

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD A UN MODELO DE TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS: GOLFO DE URABÁ, COLOMBIA

LILIANA VELÁSQUEZ MONTOYA

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de
Ingeniero Civil

Asesor: Carlos Alejandro Escobar Sierra
Ph.D en Coastal Geosciences and Engineering

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MEDELLÍN
2011

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia agradezco al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – Colciencias y a la Universidad EAFIT por 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 permanente, por su paciencia y por enseñarme algo nuevo todos los días. A Federico Posada, Heber Escobar y Juan Felipe Paniagua por la ayuda que me brindaron durante la realización de este proyecto y en especial, por su amistad.

Finalmente a mi familia, por su apoyo y cariño incondicional, gracias por hacer de mí quien soy ahora y compartir sus vidas conmigo.

CONTENIDO

RESUMEN	10
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 OBJETIVO	13
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.2 GOLFO DE URABÁ.....	14
1.3 ESTRUCTURA Y CONTENIDOS.....	17
2. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	18
2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	19
2.2.1 MOVIMIENTO INICIAL EN SEDIMENTOS NO COHESIVOS	20
2.2.1.1 ESFUERZO DE CIZALLADURA CRÍTICO	21
2.2.1.2 VELOCIDAD CRÍTICA	22
2.2.2 MOVIMIENTO INICIAL EN SEDIMENTOS COHESIVOS	23
2.3 MODELOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	23
2.3.1 TRANSPORTE DE CARGA DE FONDO.....	24
2.3.1.1 MEYER-PETER Y MULLER (1948)	25
2.3.1.2 BAGNOLD (1966)	25
2.3.1.3 VAN RIJN (1984).....	26
2.3.2 TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN.....	27
2.3.2.1 EINSTEIN (1950).....	27
2.3.2.2 BAGNOLD (1966).....	28
2.3.2.3 VAN RIJN (1984).....	29
2.3.2.4 ECUACIÓN DE ADVECCIÓN - DIFUSIÓN	29

3.	DATOS, MATERIALES Y HERRAMIENTAS.....	31
3.1	SOFTWARE	31
3.1.1	DELFT3D.....	31
3.1.2	ARCGIS.....	32
3.1.3	ENVI	32
3.1.4	MATLAB	32
3.2	MATERIAL CARTOGRÁFICO.....	33
3.3	BASES DE DATOS	33
4.	CAMPAÑAS DE MEDICIÓN	34
4.1	EQUIPOS DE MEDICIÓN	34
4.1.1	ADCP.....	34
4.1.2	MUESTREADORES MECÁNICOS	36
4.1.3	CTD	36
4.2	ESTRATEGIAS DE MEDICIÓN.....	38
4.2.1	CAMPAÑA GOLFO DE URABÁ I-2010.....	38
4.2.2	CAMPAÑA GOLFO DE URABÁ II-2010	40
5.	MONITOREO REMOTO DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN	42
5.1	DATOS DE CAMPO	42
5.2	SENSOR REMOTO MODIS	43
5.3	PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SATELITALES MODIS TERRA	44
5.4	CORRELACIÓN REFLECTANCIA-TURBIDEZ-CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS.....	45

6.	MODELACIÓN MATEMÁTICA	49
6.1	COBERTURA TEMPORAL	49
6.2	DOMINIO DE CÁLCULO	49
6.3	CONDICIONES METEOROLÓGICAS	51
6.4	CONDICIONES DE FRONTERA.....	52
6.4.1	MAR CARIBE	52
6.4.2	AFLUENTES	52
6.5	MODELO HIDRODINÁMICO.....	66
6.5.1	ECUACIÓN DE CONTINUIDAD	66
6.5.2	CONSERVACIÓN DEL MOMENTUM LINEAL.....	67
6.5.3	PARÁMETROS FÍSICOS	68
6.6	MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS	68
6.6.1	ECUACIÓN TRIDIMENSIONAL DE ADVECCIÓN-DIFUSIÓN	68
6.6.2	TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FONDO.....	69
6.6.3	PROPIEDADES DE LOS SEDIMENTOS	70
7.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	72
7.1	METODOLOGÍA.....	72
7.2	RESULTADOS	75
7.2.1	VIENTO	75
7.2.2	OLEAJE.....	76
7.2.3	MAREA.....	78
7.2.4	PROCESOS TERMO-SALINOS.....	81
7.2.5	INTERVALO TEMPORAL DE CÁLCULO	81
7.2.6	MAE Y RMS	84
8.	APLICACIÓN PRELIMINAR DEL MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	85
8.1	ÉPOCAS HÚMEDA Y SECA.....	85

