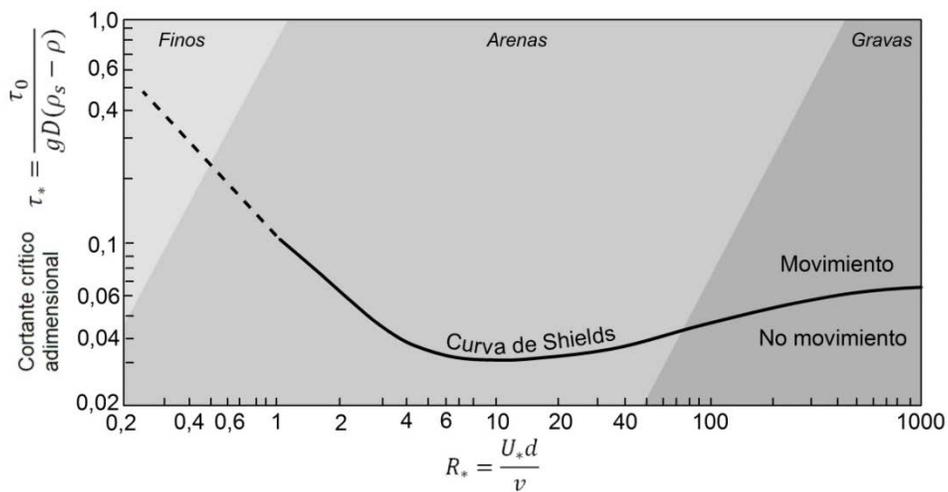


Figura 3. Diagrama de Shields (Modificada de: CSIRO, 2013)

2.2.2 Modos de transporte

Una vez los sedimentos inician el movimiento, pueden ser transportados por el flujo en uno o una combinación de los siguientes modos de transporte: (1) Rodamiento o deslizamiento en el lecho, permaneciendo en contacto con el fondo, (2) Saltación, saltando entre el flujo y el lecho; y (3) Suspensión, soportados por el fluido circundante durante todo el movimiento. Los sedimentos que al moverse

experimentan algún contacto con el lecho se conocen como carga de fondo, mientras que los que permanecen soportados por el fluido hacen referencia a la carga en suspensión (Figura 4).

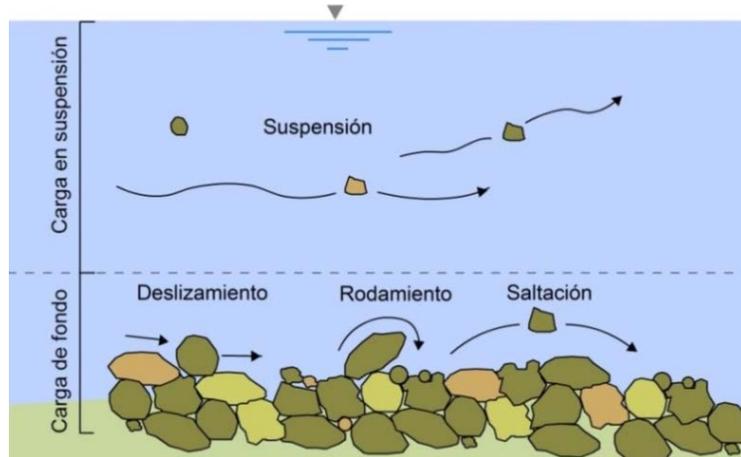


Figura 4. Modos de transporte de sedimentos. Modificado de: Allen (1994)

Existen diversos planteamientos matemáticos para el cálculo del transporte de sedimentos de fondo en flujos permanentes; entre ellos se encuentra la primera fórmula empírica presentada por Meyer-Peter y Muller (1948), posteriormente Einstein (1950) introdujo métodos estadísticos para definir el fenómeno y Bagnold (1966) utilizó el concepto de energía relacionando el transporte de sedimentos al trabajo hecho por el fluido. Adicionalmente, Van Rijn (1984) resolvió las ecuaciones de movimiento de partículas individuales en el fondo en función de las condiciones del flujo y del tamaño de grano.

El transporte en suspensión ocurre cuando los sedimentos están a una altura sobre el lecho en la que las fuerzas turbulentas superan su peso. Durante este modo de transporte la velocidad de las partículas es casi igual a la velocidad del fluido. Generalmente los sedimentos en suspensión se describen en términos de concentración (masa de los sedimentos con respecto al volumen del fluido), variable utilizada en la ecuación de advección-difusión, mediante la cual se conoce

la variación de la concentración en espacio y tiempo a causa de los procesos turbulentos (difusivos) y la velocidad del flujo (advectivos).

2.2.3 Sedimentación

Este proceso hace referencia a la caída de los sedimentos al lecho, ya sea desde la carga en suspensión o la de fondo. En el último caso, los sedimentos se depositan cuando el cortante de fondo y la turbulencia del fluido son insuficientes para mantener las partículas en movimiento. La sedimentación a partir de la carga en suspensión ocurre cuando las fuerzas ascensionales del fluido son inferiores al peso de los sedimentos.

Cuando una partícula no-cohesiva se libera en un flujo estacionario, experimenta un periodo de aceleración hacia el fondo hasta que alcanza una velocidad de caída terminal; esto sucede al equilibrarse su peso, la fuerza de boyancia y la fuerza de dragado del fluido. Bajo estas condiciones ideales, la Ley de Stokes permite determinar la velocidad de caída de sedimentos con diámetro $< 0,1$ mm.

En agua de mar y bajo condiciones de flujo no-estacionario, las partículas finas tienden a formar flóculos, lo que incrementa considerablemente su velocidad de caída. Adicionalmente, esta variable se ve afectada por el contacto grano-grano y por la viscosidad del fluido que depende en parte de la concentración de sedimentos.

2.3 DELTAS

En la literatura se encuentran numerosas definiciones de un delta, entre ellas se destaca la clásica de Elliot (1986) en la que un delta se entiende como “las protuberancias en la línea de costa en la zona donde los ríos entran a los océanos, mares parcialmente encerrados, lagunas o lagos y aportan sedimentos a una tasa más rápida que los procesos de redistribución de la cuenca”.

Los deltas se forman a partir de la acumulación de sedimentos en las desembocaduras de los ríos modificando el paisaje litoral. Según Gilbert (1885), cuando un río desemboca en su cuenca receptora, su momentum es dispersado por la interacción con el ambiente marino, causando la desaceleración del afluente y por ende la pérdida de capacidad de transporte de sedimentos y posterior sedimentación de los mismos.

2.3.1 Componentes de un delta

Gilbert (1885) dividió los deltas en tres niveles sedimentarios desde el continente hasta la cuenca receptora: *Topset* con pendientes suaves, *Foreset* con inclinaciones de 10 a 25° y *Bottomset* con pendientes suaves en la zona frontal del delta (Figura 5a). Posteriormente, los deltas compuestos por sedimentos finos se dividieron en dos partes con respecto al nivel del mar: El delta sub-aéreo por encima del nivel más bajo de la marea y el sub-acuoso debajo de ese nivel.

En el delta sub-aéreo se encuentra el plano deltaico alto sin influencia de las mareas y el plano deltaico bajo con influencia mareal. Por su parte, el delta sub-acuoso se divide en el frente deltaico donde hay sedimentación activa de sedimentos y el prodelta que es la zona más alejada donde los sedimentos alcanzan a llegar por transporte en suspensión (Figura 5 b y c).

2.3.2 Clasificación de los deltas

Galloway (1975) diferenció la morfología de los deltas en función de la entrada de sedimentos al sistema, el flujo de energía debido a las olas y debido a la marea. Los deltas dominados por la influencia fluvial reciben aportes de un sistema de drenaje bien desarrollado, capaz de transportar grandes volúmenes de sedimentos hasta la desembocadura. Una de sus principales características es el cambio de distributarios activos que trae como resultado la aparición de lóbulos y canales ya sea sinuosos o rectos, activos y/o abandonados.

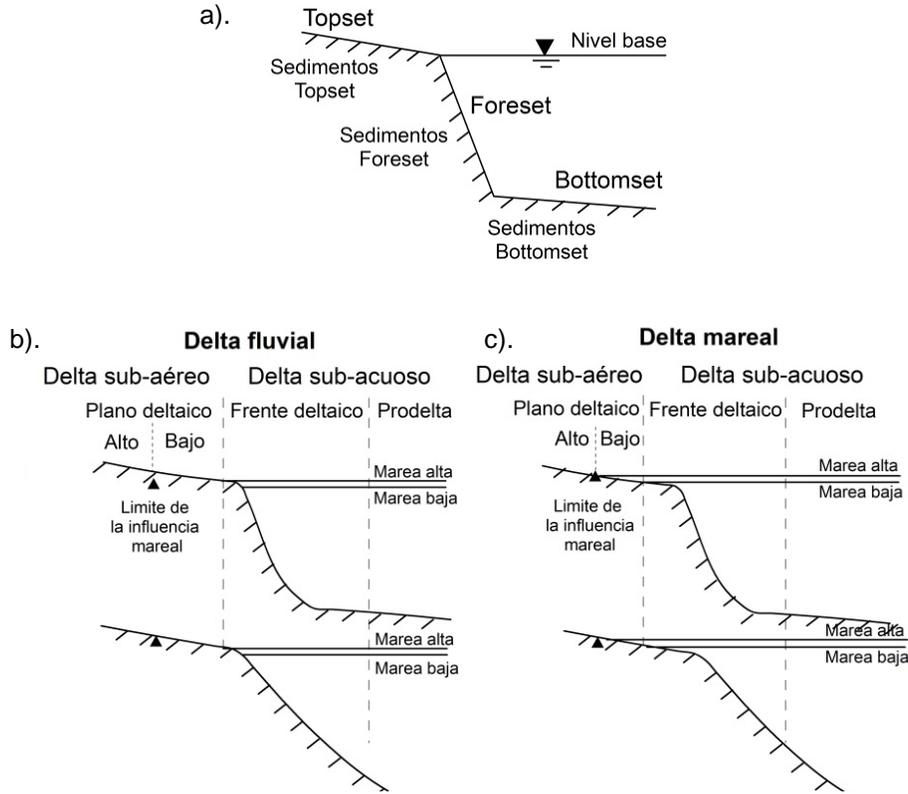


Figura 5. Componentes de los deltas basados en su morfología y ambiente sedimentario. a). Delta tipo Gilbert, b). Delta fluvial y c). Delta mareal. Modificado de: Hori y Saito (2005)

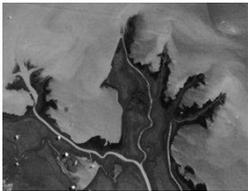
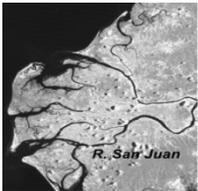
En los deltas dominados por el oleaje, éste dispersa los sedimentos finos mientras las arenas quedan en el delta. Finalmente, en los deltas dominados por influencia mareal, las corrientes de marea se llevan los sedimentos finos a aguas más profundas y forman cuerpos de arena orientados en dirección normal a la costa. En la Tabla 3 se presenta un resumen de las diferencias entre los tres tipos de deltas definidos por Galloway (1975).

2.3.3 Morfodinámica del frente deltaico

La hidrodinámica en la desembocadura de un río a su cuenca receptora está controlada por la velocidad de llegada del afluente, la pendiente del fondo en dirección hacia el mar y la distribución de densidad en profundidad (Wright, 1977).

Dependiendo de estos factores el afluente se puede comportar como un chorro (*jet*) o como una pluma.

Tabla 3. Características morfológicas y sedimentológicas que diferencian los deltas dominados por la influencia fluvial, de oleaje y mareal. Tomado de: Schwartz (2005). Modificado de: Galloway (1975). Imágenes tomadas de: NASA Expedition/16, Global Land Cover Facility y Restrepo y Lopez (2008)

Características	Dominio fluvial	Dominio de olas	Dominio mareal
Geomorfología	Elongado a lobular	Arqueado	Estuarino a irregular
Canales	Distributarios rectos a sinuosos	Canales con meandros	Canales rectos a sinuosos
Sedimentos	Lodos a mixtos	Arenosos	Variables
Formaciones geológicas	Barras en las bocas de los distributarios	Barreras costeras y playas con cordones arenosos	Cordones arenosos
Ejemplo			
	Río Atrato	Río Magdalena	Río San Juan

Los *jets* axiales ocurren cuando un río llega a alta velocidad a un receptor profundo, no hay interacción con el fondo y la energía del chorro se disipa por los procesos de mezcla turbulenta. Por debajo del jet, remolinos turbulentos generan intercambio de momentum entre la descarga y el agua del receptor, lo que resulta en la expansión y desaceleración del chorro con la distancia a partir de su boca.

Por otro lado, los *jets* planos ocurren cuando un río llega a alta velocidad a un receptor poco profundo. La expansión vertical del jet es restringida y para conservar la masa y el momentum se produce una expansión horizontal del flujo con un ángulo cercano a los 16°. El jet experimenta fricción con el fondo,

desacelerándolo más rápidamente; como consecuencia, la sedimentación es rápida y cercana a la desembocadura.

Las plumas boyantes se generan cuando ni el río ni las aguas costeras son lo suficientemente turbulentas para inducir procesos de mezcla, por lo cual generalmente se asocian a flujos estratificados. Las plumas con boyancia positiva viajan en superficie, mientras las de boyancia negativa lo hacen cerca al fondo. La primera de ellas es la más común, produciendo una estratificación estable en la que el agua fresca del río viaja por encima del agua salina más densa. El caso contrario puede ocurrir cuando la carga de sedimentos en suspensión es tan alta que hace que la densidad del agua del río sea mayor a la de la cuenca receptora.

Los límites de las plumas se conocen como frentes, reconocidos por diferencias de color entre la pluma y el agua de mar, líneas con algas flotantes o escombros cargados por el río. En la Figura 6 se observa desde diferentes ángulos la pluma del río Atrato y sus frentes en diferentes bocas.

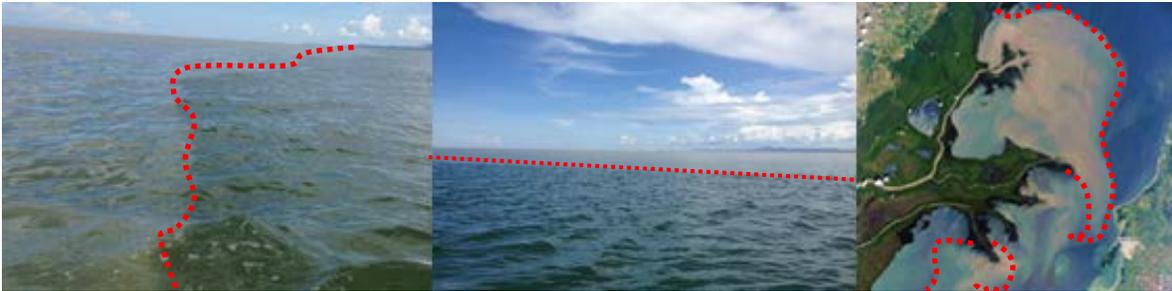


Figura 6. Pluma del río Atrato. Imagen derecha tomada de: NASA Expedition/16.

3. MODELO MATEMÁTICO

La modelación numérica para el golfo de Urabá se realizó a través de la plataforma Delft3D desarrollada en Holanda por WL|Delft Hydraulics (Roelvink y Van Banning, 1994) en la que se acoplan de manera simultánea la hidrodinámica, el oleaje, y el transporte de sedimentos. En este capítulo, a pesar de que se presentan las ecuaciones que rigen la hidrodinámica, se describe con mayor detalle el modelo de transporte de sedimentos, el cual es el eje central del presente estudio.

3.2 HIDRODINÁMICA

El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido incompresible bajo la suposición de Boussinesq, en la que las aceleraciones verticales son descartadas en la ecuación de momentum, conduciendo a la ecuación de presiones hidrostáticas. Se emplea un esquema de diferencias finitas (Leendertse, 1967; Leendertse et al., 1973; Stelling, 1984) en una malla curvilínea teniendo en cuenta las fluctuaciones turbulentas por medio de un modelo de cierre de turbulencia $K-\epsilon$ (Uittenbogaard et al., 1992).

Para definir los flujos de calor en la superficie del mar se utilizó el modelo de flujo absoluto de radiación solar total (Octavio et al., 1977), el cual requiere de la humedad relativa, la temperatura del aire y la radiación de onda corta, para resolver la radiación neta de la atmosfera (onda larga) y las pérdidas de calor debidas a la evaporación y convección.

A continuación se presentan las ecuaciones que rigen el movimiento del fluido en coordenadas curvilíneas, comenzando por la ecuación de continuidad (Ecuación 2):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (2)$$

dónde, Q representa las contribuciones por unidad de área debidas a descarga de agua, precipitación y evaporación; ζ es la elevación de la superficie libre sobre el nivel de referencia; d es la profundidad por debajo del nivel de referencia; U y V son las velocidades del flujo en las direcciones ξ y η respectivamente; ξ y η son las coordenadas horizontales curvilíneas; $\sqrt{G_{\xi\xi}}$ y $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ son los coeficientes para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares, explicados gráficamente en la Figura 7.

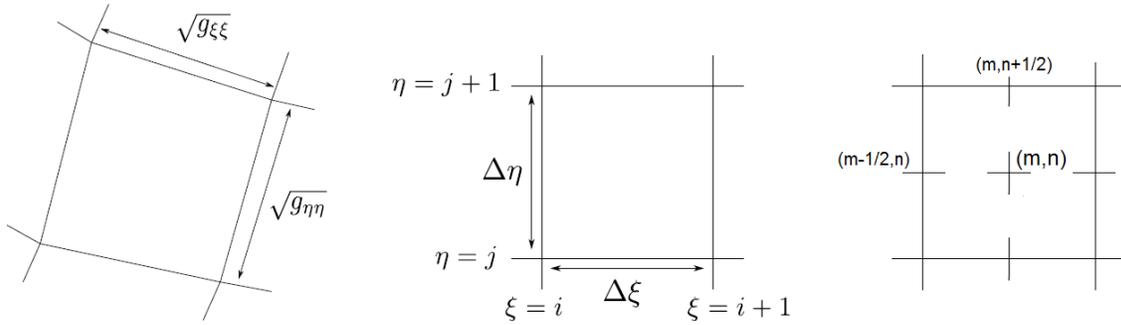


Figura 7. Equivalencia entre sistema coordenado curvilíneo y rectangular. Tomada de Deltares (2011).

En las mismas coordenadas curvilíneas se presentan las ecuaciones de conservación del momentum lineal en ambas direcciones (ξ y η) y en la vertical:

En ξ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - \frac{v^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - f_v \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\xi\xi}}} P_\xi + F_\xi + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\nu_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + M_\xi \end{aligned} \quad (3)$$

En η :

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{G_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{\omega}{d + \zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{u^2}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - f_u \\ = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta + F_\eta + \frac{1}{(d + \zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(v_V \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + M_\eta \end{aligned} \quad (4)$$

dónde ω es velocidad del fluido en la dirección z ; v_V es la vorticidad vertical, ρ_0 es la densidad de referencia del agua; f_u y f_v son las componentes de la fuerza de Coriolis en u y v ; P_ξ y P_η son los gradientes de presión en las direcciones ξ y η ; F_ξ y F_η son los desequilibrios de los esfuerzos horizontales de Reynolds en las direcciones ξ y η ; M_ξ y M_η son las fuerzas externas en ξ y η y σ es la coordenada vertical escalada según el sistema coordenado tipo σ introducido por Phillips (1957), en la cual el fondo equivale a -1 y la superficie libre a cero.

La hidrodinámica es acoplada con el oleaje, el cual se determina de acuerdo con el modelo de tercera generación SWAN (Booij et al., 1999) que simula, entre otros, tres procesos de especial importancia para el cálculo del transporte de sedimentos en aguas someras: (1) el flujo de masa por oleaje; (2) el incremento de turbulencia a causa del rompimiento del oleaje; y (3) el esfuerzo cortante producto de la corriente de fondo inducida por el oleaje (Reniers et al., 2004). Detalles de los planteamientos matemáticos se encuentran en Deltares (2011b).

La solución del sistema de ecuaciones ha sido estudiada en detalle por varios autores (Roelvink y Van Banning, 1994; Gerritsen et al., 2007; Deltares, 2011a). El modelo hidrodinámico para el golfo de Urabá fue calibrado y validado a partir de mediciones de corrientes realizadas en diferentes épocas climáticas con una amplia cobertura espacial (Escobar, 2011 y Escobar et al., En revisión) siguiendo el método de evaluación de Sutherland et al. (2003) según el cual el modelo logró

un desempeño bueno tanto en la solución de la magnitud como de la dirección de las corrientes.

Las mediciones y el modelo hidrodinámico señalan que en el golfo de Uraba se presenta una circulación estuarina. Durante los periodos de calma, el chorro de descarga del río Atrato viaja en capas superficiales y en la época seca la presencia de los vientos alisios modifica el patrón redireccionado la pluma. Detalles de la evaluación del modelo y de los patrones de circulación en diferentes épocas climáticas se encuentran en Escobar (2011), Escobar et al., 2011 y Escobar et al. En revisión.

La circulación estuarina que ocurre en el golfo es un primer indicativo de que los sedimentos en suspensión permanecerán en las capas superficiales (menos saladas) y serán transportados por las corrientes de los ríos hasta zonas alejadas del delta. Por su parte, en condiciones de viento y oleaje fuertes se espera que el cambio en las corrientes y el efecto de ambos forzadores en zonas de aguas someras incrementen los esfuerzos de fondo y los procesos de resuspensión modificando las concentraciones de sedimentos en el golfo.

3.3 TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN

El módulo de transporte de sedimentos tiene en cuenta el transporte de fondo y en suspensión de partículas cohesivas y no cohesivas. El transporte en suspensión se calcula por medio de la ecuación tridimensional de advección-difusión:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s)c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{s,z} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (5)$$

dónde c es la concentración de sedimentos en suspensión; w_s es la velocidad de sedimentación de las partículas; u , v y w son las componentes de la velocidad en las direcciones x , y y z respectivamente; $\varepsilon_{s,x}$, $\varepsilon_{s,y}$ y $\varepsilon_{s,z}$ son las difusividades de remolino en las tres dimensiones.

El primer término de la ecuación 5 hace referencia al cambio local en la concentración, los siguientes tres corresponden a la porción de concentración como respuesta a la advección y los términos restantes son aquellos referentes a la difusión o procesos turbulentos.

Los cálculos de las concentraciones en suspensión dependen además de la interacción flujo-fondo y de la velocidad de asentamiento de las partículas; para representar ambos procesos hay planteamientos diferentes según los sedimentos sean o no cohesivos.

3.4 SEDIMENTOS COHESIVOS

En agua salada los sedimentos cohesivos tienden a formar flóculos que son más grandes que las partículas individuales, lo que hace que se depositen a una tasa más rápida. El modelo tiene en cuenta este fenómeno y calcula la velocidad de asentamiento de los sedimentos finos por medio de las ecuaciones 6 y 7,

$$w_{s,0} = \frac{w_{s,max}}{2} \left(1 - \cos \frac{\pi S}{S_{max}}\right) + \frac{w_{s,f}}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi S}{S_{max}}\right) \quad \text{Si } S \leq \text{Salinidad máxima} \quad (6)$$

$$w_{s,0} = w_{s,max} \quad \text{Si } S > \text{Salinidad máxima} \quad (7)$$

Dónde $w_{s,0}$ es la velocidad de asentamiento de los sedimentos cohesivos, $w_{s,max}$ es la velocidad de asentamiento de los sedimentos cohesivos cuando la salinidad es máxima, $w_{s,f}$ es la velocidad de asentamiento de los sedimentos cohesivos cuando la salinidad es cero, S es la salinidad, S_{max} es la salinidad máxima (35 ppt) y $w_{s,max}$ y $w_{s,f}$ son parámetros de calibración que controlan en gran medida la permanencia de los sedimentos en suspensión. Por su parte, S_{max} corresponde al valor de la salinidad máxima esperada en el área de estudio. La floculación inducida por la turbulencia y el rompimiento de los flóculos, son procesos que no han sido implementados dentro del modelo.

Además de tener en cuenta el fenómeno de la floculación, el modelo supone que el coeficiente de mezcla vertical de los sedimentos finos es igual al coeficiente de mezcla vertical del fluido, esto con el fin de determinar la dispersión de los sedimentos en la tercera dimensión.

Los flujos de sedimentos cohesivos entre la interface agua-fondo son calculados mediante las formulaciones de Partherniades (1965) que se presentan en las ecuaciones 8, 9 y 10. En ellas se calculan flujos erosionales (E) o depositacionales (D) que se aplican a las celdas del fondo y que a su vez generan la respuesta de ganancia o pérdida de sedimentos en el lecho.

$$E = M S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}) \quad (8)$$

$$D = w_s c_b S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}) \quad (9)$$

$$c_b = c \left(z = \frac{\Delta z_b}{2}, t \right) \quad (10)$$

Dónde E es el flujo erosional [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$], M es la tasa de erosión [$\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$] y $S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e})$ es la función de erosión que se define según las ecuaciones 11 y 12. D es la Sedimentación, w_s es la velocidad de asentamiento, τ_{cw} es el esfuerzo cortante máximo debido a las corrientes y el oleaje, $\tau_{cr,e}$ es el esfuerzo cortante crítico de erosión, $\tau_{cr,d}$ es el esfuerzo cortante crítico de asentamiento, c_b es la concentración de sedimentos promedio en la capa de fondo y $S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d})$ es la función de asentamiento definida según las ecuaciones 13 y 14.

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}) = \frac{\tau_{cw}}{\tau_{cr,e}} - 1 \quad \text{si } \tau_{cw} > \tau_{cr,e} \quad (11)$$

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}) = 0 \quad \text{si } \tau_{cw} \leq \tau_{cr,e} \quad (12)$$

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}) = 1 - \frac{\tau_{cw}}{\tau_{cr,d}} \quad \text{si } \tau_{cw} < \tau_{cr,d} \quad (13)$$

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}) = 0 \quad \text{si } \tau_{cw} \geq \tau_{cr,d} \quad (14)$$

3.5 SEDIMENTOS NO COHESIVOS

Las características físicas y químicas de los sedimentos gruesos generan en ellos respuestas diferentes a los cohesivos, esto hace necesario el uso de otros planteamientos para el cálculo de las variables requeridas para la solución del modelo, como la velocidad de asentamiento, el coeficiente de mezcla vertical de los sedimentos y la interacción flujo – fondo.

La velocidad de asentamiento de las partículas grueso-granulares depende del diámetro de las mismas y se calcula según la formulación de Van Rijn (1993), que incluye las ecuaciones 15, 16 y 17, dónde s es la densidad relativa de los sedimentos, D_s es el diámetro de los sedimentos (d_{50}), ν es el coeficiente de viscosidad cinemática del agua.

$$w_{s,0} = \frac{(s-1)gD_s^2}{18\nu} \quad \text{si } 65 \mu m < D_s \leq 100 \mu m \quad (15)$$

$$w_{s,0} = \frac{10\nu}{D_s} \left[\left(1 + \frac{0.01(s-1)gD_s^3}{\nu^2} \right)^{0.5} - 1 \right] \quad \text{si } 100 \mu m < D_s \leq 1000 \mu m \quad (16)$$

$$w_{s,0} = 1.1[(s-1)gD_s]^{0.5} \quad \text{si } D_s > 1000 \mu m \quad (17)$$

Por su parte, el coeficiente de mezcla vertical de los sedimentos gruesos se calcula por medio de la ecuación 18 definida a partir del coeficiente de mezcla vertical del fluido obtenido del modelo de cierre de turbulencia K- ε :

$$\varepsilon_s = \beta_{eff} \varepsilon_f \quad (18)$$

Dónde ε_s es el coeficiente de mezcla vertical de los sedimentos y β_{eff} es el factor “beta” de Van Rijn, que depende de los cortantes de fondo debidos a la corrientes (τ_c) y al oleaje (τ_w), del cortante de fondo local debido a las corrientes ($u_{*,c}$), de la

velocidad de asentamiento de los sedimentos (w_s) y del coeficiente de mezcla vertical del flujo calculado por el modelo de cierre de turbulencia K- ε (ε_f).

$$\beta_{eff} = 1 + (\beta - 1) \frac{\tau_c}{\tau_w + \tau_c} \quad (19)$$

$$\beta = 1 + 2 \left(\frac{w_s}{u_{*c}} \right)^2 \quad (20)$$

En la ecuación 19, β es variable en el tiempo y el espacio pero no en profundidad. Debido al conocimiento limitado de los procesos físicos envueltos en estos fenómenos, el modelo restringe el valor de β entre 1 y 1.5.