8.2	CONDICIÓN METEOROLÓGICA EXTREMA	87
9.	CONCLUSIONES.....	91
10.	REFERENCIAS.....	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio	16
Figura 2. Diagrama de Shields, 1936	21
Figura 3. Diagrama de Yang, 1973	24
Figura 4. Acoustic Doppler Current Profiler	35
Figura 5. Botellas para muestreo mecánico A. Nansen y B. Niskin.....	37
Figura 6. Montaje de equipos oceanográficos en la embarcación.....	39
Figura 7. Campañas de medición: golfo de Urabá 2010	41
Figura 8. Secciones de aforo en seis bocas del río Atrato	41
Figura 9. Imagen MODIS Terra (4 abril de 2010).....	43
Figura 10. Correlación entre turbidez y reflectancia para abril de 2010	45
Figura 11. Correlación entre turbidez y reflectancia para noviembre de 2010	47
Figura 12. Correlación entre concentración de sedimentos y turbidez para noviembre de 2010.....	47
Figura 13. Ejemplo de sistema coordinado tipo σ	50
Figura 14. Malla de cálculo y batimetría del golfo de Urabá.....	51
Figura 15. Viento para los periodos simulados.....	54
Figura 16. Temperatura y radiación de onda corta para los periodos simulados ..	55
Figura 17. Cobertura del modelo del Caribe. Modificado de: Posada et al., 2010.	56
Figura 18. Oleaje para los periodos simulados	57
Figura 19. Celdas en las que el ADCP mide la velocidad	60
Figura 20. Componentes de la velocidad perpendiculares a la sección de aforo. Modificada de: Simpson 2001	60
Figura 21. Cobertura espacial-vertical de un ADCP	61
Figura 22. Correlación Caudal vs. Ancho para las bocas del Atrato	63
Figura 23. Distribución espacial y porcentual de los sedimentos de fondo en el golfo de Urabá.....	71

Figura 24. Discrepancia en la concentración de sedimentos a causa de la eliminación del viento	77
Figura 25. Discrepancia en la concentración de sedimentos a causa de la eliminación del oleaje	79
Figura 26. Discrepancia en la concentración de sedimentos a causa de la eliminación de la marea	80
Figura 27. Discrepancia en la concentración de sedimentos a causa de la eliminación de los procesos termo-salinos	82
Figura 28. Discrepancias respecto a la simulación patrón al modificar el intervalo temporal de cálculo	83
Figura 29. Intervalo de cálculo óptimo.....	84
Figura 30. Concentración superficial en épocas húmeda y seca	86
Figura 31. Concentración superficial en Necoclí, épocas húmeda y seca	87
Figura 32. Trayectoria huracán Tomas. Imagen de dominio público editada de Wikimedia.....	88
Figura 33. Concentración superficial simulada y medida, para el final del huracán Tomas	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los sedimentos (Lane <i>et al.</i> , 1947)	20
Tabla 2. ANOVA Correlación Turbidez vs Reflectancia de la banda 1 MODIS Terra	46
Tabla 3. Distribución de las capas en la malla vertical del modelo.....	50
Tabla 4. Componentes de Marea al norte del golfo de Urabá (Tomado de: Proyecto “Erosión costera en Antioquia I”).....	58
Tabla 5. Caudales de las bocas del Atrato calculados a partir de aforos en abril y noviembre de 2010.....	64
Tabla 6. Caudal y concentración de sedimentos de los afluentes del modelo	65
Tabla 7. Parámetros físicos del modelo hidrodinámico	68
Tabla 8. Propiedades de los sedimentos asumidas para en el modelo según su d50	71
Tabla 9. Simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad	73
Tabla 10. MAE y RMS de todos los casos del análisis de sensibilidad	84

RESUMEN

En el marco de la investigación “Erosión costera en Antioquia II: Modelación de la evolución morfológica en el golfo de Urabá” cofinanciada por la Universidad EAFIT y Colciencias, se realizó un análisis de sensibilidad espacial a un modelo de transporte de sedimentos para el golfo de Urabá en el que se tuvieron en cuenta cinco parámetros: viento, oleaje, marea, procesos termo-salinos e intervalo temporal de cálculo. Los resultados responden a las condiciones meteorológicas típicas para la temporada húmeda y a las condiciones iniciales y de frontera obtenidas a partir de la realización de dos campañas de medición en el año 2010.

El análisis de sensibilidad mostró que:

1. La marea y el viento son poco relevantes para la simulación de concentraciones de sedimentos en el golfo.
2. El oleaje proveniente del Caribe y la estratificación termo-salina ejercen mayor influencia sobre las concentraciones de sedimentos en tres zonas:
 - a). El Roto (principal boca del Atrato)
 - b). Costado noroccidental del golfo
 - c). Línea de costa entre el río Turbo y el río Caimán Nuevo
3. El intervalo temporal de cálculo óptimo es de 2.25 min, valor obtenido luego de hacer a un análisis de beneficio vs. costo computacional.

Adicionalmente, se presenta un análisis estacional, donde se comparan cualitativamente las concentraciones de sedimentos superficiales instantáneas para las épocas seca, húmeda y una condición meteorológica extrema. Y los

resultados preliminares de la aplicación de una metodología para ampliar la cobertura espacial de concentraciones de sedimentos en la que se hace uso de información de sensores remotos.

Palabras clave: MODELACIÓN MATEMÁTICA, TRANSPORTE DE SEDIMENTOS, GOLFO DE URABÁ, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.