En cuanto a la interacción flujo-fondo, el modelo implementa el planteamiento de Van Rijn (1993), el cual distingue entre la carga de sedimentos de fondo y la carga en suspensión, las cuales ocurren por debajo o por encima respectivamente de una altura de referencia a . Los sedimentos son llevados a la columna de agua imponiendo en la altura de referencia a una concentración de referencia c_a que se calcula a partir la ecuación 21. La formulación utilizada para la obtención de las concentraciones de fondo se presenta gráficamente en la Figura 8.

$$c_a = 0.015 \rho_s \frac{d_{50}(T_a)^{1.5}}{a(D_*)^{0.3}} \quad (21)$$

Dónde c_a es la concentración en la altura de referencia a y D_* es el diámetro adimensional de las partículas calculado por medio de la ecuación 22, T_a es el cortante crítico adimensional del fondo definido por la ecuación 23.

$$D_* = d_{50} \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3} \quad (22)$$

$$T_a = \frac{(\mu_c \rho_w u_*^2 + \mu_w \frac{1}{4} \rho_w f_w (U_\delta)^2) - \tau_{cr}}{\tau_{cr}} \quad (23)$$

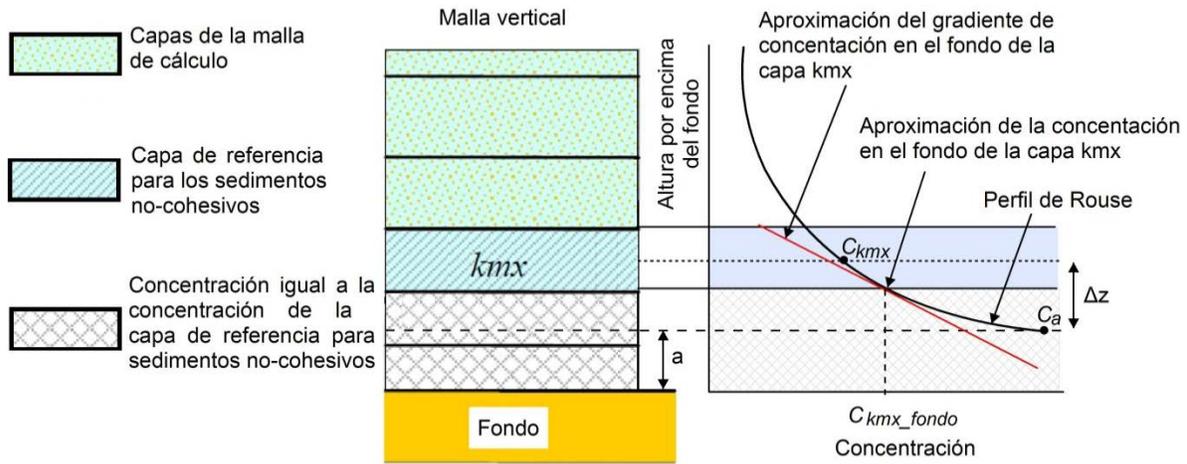


Figura 8. Aproximación de la concentración en el fondo de la capa de referencia según el método de Van Rijn (1993). Modificada de: Deltares (2011a)

μ_c = factor de eficiencia de la corriente

$$\mu_c = \frac{0.24 \left[\log_{10} \left(\frac{12h}{3d_{90}} \right) \right]^{-2}}{0.24 \left[\log_{10} \left(\frac{12h}{k_s} \right) \right]^{-2}} \quad (24)$$

u_*^2 = velocidad de cortante de fondo

μ_w = factor de eficiencia del oleaje

$$\mu_w = \max \left[0.063, \frac{1}{8} \left(1.5 - \frac{H_s}{h} \right)^2 \right] \quad (25)$$

f_w = factor total de fricción relativa al oleaje

$$f_w = \exp \left[-6 + 5.2 \left(\frac{A_\delta}{k_{s,w}} \right)^{-0.19} \right] \quad (26)$$

$k_{s,w}$ = rugosidad relativa al oleaje cuyo valor debe estar entre 0,01 y 0,1 m

$$\tau_{cr} = (\rho_s - \rho_w) g d_{50} \theta_{cr} \quad (27)$$

θ_{cr} es el parámetro límite calculado de acuerdo a la curva de Shields como función del diámetro adimensional de las partículas D_* , a es la altura de referencia de Van Rijn obtenida a partir del perfil de Rouse. En esta altura se impone la concentración de referencia c_a , A_δ es el movimiento máximo orbital en el fondo y U_δ es la velocidad orbital pico en el fondo obtenida del módulo de oleaje

Una vez conocida la concentración de referencia c_a , es posible calcular la concentración en el fondo de la capa de referencia (nombrada kmx) mediante la ecuación 28 y su respectivo gradiente mediante la ecuación 29. Estas ecuaciones llevan a la determinación de los términos fuente y sumidero que generan la erosión o sedimentación en el fondo.

$$c = c_a \left[\frac{a(h-z)}{z(h-a)} \right]^A \quad (28)$$

Dónde c es concentración de sedimentos, h la profundidad del agua, z la elevación por encima del fondo, A el Numero de Rouse que se obtiene a partir del gradiente de concentración del perfil de Rouse dado por la ecuación 29:

$$\frac{\partial c}{\partial z} = A c_a \left[\frac{a(h-z)}{z(h-a)} \right]^{A-1} \cdot \left(\frac{-ah}{z^2(h-a)} \right) \quad (29)$$

Las ecuaciones 28 y 29 aplicadas para obtener la concentración en el fondo de la capa kmx se transforman en la 30 y 31 respectivamente, dependientes de los factores α_1 y α_2 , los cuales aparecen luego de expresarlas en términos de la concentración en la capa de referencia.

$$c_{kmx_fondo} = \alpha_1 c_{kmx} \quad (30)$$

$$\frac{\partial c}{\partial z(kmx_fondo)} = \alpha_2 \left(\frac{c_{kmx} - c_a}{\Delta z} \right) \quad (31)$$

Finalmente, los flujos erosivos y depositaciones que afectan el fondo de la capa kmx se calculan teniendo en cuenta la difusión vertical y la velocidad de

asentamiento, mediante las ecuaciones 32 y 33, llegando a los términos fuente y sumidero que modifican el transporte de fondo en cada intervalo temporal de cálculo.

$$E = \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} = \varepsilon_s \alpha_2 \left(\frac{c_a - c_{kmx}}{\Delta z} \right) \quad (32)$$

$$D = w_s c_{kmx_fondo} = w_s \alpha_1 c_{kmx} \quad (33)$$

$$Fuente = \frac{\varepsilon_s \alpha_2 c_a}{\Delta z} \quad (34)$$

$$Sumidero = \frac{\varepsilon_s \alpha_2 c_{kmx}}{\Delta z} + w_s \alpha_1 c_{kmx} \quad (35)$$

3.6 DOMINIO DE CÁLCULO

El área de estudio se discretizó en una malla curvilínea compuesta por 21961 celdas en el plano horizontal. La resolución de la grilla (raíz cuadrada del área de una celda) varía entre 37,50 m en el delta del río Atrato y 1196 m en la zona norte. Su contorno sigue la línea de costa del golfo trazada en el 2009 dentro del proyecto “Expedición Antioquia 2013”.

La malla vertical utilizada es del tipo σ y cuenta con un total de 20 capas de espesores variables; las primeras cinco adoptan el espesor correspondiente al 2.5% de la profundidad total de la columna de agua, las siguientes diez el 5% y las últimas cinco el 7.5% (Tabla 4). Esta distribución se hizo con base en mediciones de CTD, realizadas en la primera fase del proyecto de investigación, donde se registraron termoclinas y haloclinas marcadas en los primeros metros de profundidad.

El número definitivo de celdas y de capas se definió a partir de los resultados del análisis de sensibilidad (véase sección 6.1). En la Figura 9 se presenta la malla en el plano x-y y una vista transversal en el estrechamiento del golfo.

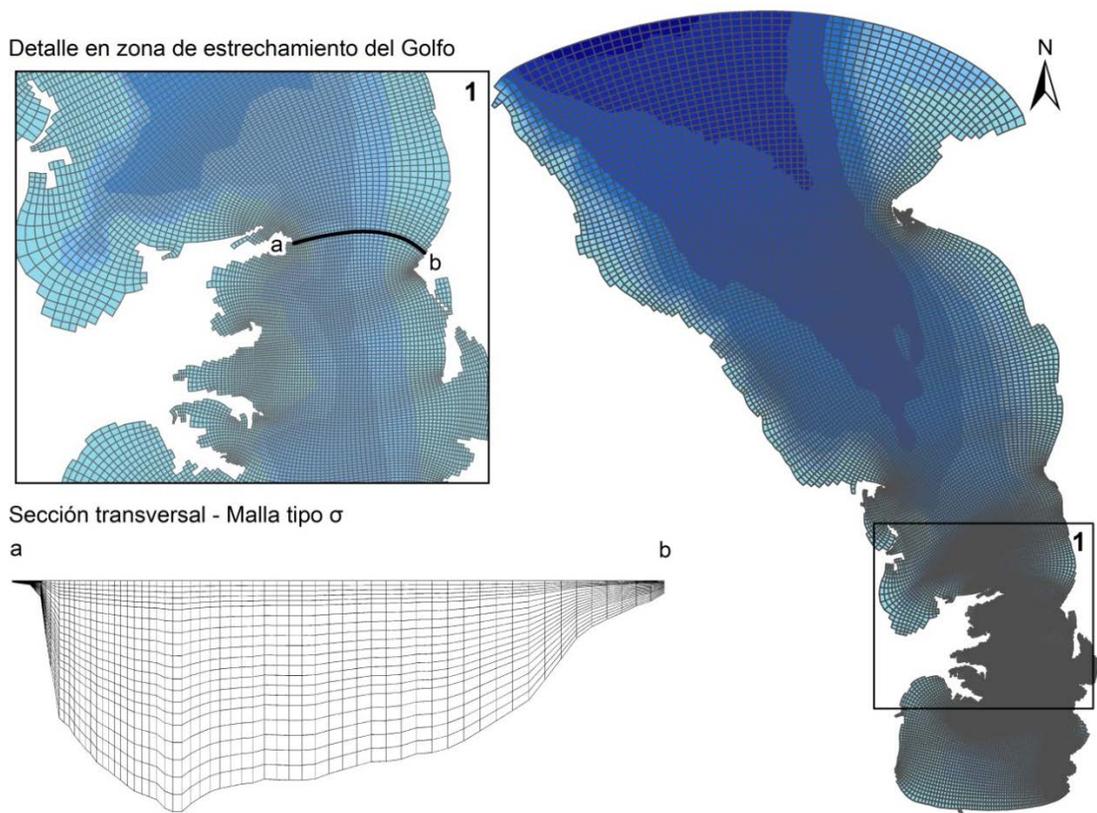


Figura 9. Malla de cálculo.

Tabla 4. Distribución de las capas en profundidad

Capas	Espesor de la capa relativo a la profundidad (%)
1 a 5	2,5
6 a 15	5,0
16 a 20	7,5

4. FUENTES DE INFORMACIÓN

Las condiciones iniciales y de frontera del modelo matemático se obtuvieron de diferentes fuentes de información tales como, modelos de cobertura global, bases de datos, publicaciones y campañas de medición. A continuación se presenta una descripción de la información obtenida según su tipo, se omiten las salidas de campo ya que éstas se explican en detalle en el capítulo 5.

4.1 MORFOLÓGICA

La información morfológica requerida para la modelación matemática consta de la línea de costa que permite delimitar el dominio de cálculo en el plano x-y y de la batimetría que constituye una de las fronteras físicas del modelo y a su vez, restringe la cobertura del mismo en profundidad.

La línea de costa utilizada fue trazada dentro del proyecto Expedición Antioquia 2013 a partir de fotografías aéreas con una resolución de 30 cm tomadas por la empresa Aeroestudios S.A. en el año 2009. La línea de costa se trazó con respecto al criterio de vegetación estable y tiene una longitud total de 727 km, cubriendo desde Cabo Tiburón (Esquina noroccidental del Golfo) hasta el municipio de Arboletes.

La batimetría base proviene de la carta náutica No. 412 editada en el año 2009 por el CIOH. Dicha información fue actualizada en el 2011 a partir de los datos batimétricos adquiridos por la Universidad EAFIT en una campaña de campo en la que se recorrieron aproximadamente 900 km de líneas batimétricas (Detalles en la sección 5.2.3). En la Figura 10 se observa el modelo 3D de la batimetría para el dominio de cálculo.

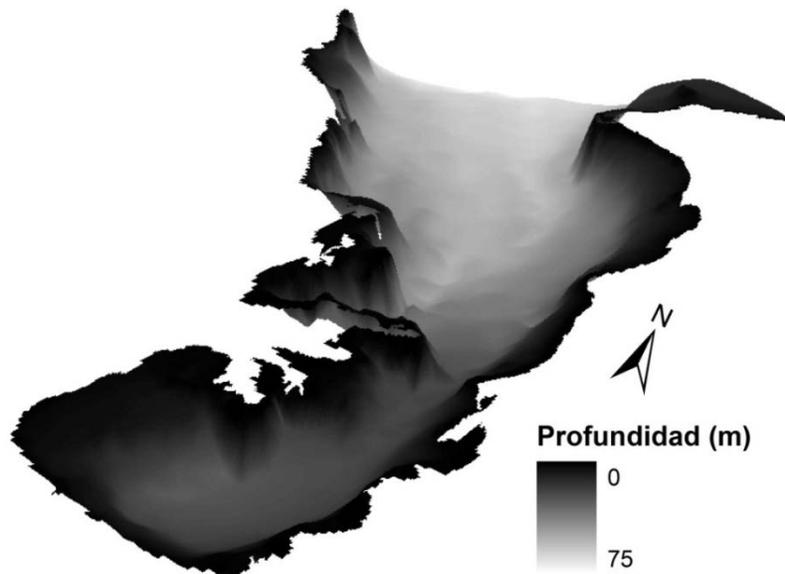


Figura 10. Batimetría 3D del golfo de Urabá

4.2 CLIMATOLÓGICA

Las variables climáticas requeridas para la solución de los diferentes módulos son: viento a 10 m sobre la superficie, presión, temperatura, humedad relativa, radiación de onda corta y cobertura de nubes. Los datos de cada una de ellas se obtuvieron de cuatro fuentes de información que difieren en su cobertura espacial y temporal: (1) NCEP/NCAR Reanalysis Project (Kalnay et al., 1996), (2) NARR Project (Mesinger et al., 2006), (3) Estación climática Los Cedros ubicada al sur del golfo en el municipio de Carepa y (4) Estación climática de la Universidad EAFIT instalada durante la campaña de medición del 2011 en punta Las Vacas, Municipio de Turbo.

De estas fuentes de información se le dio prioridad a las estaciones climáticas. Los datos del NCAR y NARR se usaron para completar la información faltante de las estaciones climáticas, a pesar de esto, los resultados utilizados del último modelo se restringieron a la temperatura y humedad relativa, variables que fueron comparadas con mediciones en el área de estudio y que demostraron tener

aplicabilidad en la misma (Escobar et al., 2011). En la Tabla 5 se presenta un resumen de la cobertura y las variables extraídas de cada fuente. Por su parte, en la Figura 11 se muestra la ubicación espacial de los puntos de control de los proyectos de Reanalysis y las estaciones climáticas.

Cabe anotar que durante las fases de calibración y validación del modelo, los datos de viento y presión fueron considerados variables en espacio y tiempo, para lo cual se utilizó una malla a partir de la que se realizó interpolación lineal para la generación de los campos respectivos; metodología que permitió trasladar la información de estaciones y modelos al dominio de cálculo.

Tabla 5. Características de las fuentes de información climática

Fuente	Cobertura espacial	Cobertura temporal	Variables utilizadas
NCEP/NCAR	Mallas globales	Cada 6 horas desde 1948	Viento Presión Radiación de onda corta
NARR	Malla en Norte América y el Caribe	Cada 3 horas desde 1979	Temperatura Humedad relativa
Los cedros	Puntual – Carepa	Diurna, horaria. A partir del 2009	Viento Temperatura Humedad relativa
Estación EAFIT	Puntual – Punta Las Vacas	Horaria desde el 18 de Noviembre hasta el 3 de Diciembre de 2011	Viento Presión Temperatura Humedad relativa

4.3 HIDROLÓGICA

El modelo matemático está influenciado por la descarga de 22 tributarios menores y del río Atrato (véase Figura 11). Los caudales de los afluentes menores que descargan sus aguas en el golfo (Tabla 6) se obtuvieron con la herramienta HydroSIG (Velez et al., 2000) y por medio de balances hidrológicos de largo plazo calculados en la primera fase del proyecto Erosión costera en Antioquia. Se

utilizaron además, para los ríos Currulao y Guadualito, los caudales presentados por Roldán (2008) obtenidos a partir de registros en estaciones de aforo.

El caudal del río Atrato se obtuvo de aforos realizados en las bocas principales durante los años 2010 y 2011. En la medida de lo posible, los aforos se hicieron durante marea descendente y cubriendo las dos temporadas climáticas características de la región. Detalles de los lugares de aforo, metodología y resultados se encuentran en el capítulo 5.

Tabla 6. Caudales de tributarios menores

No.	Río	Caudal (m ³ /s)	No.	Río	Caudal (m ³ /s)
1	Acandí	8.69	12	Turbo	5.92
2	Tolo	8.69	13	Cope	0.31
3	Titumate	0.8	14	Pta de Piedra	0.36
4	Caño Arastradero	0.52	15	Cirilo	0.06
5	Suriquí	7.12	16	Caimán nuevo	3.43
6	León	75	17	El Totumo	0.39
7	Caño El viejo	1.82	18	Caimán viejo	2.36
8	Currulao	9.24	19	Qda el Carlo	0.3
9	Guadualito	3.17	20	Bobal	2.33
10	Qda Guadualito	0.96	21	Qda Emili	0.17
11	Canal casanova	0.96	22	Necoclí	0.36

Nota: Los números asignados a cada afluente permiten ubicar su desembocadura en la Figura 11

4.4 SALINIDAD Y TEMPERATURA

Perfiles de salinidad y temperatura fueron obtenidos al norte del golfo (véase Figura 11) durante diferentes campañas de medición. Esto con el fin de determinar las condiciones de frontera referentes a la variación espacial de la salinidad y temperatura en la zona norte del dominio de cálculo. En los afluentes, la salinidad es considerada 0, mientras la temperatura en los mismos varía según los mapas de temperatura del agua presentados por (García, 2007).

4.5 OLEAJE Y MAREA

Los datos de oleaje y marea se obtuvieron del WAVEWATCH III ® (Tolman, 1997) y del Tide Model Driver (TMD) (Padman y Erofeeva, 2005) respectivamente. Los forzamientos oceanográficos se imponen en la frontera norte del modelo a partir de los siguientes parámetros: altura significativa, periodo al pico y dirección del oleaje. La marea se ingresa como serie de niveles generada a partir de las 13 componentes que ofrece el TMD, de las cuales se presenta su amplitud y fase para el norte del golfo de Urabá en la Tabla 7. Los puntos de generación del oleaje y la marea al norte del golfo se observan en la Figura 11.

Tabla 7. Componentes de marea para el norte del golfo de Urabá extraídas del TMD

Componente	Amplitud (m)	Fase (°)
M2	0.0692	151.94
S2	0.0167	11.24
N2	0.0254	121.05
K2	0.0052	359.01
K1	0.0935	239.33
O1	0.0575	240.17
P1	0.029	244.3
Q1	0.0082	235.86
MF	0.0168	356.52
MM	0.0081	353.33
M4	0.0019	151.68
MS4	0.005	340.23
MN4	0.0018	193.1

4.6 SEDIMENTOS

La información de sedimentos de fondo fue obtenida principalmente de García (2007). En la Figura 11 se presenta el mapa de porcentaje de arenas interpolado a partir de los datos presentados en dicha publicación. Es clara la predominancia de sedimentos finos en aproximadamente el 80% del dominio de cálculo, en especial en aguas profundas. El porcentaje de arenas aumenta con la cercanía a

la línea de costa, adquiriendo los mayores valores al norte del golfo, sobre su costado noroeste y punta Caribaná.

Ante la escasa información referente a las propiedades de los sedimentos presentes en el golfo, se utilizaron dos tipos de sedimentos: (1) arenas con un d_{50} de 150 μm y (2) finos con tamaños inferiores a 63 μm . Variables dependientes de las propiedades de los sedimentos debieron ser asumidas para completar los datos de entrada del modelo. En la Tabla 8 se presentan los valores utilizados, entre ellos, algunos sugeridos por Deltares (2011a).

El tamaño medio de los sedimentos gruesos se obtuvo de una ponderación de los tamaños presentados por García (2007) y solo se utilizó un tamaño debido a restricciones internas de la plataforma de modelación. La densidad específica de las arenas se asumió igual a la del cuarzo, mientras la de los sedimentos finos 30% menor, aun así, la densidad seca del fondo corresponde para ambos tipos de suelo a 1600 kg/m^3 equivalente a una porosidad aproximada del 40% para las partículas gruesas y cercana al 10% para las finas. Estos valores no fueron sometidos a sensibilidad y deberán considerarse en futuros estudios.

Tabla 8. Tamaño y parámetros característicos asumidos para los sedimentos del golfo

Variable	Sedimentos finos	Sedimentos gruesos
d_{50} (μm)	< 63	150
Densidad específica (kg/m^3)	1800	2650
Densidad seca de fondo (kg/m^3)	1600	1600
Densidad de referencia para asentamiento en medio real (kg/m^3)	1600	1600

Las concentraciones de los dos tipos de sedimentos en las desembocaduras de los ríos se calcularon mediante una correlación entre mediciones de concentración de sedimentos suspendidos en superficie y la reflectancia de la banda 1 de imágenes satelitales MODIS. Los detalles de la metodología empleada y los respectivos resultados se encuentran en Velásquez (2011).

Finalmente, dada la falta de información referente a la distribución de arenas y finos en la descarga de los ríos, se asumió que en cada uno de ellos, los sedimentos no-cohesivos representan el 3% de la carga sólida. Éste valor fue sometido a evaluación durante la calibración, encontrándose que la predicción de las concentraciones desmejoraba cerca al delta del Atrato y al río León (zonas de especial importancia) al incrementar este porcentaje a 10% y 20%. Aun así, es importante que esta variable se reconsidere en trabajos futuros, haciéndose necesario que los muestreos de aguas en las desembocaduras de los ríos incluyan análisis de tamaños de grano.

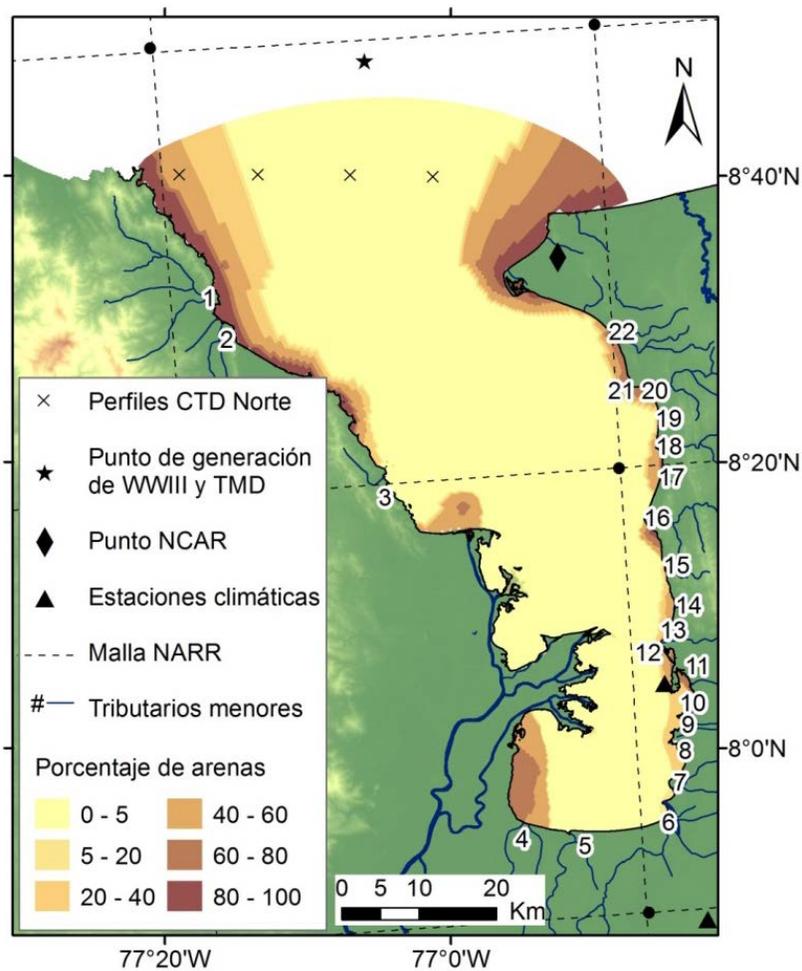


Figura 11. Ubicación de fuentes de información, tributarios menores y distribución del porcentaje de arenas

5. MEDICIONES EN CAMPO

En este capítulo se describen las estrategias y las campañas de medición que se llevaron a cabo para obtener la información necesaria para la evaluación del modelo de transporte de sedimentos y para la determinación de las condiciones de frontera del mismo. Las mediciones realizadas incluyeron datos de concentración de sedimentos, turbidez, caudales, profundidad, salinidad y temperatura.

5.1 EQUIPOS DE MEDICIÓN

5.1.1 Batimetría, caudales, salinidad y temperatura

Con el fin de actualizar los datos de la carta náutica No. 412 de 2009 y de registrar posibles variaciones en las profundidades del golfo, se recorrieron líneas a lo largo y ancho del área de estudio utilizando una ecosonda Knudsen 320BP junto con un transductor mono haz de doble frecuencia (200/28 KHz).

Los caudales de los ríos Atrato y León fueron medidos con *Acoustic Doppler Current Profiler* ADCP referencia WorkHorse Sentinel de 600 kHz. Este equipo midió las corrientes en bins de 50 cm de profundidad generando datos cada 15 s. El acople de sensores de balanceo, cabeceo y detección de fondo permitió corregir las mediciones de este equipo con respecto a los movimientos de la embarcación.

Los cambios en salinidad y temperatura en el golfo se midieron con un CTD SBE 19 plus V2, equipo que registra ambas variables a diferentes profundidades (hasta 600 m) con una frecuencia de 4 Hz.

5.1.2 Concentración de sedimentos

Wren et al. (2000) hicieron un recuento de las metodologías empleadas para medir la concentración de sedimentos en campo. Entre ellas, se encuentra una de las usadas en el presente estudio: el muestreo mecánico, cuyo uso es común y sus resultados confiables. El muestreo mecánico consiste en la toma de muestras de agua instantáneas que posteriormente son procesadas en laboratorio. En el golfo de Urabá se realizó con una botella Niskin con capacidad de 1,2 litros (Figura 12).

Las muestras de agua se llevan al laboratorio y las concentraciones de sedimentos se determinan por medio de filtración. En este proceso se mide el volumen de agua y el peso de los sedimentos contenidos en la muestra lo que lleva a la determinación directa de la concentración. La filtración de las muestras tomadas en el área de estudio se hizo siguiendo la norma estándar 2540 (American Public Health Association et al., 1998) con papeles de filtro de fibra de vidrio marca GC50 cuyo tamaño de poro es de 0,5 μm .



Figura 12. Equipos de medición. Transductor de ecosonda (izq.) y Botella Niskin y CTD (der.)

Por otra parte, se hicieron mediciones de turbidez con un Turbidímetro marca WPA modelo TU140 perteneciente al Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Este equipo mide la intensidad de la luz dispersada a 90° cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua. Los datos de turbidez fueron tomados simultáneamente con muestras de agua con

el fin de obtener una curva de calibraron entre turbidez y concentración de sedimentos para el golfo de Urabá

5.2 ESTRATEGIAS DE MEDICIÓN

Las campañas de medición se planearon con el fin de tener una adecuada cobertura espacial y temporal dentro del golfo y el en delta del Atrato. La cobertura espacial de las mediciones tuvo en cuenta cuatro áreas del golfo: (1) La zona Norte a partir de boca Tarena, (2) La zona centro donde ocurre el estrechamiento del golfo entre las bocas Tarena y Leoncito, (3) La zona Sur o Bahía Colombia y (4) El delta del Atrato con sus siete bocas principales (Figura 13).

Para cada variable a medir se diseñaron esquemas de monitoreo teniendo en cuenta los equipos, la embarcación, las condiciones climáticas y el personal disponible. En la Figura 13 se muestran los diferentes esquemas planeados, como se verá en las siguientes secciones, estos no se cubrieron exactamente debido a condiciones climáticas adversas, daños en los equipos e imprevistos ocurridos durante la ejecución de las campañas.

La batimetría se planeó a lo largo de transectos longitudinales equidistantes. La descarga líquida y sólida del río Atrato se pretendió medir en las siete bocas principales, con el fin de determinar el porcentaje de descarga de cada una de ellas.

El monitoreo de la salinidad, temperatura, turbidez y concentración de sedimentos se realizó siguiendo el esquema espacial planteado por Montoya (2010), el cual aparece en la Figura 13 como puntos negros y que cubre zonas de aguas profundas. En la misma figura se presentan con cruces rojas la distribución de estaciones en zonas de aguas someras y cercanas al delta del Atrato ideadas dentro de este estudio, con el fin de complementar la cobertura espacial del

muestreo de sedimentos en suspensión y de muestrear las zonas que fueron críticas en la fase de análisis de sensibilidad del modelo.

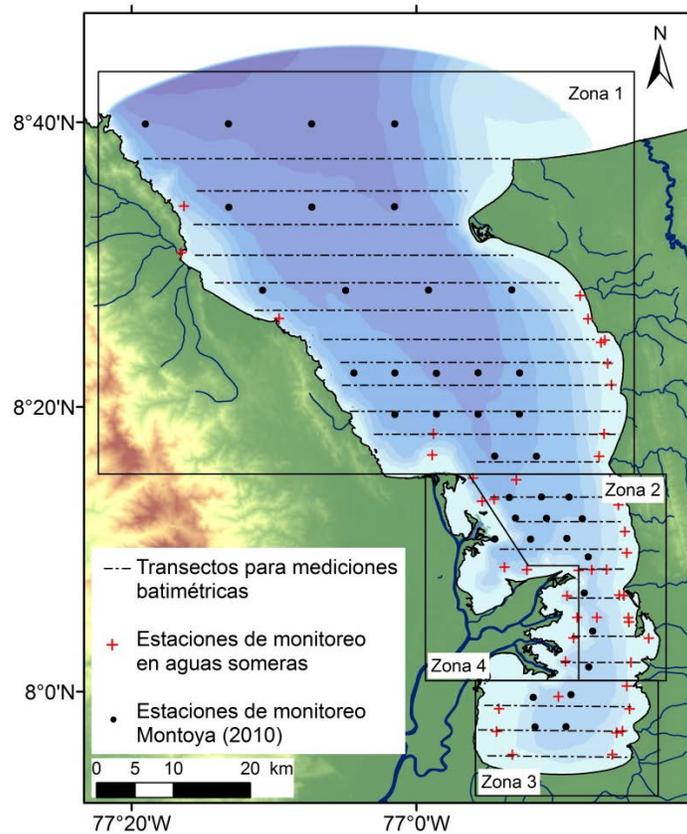


Figura 13. Estrategias de medición

Para las campañas de medición se utilizaron dos tipos de embarcaciones, el buque oceanográfico ARC Malpelo con un calado medio de 4,4 m y un bote de pasajeros de bajo calado que se adecuó para las maniobras de medición y que facilitó el acceso al delta del Atrato y a las zonas de aguas someras en ambos costados del golfo.

En cuanto a la cobertura temporal de las mediciones, con la finalidad de cubrir las épocas climáticas entre los años 2010 y 2011, se planearon un total de tres campañas de medición realizadas en Abril de 2010, Noviembre de 2010 y

Noviembre-Diciembre de 2011, cada una de ellas en la época seca, húmeda y el periodo transición respectivamente.

5.2.1 Campaña de medición 1

Esta campaña se realizó entre el 6 y el 16 de abril de 2010 y en ella se tuvieron dos frentes de trabajo. El primero consistió en personal del CIOH a bordo del ARC Malpelo que obtuvo mediciones de turbidez de agua superficial; el segundo frente de trabajo estuvo conformado por personal de la Universidad EAFIT y obtuvo aforos líquidos y sólidos en las bocas del Atrato. En la Figura 14 se muestran los puntos muestreados por ambos grupos de trabajo.

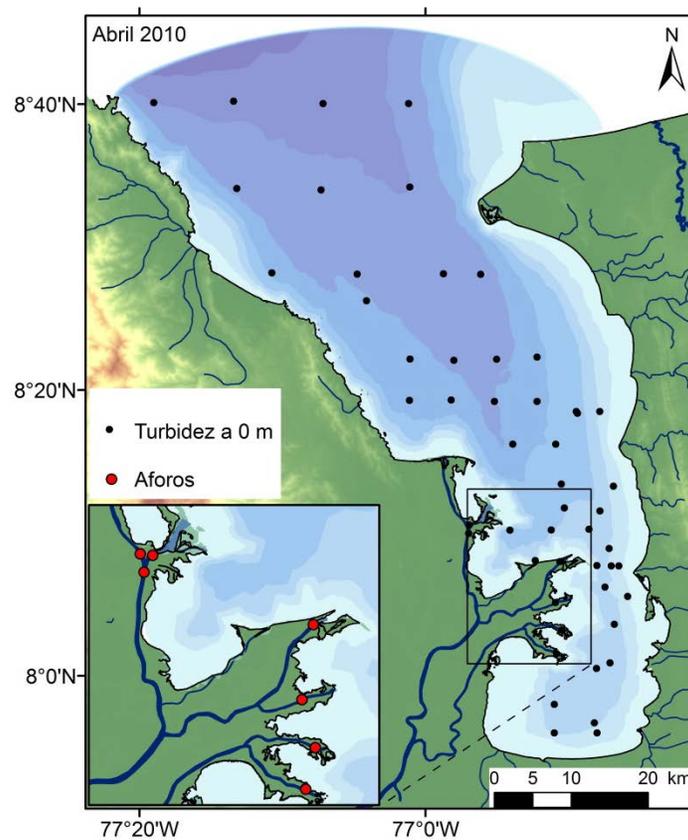


Figura 14. Lugares de medición en campaña de Abril 2010

Los caudales y las concentraciones de sedimentos medidas en las bocas principales del Atrato a las que se tuvo acceso se presentan en la Tabla 9, en la que se identifica el Roto como la boca de mayor aporte en el momento del aforo con aprox. 69% del total de la descarga del río, seguido por la boca Leoncito y Matuntugo. La mayor concentración de sedimentos se midió en el Leoncito.

Tabla 9. Caudales y concentración de sedimentos en las bocas del Atrato en Abril 2010

Boca	Caudal (m ³ /s)	Concentración (mg/l)
Tarena	16,41	-
Roto	2849,15	75,11
Pavas	15,65	105,87
Matuntugo	484,12	66,93
Coco Grande	137,8	57,97
Urabá	7,41	45,86
Leoncito	627,87	106,07
TOTAL	4138,41	

5.2.2 Campaña de medición 2

Realizada entre el 6 y el 11 de noviembre de 2010 por personal del CIOH y EAFIT, en esta campaña se hizo muestreo por estaciones y aforos líquidos y sólidos en las bocas del río Atrato. En los puntos que se muestran en la Figura 15 se midieron perfiles con CTD y se tomaron muestras de agua a 0, 3, 5 y 10 m de profundidad. De manera simultánea se midió la turbidez a las mismas profundidades.

A partir de los datos medidos en esta campaña, se generó una correlación lineal entre turbidez y concentración de sedimentos (Figura 16 izquierda) con un coeficiente de determinación (r^2) del 77%. Esta relación permitió convertir los valores de turbidez medidos en la primera campaña (abril de 2010) a concentración, variable requerida para los procesos de calibración y validación del modelo matemático.

Respecto a esta correlación cabe hacer la salvedad que al eliminar tres puntos de los cuales se sospecha no simultaneidad de muestreo a las afueras de la boca Matuntugo, el coeficiente de determinación (r^2) llega al 94% (Figura 16 derecha).

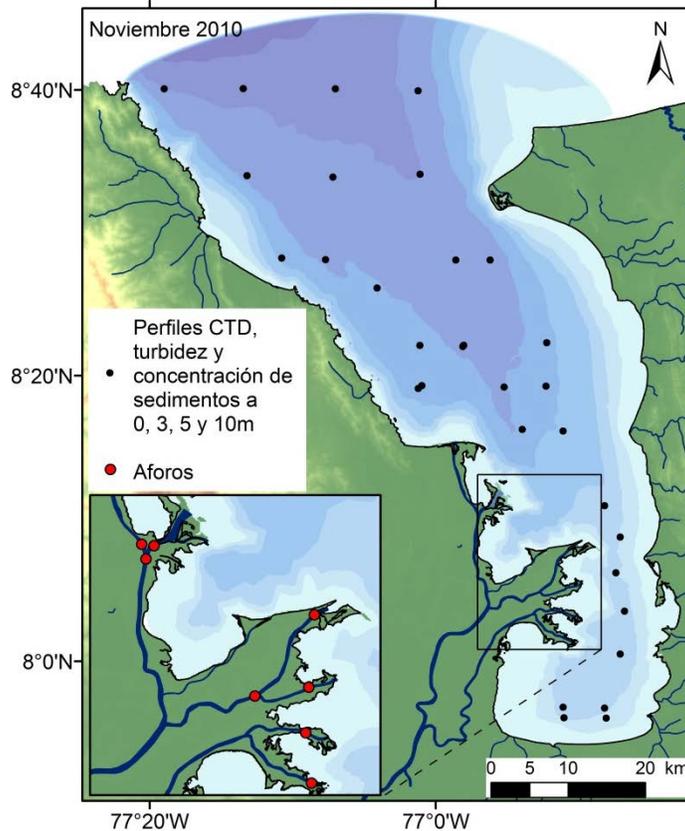


Figura 15. Lugares de medición en campaña de Noviembre 2010.

Para esta segunda campaña se volvió a tener el mayor caudal en la Boca el Roto, seguida nuevamente por Leoncito y Matuntugo (Tabla 10). Las concentraciones más bajas (cero) se obtuvieron para las estaciones ubicadas en la zona norte del golfo. Los datos de concentración de sedimentos en suspensión en el delta del Atrato presentaron problemas relacionados con el proceso de filtración en laboratorio y debieron descartarse.

Los problemas mencionados fueron el rompimiento de papeles de filtro por exceso de vacío generado por la bomba y colmatación de los filtros, referente a los

mismos se recomienda hacer ensayos preliminares de resistencia al vacío de los filtros para evitar su rompimiento con muestras y la utilización de varios filtros para muestras de agua con alto contenido de sedimentos.

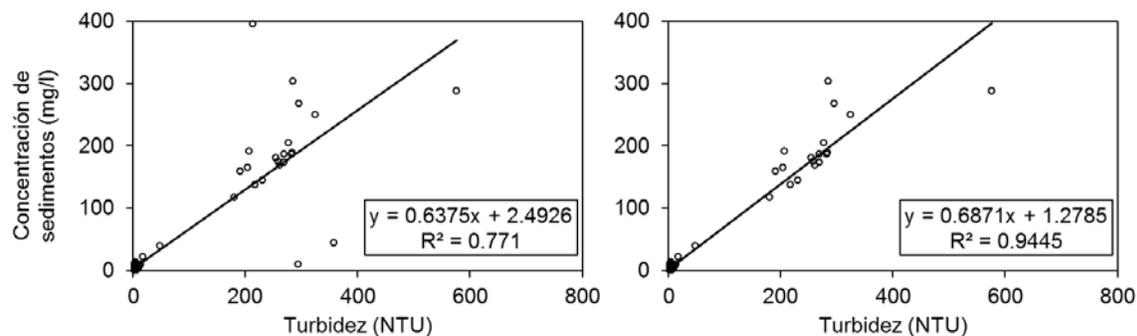


Figura 16. Correlación entre concentración de sedimentos y turbidez. Correlación utilizando todos los puntos muestreados (izquierda) y correlación eliminando tres puntos de los que se sospecha no simultaneidad de muestreo (derecha)

Tabla 10. Caudales en las bocas del río Atrato en Noviembre de 2010

Boca	Caudal (m ³ /s)
Tarena	53,1
Roto	2847,82
Pavas	15,65
Matuntugo	547,02
Coco Grande	127,76
Urabá	11,63
Leoncito	859,79
TOTAL	4462,77

5.2.3 Campaña de medición 3

La última salida de campo fue realizada por personal de la Universidad EAFIT desde el 18 de noviembre hasta el 3 de diciembre de 2011. En esta campaña se realizaron mediciones de profundidad a lo largo de 900 km en transectos distribuidos por todo el golfo (Figura 17).

Se tomaron muestras de agua superficial a lo largo de los transectos recorridos en las cercanías a la costa (este y oeste), el delta del Atrato y el río León. En estos dos últimos ríos se realizaron además aforos líquidos y sólidos. Adicionalmente se midieron tres perfiles de CTD en la zona septentrional del golfo, lo más cerca posible (según logística de la campaña), de la frontera del dominio de cálculo del modelo. Los puntos de muestreo se observan en la Figura 17.

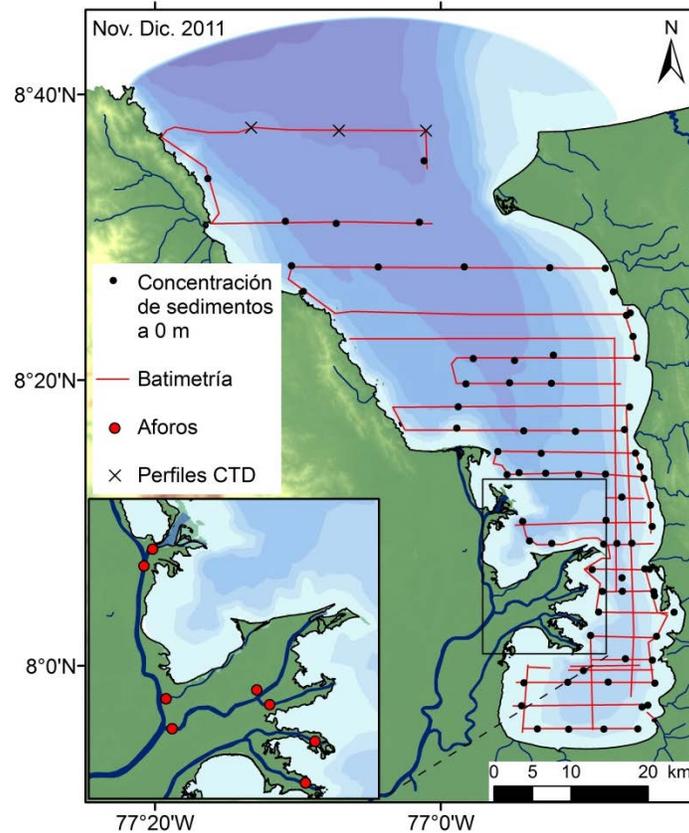


Figura 17. Lugares de medición en campaña de Noviembre - Diciembre 2011.

El resumen de los aforos realizados en esta campaña se muestra en la Tabla 11, donde se observa que al igual que en abril y noviembre de 2010, el Roto fue la boca con la mayor descarga (63% del total), seguida por Leoncito y Matuntugo. El caudal obtenido en el río León fue alto y responde a la temporada de fuertes lluvias que se venía presentando en Noviembre del 2011, época de los mayores

incrementos de caudal del río según el registro en la estación Barranquillita presentado por Roldán (2008).

La concentración de sedimentos más alta para todos los puntos de muestreo de esta campaña se registró en el río León y superó los 300 mg/l, mientras la concentración media en las bocas del Atrato fue de 97 mg/l. Una de las concentraciones más altas del Atrato se midió en Leoncito, boca que junto con el río León descargan en bahía Colombia, zona sometida a continuos dragados por sus altas tasas de sedimentación.

Tabla 11. Caudales y concentración de sedimentos en las bocas del Atrato y el río León en Noviembre 2011

Río	Boca	Caudal (m ³ /s)	Concentración (mg/l)
Atrato	Tarena	34,40	87,38
	Roto	3200,93	64,02
	Pavas	11,07	119,8
	Matuntugo	753,80	85,58
	Coco Grande	228,00	115,84
	Urabá	11,63	-
	Leoncito	776,97	107,95
	TOTAL	5016,80	
León		183,55	319

Finalmente, para esta campaña de medición se instaló una estación climática en el municipio de Turbo, en la zona de la playa en punta Las Vacas. Dicha estación registró datos de temperatura, humedad relativa, viento y presión atmosférica por 15 días. Cabe anotar que este periodo fue el único en el que se contó con una estación climática propia. Para las demás campañas, los datos climatológicos debieron obtenerse de las fuentes de información definidas en la sección 4.2.

5.3 DISCUSIÓN

Los datos tomados en las campañas de medición realizadas representan un avance considerable para la investigación en la región. El despliegue de equipos oceanográficos y personal son el resultado del esfuerzo conjunto de las instituciones participantes en el este estudio. Muestreos en diferentes zonas, algunas de ellas sin precedentes de información (delta del Atrato), hacen parte del aporte al conocimiento del golfo y forman junto con los datos de Chevillot et al. (1993); Correa y Vernet (2004); Bernal Franco et al. (2005); García (2007); Roldán, (2008) y Montoya (2010) entre otros, la base para el planteamiento de futuras campañas de medición a realizarse en la región.

Es importante anotar que las mediciones realizadas estuvieron limitadas por las condiciones climáticas y oceanográficas que se presentaron durante los periodos seleccionados para la toma de datos. A pesar de que se hicieron mediciones en abril con el fin de monitorear la época seca, se sugiere que en estudios futuros se hagan (dentro de lo posible) mediciones en enero y febrero para contar con datos de concentración de sedimentos bajo condiciones de oleaje y vientos característicos de estos meses.

El monitoreo del delta del Atrato constituye un factor fundamental para el entendimiento del transporte de sedimentos y la hidrodinámica en el golfo; datos batimétricos, de variación temporal de descargas del río y cambios morfológicos deberán ser prioridad en futuros estudios oceanográficos que se realicen en el golfo. Lo inhóspito del lugar y el difícil acceso al mismo en embarcaciones (incluso de bajo calado) con equipos de medición son retos a superar en el futuro.

En el presente estudio se usaron datos de otros autores para determinar la distribución espacial de las arenas en el golfo, aun así, se sugiere un mejor detalle en la información de los sedimentos aportados por el río Atrato y León (zonas de particular interés y variabilidad). Esto implicaría la toma de muestras de

sedimentos de fondo y en suspensión en los deltas de ambos ríos y la determinación de granulometría y propiedades de los mismos.

Mediciones in-situ de las variables climatológicas de la región, en especial de la magnitud y dirección del viento resultan de especial importancia para estudios oceanográficos y de dispersión de sedimentos en el golfo. La escasa cobertura temporal y espacial de las estaciones de la región obliga el uso de modelos globales para la obtención de estos datos. Se sugiere la instalación de estaciones de monitoreo de las variables atmosféricas al norte y sur del golfo, con el fin de validar el uso de estos modelos en el área de estudio y de registrar la variación espacial de las variables.

6. ANALISIS DE SENSIBILIDAD

La primera fase de la modelación numérica consistió en la realización de un análisis de sensibilidad espacial a forzamientos externos, parámetros numéricos y físicos. Se siguió la metodología propuesta por Escobar (2010) en la que se hacen comparaciones celda a celda entre una simulación patrón y simulaciones en las que se alteran los parámetros de interés uno a la vez (*One at a Time*) (Saltelli et al., 2000). Por medio de esta metodología, se estimó dónde y en qué grado las variables están afectando de manera significativa los resultados del modelo, por ende, la necesidad de adquirir o no información detallada en campo.

El análisis de sensibilidad se realizó para el periodo de Agosto de 2009, el cual presentó características de época húmeda con condiciones de viento y oleaje débiles. El resumen de los forzamientos externos, los parámetros numéricos y físicos utilizados en la simulación patrón se muestran en negrita en la Tabla 12. Las simulaciones modificadas por su parte, fueron idénticas a la patrón pero se les excluyó o modificó los parámetros con el fin de identificar su efecto en las concentraciones de sedimentos. En la Tabla 12 se encuentran los rangos de variación de cada parámetro analizado.

Los valores base de los parámetros relativos a la hidrodinámica que se presentan en negrita en la Tabla 12 se obtuvieron del modelo hidrodinámico previamente calibrado y validado para la zona de estudio (Escobar, 2011 y Escobar et al., En revisión). El rango de variación de cada parámetro se seleccionó teniendo en cuenta valores que fueran posibles según la física de los fenómenos en los que cada uno influye y que permitieran identificar el efecto de cada parámetro en la dinámica de sedimentos.

Tabla 12. Valores de los parámetros en el análisis de sensibilidad

Tipo de parámetro	Nombre	Valores del parámetro en cada simulación
Numéricos	Intervalo temporal (min)	0,5 - 1,0 - 2,0 - 4,0
	No. de celdas	Refinado x2 - 21961 - Derefinado x2 - Derefinado x4
	No. de capas en profundidad	6 - 10 - 20 - 30
Físicos	Coefficiente de rugosidad de Manning	0,015 - 0,02 - 0,025 - 0,03
	Tamaño de grano (μm)	Finos - 64 - 100 - Distribución espacial de tamaños
	Velocidad de asentamiento (mm/s)	0,1 - 0,25 - 0,5 - 1,0
	Cortante crítico de erosión (N/m^2)	0,5 - 0,75 - 1,0 - 1,5
	Cortante crítico de depositación (N/m^2)	1,0 - 2,0 - 2,5 - 3,0
	Tasa de erosión ($\text{kg/m}^2/\text{s}$)	0,00025 - 0,0005 - 0,00075 - 0,001
	Viscosidad de remolino horizontal (m^2/s)	1 - 10 - 100 - 500
	Viscosidad de remolino vertical (m^2/s)	0 - 0,0001 - 0,0005 - 0,001
	Difusividad de remolino horizontal (m^2/s)	1 - 10 - 100 - 250
	Difusividad de remolino vertical (m^2/s)	0 - 0,0001 - 0,001 - 0,005
	Coefficiente dragado del viento	0,00063 - 0,001 - 0,002 - 0,003
	Escala Ozmidov (m)	0 - 0,01 - 0,1 - 1,0
Forzamientos externos	Oleaje	Hs = 0,7 m Tp= 4 s y Dir = 84° Sin oleaje
	Viento	Magnitud = 1,24 m/s Dir = 260° Sin viento
	Marea	Mixta semidiurna - régimen micromareal Sin marea
	Procesos termo-salinos	Salinidad ríos = 0 Caribe = 23 - 35 Temperatura ríos (°C) = 26 - 28,7 Caribe = 28,8 Sin procesos termo-salinos
	Descarga Atrato (m^3/s)	4700 Sin río Atrato
	Tributarios menores	22 tributarios menores Sin tributarios menores

Notas: (1) Datos en negrita corresponden a la simulación patrón. (2) El oleaje y el viento variaron temporalmente, los valores presentados equivalen a la media de los datos.

Una vez corrida la simulación patrón y las simulaciones modificadas, se calcularon las diferencias en las concentraciones de sedimentos para cada par de

simulaciones. Para esto, las concentraciones obtenidas se promediaron en el tiempo y se integraron en profundidad, lo que llevó a obtener concentraciones celda a celda para cada simulación, que posteriormente se restaron a las concentraciones obtenidas por la simulación patrón. El diagrama metodológico del análisis de sensibilidad se encuentra en la Figura 18.

A pesar de que de antemano se conoce la estratificación del sistema, las generalizaciones en tiempo y profundidad se hacen como parte de una fase preliminar del modelo y con el fin de encontrar zonas críticas donde las mediciones deben enfocarse. Grandes diferencias, aún con promediaciones, señalan áreas en las que se debe tener especial cuidado durante las fases de evaluación del modelo.

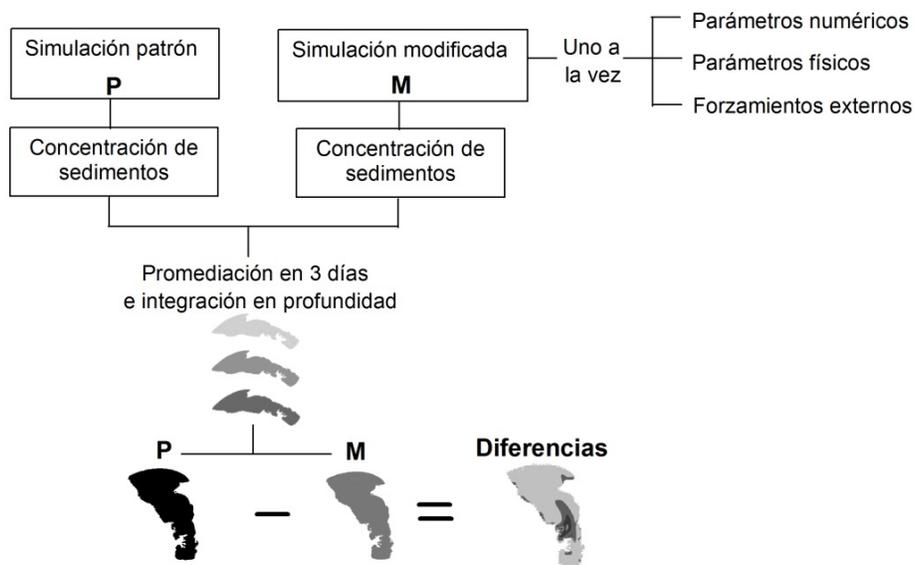


Figura 18. Diagrama metodológico del análisis de sensibilidad

Las diferencias que se encuentran equivalen a valores positivos o negativos de concentraciones de sedimentos en todo el dominio de cálculo. Los primeros (mostrados en tonos oscuros) indican el aumento en las concentraciones de sedimentos como consecuencia del valor base del parámetro. Por otro lado,

valores negativos (mostrados en tonos claros) revelan un efecto indirecto en el que el parámetro modificado es el que ocasiona el aumento en las concentraciones.

Las diferencias son entonces una forma indirecta de conocer la relevancia de cada parámetro y sus zonas de influencia en el cálculo de las concentraciones de sedimentos. Además de este cálculo, para los parámetros numéricos (número de celdas, número de capas e intervalo temporal de cálculo) se hizo un análisis de beneficio vs. costo computacional, en que se compara la calidad de la solución numérica con el tiempo de cálculo requerido por una máquina estándar para ejecutar las modelaciones.

En este último procedimiento se asume que la mejor solución está dada por los modelos con el mayor refinamiento, por lo que éstos son considerados como patrones para la comparación de los resultados de los parámetros numéricos únicamente. Una vez seleccionados sus valores óptimos, el análisis de sensibilidad de las demás variables se realizó usando estos últimos.

6.1 PARÁMETROS NUMÉRICOS

El primer parámetro analizado fue el número de celdas en el que se discretizó el dominio de cálculo. La malla con mayor refinamiento (considerada patrón) tuvo un total de 38596 celdas, mientras los demás modelos tuvieron mallas con 21961, 5325 y 1254 celdas.

En la Figura 19 se evidencia que al modificar el número de celdas, el efecto se localiza en las bocas principales del Atrato y en zonas de aguas someras. Según los resultados obtenidos, un menor refinamiento del dominio puede llevar a incrementos significativos (superiores a 100 mg/l) en el cálculo de las concentraciones de sedimentos, tanto en el delta del Atrato como en las cercanías a la costa.

El análisis de calidad de la solución vs. el tiempo de cómputo (Figura 20) permitió identificar un número de celdas igual a 14000 para obtener la mejor solución en el menor tiempo. Se decidió optar por la alternativa siguiente más conservadora (con mayor número de celdas) la cual corresponde a un total de 21961 celdas o un incremento del 50% respecto al valor óptimo encontrado.

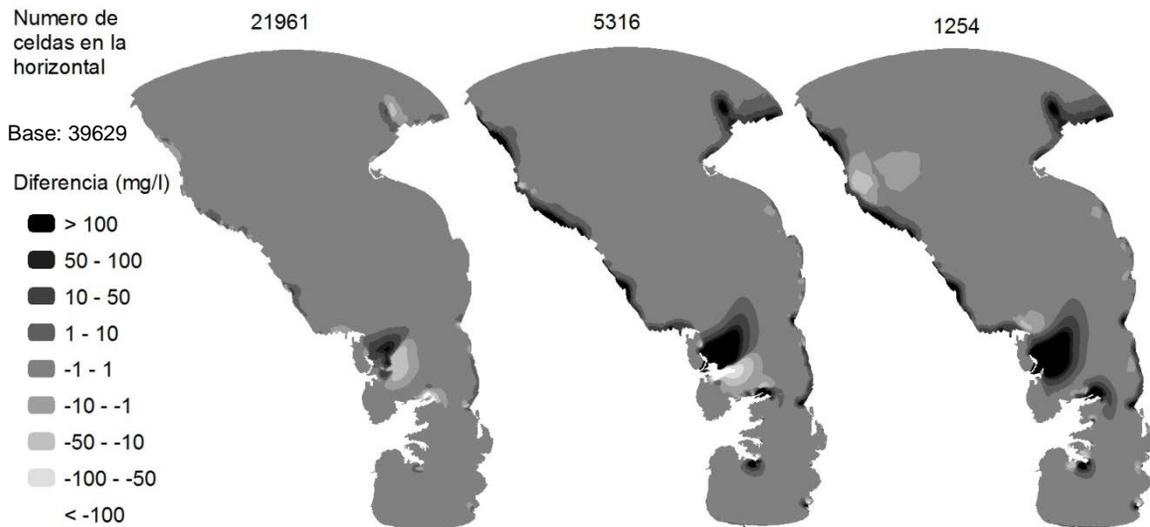


Figura 19. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa del número de celdas

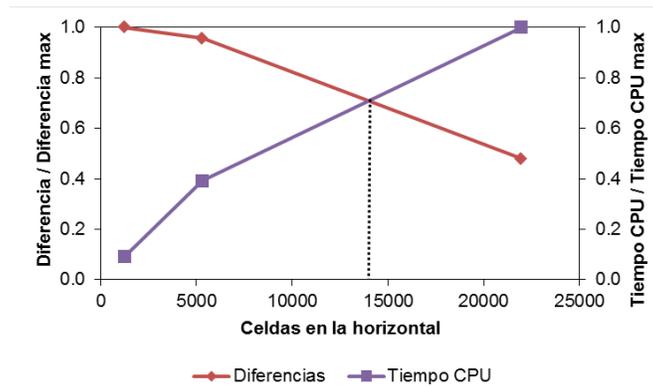


Figura 20. Número de celdas óptimo

Tres modelos con 6, 10 y 20 capas en la vertical se compararon con un patrón con 30. En la Figura 21 se observa como al hacer menos fina la cobertura vertical del

modelo, el efecto del número de capas se intensifica en el Roto y en zonas de aguas someras, en especial, sobre el costado noroeste del golfo.

En la Figura 22 se muestra que el número óptimo de capas es 13, con el cual se obtiene una buena calidad de la solución numérica en un tiempo de cómputo moderado en relación con el modelo de 30 capas. Teniendo en cuenta la solución siguiente más conservadora se adopta un modelo con 20 capas en la vertical.

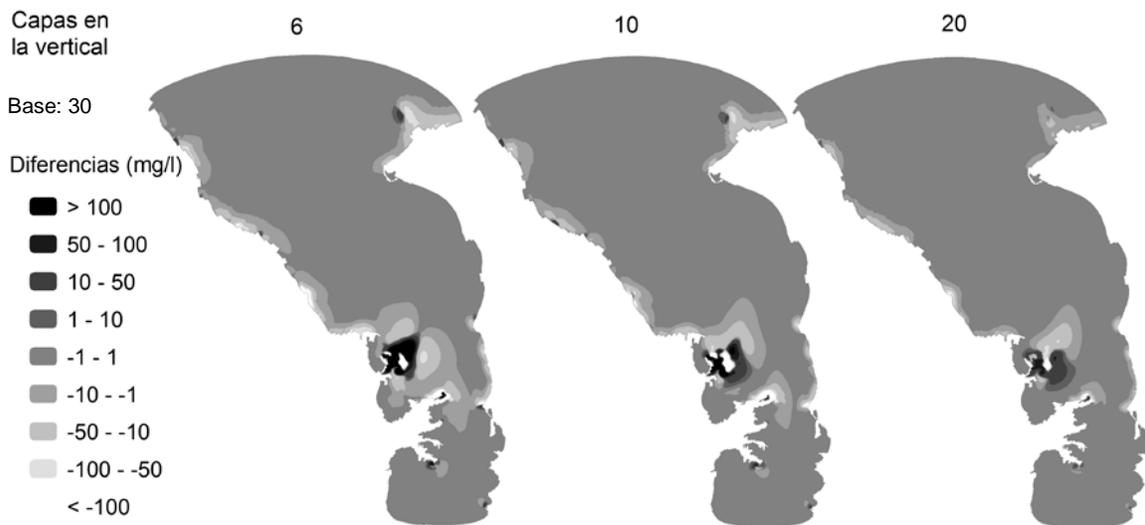


Figura 21. Variación espacial del efecto del número de capas en la concentración de sedimentos

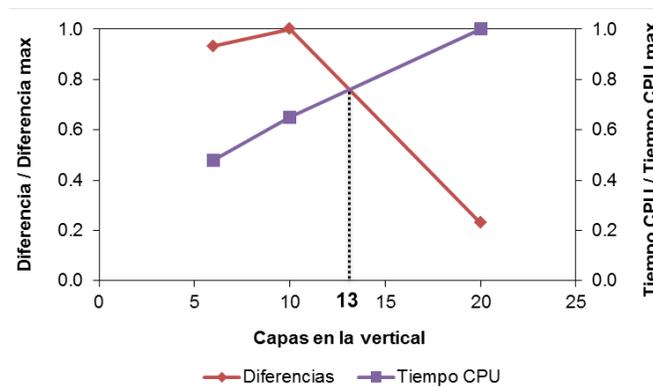


Figura 22. Número de capas óptimo

El último parámetro numérico revisado fue el intervalo temporal de cálculo. Su efecto se localizó en las tres bocas principales del Atrato (Figura 23). En el Roto

generó variaciones superiores a los 50 mg/l, mientras que en aguas profundas su efecto se puede considerar despreciable. En cuanto al intervalo temporal de cálculo óptimo, en la Figura 24 se observa un valor teórico de 2,25 min, pero siguiendo la premisa de la opción más conservadora y considerando el análisis de sensibilidad del modelo hidrodinámico, se toma como valor óptimo 1 minuto.

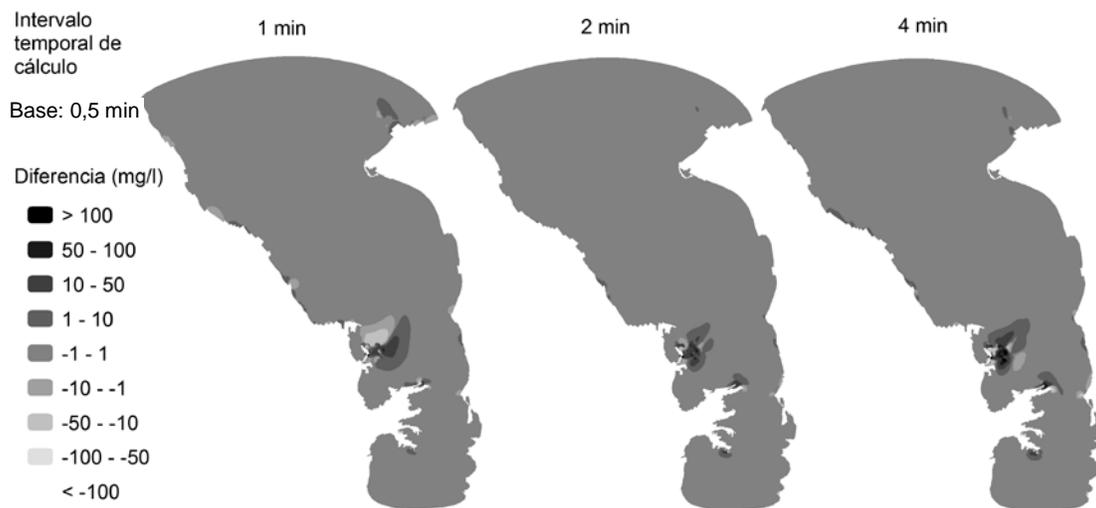


Figura 23. Variación espacial del efecto del intervalo de cálculo en la concentración de sedimentos

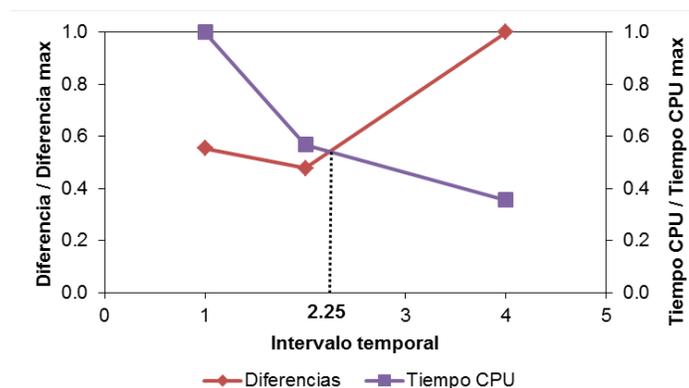


Figura 24. Intervalo temporal de cálculo óptimo

6.2 PARÁMETROS FÍSICOS

Se revisó el efecto en la concentración de sedimentos de 12 parámetros físicos. Los resultados se presentan entre la Figura 25 y la Figura 35, de las cuales es evidente que las regiones con mayor sensibilidad a cambios en cualquiera de los parámetros son el Roto, las zonas de aguas someras y punta Caribaná.

Parámetros como el coeficiente de rugosidad de Manning, el cortante crítico de erosión, el cortante crítico de sedimentación y la tasa de erosión tienen su influencia concentrada en las zonas mencionadas y sus efectos en aguas profundas son despreciables (inferiores a 5 mg/l). Bajo las condiciones simuladas, el coeficiente de rugosidad resultó ser responsable de incrementos y reducciones en la concentración superiores a 100 mg/l en regiones cercanas a la costa (Figura 25), indicando que variaciones moderadas en su valor, generan respuestas significativas en las concentraciones.

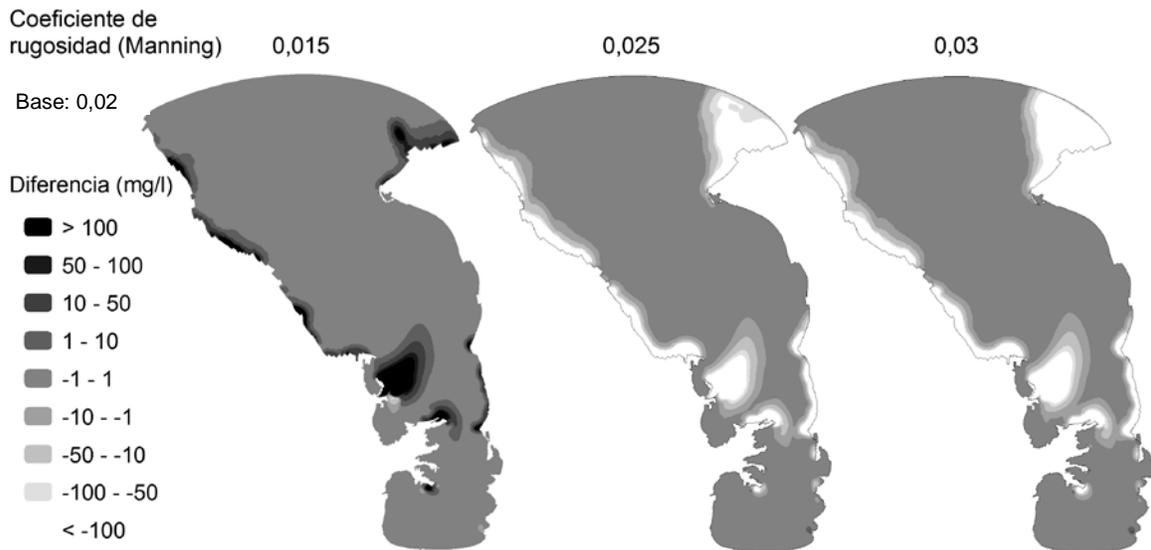


Figura 25. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa del coeficiente de rugosidad de Manning

El cortante crítico de erosión, la tasa de erosión y el cortante crítico de sedimentación (Figura 26 a Figura 28) son parámetros que regulan los procesos

de resuspensión y asentamiento de las partículas respectivamente. Sus efectos fueron por tanto, más evidentes en zonas de aguas someras con afectación directa del chorro de salida del Atrato y del oleaje.

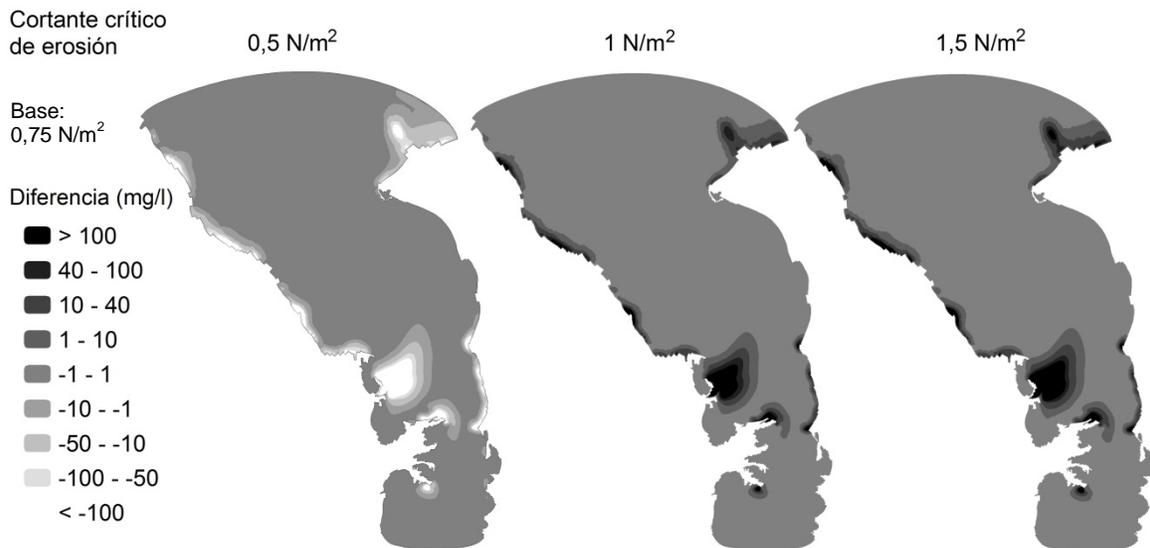


Figura 26. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa del cortante crítico de erosión

Por su parte, la velocidad de asentamiento de finos, las difusividades de remolino horizontal y vertical y la escala Osmidov fueron parámetros que además de afectar las zonas anteriormente mencionadas, tuvieron incidencia directa en la dispersión de los sedimentos hacia aguas más profundas.

La velocidad de asentamiento de las partículas cohesivas (Figura 29) se mostró desde esta instancia, como un parámetro fundamental para lograr representar adecuadamente la pluma turbia del río Atrato y las plumas de los demás tributarios; valores bajos del parámetro hacen que las partículas permanezcan más tiempo en suspensión y sean transportadas mayores distancias, velocidades mayores generan un asentamiento rápido en cercanías a las fuentes de sedimentos.

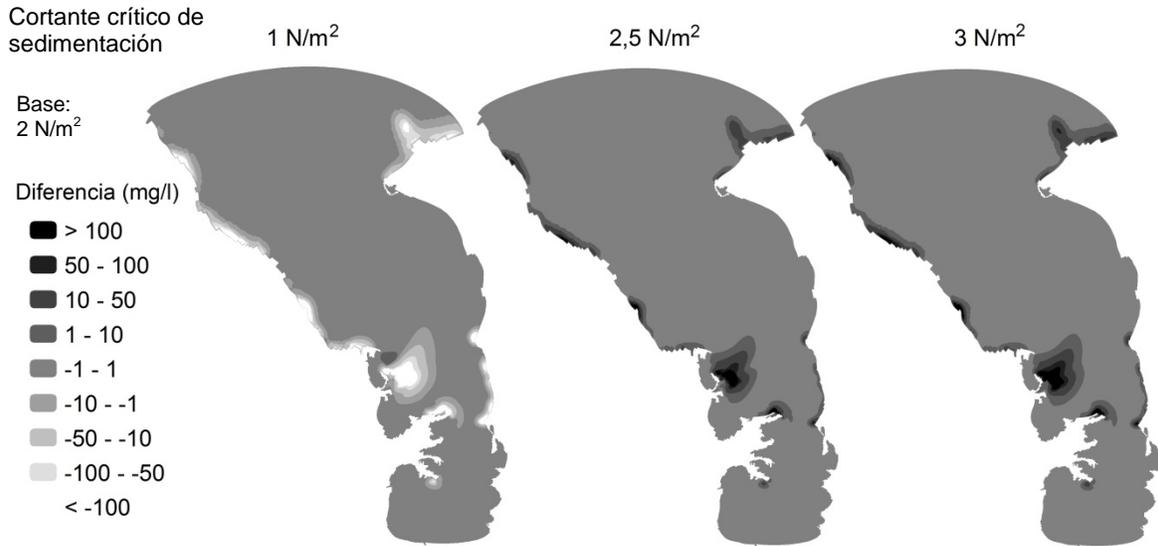


Figura 27. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa del cortante crítico de sedimentación

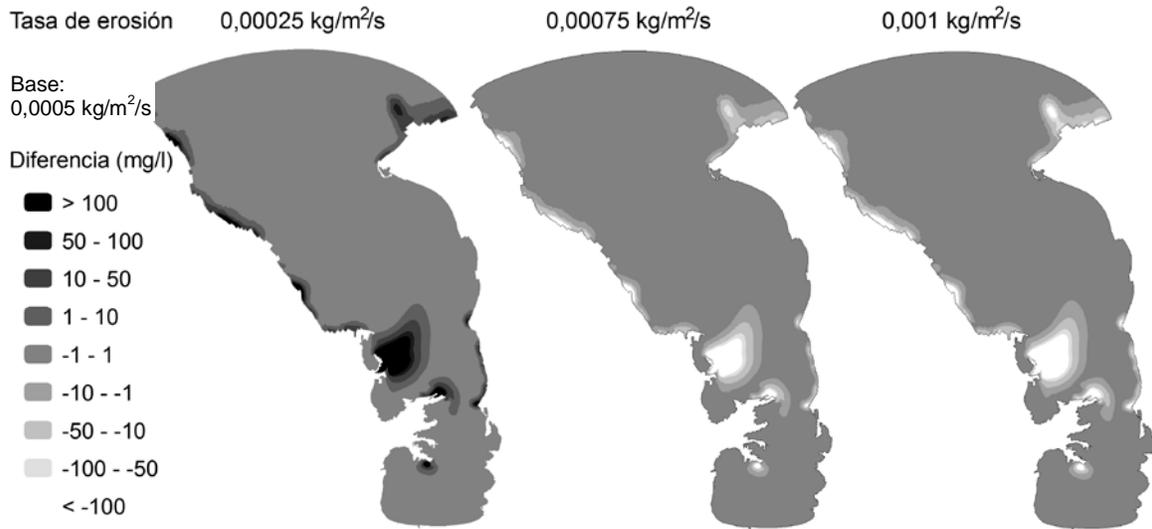


Figura 28. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la tasa de erosión

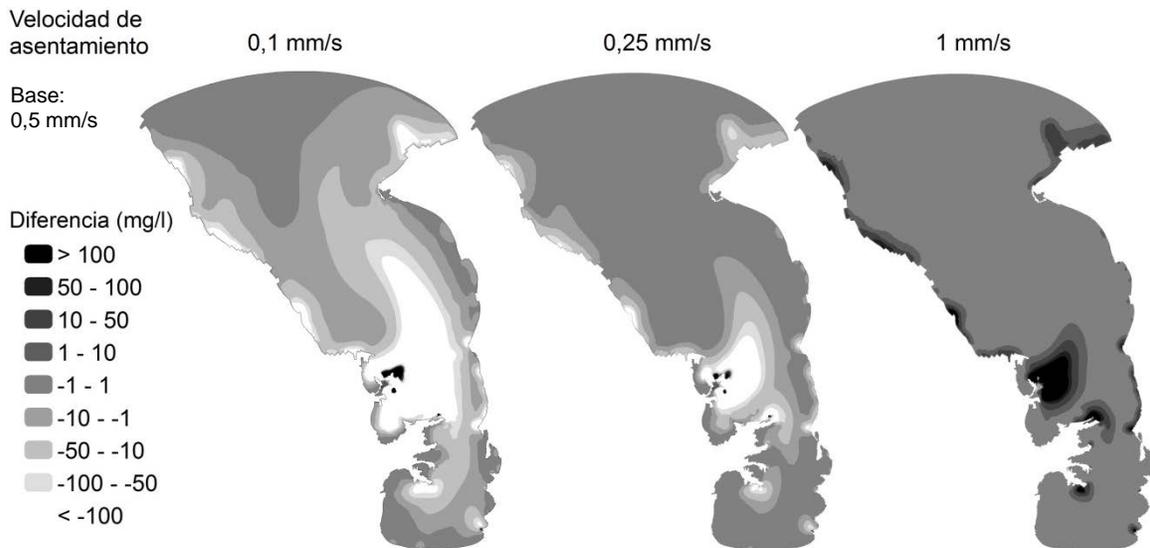


Figura 29. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la velocidad de asentamiento de las partículas cohesivas

Las difusividades de remolino y la escala Osmidov (Figura 30 a Figura 32) son parámetros relacionados con procesos turbulentos que afectan directamente el término difusivo de la ecuación de advección-difusión. Los resultados indican de posibles cambios en la dispersión (vertical y horizontal) de los sedimentos según el valor que tomen dichas variables.

Las viscosidades de remolino horizontal y vertical tienen efectos marcados en cercanías del Roto, donde se evidencian cambios en la concentración de sedimentos superiores a 100 mg/l al modificar en un orden de magnitud el valor de los parámetros.

El coeficiente de dragado del viento fue el parámetro con menor área de influencia en el cálculo de las concentraciones de sedimentos; tuvo efectos significativos únicamente en el Roto, sin llegar ni siquiera a otras regiones de aguas someras.

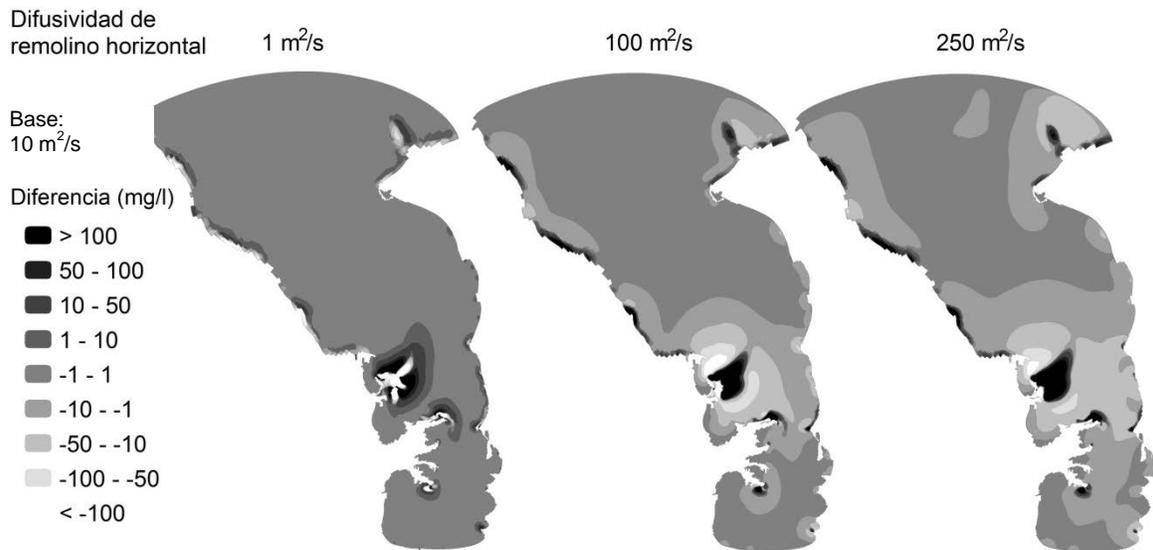


Figura 30. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la difusividad de remolino horizontal

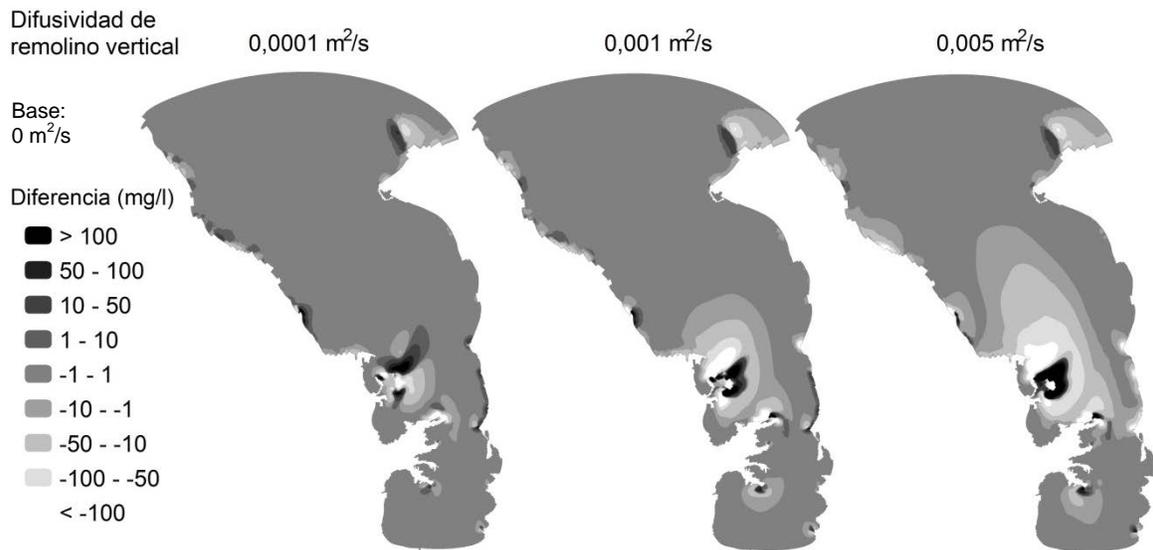


Figura 31. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa la difusividad de remolino vertical

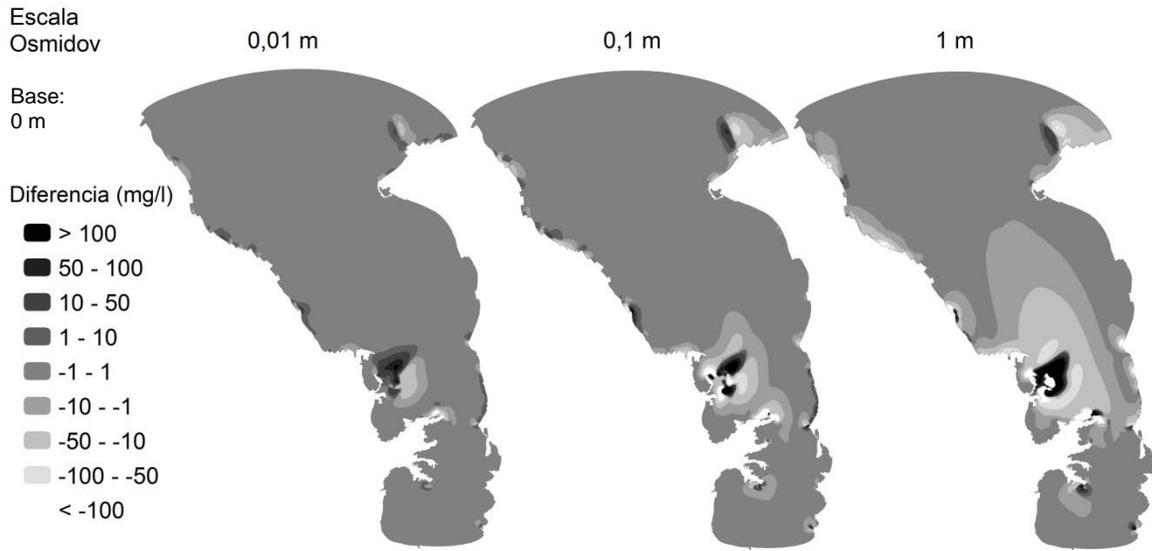


Figura 32. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la escala Ozmidov

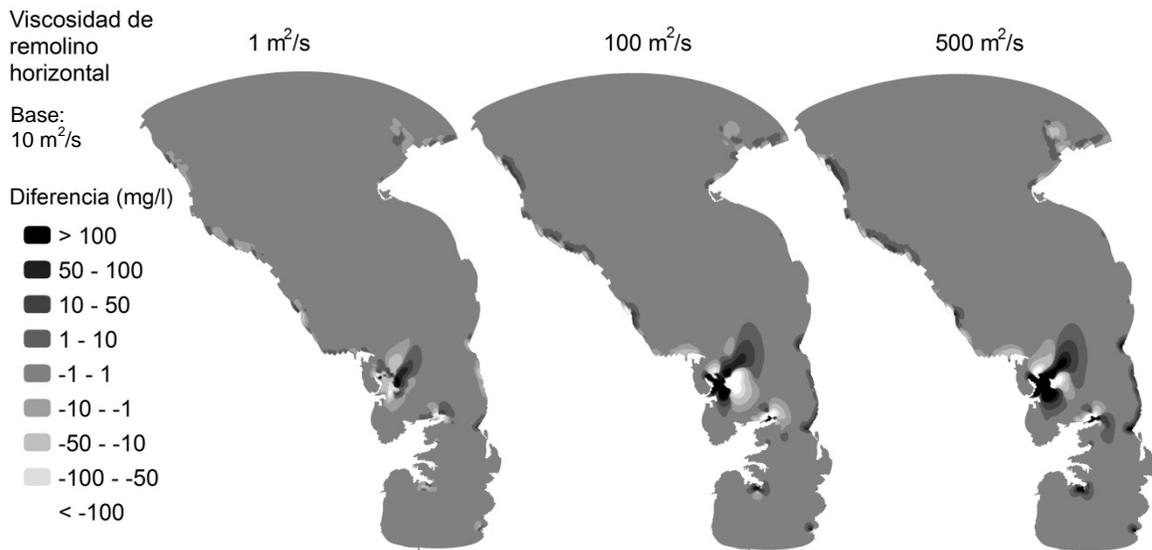


Figura 33. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la viscosidad de remolino horizontal

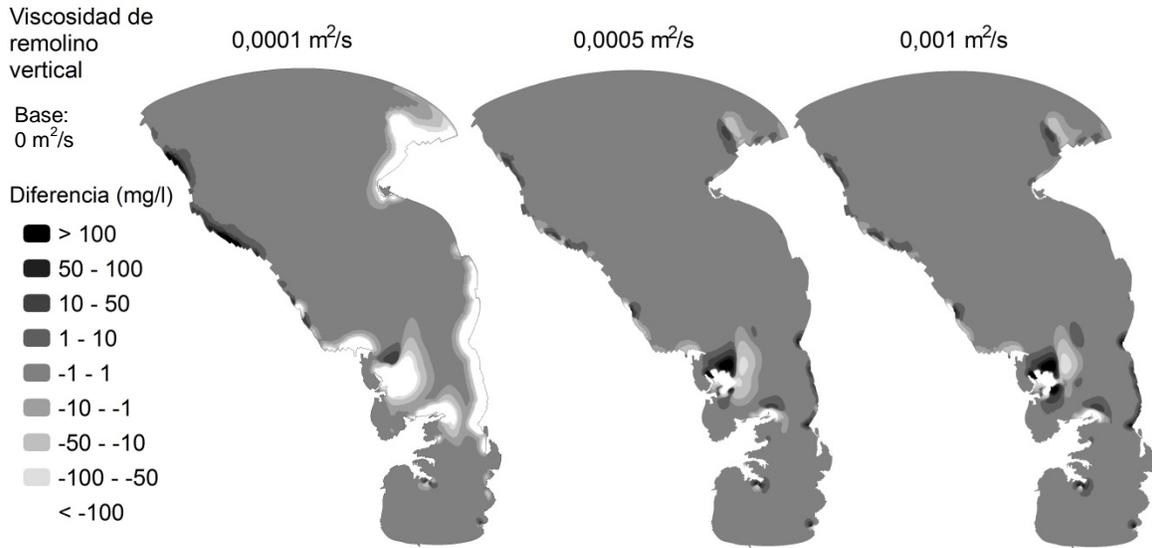


Figura 34. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa de la viscosidad de remolino vertical

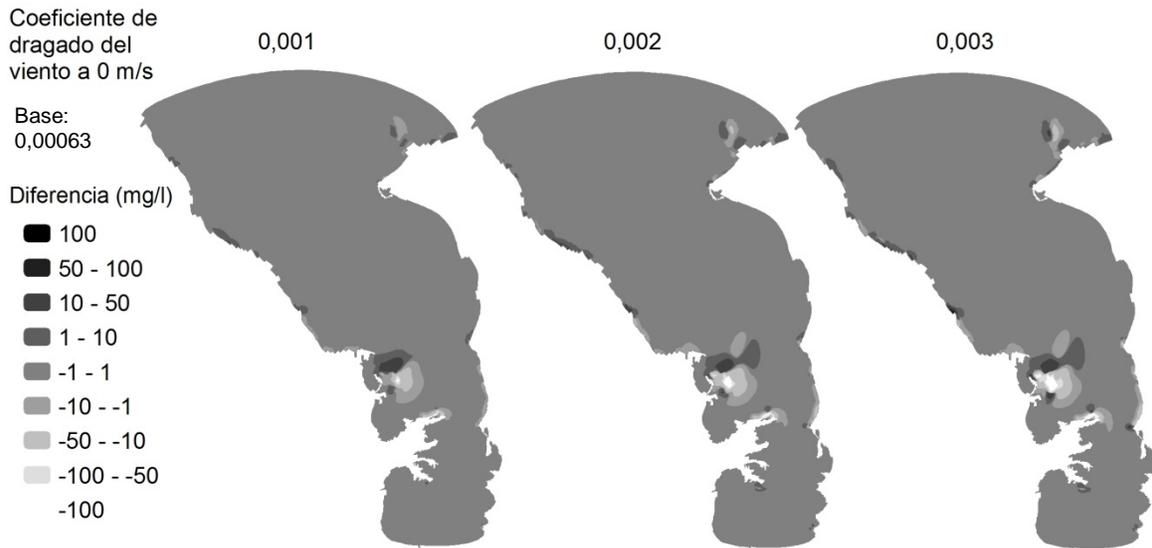


Figura 35. Diferencias en el cálculo de las concentraciones de sedimentos a causa del coeficiente de dragado del viento a 0 m/s

Finalmente, para cada uno de los parámetros físicos incluidos en el análisis se calculó el promedio de las diferencias absolutas. A partir de los resultados

obtenidos se asignó un orden de relevancia a cada parámetro según el porcentaje en el que fue variado durante el análisis y el efecto que tuvo en el cálculo de las concentraciones de sedimentos (véase Tabla 13). El proceso de calibración del modelo (sección 7.2) inició con el ajuste de los parámetros más relevantes hasta finalizar con aquellos que tuvieron menor relevancia en el cálculo de las concentraciones de sedimentos.

Tabla 13. Relevancia de los parámetros físicos en el cálculo de las concentraciones de sedimentos

Parámetro	% de variación	Diferencias (mg/l)	Grado de relevancia
Coeficiente de rugosidad	100	115.32	1
Cortante crítico de erosión	200	19.75	2
Tasa de erosión	300	22.44	3
Velocidad de asentamiento	900	33.79	4
Escala Ozmidov	100	10.00	5
Cortante crítico de sedimentación	200	7.86	6
Viscosidad de remolino vertical	1000	92.12	7
Difusividad de remolino horizontal	> 1000	19.22	8
Difusividad de remolino vertical	1000	13.74	9
Viscosidad de remolino horizontal	> 1000	7.67	10
Coeficiente dragado del viento a 0m/s	376	1.54	11

Los cuatro parámetros más relevantes se revisaron sin realizar ningún tipo de promediación (tiempo y profundidad) con el fin de verificar que la metodología empleada efectivamente señalara las zonas donde éstos adquieren mayor importancia en el cálculo de las concentraciones de sedimentos. Los resultados se presentan entre la Figura 36 y la Figura 39, las cuales ratificaron que las generalizaciones empleadas dan una idea correcta de los efectos que tiene cada parámetro en la variable analizada.

El coeficiente de rugosidad de Manning tiene efectos mayores en el fondo con respecto a la superficie y su influencia se centra en el delta del Atrato y cercanías a la costa. El incremento de este parámetro aumenta las concentraciones de sedimentos desde el fondo hasta la superficie

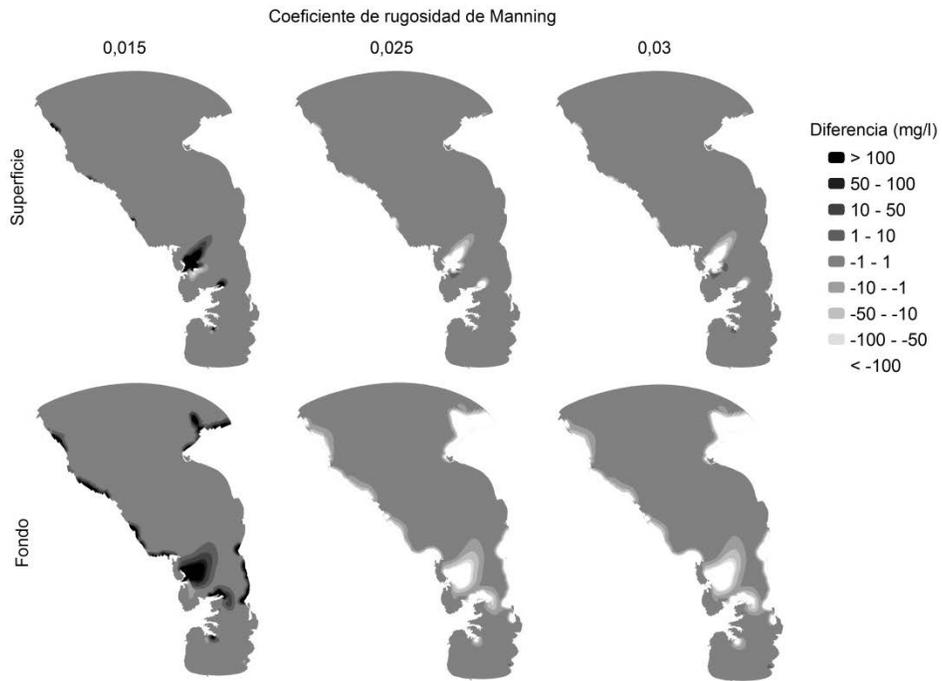


Figura 36. Diferencias instantáneas en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en superficie y fondo a partir de variaciones del coeficiente de rugosidad de Manning

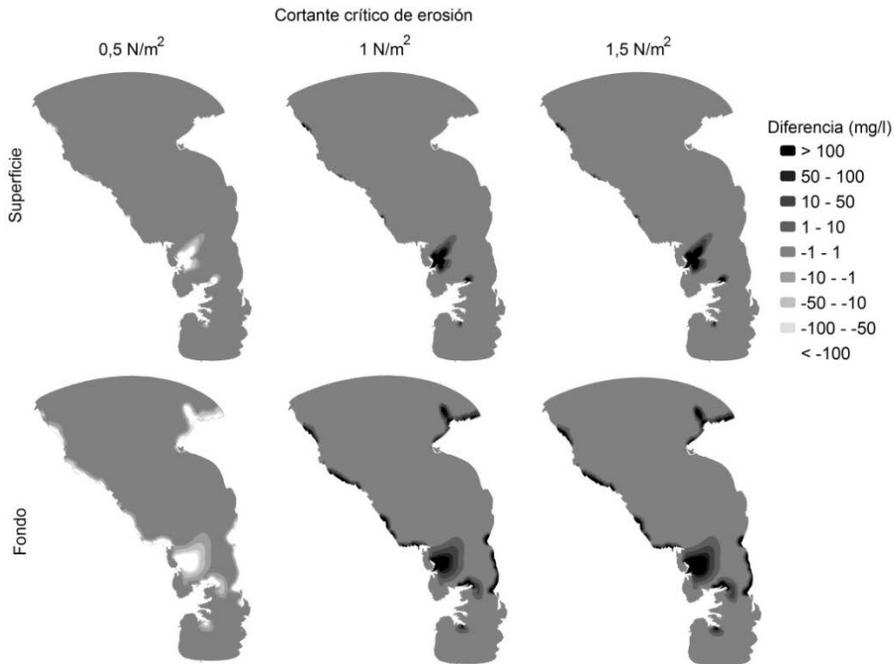


Figura 37. Diferencias instantáneas en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en superficie y fondo a partir de variaciones del cortante crítico de erosión

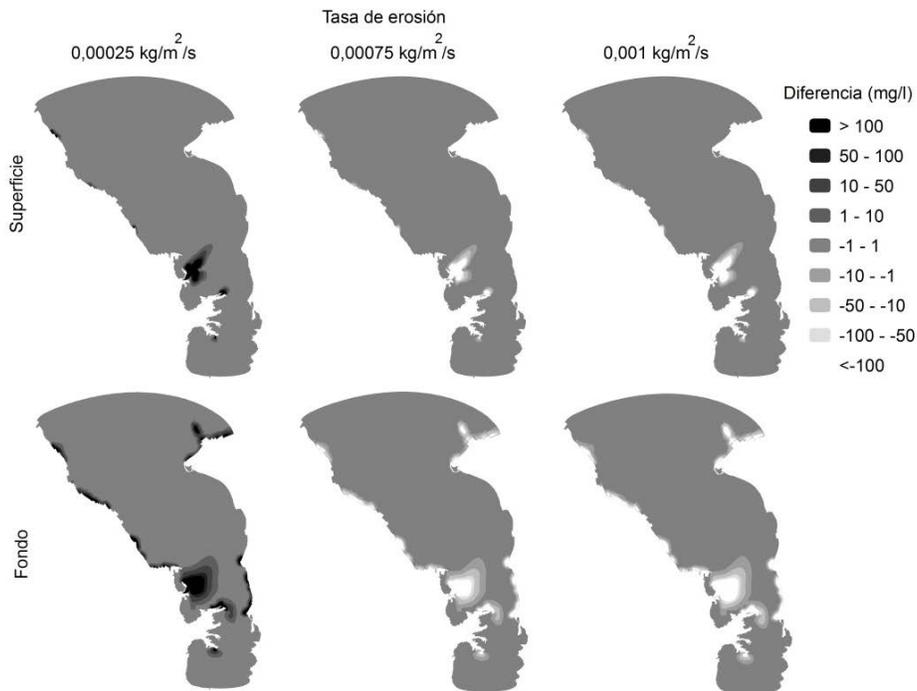


Figura 38. Diferencias instantáneas en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en superficie y fondo a partir de variaciones de la tasa de erosión

De igual manera, modificaciones en la tasa y el cortante crítico de erosión tuvieron efectos más fuertes en las concentraciones del fondo con respecto a las de superficie y las zonas de afectación resultaron ser las mismas a aquellas señaladas con la metodología que incluyó promediación.

La velocidad de asentamiento mostró una alta relevancia en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en profundidad y con la distancia al delta del río Atrato, en especial para los casos en que se disminuyó su valor. Al igual que en los análisis anteriores, para los casos revisados en detalle se encontró que las zonas donde deberán enfocarse los esfuerzos de trabajo de campo y de evaluación del modelo son el delta del río Atrato y las zonas cercanas a la costa, incluida punta Caribaná.

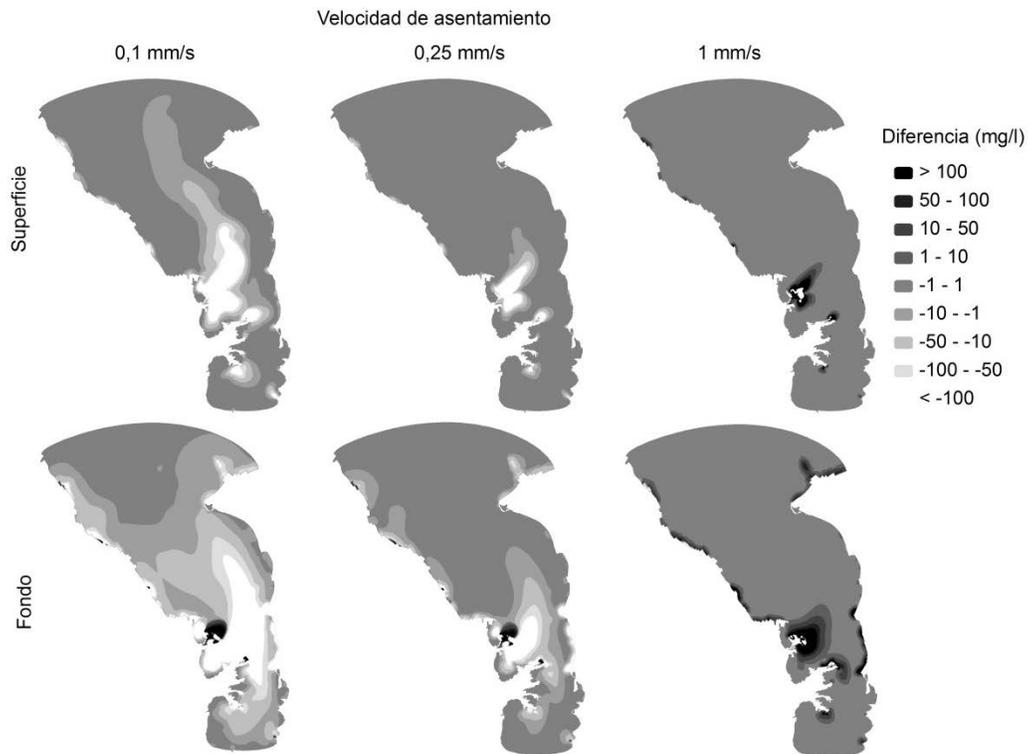


Figura 39. Diferencias instantáneas en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en superficie y fondo a partir de variaciones de la velocidad de asentamiento

Finalmente, antes de proceder con la evaluación de los parámetros físicos en la fase de calibración de los mismos, se hizo la revisión de perfiles de salinidad distribuidos por todo el golfo (Figura 40). Las comparaciones presentadas demuestran que el modelo está en capacidad de reproducir la variabilidad espacial de la salinidad en las zonas norte y central del golfo y reitera que los sedimentos son transportados por flujos menos densos en superficie.

Por otro lado, en el estrechamiento del golfo y Bahía Colombia el modelo tendió a sub-predecir las salinidades en toda la columna de agua y suavizar la haloclina, lo que podría traer como consecuencia que la distribución de los sedimentos en profundidad no sufra cambios abruptos y por ende una sedimentación más gradual de las partículas en esta área del golfo.

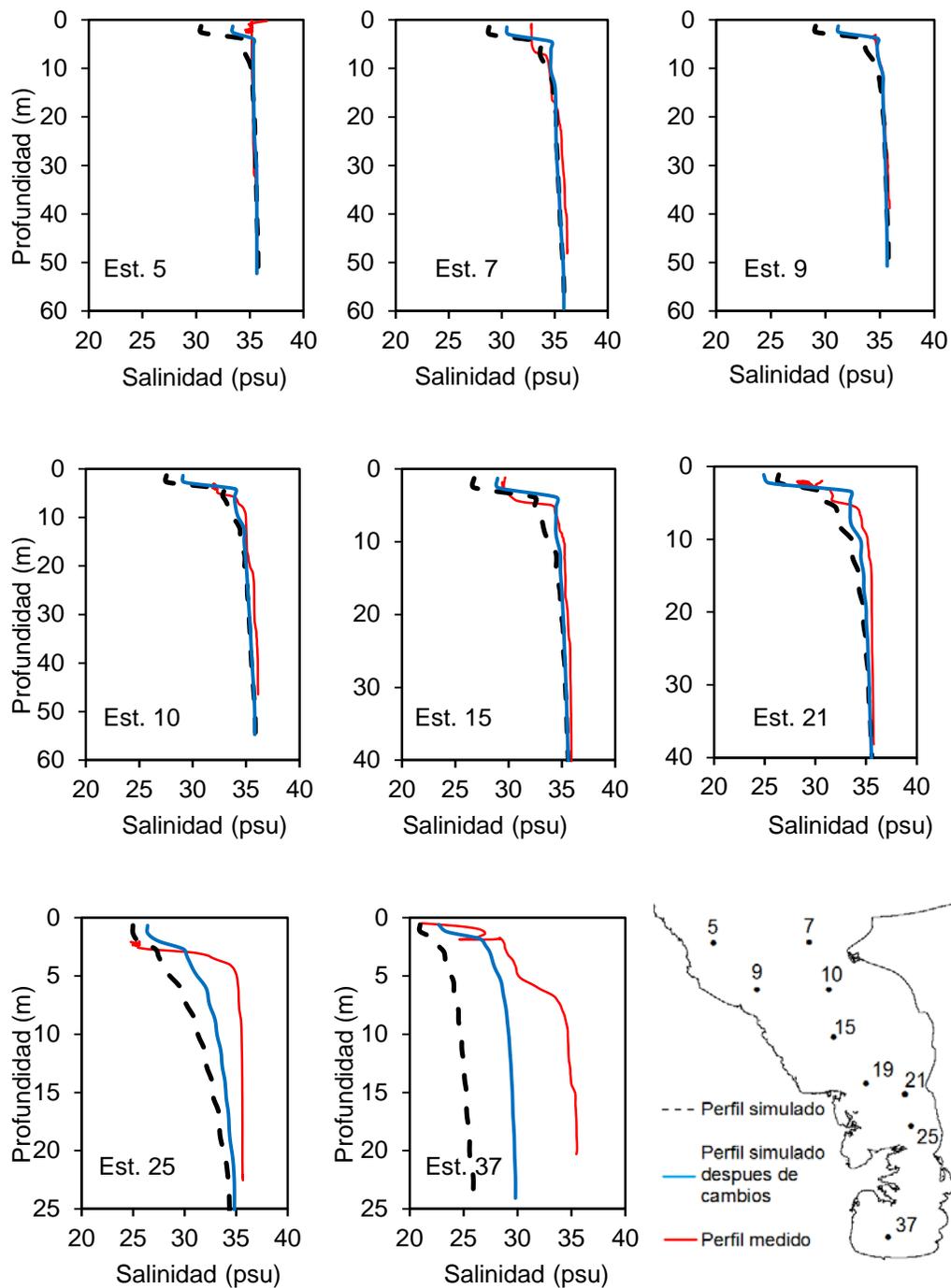


Figura 40. Comparación de perfiles de salinidad medidos y simulados en el golfo de Urabá al final del análisis de sensibilidad

Con el fin de mejorar este aspecto particular del modelo, se hicieron varios ensayos que incluyeron la imposición de un perfil de salinidad en las bocas del delta del Atrato y la disminución de la viscosidad de remolino vertical a $0,00001 \text{ m}^2/\text{s}$. Éstas modificaciones generaron mejorías del orden del 50% en los perfiles de salinidad simulados en bahía Colombia. Por lo mencionado, se recomienda que en trabajo futuro se exploren más a fondo estas alternativas para mejorar el desempeño del modelo en Bahía Colombia.

6.3 FORZAMIENTOS EXTERNOS

El efecto de los forzamientos externos en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en el golfo de Urabá se determinó incluyendo (simulación patrón) y excluyendo (simulación modificada) cada uno de los forzamientos de interés. La Figura 41 y Figura 42 muestran la cantidad de sedimentos que aporta al sistema el forzamiento en consideración (tonos oscuros) y las zonas donde cada forzamiento contrarrestó la acción de otros (tonos claros).

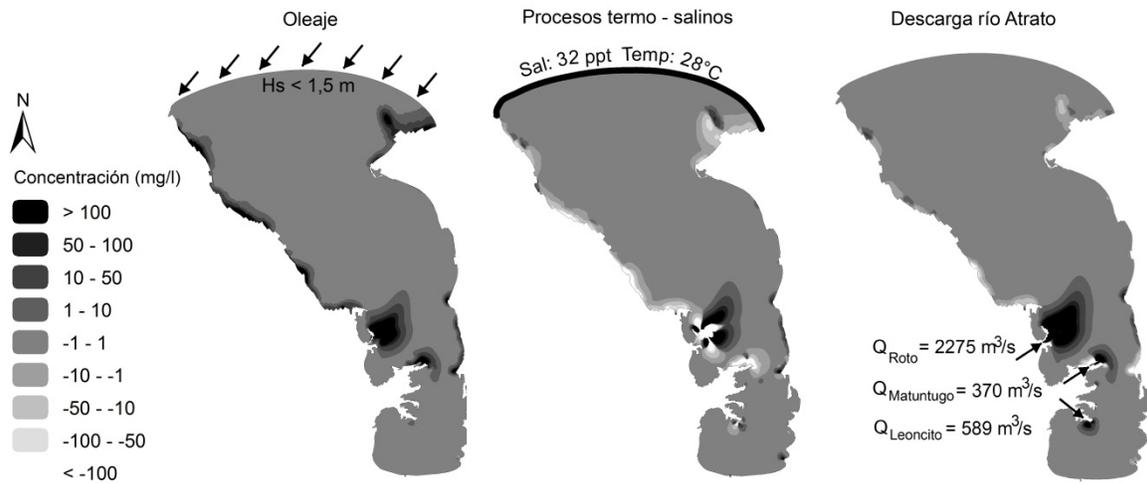


Figura 41. Variación espacial del efecto del oleaje, los procesos termo-halinos y la descarga del río Atrato en la concentración de sedimentos (Tomada de: Velásquez y Escobar 2012a)

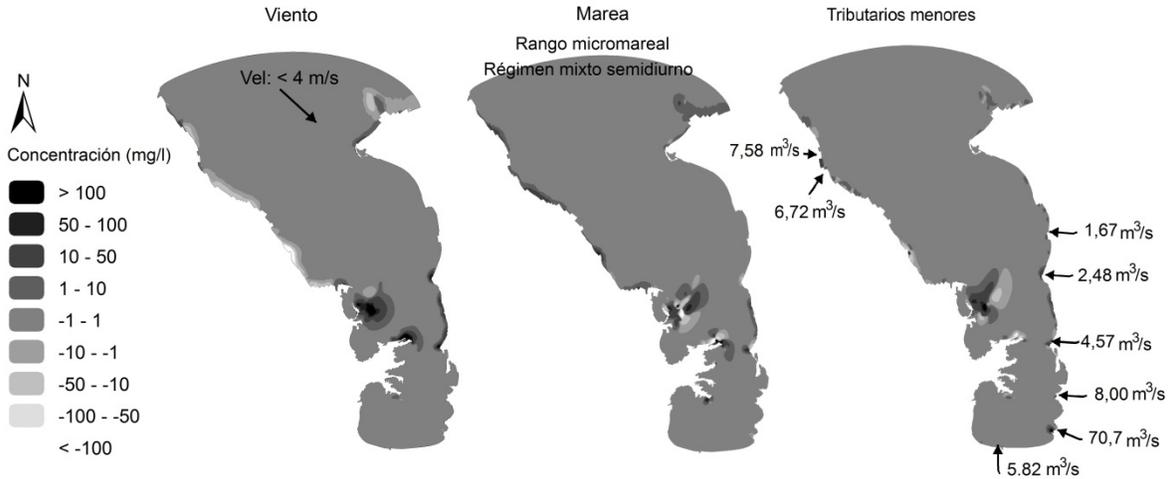


Figura 42. Variación espacial del efecto del viento, la marea y los tributarios menores en la concentración de sedimentos en el golfo de Urabá (Tomada de: Velásquez y Escobar 2012a)

Bajo las condiciones de frontera utilizadas se encontró que las zonas influenciadas en mayor medida por los forzamientos externos fueron las cercanías del delta del Atrato, en especial sus tres distributarios principales (El Roto, Matuntugo y Leoncito), las aguas someras del costado noroeste del golfo y punta Caribaná.

Se obtuvo además, que los forzamientos externos que presentan mayor relevancia en el cálculo de las concentraciones de sedimentos fueron la descarga del río Atrato, los procesos termo-salinos y el oleaje (Figura 43). La baja magnitud del viento (inferior a 4 m/s) hizo que su efecto fuera reducido, pero si se llegase a aumentar su valor, probablemente las áreas de afectación se incrementarían al igual que las concentraciones de sedimentos calculadas.

Detalles y análisis específicos de cada uno de estos forzamientos y sus efectos en el cálculo de las concentraciones de sedimentos en el golfo de Urabá se encuentran en Velásquez (2011); Velásquez y Escobar (2012a). Un análisis particular del río Atrato a diferentes profundidades y en condiciones climáticas y mareales variables llevo a determinar que este río tiene efecto directo en las concentraciones de sedimentos en cercanías del delta, donde se presentan zonas

de alta concentración que se van atenuando a medida que las partículas se alejan en la dirección del flujo y se depositan en el fondo.

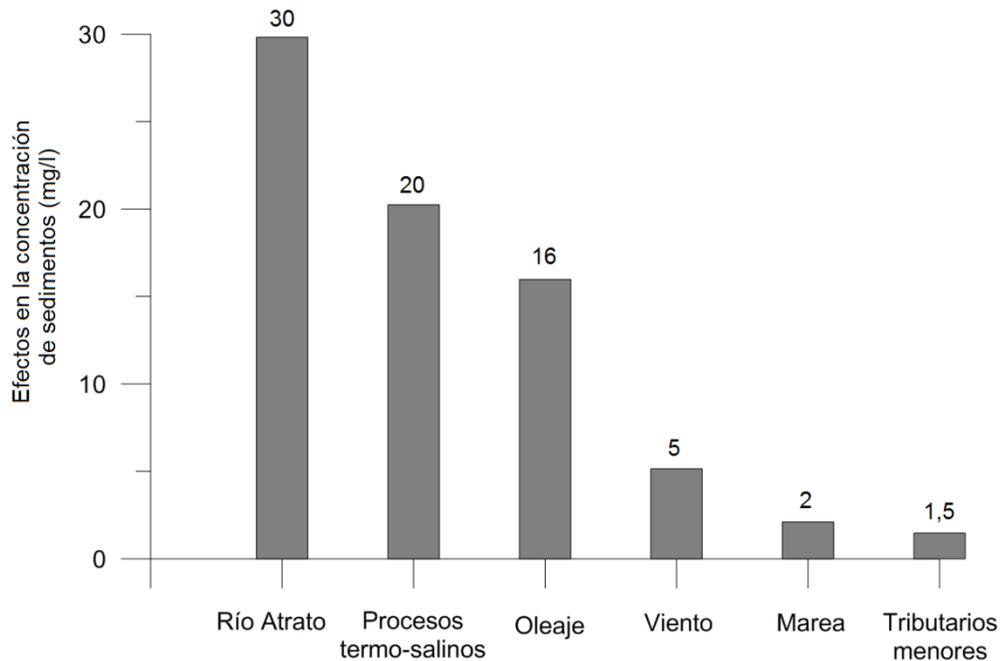


Figura 43. Efecto de los forzamientos externos en las concentraciones de sedimentos

La variación estacional llevada a cabo en este análisis permitió encontrar que en la fase preliminar del modelo, los sedimentos provenientes del Atrato tienden a quedarse en Bahía Colombia durante la época seca, mientras que en la época húmeda son transportados hacia el norte a zonas más alejadas de la desembocadura. Otras conclusiones del análisis y detalles del mismo se encuentran en Velásquez y Escobar (2012b).

6.4 DISCUSIÓN

La metodología empleada permitió conocer las zonas del dominio de cálculo donde los parámetros numéricos, físicos y forzamientos externos están afectando las concentraciones de sedimentos, además del grado en que lo hacen. El análisis

mostró que todos parámetros pueden llegar a generar variaciones puntuales superiores a 100 mg/l en zonas de especial interés, como lo es el delta del Atrato.

El haber realizado el análisis de sensibilidad durante un periodo con características de la época húmeda mostró los efectos de los parámetros bajo condiciones de calma, de realizarse este análisis bajo condiciones de viento y oleaje más fuertes, los efectos de los parámetros en términos de concentraciones de sedimentos podrían llegar a modificarse tanto en el delta del Atrato como en las demás zonas de aguas someras.

En esta fase inicial de la modelación se permitió realizar análisis integrados en profundidad ya que se buscó una revisión preliminar de la influencia de los parámetros en el modelo. En la validación, el modelo fue evaluado a diferentes profundidades (se contaron con estas mediciones), ya que la estratificación de sus aguas se prevé como un factor determinante en el transporte en suspensión de los sedimentos finos.

Parámetros físicos como la velocidad de asentamiento de los sedimentos cohesivos, el cortante crítico de erosión y el coeficiente de rugosidad de Manning que resultaron ser críticos durante el análisis de sensibilidad, fueron a su vez, algunos de los más complejos de calibrar. Los dos últimos mencionados debieron someterse incluso a variación espacial para diferenciar las zonas de los deltas del río Atrato y León del resto del golfo.

La escasa información batimétrica del delta y de caudales líquidos y sólidos del río Atrato, incrementan la complejidad en la modelación de los procesos que allí tienen lugar. El análisis de sensibilidad sugiere que las campañas de medición de este y otros estudios de sedimentos que se hagan en la región deben ampliar el conocimiento de este delta en particular.

Los resultados del análisis de sensibilidad llevaron a complementar el esquema de estaciones de monitoreo planteado por Montoya (2010), ya que éste abarca principalmente zonas de aguas profundas y los resultados iniciales indican que en la evaluación de las concentraciones de sedimentos deben incluirse las zonas cercanas a las costas y al delta del Atrato. Los puntos resultantes se presentaron anteriormente en la Figura 13.

Adicionalmente, identificar el río Atrato como un forzamiento crítico para la modelación de la concentración de sedimentos hizo que se planearan aforos líquidos y sólidos en sus bocas principales en diferentes épocas climáticas (húmeda, seca y transición). Mediciones que se incluyeron como condiciones de frontera en las siguientes fases de la modelación.

7. DESEMPEÑO Y EVALUACIÓN DEL MODELO

La evaluación del modelo se realizó mediante la comparación de las concentraciones de sedimentos medidas en las campañas de campo descritas en la sección 5 con respecto a las simuladas para los mismos periodos de tiempo. La fase inicial consistió en la calibración de los parámetros físicos que llevaran a mejorar las predicciones del modelo. Una vez determinados los valores finales de estos parámetros, se validó el uso del modelo para dos periodos de tiempo diferentes, en los que nuevamente se compararon mediciones y predicciones.

Los estadísticos utilizados para evaluar el desempeño del modelo en ambas fases (calibración y validación) corresponden a tres errores típicamente usados en modelación numérica (Sutherland et al., 2003; Ji, 2008). Cada uno de ellos aporta información diferente respecto a las predicciones y complementa el análisis de la precisión del modelo.

El *Mean Absolute Error* (MAE) es calculado como el promedio de las diferencias absolutas (Ecuación 36) entre el conjunto de valores simulados y el de valores medidos. El MAE es un parámetro poco influenciado por valores atípicos y debido a su carácter absoluto, no permite identificar si hay sobre o sub predicción del modelo con respecto a los valores medidos. En las ecuaciones siguientes los paréntesis angulares denotan promedio y las líneas rectas modulo; Y es el conjunto de valores simulados y X el de valores medidos.

$$MAE = \langle |Y_j - X_i| \rangle \quad (36)$$

El *Relative Mean Absolute Error* (RMAE) equivale a la división del MAE entre el promedio del conjunto de datos medidos (Ecuación 37). El mejor resultado corresponde a un valor de cero, pero debe analizarse con cautela, debido a que los datos aún están afectados por los errores de medición.

$$RMAE = \frac{MAE}{\langle |X_i| \rangle} \quad (37)$$

Finalmente, y con el fin de tener en cuenta el error de las mediciones, se utiliza el *Adjusted RMAE* (ARMAE), en el cual se resta a las diferencias absolutas de mediciones y predicciones el error de las observaciones (*OE*) (Ecuación 38). Valores negativos en el numerador se convierten a cero antes de promediar. Al igual que otros estadísticos derivados de la relación de dos cantidades, el RMAE y el ARMAE son muy sensibles a cambios en el denominador, en especial, cuando éste es pequeño.

$$ARMAE = \frac{\langle |Y-X| - OE \rangle}{\langle |X| \rangle} \quad (38)$$

El error de observación (*OE*) correspondió a 4.64 mg/l y se obtuvo a partir de la precisión que ofrece el método de filtración empleado (American Public Health Association et al., 1998) y del valor medio de las mediciones obtenidas para las tres campañas de medición.

Los estadísticos mencionados han sido utilizados por Van Rijn et al. (2003) y Sutherland et al. (2003) para proponer metodologías de calificación cualitativas, éstas se han enfocado en variables morfológicas e hidrodinámicas como la velocidad de las corrientes, la altura significativa del oleaje y perfiles de lecho base.

Las concentraciones de sedimentos por su parte, aun no cuentan con un sistema de calificación con escala cualitativa (Winter, 2007), por lo que los modelos que las reproducen se han considerado muy acertados cuando sus resultados se encuentran dentro del rango de un factor de 2, el cual corresponde un *RMAE* variando entre 0,5 y 1,0 (Davies et al., 2002). Premisa que fue utilizada para la evaluación del modelo construido en el presente estudio.

7.1 CALIBRACIÓN

La calibración es el proceso en el que se ajustan los parámetros físicos del modelo con el fin de lograr la mejor reproducción de la realidad, aun así, a medida que se mejora la calidad de los resultados en ciertas zonas o periodos de tiempo, esta puede deteriorarse en otros, por lo que debe buscarse un punto de equilibrio.

La calibración comprendió la tercera campaña de medición (sección 5.2.3) realizada durante el periodo de transición estacional entre el 18 de Noviembre y el 3 de Diciembre de 2011, en el que se contó con un total de 74 puntos de monitoreo distribuidos en diferentes zonas del área de estudio (véase Figura 42).

Conociendo de antemano que las corrientes superficiales son uno de los principales mecanismos de transporte de sedimentos en el golfo como consecuencia de los flujos estratificados que allí tienen lugar, y dada la falta de datos de concentración de sedimentos en profundidad para este periodo, la calibración debió realizarse con datos superficiales.

En este periodo se tuvieron vientos de dirección variable que alcanzaron a superar los 7 m/s al final de la simulación. La humedad relativa y temperatura promedio fueron de 86% y 27 °C respectivamente. La altura significativa del oleaje (H_s) fue menor a 1,5 m y con dirección predominante noreste. Finalmente, las concentraciones de sedimentos medidas en el golfo (afuera de los ríos) llegaron a un máximo de 90 mg/l cerca al delta del río León. Detalles de las condiciones climáticas usadas en la modelación de este periodo se presentan en la Figura 42.

Durante la calibración del modelo se variaron los parámetros físicos uno a la vez según la relevancia que tuvieron en el análisis de sensibilidad. Los valores utilizados para cada parámetro se presentan en la Tabla 14; para cada uno de ellos, se compararon las concentraciones de sedimentos simuladas con las medidas en las 74 estaciones mencionadas anteriormente en los mismos tiempos y se calcularon los parámetros estadísticos MAE, RMAE y ARMAE. De igual

manera, se analizaron en detalle los resultados particulares en zonas como el delta y prodelta del Atrato, el norte del golfo y Bahía Colombia, con el fin de mantener una buena calidad de la solución en las diferentes regiones del área de estudio.

Tabla 14. Valores de parámetros físicos evaluados en la calibración del modelo

Parámetro	Valores
Coefficiente de rugosidad de Manning*	0,015-0,02-0,021-0,023
Cortante crítico de erosión (N/m ²)*	0,8-1,5-2,0-4,0
Tasa de erosión (kg/m ² /s)	0,00025-0,000375-0,0005-0,005
Velocidad de asentamiento en agua fresca (mm/s)	0,01-0,05-0,1-0,20
Velocidad de asentamiento en agua salada (mm/s)	0,05-0,1-0,15-0,20
Escala Ozmidov	0-0,01-0,1
Cortante crítico de sedimentación (N/m ²)	1,0-1,5-2,0- 2,5
Viscosidad de remolino vertical (m ² /s)	0,0002-0,00035-0,0005-0,001
Difusividad de remolino horizontal (m ² /s)	10-40-60-80
Difusividad de remolino vertical (m ² /s)	0-0,0005-0,001-0,002
Viscosidad de remolino horizontal (m ² /s)	400-500-700
Coefficiente de dragado del viento a 0 m/s	0,001-0,005-0,00723-0,009

*Parámetros sometidos a variación espacial

En la metodología implementada, una vez se tenían los resultados de las simulaciones construidas a partir de las variaciones de un primer parámetro, se procedía a fijar para las simulaciones siguientes, aquel parámetro que había generado la solución con los menores errores y cuyos resultados habían generado la mejor aproximación a la física del fenómeno representado.

A pesar de que en esta metodología se van fijando valores de parámetros (uno a la vez), permite evaluar el desempeño del modelo bajo diferentes combinaciones de valores de otros parámetros. Una vez finalizado un primer ciclo, es recomendable hacer uno nuevo en caso de que los errores obtenidos así lo ameriten. Procedimiento que fue realizado para los tres parámetros que resultaron ser los que modificaban notoriamente las concentraciones en el periodo evaluado

(velocidad de asentamiento de los sedimentos cohesivos, cortante crítico de erosión y coeficiente de rugosidad de Manning).

Adicionalmente, el coeficiente de rugosidad Manning y el cortante crítico de erosión se sometieron a variación espacial en los deltas de los ríos Atrato y León, como resultado del desconocimiento y variabilidad de estas zonas, lo cual dificulta los procesos de selección de los parámetros.

En la Tabla 15 se presentan los parámetros evaluados junto con sus valores calibrados. Para el caso del cortante crítico de erosión, un valor de 4 N/m² debió utilizarse en el delta del Atrato con el fin de regular la resuspensión de los sedimentos en esta zona de poca profundidad. Valores inferiores del parámetro llevaban a la predicción de concentraciones superiores a 800 mg/l (valor mucho mayor a los máximos medidos en las tres campañas de medición).

Tabla 15. Parámetros calibrados del modelo

Tipo	Parámetro	Valor
Numérico	Celdas	21961
	Capas (% del total de la profundidad)	1 – 5
		6 – 15
		16 – 20
	Intervalo de cálculo (minuto)	1
Físico	Coeficiente de dragado del viento a 0 m/s	0,001
	Coeficiente de dragado del viento a 100 m/s	0,00723
	Coeficiente de rugosidad de Manning	0,015
	Viscosidad de remolino horizontal (m ² /s)	500
	Difusividad de remolino horizontal (m ² /s)	80
	Viscosidad de remolino vertical (m ² /s)	0,001
	Difusividad de remolino vertical (m ² /s)	0
	Velocidad de asentamiento de partículas cohesivas en agua fresca (mm/s)	0,01
	Velocidad de asentamiento de partículas cohesivas en agua salada (mm/s)	0,05
	Cortante crítico de sedimentación (N/m ²)	1
	Cortante crítico de erosión (N/m ²)	Delta del río Atrato : 4,0 Golfo: 1,5
	Tasa de erosión (kg/m ² /s)	0,0005
	Escala Ozmidov	0

En este punto, el modelo sub-predijo las concentraciones de sedimentos superficiales en la zona del prodelta del Atrato, pero en el resto de las áreas del golfo se encontró una buena concordancia entre mediciones y predicciones, tal como se presenta en la Figura 44, en la que se observan las mediciones como puntos superpuestos sobre un momento instantáneo de la simulación con resultados típicos del periodo simulado.

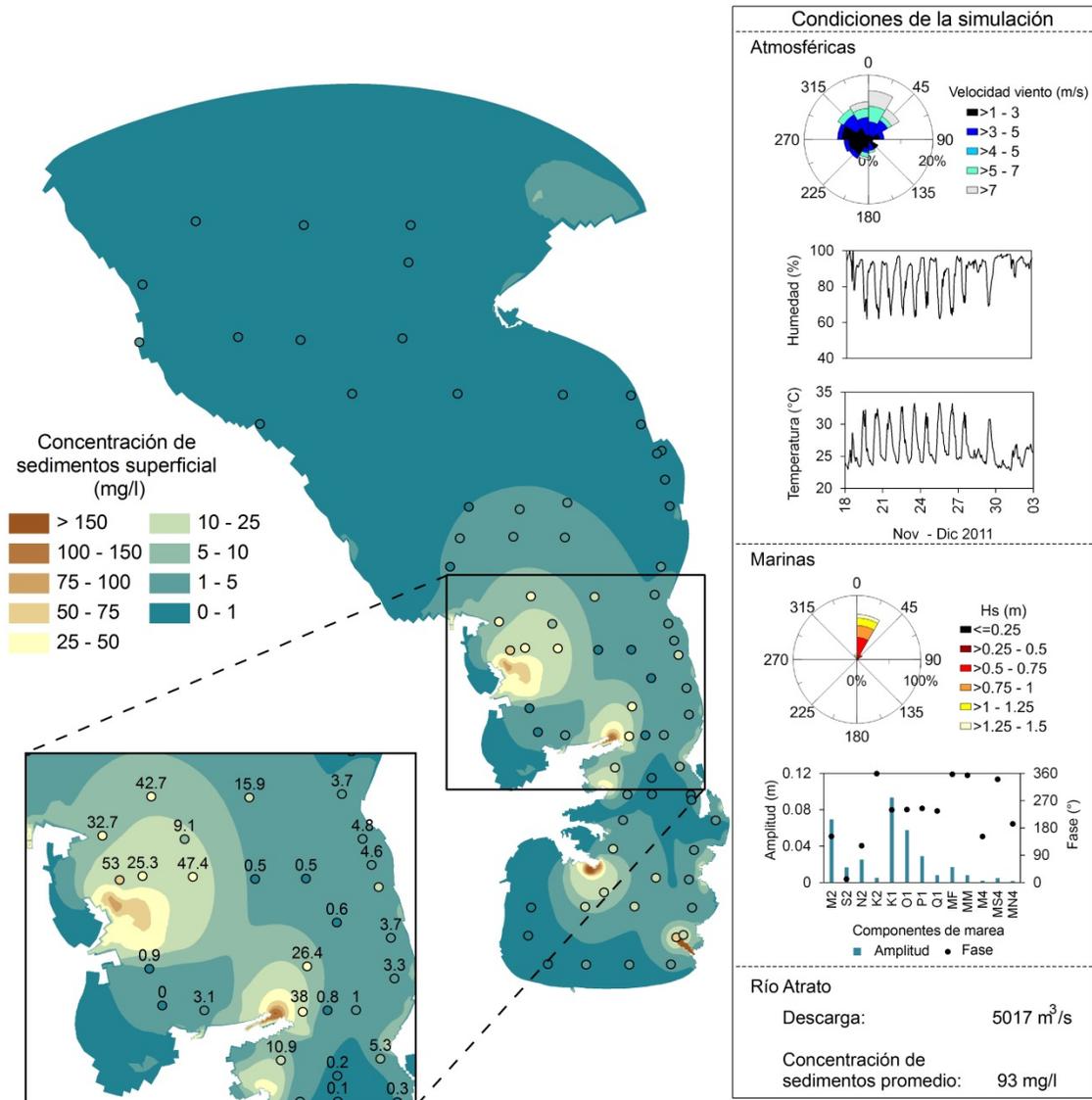


Figura 44. Concentración de sedimentos superficial medida (puntos) y modelada (fondo) y forzamientos externos para el periodo de calibración (Noviembre 2011)

En la Figura 44 se observa como el modelo reprodujo adecuadamente las bajas concentraciones de sedimentos superficiales en la zona norte del golfo y en Bahía Colombia. Las áreas cercanas a las bocas Leoncito, Matuntugo y el Roto y al río León son zonas de transición entre concentraciones nulas y concentraciones del orden de los 100 mg/l; allí, el modelo genera una dispersión que se asemeja en gran medida a la registrada por las mediciones, las diferencias más notables se presentan en cercanías del Roto, donde el modelo genera concentraciones más bajas que las medidas.

Durante la calibración se intentó mejorar la reproducción de las concentraciones cerca al Roto, pero esto generaba problemas en puntos de monitoreo más alejados de la boca, finalmente se seleccionaron los parámetros que sin desmejorar los resultados en la zona del prodelta, reprodujeran razonablemente las concentraciones en las zonas restantes del golfo.

Al final del proceso de calibración se obtuvo un MAE, RMAE y ARMAE de 5,1 mg/l, 0,65 y 0,41 respectivamente. La sensibilidad del error relativo (RMAE) a cambios en concentraciones bajas, hace que éste alcance un valor de 0,65, el cual es ajustado una vez se incluye el error de las observaciones, para obtener un ARMAE final de 0,41. El ajuste de las concentraciones simuladas y las medidas se presenta en la Figura 45, en la cual se evidencia que el modelo sub-predijo las concentraciones más altas y reprodujo adecuadamente las bajas. El 28% de los de los 74 puntos de monitoreo se ubicó dentro del rango de un factor de 2, mientras que el 80% dentro de un factor de 5.

Para el periodo evaluado, tanto las mediciones como los resultados de la simulación están mostrando que las mayores concentraciones de sedimentos se ubican en las cercanías de las bocas del Atrato y el río León. A partir de esos focos de alta concentración se generan plumas turbias que transportan sedimentos finos y que se van atenuando con la distancia a los deltas. Las zonas

de aguas más profundas donde las concentraciones son prácticamente nulas están indicando una predominancia de la influencia marina sobre la fluvial y comprenden específicamente el norte del golfo.

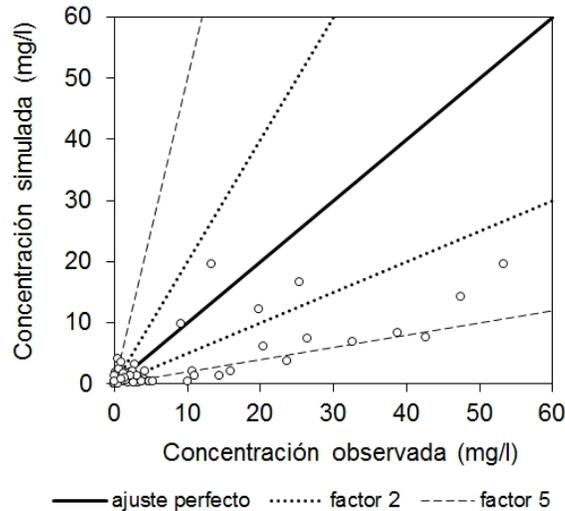


Figura 45. Ajuste entre concentraciones simuladas y observadas para el periodo de calibración

A pesar de que para este periodo simulado no se cuentan con mediciones de salinidad y concentración a diferentes profundidades, en la Figura 46 se presentan perfiles típicos de ambas variables simuladas en diferentes zonas del golfo para identificar de manera cualitativa si el modelo está reproduciendo un flujo estratificado. Los resultados corroboran que el modelo logra simular una capa superficial de agua menos densa (correspondiente a la pluma del río Atrato) con un espesor inferior a 5 m responsable de la dispersión de los sedimentos en la zona del prodelta y hacia zonas de aguas profundas.

Los perfiles permiten inferir que las regiones más estratificadas se encuentran cerca al delta del Atrato (puntos d, e y f) y las menos al norte, estos resultados coinciden de manera general con los presentados por estudios previos realizados en la región como los de García (2007) y Montoya (2010). Aun así, debe tenerse

en cuenta que la evaluación del grado de estratificación del flujo deberá hacer parte de estudios futuros.

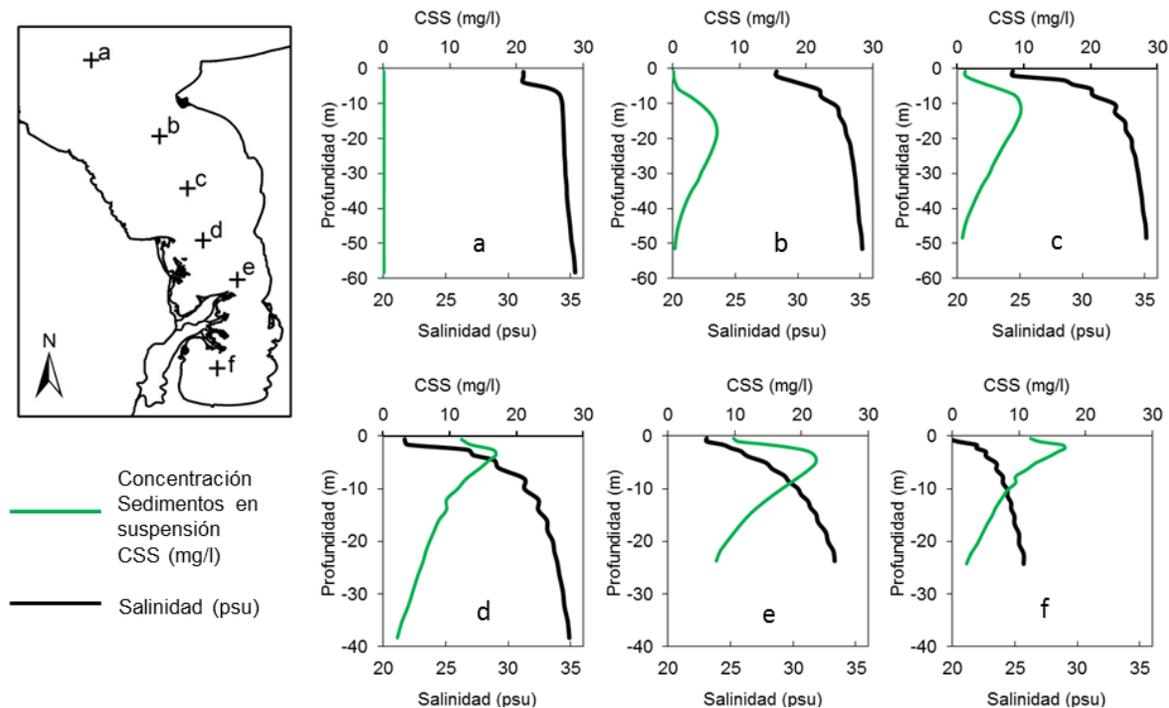


Figura 46. Perfiles de salinidad y concentración de sedimentos típicos simulados en el periodo de calibración

Finalmente, teniendo en cuenta el ajuste y los parámetros estadísticos calculados, se puede decir que el modelo logra una buena reproducción de las concentraciones de sedimentos superficiales en el golfo y razonable en las zonas cercanas a los deltas. Adicional a los resultados estadísticos, la calificación buena del modelo se sustenta en el hecho de que se logra la reproducción de un flujo estratificado que genera una pluma que viaja en los primeros 5 m de profundidad y cuya influencia con la distancia al delta del río Atrato va disminuyendo.

Posibles causas de los errores obtenidos (con tendencia general de subpredicción cerca al delta del Atrato) son el desconocimiento de la batimetría del delta del Atrato, las suposiciones a las que se tuvo que recurrir por la misma, la

invariabilidad temporal de las descargas de este afluente y la curvatura superior que el modelo está generando de los perfiles de concentración.

Adicionalmente, lograr simular un flujo altamente estratificado es complejo, por lo que reducir el espesor de la pluma y por ende generar zonas de mayor concentración podrían ser puntos claves a trabajar en el futuro para mejorar el desempeño del modelo; a este trabajo, se suma identificar si el grado de estratificación simulado por el modelo en su estado actual corresponde al que se puede presentar en el cuerpo de agua bajo diferentes condiciones climáticas.

7.2 VALIDACIÓN

Luego de la calibración de los parámetros físicos se procedió a continuar con la validación, la cual consiste en reproducir periodos de tiempo diferentes para evaluar el desempeño del modelo con sus parámetros calibrados. Su finalidad es llevar a conclusiones acerca de las predicciones del modelo bajo diferentes condiciones atmosféricas, hidrológicas y oceanográficas (Fleming, 2000), por lo que se utilizaron los datos de las dos campañas de medición restantes para verificar el modelo tanto en superficie como a diferentes profundidades.

7.2.1 Caso 1

La primera validación se realizó para una época húmeda en la que se presentaron condiciones de oleaje fuerte por el paso del huracán Tomas por el Caribe, a pesar de que el modelo se corrió para todo el mes de octubre, la comparación de datos se realizó específicamente los días 6 y 7 de noviembre de 2010 en los cuales se tomaron muestras a 0, 3, 5 y 10 m en 30 estaciones (Figura 15). Con la simulación de este periodo se pretendió verificar que tan acertadas son las predicciones de las concentraciones de sedimentos del modelo en las tres dimensiones.

En los días de las mediciones, el viento no superó los 2 m/s y su dirección predominante fue oeste-suroeste. La humedad relativa y temperatura promedio fueron de 87 % y 26°C respectivamente, la altura de ola significativa (H_s) promedio fue de 1,6 m y la máxima de 2 m mientras su dirección predominante al norte del golfo fue noroeste. La descarga líquida del Atrato corresponde a la medida en las bocas para esas fechas (Tabla 10) y la sólida se obtuvo del promedio de las concentraciones medidas en las dos campañas de medición restantes. Detalles de los forzamientos utilizados se muestran en la Figura 47.

Las concentraciones medidas en el golfo durante el periodo de la validación no superaron los 50 mg/l y los valores más altos se registraron en superficie. De igual manera, en la simulación para el periodo respectivo, las concentraciones más altas se presentaron a 0 m en especial cerca a los deltas del Atrato y el río León, tal como se observa en la Figura 47, donde se superponen las mediciones (puntos) sobre las concentraciones simuladas a cuatro profundidades. Esta distribución en profundidad ratifica el transporte en plumas que ocurre en el golfo.

Los parámetros estadísticos MAE, RMAE y ARMAE obtenidos para la validación fueron 4,2 mg/l, 0,81 y 0,24 respectivamente. El incremento del RMAE con respecto al obtenido en la calibración, responde en parte, a la comparación de bajas concentraciones medidas y simuladas en aguas profundas y hacia el norte del golfo. En contraste, los ARMAE están por debajo de 0,5 en las profundidades evaluadas, lo cual es un buen indicio del desempeño general del modelo.

En la Tabla 16 se encuentra la distribución de los errores en profundidad, de donde es claro que los mejores resultados se obtuvieron a 3 m de profundidad seguidos por los de 5 m. Como se observa en la misma tabla, el modelo tiende a sobre-predecir las concentraciones de sedimentos a partir de los 3 m, a esta profundidad en 10 de las 30 estaciones hubo predicciones que excedieron a las mediciones en un promedio de 2,2 mg/l. El número de estaciones con la misma

tendencia incrementó a 15 y 19 a los 5 y 10 m de profundidad y el promedio de esta excedencia fue de 5 y 6 mg/l respectivamente.

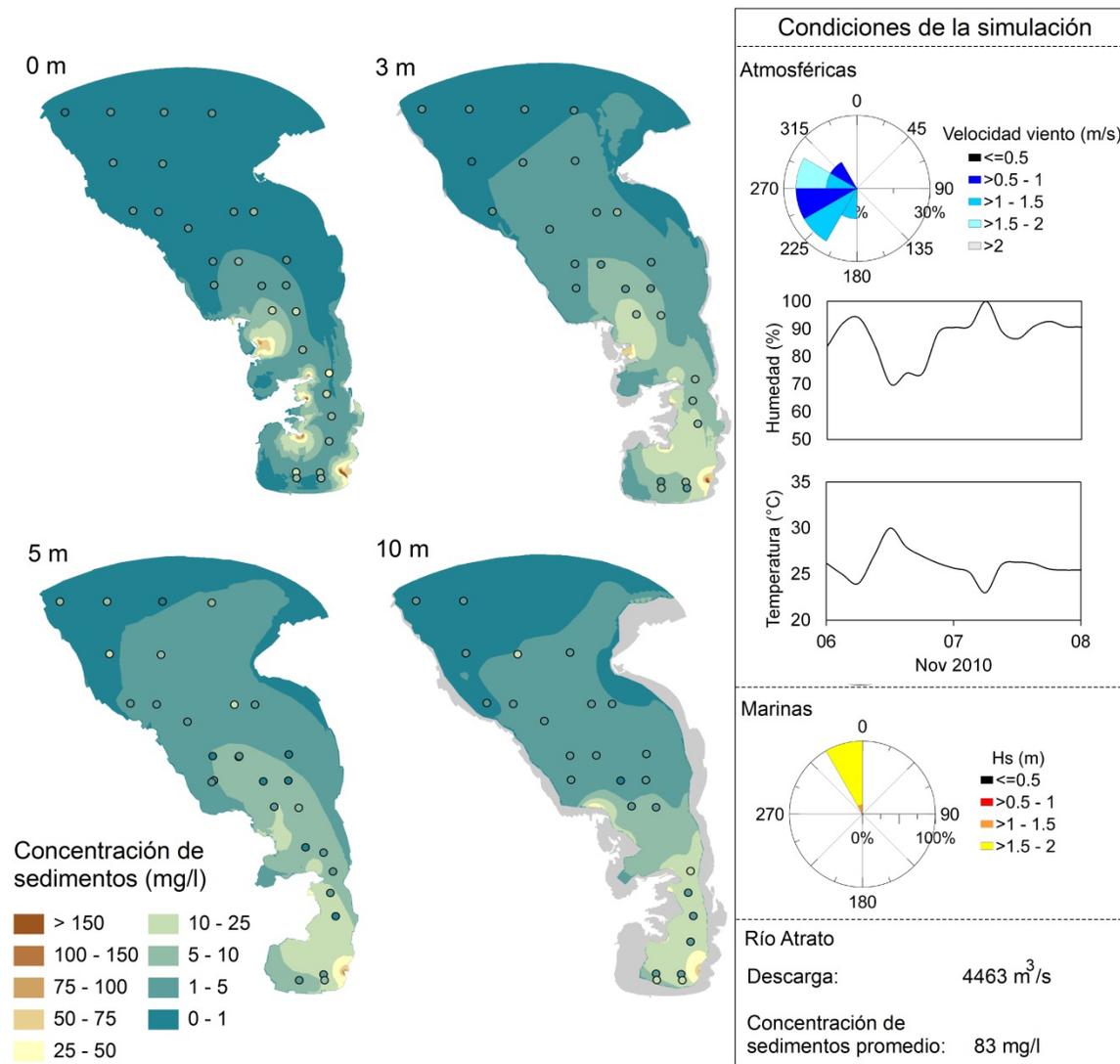


Figura 47. Concentración de sedimentos medida (puntos) y modelada (fondo) y forzamientos externos para el primer periodo de validación (Noviembre 2010)

El dato puntual con el mayor error de este periodo se obtuvo en superficie cerca de Matuntugo. El grupo de estaciones con los errores más altos se ubicaron en Bahía Colombia cerca al río León, donde la incertidumbre con respecto a los datos batimétricos es muy alta debido a los continuos dragados que se realizan en esta

zona del golfo. El ajuste punto a punto entre las concentraciones observadas y las medidas arrojó que el 39% de los datos están en el rango de un factor de 2 y el 71% en el de un factor de 5, tal como se observa en la Figura 48.

Tabla 16. Parámetros estadísticos de la validación distribuidos en profundidad

Fecha	Profundidad (m)	MAE (mg/l)	RMAE	ARMAE	Estaciones sobre-predicción
6 y 7 Nov. 2010	0	5,66	0,77	0,30	1
	3	2,55	0,54	0,01	10
	5	3,89	0,90	0,21	15
	10	4,59	1,10	0,43	19

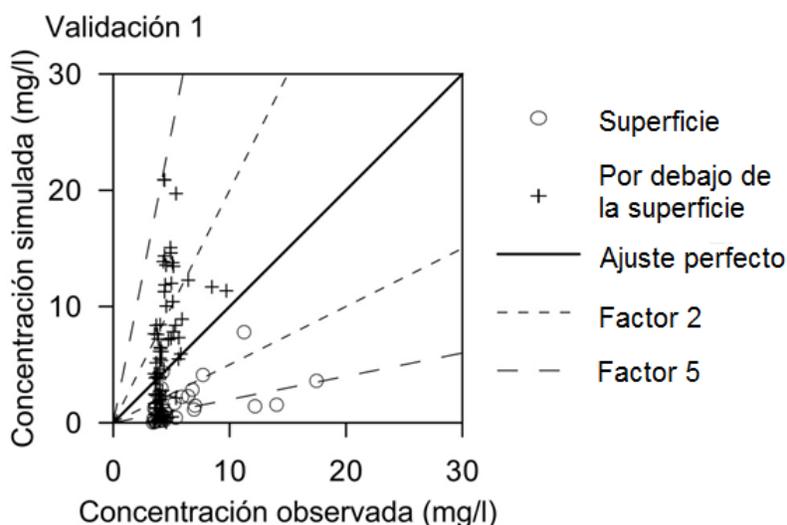


Figura 48. Ajuste entre concentraciones simuladas y observadas para el primer periodo de validación

Para este periodo, las plumas de sedimentos modeladas que salen del Roto y Matuntugo, estuvieron evidentemente direccionadas hacia el norte y delimitadas desde la superficie hasta los 3 m de profundidad, a partir de los cuales tendieron a desvanecerse. Por otra parte, las plumas salientes de la boca Leoncito y el río León permanecieron incluso hasta los 10 m de profundidad en las zonas que abarcan sus prodeltas. La pluma en esta zona pareció debilitarse en comparación con aquellas expuestas a mayor influencia marina.

Tanto las mediciones como los resultados del modelo indican que los sedimentos están siendo transportados en capas superficiales por los chorros de salida del río Atrato. Las concentraciones de sedimentos a partir de los 5 m de profundidad son muy bajas (prácticamente despreciables) en todo el golfo, a excepción de la zona de estrechamiento máximo y a las cercanías del río León.

El hecho de que la sobre-predicción de las concentraciones de sedimentos se haya incrementado con la profundidad, es un indicativo de que procesos de mezcla y turbulencia podrían estar afectando el espesor de la pluma simulada.

Caso 2

El segundo ciclo de validación se realizó con los 37 datos de turbidez tomados en época seca entre el 6 y 8 de abril de 2010 (Figura 49). Los valores de turbidez fueron convertidos a concentración de sedimentos por medio de la ecuación que relacionó ambas variables (Figura 16), por lo que de antemano se debe tener en cuenta que las mediciones tienen un error implícito proveniente de dicha correlación.

Para este periodo el viento fue menor 3 m/s, la humedad relativa y temperatura promedio fueron de 84 % y 28 °C respectivamente, mientras la altura significativa de ola (Hs) se mantuvo entre 1 y 2 m con un máximo de 3,2 m alcanzado en los primeros días de la simulación. La concentración máxima obtenida a partir de turbidez fue de 18 mg/l y se ubicó afuera de Matuntungo (véase Figura 49).

Los parámetros estadísticos MAE, RMAE y ARMAE para este segundo caso de validación, fueron 6,18 mg/l, 0,78 y 0,25 respectivamente. El error absoluto más alto alcanzó los 15 mg/l y se obtuvo en la estación ubicada en la zona norte del golfo (véase Figura 49), de la cual se sospecha, tenga un alto error en la medición debido a las bajas concentraciones obtenidas para las muestras vecinas.

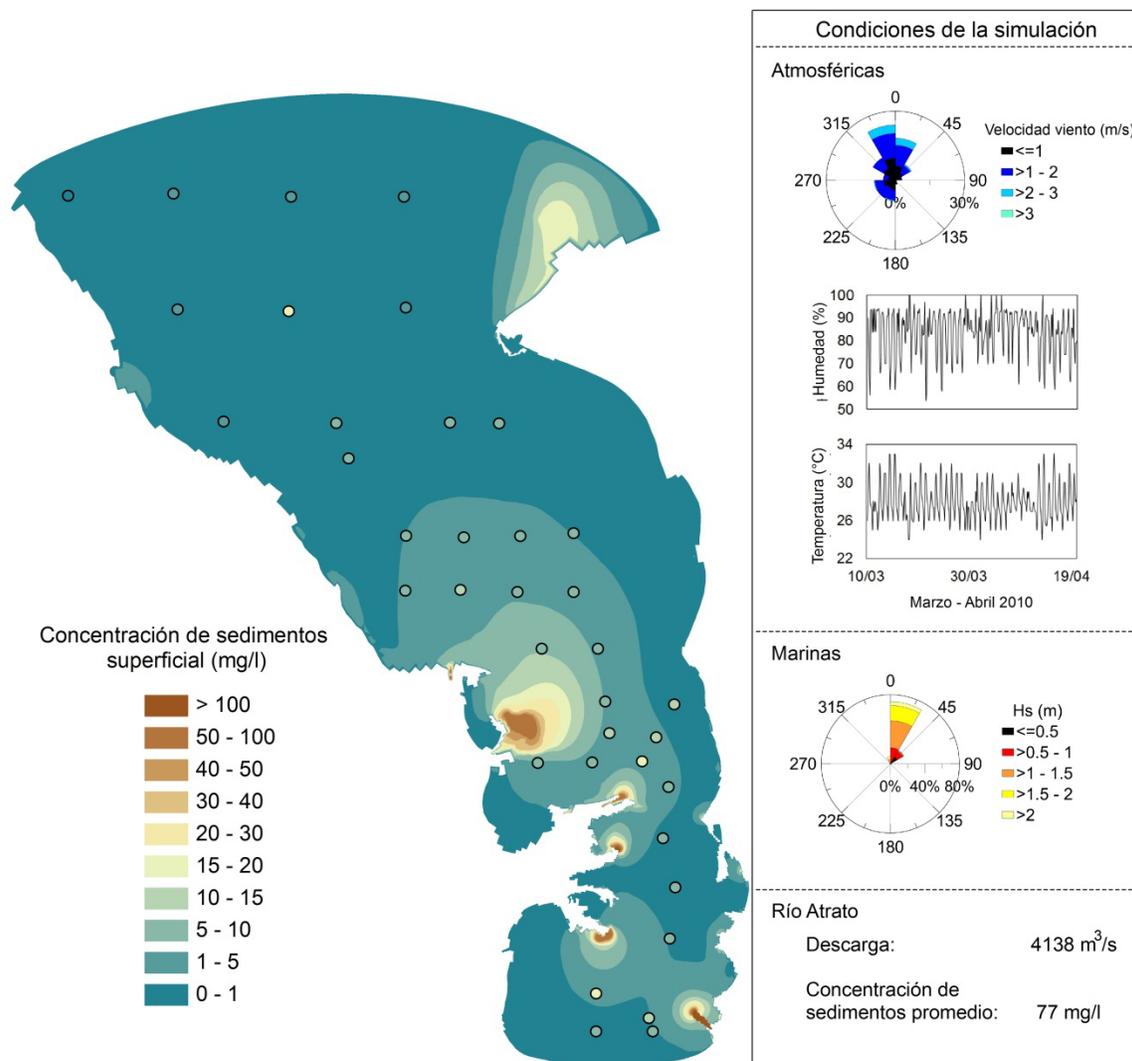


Figura 49. Concentración de sedimentos medida (puntos) y modelada (fondo) y forzamientos externos para el primer periodo de validación (Abril 2010)

De la correlación entre las concentraciones simuladas en 37 puntos, 16% de los datos se ubicaron en un rango de un factor de 2 y 35 % en un rango de un factor de 5 (Figura 50). Para este periodo igual que en la calibración y en el primer caso de validación, el modelo tuvo una tendencia a sub-predecir las concentraciones de sedimentos superficiales.

Finalmente, se puede decir que este último caso coincide con los dos primeros evaluados en aspectos como las altas concentraciones cerca al delta del Atrato

que van disminuyendo con la distancia al mismo, ratificando que la descarga de este afluente es un factor determinante no solo en cuanto al aporte de sedimentos al golfo, sino en el transporte de los mismos al interior del cuerpo de agua en plumas boyantes que se generan por los gradientes de densidad entre el río y el mar.

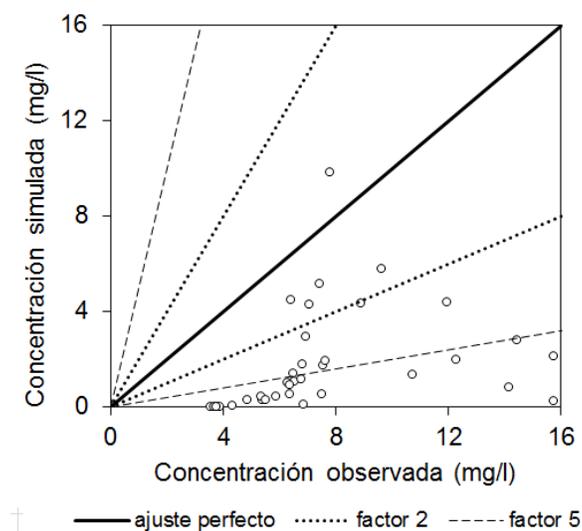


Figura 50. Ajuste entre concentraciones simuladas y observadas para el segundo periodo de validación

En punta Caribaná las concentraciones que se generan no son consecuencia directa de la descarga del río Atrato sino que están relacionadas con procesos de resuspensión a causa del oleaje que incide directamente sobre esta región de poca profundidad.

7.3 DISCUSIÓN

Los procesos de calibración y validación llevados a cabo siguieron las premisas utilizadas en estudios realizados en estuarios en los que la concentración de sedimentos es utilizada como variable de referencia para evaluar el desempeño del modelo (Chevict et al., 2002; Liu et al., 2002; Hu et al., 2009, entre otros).

La calibración de los parámetros físicos del modelo matemático llevó a una reproducción de las concentraciones de sedimentos que puede calificarse cualitativamente como buena en la zona norte y central del golfo y razonable en las cercanías de los deltas de los ríos Atrato y León. Este comportamiento junto con la tendencia general de sub-predicción de las concentraciones superficiales fue igualmente obtenido en los dos casos de validación.

Los errores alcanzados se explican no solo por los parámetros físicos definidos, sino que además juegan un papel importante las suposiciones a las que se tuvo que recurrir según la disponibilidad de información, entre ellas están por ejemplo, la invariabilidad temporal de las descargas líquidas y sólidas de los ríos y el uso de información climática generada por modelos globales.

Los MAE para los casos evaluados en periodo de transición, época húmeda y seca durante la calibración y los dos casos de validación respectivamente, indican que los errores medios no superaron los 7 mg/l. Si se tiene en cuenta que el error medio de las mediciones es 4,64 mg/l, es claro que el desempeño del modelo fue en general bueno y permite reproducir las concentraciones de sedimentos en el golfo bajo las diferentes épocas climáticas de la región.

En cada uno de los periodos evaluados las corrientes del río Atrato y el río León son los principales medios de transporte de sedimentos en el golfo. El movimiento de las partículas obedece principalmente a los términos convectivos que las direccionan en el sentido de las corrientes. Las partículas logran permanecer en suspensión en capas superficiales hasta que la mezcla con aguas marinas en zonas alejadas del delta, incrementa la salinidad superficial y se acelera la sedimentación de los finos.

Tanto las mediciones como los resultados de las simulaciones, indican que la variabilidad espacial de las concentraciones de sedimentos en el golfo está directamente relacionada con la proximidad al delta del Atrato. Las

concentraciones medidas más altas para los tres periodos evaluados se localizaron cerca al Roto, Matuntugo y Leoncito. La descarga de agua dulce del río Atrato protege a las partículas en suspensión del contacto directo con aguas saladas que aceleran la floculación. Las concentraciones por debajo de la pluma y a partir de los 5 m son prácticamente nulas dada la naturaleza marina de las aguas que allí fluyen.

Las concentraciones de sedimentos en regiones como Punta Caribaná y cercanas a la costa responden al incremento de los esfuerzos de fondo que genera el oleaje y que propician la resuspensión de partículas. En estas áreas las concentraciones más altas se encuentran en el fondo (donde ocurre la resuspensión) y se van disminuyendo a medida que se aproximan a la superficie.

Tanto la calibración como la validación se hicieron con muestras de sedimentos en suspensión, en las cuales teóricamente el contenido de arenas es bajo, en especial si el muestreo se lleva a cabo en aguas profundas del golfo. Lo anterior implica que el modelo fue primordialmente evaluado para los sedimentos finos, y que a pesar de que se hicieron muestreos en cercanías a la costa, a futuro deberá hacerse una evaluación detallada la dinámica de arenas en aguas someras.

Con el fin de reducir los errores en las cercanías de los deltas sin desmejorar la calidad de los resultados en el resto del golfo y a diferentes profundidades, se recomienda como trabajo futuro, la obtención de mayor detalle en la distribución espacial de los sedimentos de fondo y en variables como el cortante crítico de erosión, esto a partir de muestreos de alta resolución espacial en zonas de aguas someras del área estudio.

Nuevamente, la batimetría en los deltas se constituye como una variable fundamental para la adecuada reproducción de las concentraciones en aguas someras. La variabilidad espacio-temporal de los deltas y la acción antrópica en los mismos incrementa la complejidad de la modelación de esas zonas. Futuros

estudios deben incluir en su plan de ejecución, monitoreo batimétrico cerca las bocas del Atrato y al delta del río León en diferentes temporadas climáticas.

El río León afecta las concentraciones de sedimentos en Bahía Colombia, en especial en cercanías a su desembocadura. El efecto que este río llega a tener en las concentraciones de sedimentos en profundidad debe revisarse con especial cuidado, ya que mejoras en esta zona del dominio son recomendadas según las comparaciones entre perfiles de salinidad medidos y simulados.

8. APLICACIONES

Una vez se conoció que el modelo tenía un desempeño entre bueno y razonable en la reproducción de las concentraciones de sedimentos en el golfo de Urabá para tres casos específicos, se procedió a aplicar el mismo para representar los patrones de dispersión de las partículas en las dos temporadas climáticas características de la región (seca y húmeda). Adicionalmente se analizó un evento de alta energía con viento y oleaje incrementados a valores máximos posibles para el golfo según Chevillot et al., (1993) y Osorio et al. (2010).

Estas nuevas simulaciones se realizaron para un periodo de un mes (época seca y húmeda) y de 5 días (evento de alta energía). Este último considerado como la duración aproximada que puede tener un evento extremo en el golfo (v.gr. el paso de un huracán por el Caribe con afectación en el golfo). La duración de un mes para las simulaciones de las épocas climáticas típicas se hizo con el fin de observar las variaciones de concentración en marea viva y muerta.

Para lograr simular patrones de concentración se fijaron los forzamientos externos a valores característicos de cada época, el resumen de los mismos se presenta en la Tabla 17. Las principales diferencias entre temporadas están dadas por el viento, el oleaje y la descarga del río Atrato. Viento débil del sur y oleaje inferior a 1 m proveniente del norte se utilizaron para la época húmeda, por su parte, para la época seca el viento se incrementó 2,7 veces con respecto a la primera temporada y el oleaje proveniente del noreste se fijó en 1,75 m. Las descargas del Atrato corresponden a las medidas en campo durante cada época.

En cuanto al evento de alta energía, este partió de una simulación de la época seca en la que por 5 días se incrementaron las condiciones de viento a 12 m/s y de oleaje a 3 m de altura significativa. Para evaluar el efecto de la dirección del oleaje en las concentraciones de sedimentos en zonas cercanas a la costa, se

simularon 3 casos cada uno de ellos con olas provenientes de noreste (30°), norte (0°) y noroeste (330°).

Tabla 17. Condiciones de simulación para época húmeda, seca y evento de alta energía

Variable	Época Húmeda	Época seca	Evento de alta energía
Descarga media (m ³ /s) y concentración de sedimentos (mg/l) del río Atrato	5016,80 / 83,64	4138,00 / 83,25	4138,00 / 83,25
Tarena	34,40 / 87,38	16,41 / 124,94	16,41 / 124,94
El Roto	3200,93 / 69,57	2849,15 / 75,11	2849,15 / 75,11
Pavas	11,07 / 112,84	15,65 / 105,87	15,65 / 105,87
Matuntugo	753,80 / 76,26	484,12 / 66,93	484,12 / 66,93
Coco Grande	228,00 / 86,91	137,8 / 57,97	137,8 / 57,97
Urabá	11,63 / 45,86	7,41 / 45,86	7,41 / 45,86
Leoncito	776,97 / 107,01	627,87 / 106,07	627,87 / 106,07
Magnitud del viento (m/s)	3,00	8,00	12,00
Dirección del viento (°)	180,00	30,00	30,00
Altura de ola significativa Hs (m)	0,80	1,75	3,00
Periodo al pico del oleaje (s)	5	6,20	9,00
Dirección del oleaje (°)	0	30	0 - 30 - 330
Temperatura media (°C)	27,11	25,05	25,05
Humedad relativa media (%)	81,01	94,95	94,95

8.1 PATRÓN DE DISPERSIÓN DE SEDIMENTOS EN LAS ÉPOCAS SECA Y HÚMEDA

Los resultados obtenidos para las dos épocas climáticas representadas se muestran en la Figura 51, donde en color están las concentraciones y en flechas el transporte por unidad de área de los sedimentos. Los máximos de ambas variables se presentaron durante la época seca y en las afueras de río León y Bahía Colombia. Las diferencias en los resultados entre marea viva y muerta y en un ciclo mareal fueron despreciables.

Es claro que durante la época húmeda se generan plumas de sedimentos superficiales que se originan en el Roto, Matuntugo, Leoncito y el río León (Figura 51 izquierda-arriba). Estas plumas viajan hacia el norte, dirección en la que disminuye su concentración, proceso que probablemente está ligado al efecto del

agua salada en las partículas finas, por medio del cual se da la generación de flóculos y como consecuencia se incrementa la sedimentación en la zona del prodelta.

En el fondo en cambio, durante la época húmeda las plumas mencionadas desaparecieron (Figura 51 izquierda-abajo). El transporte de sedimentos direccionado hacia el sur predominó, lo que incrementó las concentraciones en Bahía Colombia. Para esta temporada, la concentración máxima simulada fue menor a 500 mg/l y se ubicó en el río León. En el delta del Atrato, por su parte, no se superaron los 100 mg/l. El transporte de sedimentos fue superior en superficie y tuvo un máximo de 7 kg/m²/s.

En la época seca (Figura 51 derecha) los sedimentos tendieron a permanecer en la zona central y sur del golfo y no se diferenció una pluma boyante. Los forzamientos incrementados del noreste (viento y oleaje) aumentan la mezcla en el flujo y retienen las partículas en el área más resguardada del cuerpo de agua. Los focos de concentración fueron el Roto y el río León, donde a su vez se presentaron las mayores tasas de transporte con valores que llegaron a los 70 kg/m²/s, 10 veces por encima a los alcanzados en la época húmeda.

La diferencia más evidente entre las concentraciones en superficie y las de fondo para la época seca, está en que en la primera se logra una dispersión de sedimentos un poco mayor (que genera concentraciones del orden de 10 mg/l en la zona central) en comparación con la segunda.

La alta concentración de sedimentos obtenida en la simulación de la época seca con respecto a la húmeda, se puede explicar en parte, por el incremento en la resuspensión de sedimentos en zonas poco profundas a causa del oleaje y de la turbulencia, esta última afectando directamente el término difusivo en el cálculo de la cantidad de sedimentos en suspensión . Adicionalmente, el direccionamiento

hacia el sur del transporte de los sedimentos genera su acumulación en Bahía Colombia, aumentando las concentraciones en esta región.

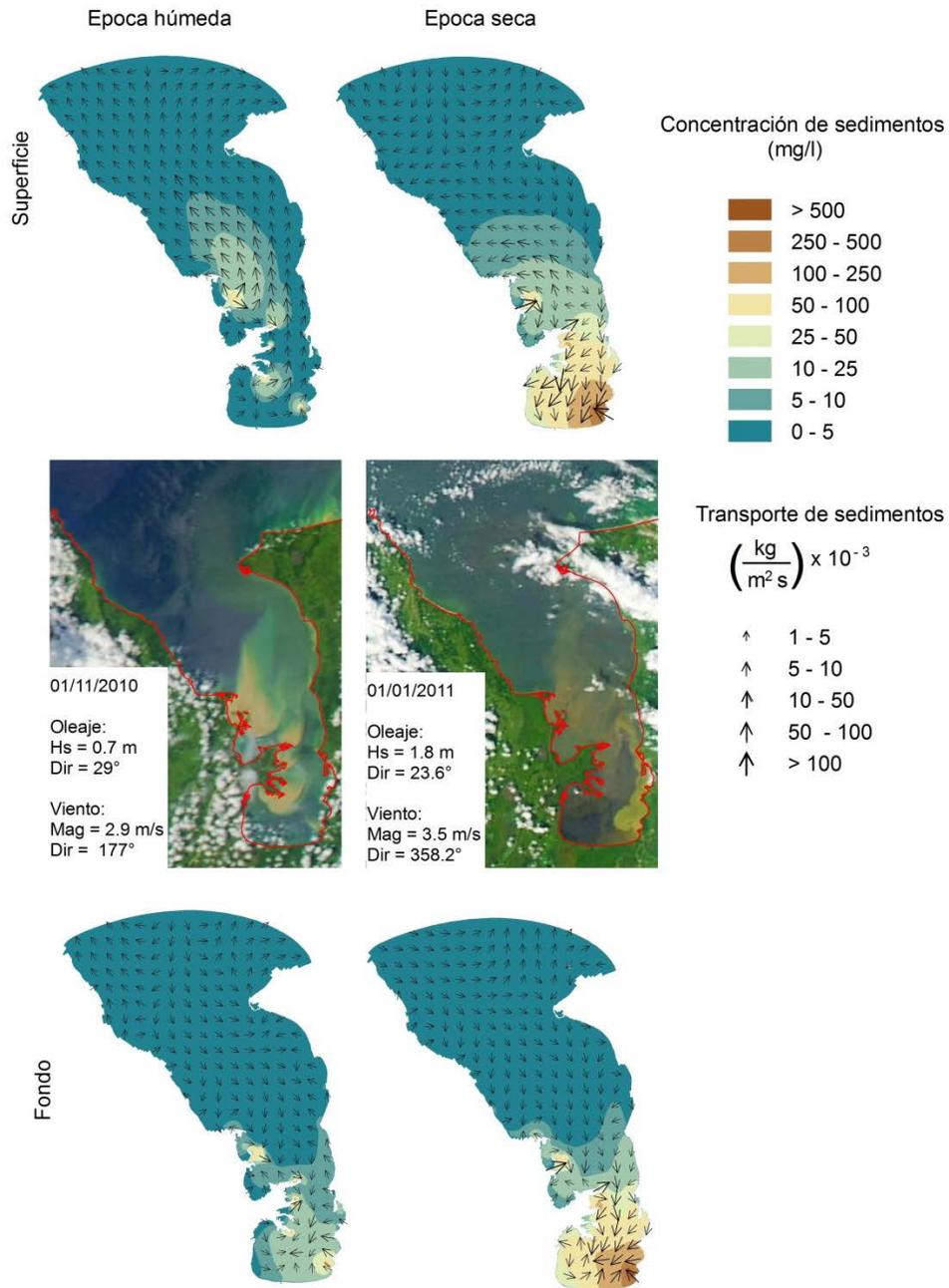


Figura 51. Patrones de concentración y transporte de sedimentos en superficie y fondo para las épocas climáticas del golfo de Urabá e imágenes satelitales MODIS

El transporte de sedimentos gruesos nunca excedió el de finos para ninguna de las dos temporadas climáticas de la región. La presencia de arenas en cercanías a la costa restringe su transporte a estas zonas. La utilización de un solo tipo de sedimento no cohesivo con un diámetro medio de 150 μm puede generar una subpredicción de las concentraciones de gruesos.

El transporte de fondo estuvo también restringido a zonas cercanas a la costa, sus máximos se obtuvieron en Punta Caribaná y en las cercanías de Acandí con valores de $2,65 \times 10^{-3}$ y $5,30 \times 10^{-2}$ kg/s/m en la época húmeda y seca respectivamente. En la costa entre Necoclí y Turbo y cercanías de Tarena, el transporte de fondo representó el 10% del transporte en suspensión, porcentaje que llegó al 80% en Acandí durante la época seca.

A modo de comparación cualitativa se presentan dos imágenes satelitales generadas con el *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), las cuales fueron tomadas en fechas cuyas condiciones de viento y oleaje coinciden aproximadamente con las usadas para las dos épocas climáticas. Se observa como la tendencia general de direccionamiento de las plumas superficiales coincide, además es claro el incremento de las concentraciones cerca al río León en la época seca.

En la Figura 52 se muestran para las dos épocas climáticas los perfiles de concentración de sedimentos en tres secciones transversales ubicadas cerca a las desembocaduras del Roto, Matuntugo y Leoncito. De estos perfiles es evidente un aumento de la concentración durante la época seca en las tres secciones analizadas, dicho aumento es progresivo de norte a sur.

En la época húmeda (Figura 52 izquierda) las concentraciones de sedimentos máximas de las secciones A, B y C se localizan cerca de las tres bocas del Atrato respectivas. La pluma boyante más clara se presentó en la sección A, en la que la concentración de sedimentos disminuye con la distancia al Roto y en profundidad.

La pluma marcada por el contorno de 50 mg/l ocurre en los primeros 3 m de profundidad, mientras concentraciones de hasta 10 mg/l se presentaron a 10 m. En contraste y a pesar de seguir la misma tendencia, durante la época seca el contorno de 10 mg/l alcanzó los 20 m de profundidad y las máximas concentraciones cerca al Roto abarcaron toda la columna de agua.

En la sección B (estrechamiento del golfo), las diferencias entre temporadas climáticas radican en la cobertura de la pluma de sedimentos; En la época húmeda los máximos ocurren cerca de Matuntugo a partir de donde comienza una reducción gradual de las concentraciones tanto en profundidad como con la distancia a la boca. Por su parte, en la época seca el contorno de los 25 mg/l demarca una pluma turbia que alcanza los 10 m de profundidad.

En la sección C (entrada de bahía Colombia) concentraciones máximas del orden de 100 mg/l se presentan en la época húmeda cerca a la boca Leoncito, la pluma marcada alcanza los 4 m de profundidad y se atenúa a medida que se aleja del delta, aun así, concentraciones de hasta 10 mg/l se presentaron en el fondo. Para la época seca se obtuvieron concentraciones de sedimentos superiores a 75 mg/l en toda la sección y se pierde por completo la pluma boyante de la primera temporada. Las altas concentraciones de sedimentos obtenidas en la entrada de la Bahía son el resultado del transporte direccionado hacia el sur (Figura 51) y del incremento en la energía del sistema.

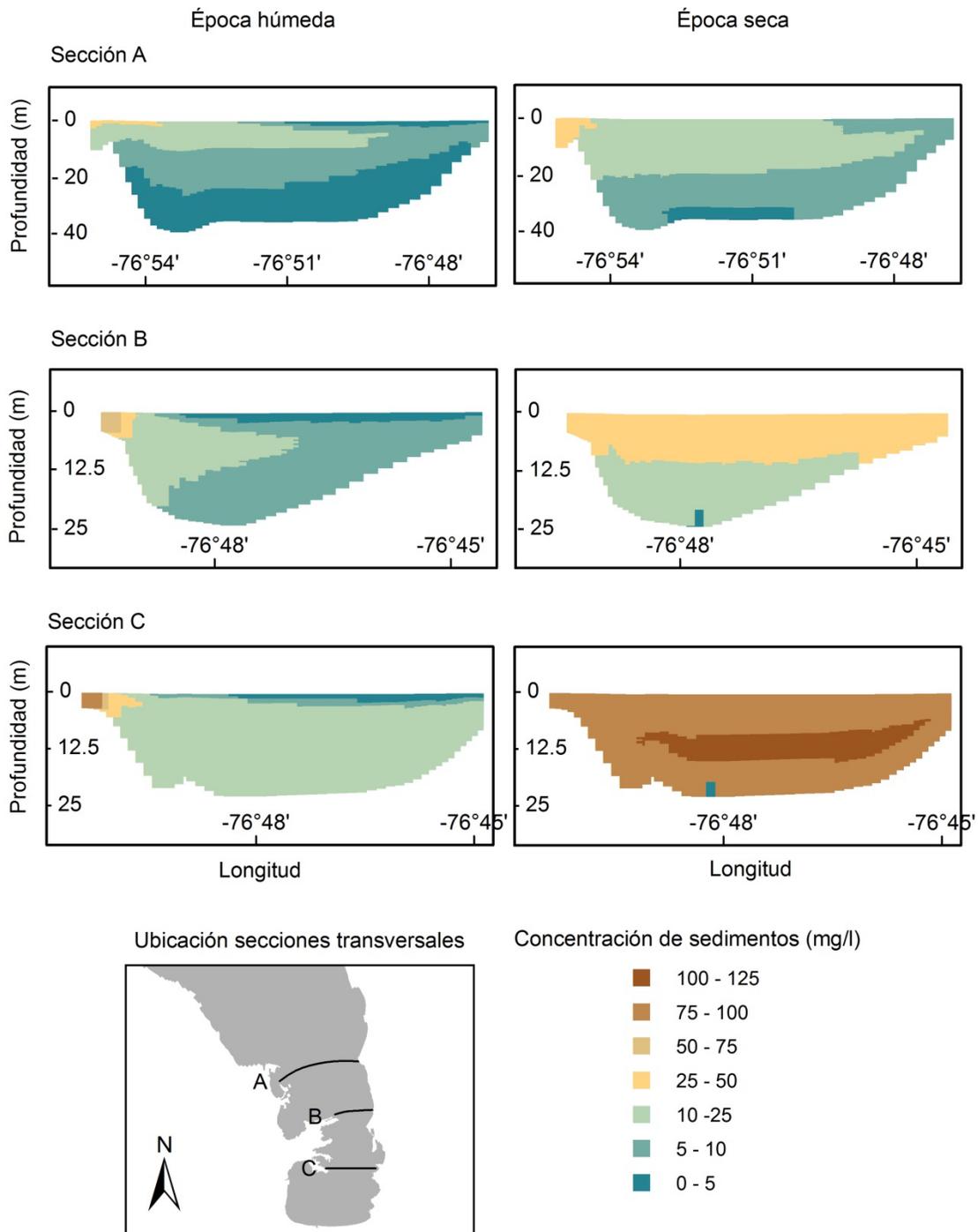


Figura 52. Perfiles transversales de concentración de sedimentos en las épocas seca y húmeda

8.2 CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS ANTE EVENTOS DE ALTA ENERGÍA

Partiendo de tres simulaciones con los forzamientos especificados en la Tabla 17 (columna derecha) se evalúa la respuesta de las concentraciones de sedimentos a tres eventos de alta que energía con una duración de cinco días, cuya única diferencia es la dirección del oleaje entrante por la frontera norte del modelo. Los resultados en superficie y fondo se presentan en la Figura 53.

En general, Punta Caribaná resultó ser un área afectada durante los eventos simulados. Las tres imágenes en superficie indican que hubo un incremento en la dispersión de los sedimentos en esta zona a medida que el oleaje se desplazó hacia el noreste. La costa noroeste del golfo se vio afectada en mayor medida durante el evento con oleaje del noreste, ya que su ubicación hace que lo enfrente directamente. Caso similar ocurrió con la costa este cuando el oleaje provino del noroeste.

El incremento de concentración en Bahía Colombia también mostró cierta dependencia a la dirección del oleaje, a medida que éste se desplazó hacia el oeste, las concentraciones en superficie y fondo frente al delta del Atrato y en la Bahía fueron aumentando en el rango entre los 100 y 250 mg/l.

Durante los tres eventos simulados el transporte por unidad de área alcanzó su máximo ($0,1 \text{ kg/m}^2/\text{s}$) en superficie y direccionado hacia el sur en Punta Caribaná, tal como se aprecia en la Figura 53. Transporte superior a $0,05 \text{ kg/m}^2/\text{s}$ también se presentó cerca al río León y en el costado este del golfo (Entre Necoclí y Punta las Vacas), este último específicamente para el caso con oleaje del noroeste.

Las zonas norte y de aguas profundas del golfo presentaron concentraciones cercanas a cero. De las tres simulaciones se evidenció además, la influencia del oleaje y el viento en las concentraciones de sedimentos en zonas críticas y de puntual afectación como punta Caribaná, Tarena, Acandí y la costa este al sur de

Punta Caimán Nuevo. Al igual que para la época seca, los eventos extremos generan aumentos significativos (superiores a los 100 mg/l) en las concentraciones de sedimentos en Bahía Colombia.

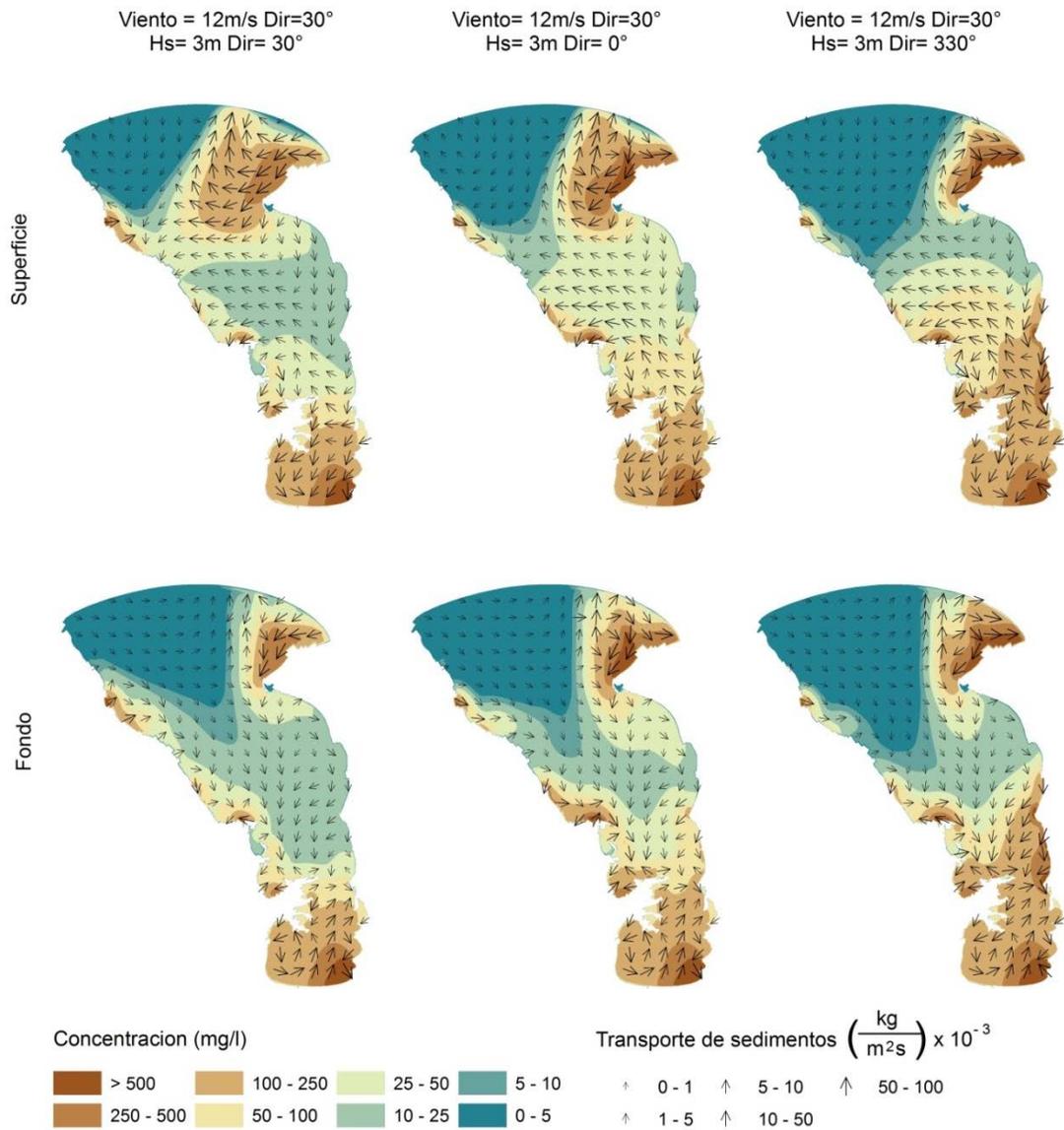


Figura 53. Concentración y transporte de sedimentos en superficie y fondo para tres eventos de alta energía con dirección de oleaje noreste (izq.), norte (centro) y noroeste (der.)

8.3 ZONAS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN A LO LARGO DE LA LINEA DE COSTA DEL GOLFO

Finalmente, y con el fin de identificar si el modelo logra reproducir la pérdida o ganancia de sedimentos en zonas de erosión y sedimentación reportadas en la región (Velásquez y Rave, 1996; Correa y Vernet, 2004; Bernal Franco et al., 2005; Posada y Henao, 2008), se hicieron balances de transporte de sedimentos a lo largo de la línea de costa del golfo.

A partir de las simulaciones de las épocas seca, húmeda y el evento extremo con oleaje del noroeste se obtuvieron las zonas donde el modelo está prediciendo pérdida y ganancia de sedimentos a lo largo de su línea de costa. Los resultados que se presentan son cualitativos y dan una idea general del comportamiento del modelo en estas áreas, en especial, al comparar sus resultados con los reportes de erosión y sedimentación con los que se cuenta para el golfo.

Los resultados se obtuvieron a partir de la generación de secciones de control paralelas y perpendiculares a la línea de costa, a través de las cuales, se hicieron balances de pérdida y ganancia de sedimentos. Dichos balances se realizaron para un periodo de 14,5 días en las dos épocas climáticas típicas y para 5 días en el evento extremo.

El tamaño y la separación de las secciones se eligió según las posibilidades que brinda el software (secciones mínimo de 2 celdas) y de un análisis de sensibilidad en el cual se identificó que secciones perpendiculares muy largas esconden respuestas internas en sus áreas de cobertura que afectan el resultado final de erosión y sedimentación.

Teniendo en cuenta el análisis de sensibilidad realizado, las secciones de control perpendiculares a la costa se generaron con una longitud media de 500 m, alcanzando profundidades que oscilan entre los 5 y 3 m. Las secciones paralelas a

la costa tienen una longitud media de 2.8 km y nunca excedieron 4.5 km. En la Figura 54 se muestra la distribución espacial de las 134 secciones generadas a lo largo del golfo, nótese que en el delta del Atrato se dificultó la creación de secciones de control que cumplieran con las características previamente mencionadas dada la irregularidad en la distribución de las celdas en esta región.

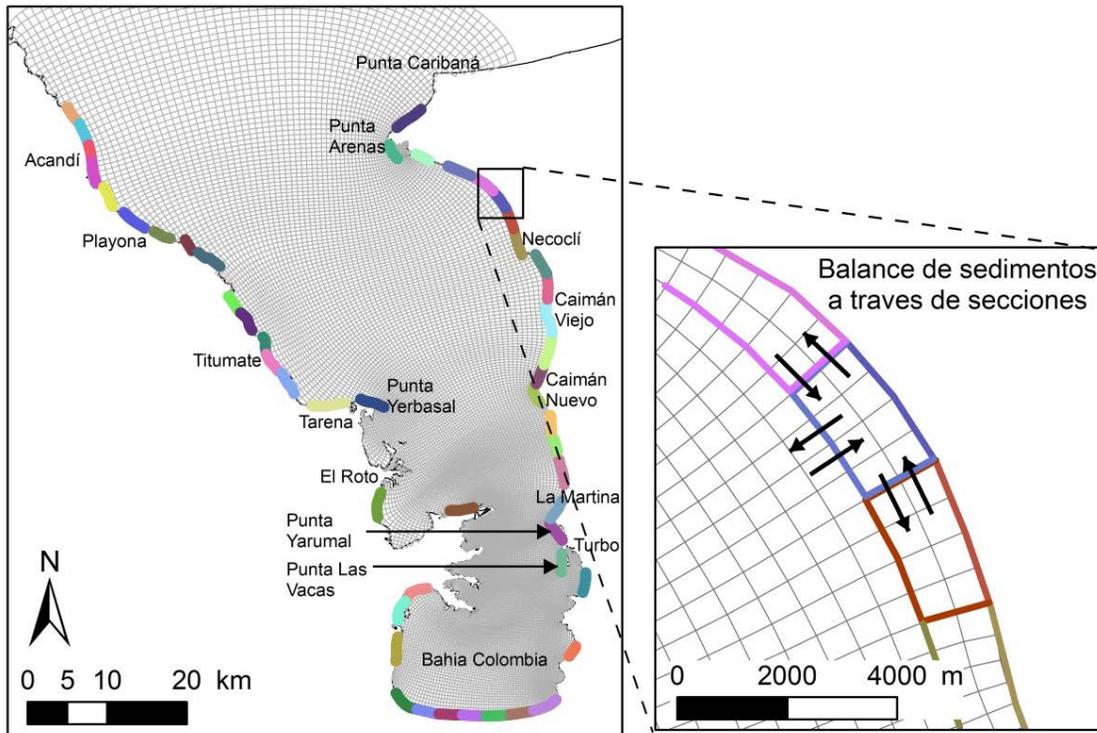


Figura 54. Secciones para el cálculo de balances de sedimentos

Los resultados para las tres temporadas se muestran en la Figura 55, en la primera fila se presenta el transporte total (fondo y suspensión) a través de las secciones para sedimentos gruesos y finos, mientras en la segunda fila se incluye el transporte total (fondo y suspensión) solo de arenas. Las columnas diferencian las temporadas comenzando con la de mayor calma en la izquierda y terminando a la derecha con el evento de más alta energía.

En la misma figura, los tonos entre naranja y rojo indican erosión y los verdes sedimentación. La variación de los colores representa el grado en el que se presentó cada fenómeno y el color negro indica que el transporte acumulado fue despreciable.

Los resultados mostraron que la respuesta erosional en las cercanías a la costa está ligada al aumento de los vientos y el oleaje en el área de estudio. Durante la época húmeda, la dinámica de los sedimentos finos prima sobre la de los gruesos y hay una tendencia generalizada de baja ganancia de partículas cohesivas en ambos costados del golfo. Zonas puntuales de baja erosión de finos se presentaron en Acandí y distribuidas en la costa este.

Para los 14,5 días de la época seca continuó siendo más notable la dinámica de los sedimentos cohesivos, los cuales permanecen al sur a lo largo de la línea de costa de Bahía Colombia, en la desembocadura del río Turbo y sobre Punta Yarumal. La ganancia de arenas está restringida a ciertas zonas de la costa oeste del golfo, a las cercanías de Tarena, Punta Yarumal y Punta Arenas. Por su parte, aparecen zonas de erosión mucho más marcadas que en la época húmeda, específicamente en Playona, Punta Yerbasa y al sur de Punta Caribaná.

Durante las épocas húmeda y seca el transporte de arenas resultó despreciable en Bahía Colombia y desde el sur de Punta Arenas hasta Punta Caimán Nuevo. El oleaje y el viento débiles en la primera temporada y el direccionamiento (30°) de éstos en la segunda, parecen no tener incidencia significativa sobre el transporte de arenas en estas regiones del golfo.

Durante el evento de alta energía, la erosión constituyó la respuesta predominante en ambos costados del golfo. En la categoría de alta erosión, tanto de sedimentos finos como gruesos, se encuentra la costa este entre Necocli y Turbo y en la costa oeste la región comprendida entre Acandí y Playona. Por su parte, en Bahía Colombia persistió la acumulación de finos y se presentó baja erosión de arenas.

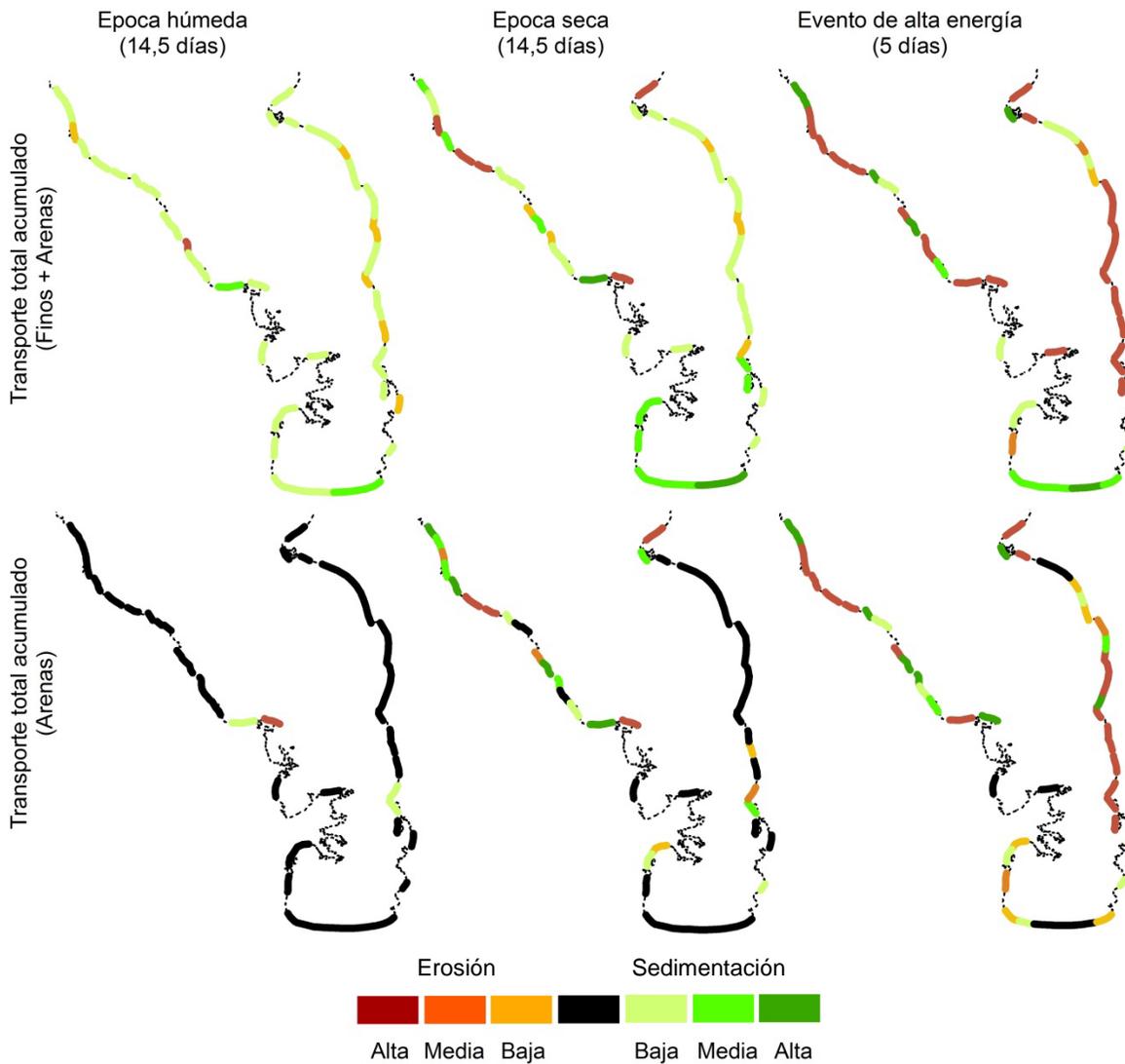


Figura 55. Zonas de erosión y sedimentación según condiciones climáticas. Finos y arenas (arriba), solo arenas (abajo)

Esta última respuesta, indica el efecto erosional que eventos con viento y oleajes extremos pueden llegar a tener en la costa del golfo. Es claro como la dinámica de arenas en cercanías a la costa se restringió principalmente a la época seca y al evento de alta energía, mientras en la época húmeda fue en su mayoría despreciable.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y que el aporte real de las playas lo hacen los sedimentos gruesos, se puede suponer que las arenas no son recuperadas en temporadas de calma luego de un evento extremo, lo que podría llevar a una erosión generalizada de la costa este del golfo.

Finalmente, a modo de validación de los resultados de los balances realizados, en la Figura 56 se presenta un resumen de los reportes de erosión y sedimentación a lo largo de las costas del golfo que han hecho otros autores. Debe tenerse en cuenta que sus resultados se obtuvieron a partir de estudios con escalas temporales más amplias (del orden de años) mientras los aquí presentados se obtuvieron para periodos de tiempo menores (del orden de días).



Figura 56. Reportes de erosión y acumulación de sedimentos en la costa del golfo. Tomado de (García, 2007) a partir de los estudios realizados por Correa y Vernette (2004); (Bernal Franco et al., 2005) y Velásquez (2000).

A pesar de la diferencia en las escalas temporales, los resultados obtenidos a partir de la modelación para temporadas climáticas que buscan representar la generalidad del golfo, conformarían de manera acumulada, los resultados presentados por otros autores obtenidos mediante diferentes metodologías.

Debe anotarse además, que las simulaciones incluyen únicamente la respuesta de la costa a partir de los forzamientos marinos y que no se tienen en cuenta la erosión de acantilados ni la resistencia del suelo.

Comparando los resultados de las simulaciones con los reportes, se observa la coincidencia en la tendencia generalizada de erosión en la costa este y Acandí y de acumulación en punta Arenas. Coinciden igualmente la erosión en Tarena y la acumulación en Yerbasal.

8.4 DISCUSIÓN

La dinámica de sedimentos del golfo de Urabá resultó estar altamente influenciada por el viento y el oleaje, tal como lo reportaron Molina et al. (1992); Chevillot et al. (1993); Lonin y Vasquez, (2005) y Montoya, (2010). El comportamiento de las plumas boyantes y su espesor en profundidad dependen de la fuerza y dirección de ambos forzamientos y de la turbulencia que estos generan, de allí que se diferencien dos patrones de circulación de sedimentos, uno para la época húmeda y otro para la seca.

Los resultados del modelo indican que durante la época húmeda, la baja energía de los sistemas convergentes (marinos, fluviales y atmosféricos) permite la aparición de plumas boyantes que se desplazan hacia el norte en los primeros 5 m de profundidad. Mientras en aguas más profundas las concentraciones no superan los 5 mg/l. La dispersión de los sedimentos ocurre desde las tres bocas principales del Atrato (El Roto, Matuntugo y Leoncito) y el río León, a partir de donde los

sedimentos finos son transportados hacia aguas más profundas donde finalmente se depositan (Zona central del golfo y Bahía Colombia).

En la época seca, el incremento del viento y oleaje aumenta la turbulencia y los procesos de mezcla. Los sedimentos son transportados hacia el sur donde generan altas concentraciones en toda la columna de agua. Esta respuesta junto con el continuo aporte de sedimentos del río León y la boca Leoncito en Bahía Colombia, son un indicativo de la acumulación de sedimentos en esta zona, donde regularmente se deben realizar dragados para garantizar el cargue del banano.

Los resultados indican además que eventos extremos en el Caribe llegan a tener influencia incluso en la zona más resguardada del golfo, generando aumento en las concentraciones de sedimentos a causa del transporte y de los procesos de resuspensión en zonas de aguas someras. Las concentraciones de sedimentos más altas en la costa este se presentaron cuando el oleaje proviene del noroeste, lo que implica una mayor vulnerabilidad de esta costa durante este tipo de eventos.

La comparación con imágenes satelitales permite demostrar cualitativamente que el modelo logra reproducir de manera general la dispersión de sedimentos en el golfo. Estudios con este tipo de imágenes que permitan correlacionarlas con datos de campo, serían de gran ayuda para la evaluación de este y otros modelos que se desarrollen para el golfo.

Detalles de la deriva litoral deberán estudiarse mediante el uso de modelos anidados a menor escala y sectorizados según el área de interés, en los cuales se incluyan las obras de defensa costera que interfieren en el transporte de sedimentos cercanos a la costa.

9. CONCLUSIONES

Se construyó un modelo de transporte de sedimentos para el golfo de Urabá el cual se evaluó según criterios típicamente usados en modelación numérica, obteniendo un desempeño entre bueno y razonable para diferentes zonas del golfo, lo que sugiere que el modelo es una herramienta confiable para el estudio de la dinámica de los sedimentos en el golfo.

Los datos obtenidos en campo permitieron calibrar y validar el modelo de transporte de sedimentos del golfo de Urabá. El muestreo de sedimentos en suspensión realizado en tres temporadas climáticas diferentes buscó garantizar la evaluación del modelo bajo diferentes forzamientos atmosféricos, fluviales y marinos. Aun así, debe tenerse en cuenta que los errores de medición generan un rango de incertidumbre entre las predicciones y mediciones.

Parámetros físicos como la velocidad de caída de las partículas finas y el cortante crítico de erosión resultaron fundamentales para lograr la aproximación de las predicciones del modelo a la realidad. La floculación que resulta, en parte, por los gradientes de salinidad del agua regula la permanencia de las partículas en suspensión, mientras el cortante crítico de erosión controla la resuspensión de los sedimentos de fondo.

Los patrones de circulación de sedimentos en las dos épocas climáticas típicas de la región, indican que durante la época húmeda los sedimentos son transportados en plumas boyantes hacia los prodeltas de los ríos Atrato y León por las corrientes que estos mismos generan. La dirección predominante del transporte es norte y las concentraciones se reducen con la distancia a las bocas de los ríos mencionados.

En la época seca los sedimentos son transportados principalmente hacia el sur del golfo, generando altas concentraciones en Bahía Colombia, en especial cerca al

río León. Las plumas de sedimentos del Roto y Matuntugo ganan espesor y en Bahía Colombia las concentraciones superan los 25 mg/l en toda la columna de agua.

La dinámica de los sedimentos en suspensión cerca a la interface aire-agua está directamente relacionada con la magnitud y dirección del viento, forzamiento que direcciona el flujo superficial a través de la fuerza de dragado. El oleaje por su parte, tiene efectos marcados en las zonas de aguas someras, a partir de los frentes de los deltas de los ríos, donde la pérdida de profundidad incrementa los esfuerzos de corte y los procesos de resuspensión de las partículas de fondo.

Los eventos de alta energía generan aumento generalizado de las concentraciones de sedimentos en el golfo. Zonas como Punta Caribaná, Tarena y la costa centro oriental resultaron altamente vulnerables a la acción del oleaje y el viento. Dicha afectación coincide con los reportes de erosión costera en la región, lo que sugiere que dicha problemática puede ser causada en cierta medida por la acción de las olas durante temporadas de alta energía marítima y atmosférica.

En periodos de calma, la dinámica de sedimentos en aguas someras está restringida a las partículas cohesivas y a medida que se incrementan los forzamientos mencionados, los sedimentos no-cohesivos comienzan a desplazarse generando erosión principalmente en el costa este del golfo.

Bahía Colombia resultó ser una zona de acumulación de sedimentos cohesivos sin importar las condiciones climáticas. Éste tipo de sedimentos no son generadores de playa y tienden a permanecer suspendidos, por lo que no aportan a la solución de los problemas de erosión.

Las restricciones del modelo están relacionadas con la disponibilidad de información de campo referente a las propiedades de los sedimentos. Detalles en la distribución de los tamaños de grano en el golfo y la inclusión de diferentes

grupos de sedimentos gruesos constituyen trabajo futuro para mejorar el desempeño del modelo, en especial en zonas de aguas someras; donde el uso de modelos anidados de menor escala surgen como una muy buena opción para detallar los procesos de erosión y sedimentación en zonas de especial interés.

Según Correa y Vernet (2004) la erosión costera en el golfo además de ser una respuesta a las condiciones marinas, está altamente influenciada por la resistencia del suelo y la geomorfología de la costa. El modelo desarrollado, no considera la erosión de acantilados, ni la afectación del suelo por obras civiles o por filtraciones de agua en el terreno a causa de irrigación de cultivos o tanques de almacenamiento de aguas. Un estudio de erosión por causas no marinas complementaría en gran medida los resultados presentados en este trabajo.

10. REFERENCIAS

ALLEN, J.R.L., Fundamental properties of fluids and their relation to sediment transport processes, En: Sediment Transport and Depositional Processes, 1ra Edición, Blackwell Scientific Publications, capítulo: 2, Oxford, 1994, 397 p. ISBN: 0632031123.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION y ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS. Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water. 20va Edición. Washington: AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1998, 1325 p. ISBN: 0-87553-235-7.

BAGNOLD, R. A. An approach to the sediment transport problem from the general physics. En: Geological survey professional paper, 1966. U.S government printing office, Washington, p.1-37.

BERNAL FRANCO, Gladys Rocio, TORO BOTERO, Francisco Mauricio, MONTOYA JARAMILLO, Luis Javier y GARIZABAL, Camilo. Estudio de la dispersión de sedimentos del río Atrato y sus impactos sobre la problemática ambiental costera del golfo de Urabá. Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, 2005, 61 p.

BANCO DE INICIATIVAS REGIONALES PARA EL DESARROLLO DE ANTIOQUIA (BIRD). Iniciativas de conexión de Antioquia con el noroccidente colombiano. Medellín, Colombia: 2010, 193 p. ISBN: 978-958-98838-9-1.

BOOIJ N., RIS R. C. y HOLTHUIJSEN L.H. A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. En: Journal of Geophysical Research, 1999, Vol. 104, No. C4, p. 7649-7666.

CÁMARA DE COMERCIO DE MEDELLÍN PARA ANTIOQUIA. Antioquia 2020. Estrategia de competitividad para Medellín, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Antioquia. Medellín, Antioquia, Comisión tripartita: Alcandía de Medellín, Gobernación de Antioquia y Área Metropolitana del Valle del Aburrá, 2006, 95 p.

COMISIÓN TÉCNICA FRANCESA (1984). Golfe d'Uraba; Etudè d'Environnement, recommandations pour l'Etudè du futur port. Informe técnico.

CORREA, Ivan Dario y ALCÁNTARA, Javier. Historical and Recent Shore Erosion along the Colombian Caribbean Coast. En: Journal of Coastal Research, 2005, Vol. No. Special Issue 49. p. 52-57.

CORREA, Ivan Dario y VERNETTE, Georges. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) costa caribe colombiana. En: Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, 2004, Vol. 33, p. 7-28. ISSN: 0122-9761.

CHEVICT, C., VIOLEAU, D. y GUESMIA, M. Numerical simulation of cohesive sediment transport in the Loire estuary with a three-dimensional model including new parameterisations. En: Proceedings in marine Science, 2002, Vol. 5, p. 529 - 543.

CHEVILLOT, Phillipe, MOLINA, Amparo, GIRALDO, Luis y MOLINA, Consuelo. Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. En: Boletín científico CIOH, 1993, p. 79-89.

COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION (CSIRO). Simulated Surface processes. Erosion, Transport and Sedimentation. Australia, Actualizada Enero 8 2013 (Citada: Febrero 8 de 2013) <<http://tellus.csiro.au/TellusPhysics.html>>

DAVIES, A.G., VAN RIJN, L.C., DAMGAARD, J.S., VAN DE GRAAFF, J. y RIBBERINK, J.S. Intercomparison of research and practical sand transport models. En: Journal of coastal Engineering, 2002, Vol. 46, No. 1. p. 1-23.

DELTAIRES. Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Delft, Holanda: Deltaires, 2011a, 647 p.

DELTAIRES. Delft3D-WAVE: Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual. Delft, Holanda: Deltaires, 2011b, 206 p.

EINSTEIN, Hans A. The bed load function for sediment transportation in open channel flows. En: Technical Bulletin No 1026, U.S Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950, 71 p.

EISMA, D. Suspended Matter in Aquatic Environments. Springer Verlag, 1993, 315 p.

ELLIOT, T., Deltas, En: Sedimentary Environments and Facies, 2da Edición, Blackwell Scientific Publication, 1986, p. 113-154.

ESCOBAR, Carlos Alejandro. Análisis de sensibilidad espacial de un modelo hidrodinámico del embalse Punchiná (Antioquia). En: Revista EIA, 2010, Vol. 1, No. 14. p. 97-113.

ESCOBAR, Carlos Alejandro. Relevancia de los procesos costeros en la hidrodinámica del Golfo de Urabá (Caribe Colombiano). En: Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras, 2011, Vol. 40, No. 2. p. 101 - 120. ISSN: 0122-9761.

ESCOBAR, Carlos Alejandro, VELÁSQUEZ, Liliana y POSADA, Federico. Reporte de la construcción del modelo hidrodinámico y de oleaje del golfo de Uraba. Anexo modulo oceanografía, Universidad EAFIT, 2011, 45 p.

ESCOBAR, Carlos Alejandro, VELASQUEZ, Liliana y POSADA, Federico. Marine currents and circulation patterns in the Gulf of Urabá, Colombian Caribbean Sea. En: Journal of Coastal Research, En revisión.

FLEMING, C.A. Coastal Management. Integration Science, Engineering and Management. 1ra Edición. Londres, Reino Unido: Thomas Telford Publishing, 2000, p.

GALLOWAY, W.E., Processes framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems, En: Deltas: Model for Exploration, Houston, Estados Unidos: Houston Geological Society, 1975, p.87-98.

GARCÍA, Carolina. Atlas del golfo de Urabá: Una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. 1ª Edición. Santa Marta, Colombia: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar) y Gobernación de Antioquia. Serie de Publicaciones Especiales de Invemar No 12, 2007, 180 p. ISBN: 978-958-98104-3-9.

GERRITSEN, H., DE GOEDE, E.D., F.W., PLATZAK., GENSEBERGER, M., VAN KESTER, J. A. T. M. y UITTENBOGAARD, R. E. Validation document Delft3D-FLOW: A Software System for 3D Flow Simulations. W. D. Hydraulics, 2007, 266 p.

GILBERT, G.K. The topographic features of lake shores. En: U.S. Geological Survey. 5º Annual report, 1885, p. 69-123 .

HORI, K. y SAITO, Y. Classification, Architecture and Evolution of Large River Deltas, En: Large Rivers Geomorphology and Management Edición, John Wiley & Sons, 2005, p. 85-116.

HU, Kelin, DING, Pingxing, WANG, Zhengbing y YANG, Shilun. A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary, China. En: Journal of Marine Systems, 2009, Vol. 77, No. 1. p. 114 - 136.

JI, Zhen Gang. Hydrodynamics and water quality: modeling rivers, lakes and estuaries. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008, 676 p.

KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L., IREDELL, M., SAHA, S., WHITE, G., WOOLLEN, J., ZHU, Y., LEETMAA, A., REYNOLDS, R., CHELLIAH, M., EBISUZAKI, W., HIGGINS, W., JANOWIAK, J., MO, K. C., ROPELEWSKI, C., WANG, J., JENNE, ROY y JOSEPH, DENNIS. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. En: Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, Vol. 77, No. p. 437-470.

LEENDERTSE, J.J. Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation. Rand Corporation, Santa Monica, Estados Unidos, 1967, 293 p.

LEENDERTSE, J.J., ALEXANDER, R.C. y LIU, S.K. (1973). A three-dimensional model for estuaries and coastal seas. Rand Corporation, Santa Monica, Estados Unidos, 1973, 293 p.

LIU, Wen-Cheng, HSU, Ming-Hsi y KUO, Albert. Modelling of hydrodynamics and cohesive sediment transport in Tanshui River estuarine system, Taiwan. En: Marine Pollution Bulletin, 2002, Vol. 44, p. 1076 -1088.

LONIN, Serguei y VASQUEZ, Jairo Guillermo. Hidrodinámica y distribución de coliformes en el Golfo de Urabá. En: Boletín Científico del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas 2005, Vol. 23, p. 101-119. ISSN: 0120-0542.

MASSELINK, Gerhard y HUGHES, Michael. Introduction to coastal processes and geomorphology. Londres, Gran Bretaña: Hodder Arnold, 2003, 354 p. ISBN: 340 76411 2.

MEHTA, A.J., HAYTER, E.J., PARKER, W.R., KRONE, R.B. y TEETER, A.M. Cohesive Sediment Transport I: Process Description. En: Journal of Hydraulic Engineering, 1989, Vol. 115, No. 8. p. 1076 - 1093.

MESINGER, Fedor, DIMEGO, Geoff, KALNAY, Eugenia, MITCHELL, Kenneth, SHAFRAN, Perry, EBISUZAKI, Wesley, JOVIC, Dusan, WOOLLEN, Jack y ROGERS, Eric. North American Regional Reanalysis: A long-term, consistent, high-resolution climate dataset for the North American domain, as a major improvement upon the earlier global reanalysis datasets in both resolution and accuracy. En: Bulletin of the American Meteorological Society, 2006, Vol. 87, No. 3. p. 343-360.

MEYER-PETER, E. y MULLER, R. . Formulas for bed load transport. En: 2nd meeting of the International Association of Hydraulic Research. Suecia, 1948, p. 39-64.

MOLINA, Amparo, MOLINA, Consuelo y CHEVILLOT, Phillipe. La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. En: Boletín científico CIOH, 1992, Vol. 1, No. 11. p. 43-58.

MONTOYA, Luis Javier. Dinámica oceanográfica del golfo de Urabá y su relación con la dispersión de contaminantes y sedimentos. Medellín, 2010, 254 p. Tesis (Doctor en ingeniería). Universidad Nacional de Colombia, Posgrado de Aprovechamiento de recursos hidráulicos.

MORTON, Robert y CORREA, Ivan. Introducción al uso de los Geindicadores de Cambios Ambientales en Costas Húmedas Tropicales. En: Geología Norandina, 2004, Vol. 12, No. 1. p. 1-56.

OCTAVIO, K. A. H., JIRKA, G. H. y HARLEMAN, D. R. F. Vertical Heat Transport Mechanisms in Lakes and Reservoirs. Massachusetts Institute of Technology, 1977, p. 257, 261, 262, 267.

OSORIO, Andrés , GÓMEZ, Andrés, MOLINA, Luis , ÁLVAREZ, Oscar y OSORIO, Juan. Bases metodológicas para caracterizar el oleaje local (sea) y de fondo (swell) en el golfo de Urabá. En: XXIV Congreso latinoamericano de hidráulica (2010: Punta del Este, Uruguay). AIH, p. 12.

PADMAN, L. y EROFEEVA, S. Tide Model Driver (TMD) Manual. Edición. Earth and Space Research, 2005, 13 p.

PARTHENIADES. Erosion and deposition of cohesive soils. En: ASCE Journal of the Hydraulics Division, 1965, Vol. 91, No. No HY1. p. 105-139.

PHILLIPS, N.A. A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting. En: Journal of Meteorology, 1957, Vol. 199, No.14. p.184-185.

RENIERS, A.J.H.M., ROELVINK, J.A. y THORNTON, E.B. Morphodynamic modelling of an embayed beach under wave group forcing. En: Journal of Geophysical Research 2004, Vol. 109, No. c1. p. 1 - 22.

RESTREPO, Juan D. y LOPEZ, Sergio A. Morphodynamics of the Pacific and Caribbean deltas of Colombia, South America. En: Journal of South American Earth Sciences, 2008, Vol. Vol. 25, p. 1-21.

ROELVINK, J.A y VAN BANNING, G.H.F.M Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics. En: Hydroinformatics (1994: Balkema, Rotterdam).

ROLDÁN, Paola Andrea. Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, golfo de Urabá. Implicaciones para el transporte de sedimentos. Medellín, 2008, 97 p. (Maestría en aprovechamiento de recursos hidráulicos). Universidad Nacional de Colombia, Posgrado en aprovechamiento de recursos hidráulicos.

SALTELLI, A., TARANTOLA, S. y CAMPOLONGO, F. Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. En: Statistical Science, 2000, Vol. 15, No. 4. p. 377-395.

SCHOKLITSCH, A. Uber schleppkraft und geschiebebewegung. Edición. Engelmann, Leipzig: 1914, 74 p.

SCHWARTZ, Maurice. Encyclopedia of Coastal Science. Dordrecht, Holanda: 2005, 1211 p. ISBN: 13 978-1-4020-1903-6.

SHIELDS, Albert. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. California Institute of Technology, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources. 1936, 47 p.

SOULSBY, Richard. Dynamic of marine sands: A manual for practical applications. Londres, Reino Unido: Thomas Telford Publications, 1997, 249 p. ISBN: 0 7277 2584 X.

STELLING, G. S. On the construction of computational methods for shallow water flow problems, 1984, 266 p.

SUTHERLAND, J., WALSTRA, D.J.R, CHESHER, T.J., VAN RIJN, L.C. y SOUTHGATE, H.N. Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. En: Journal of Coastal Engineering, 2003, Vol. 51, No. 2. p. 793 - 810.

TOLMAN, H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH -III version 1.5. NOAA/NWS/NCEP/OMB, 1997, 97 p.

UITTENBOGAARD, R. E., VAN KESTER, J. A. T. M. y STELLING, G. S. Implementation of three turbulence models in 3D-TRISULA for rectangular grids, 1992, Report Z81.

VAN RIJN, L.C., WALSTRA, D.J.R., GRASMEIJER, B., SUTHERLAND, J., PAN, S. y SIERRA, J.P. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. En: Journal of Coastal Engineering, 2003, Vol. 47, p. 295 - 327.

VAN RIJN, Leo C. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. 1ra Edición. Delft: Aqua Publications, 1993, 715 p. ISBN: 90-800356-2-9.

VAN RIJN, Leo C. Sediment transport, Part I: Bed load transport. En: Journal of Hydraulic Engineering, 1984, Vol. 110, No. 10. p. 1431-1456.

VELÁSQUEZ, N. Geomorfología y dinámica de la línea de costa en el Urabá chocoano: sector Cabo Tiburón - Bahía Acandí. Medellín, 2000, 301 p. (Ingeniero geológico). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas.

VELÁSQUEZ, Liliana. Análisis de sensibilidad espacial a un modelo de transporte de sedimentos: Golfo de Urabá, Colombia. Medellín, 2011, 99 h. (Ingeniero Civil). Universidad EAFIT, Departamento de Ingeniería Civil.

VELÁSQUEZ, Liliana y ESCOBAR, Carlos Alejandro. Análisis de sensibilidad espacial a un modelo de transporte de sedimentos en el golfo de Urabá, Colombia. En: XXV Congreso Latinoamericano de hidráulica (2012a: San José, Costa Rica). Colegio de Ingenieros Civiles de Costa Rica, 8 p.

VELÁSQUEZ, Liliana y ESCOBAR, Carlos Alejandro. Efecto del río Atrato en la dispersión de sedimentos en el golfo de Urabá. En: XX Seminario Nacional de hidráulica e hidrología (2012b: Barranquilla, Colombia), 8 p.

VELEZ, J., POVEDA, G. y MESA, O. . Balances hidrológicos de Colombia. Edición. Medellín. Colombia: Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, 2000, No. 16, 150 p.

VERNETTE, Georges, GAYET, Jacques, ECHEVERRI, Carlos, PIEDRAHITA, Ignacio y CORREA, Ivan. Introducción a los ambientes deltaicos: Morfología y Sedimentación, En: Geología y Oceanografía del delta del río San Juan, litoral pacífico colombiano., 1ra Edición, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, 2002. 221 p.

WINTER, C. On the evaluation of sediment transport in tidal environments. En: Sedimentary Geology, 2007, Vol. 202, p. 562 - 571.

WREN, D.G., BARKDOLL, B.D., KUHNLE, R.A. y DERROW, R.W. Field Techniques for Suspended Sediment Measurement. En: Journal of Hydraulic Engineering, 2000, Vol. 126, No. 2, 8 p.

WRIGHT, L.D. Sediment transport and deposition at river mouths: A synthesis. En: Geological Society of America Bulletin 1977, Vol. 88, p. 857-868.

ZANQUE, U.C.E. On the influence of turbulence on the initiation of sediment motion. En: International Journal of Sediment Research, 2003, Vol. 18, No. 1, p. 1-15.