1. INTRODUCCIÓN

El golfo de Urabá se ha considerado a lo largo de la historia de Colombia como una zona estratégica, no solo por su ubicación geográfica, sino por el alto potencial comercial y económico que le otorga a los departamentos de Antioquía y Chocó, a los que les permite conectarse con el mar Caribe. Aun así, los problemas de sedimentación y erosión que continuamente se presentan a lo largo de la línea de costa del golfo, han retrasado su desarrollo y han generado cuantiosos gastos económicos relacionados con la construcción de espolones, muros de contención, barreras, etc. que con pocas excepciones se han convertido en causas de nuevos problemas y no representan una solución definitiva del problema (Correa y Vernet, 2004). Esta situación da lugar a un cuestionamiento sobre la coherencia entre las medidas ingenieriles que se han venido desarrollando y el conocimiento de la dinámica de sedimentos para esta área en particular.

Ante la problemática mencionada, que no es exclusiva del golfo de Urabá, el gobierno nacional ha comenzado a tomar medidas, entre las que se destaca el Programa Nacional de Investigación para la Prevención, Mitigación y Control de la Erosión Costera en Colombia (PNIEC), cuyo plan de acción comenzó en el 2009 y se espera esté terminado para el 2019. Sus objetivos se resumen en investigar, mitigar, monitorear, prevenir y controlar la erosión costera en el país y en su ejecución participan numerosas entidades públicas y privadas.

El problema de la erosión, su continuo incremento, la afectación a la población y la falta de soluciones de calidad a lo largo de la línea de costa del golfo de Urabá, entre otras zonas costeras del país, plantean un reto al Estado colombiano y a la ingeniería nacional, quienes no solo deben tomar medidas rápidas y eficientes sino que debe sustentar dichas medidas con estudios técnicos que validen sus planteamientos y accionar, ya que “Ninguna técnica resulta adecuada si se carece

de estudios pertinentes que garanticen en gran medida su eficiencia en su aplicación” (Guzmán *et al.*, 2008).

Por las razones anteriormente mencionadas, se ha considerado necesario realizar una modelación matemática que permita identificar los patrones de transporte de sedimentos y su relación con los problemas de erosión y sedimentación en el golfo de Urabá. Para esto, se procede en primera instancia, con un análisis de sensibilidad en el que se evalúe la relevancia que tienen los forzadores externos y los parámetros físicos y numéricos en la dinámica de sedimentos, lo que permitirá reconocer aquellos factores realmente significativos para el área de interés y así enfocar la obtención de información para el desarrollo de modelos matemáticos confiables.

El modelo en desarrollo, presenta una alternativa que hace uso de tecnología de punta y se sustenta en bases físicas y matemáticas para la comprensión del transporte de sedimentos en el golfo de Urabá y permite dar un paso adelante frente a otros esfuerzos previos y valiosos que se han realizado en la zona, como los de Montoya (2010), Roldan (2008), Chevillot *et al.* (1993), entre otros.

La posibilidad de conjugar la modelación de la hidrodinámica, el oleaje y el transporte de sedimentos; además, de la simulación de eventos extremos, la utilización de una malla curvilínea y un sistema coordinado tipo σ para lograr una representación más detallada de las fronteras, son algunas de las posibilidades que ofrece la plataforma de modelación Delft3D, utilizada en este trabajo.

1.1 OBJETIVO

Realizar un análisis de sensibilidad a un modelo de transporte de sedimentos, que permita identificar la relevancia de un parámetro numérico, de forzamientos externos y procesos físicos en la dinámica de sedimentos del golfo de Urabá.

1.1.1 Objetivos específicos. Con la realización del análisis de sensibilidad se pretende:

Determinar la relevancia del viento, la marea, el oleaje, la estratificación termo-salina y el intervalo temporal de cálculo en el transporte de sedimentos bajo condiciones “típicas” del golfo de Urabá.

Además, aplicar el modelo, para simular de manera preliminar el transporte de sedimentos en el golfo de Urabá en los siguientes casos:

1. Época seca.
2. Época húmeda.
3. Condición meteorológica extrema.

1.2 GOLFO DE URABÁ

El golfo de Urabá es el más grande y meridional en su clase en el Caribe colombiano, adentrándose en el continente por 80 km, con un ancho promedio de 25 km. Se ubica en las cercanías de la frontera con la República de Panamá y al norte de los departamentos de Antioquia y Chocó entre los 7° 55' y 8° 40' de latitud Norte y los 76° 53' y 77° 23' de longitud Oeste (véase Figura 1). Sus zonas más profundas se encuentran a lo largo de su eje central, partiendo de 30 m en Bahía Colombia y acrecentándose hacia el norte donde no se superan los 65 m (Chevillot *et al.*, 1993).

Según García (2007) su climatología se caracteriza por una alta pluviosidad de aproximadamente 2500 mm/año y una temperatura diurna variando entre 26 y 28°C. En el estudio de Chevillot *et al.* (1993) los autores diferencian dos temporadas climáticas, una denominada “época seca” que va desde diciembre hasta abril dominada por los vientos alisios y otra “época húmeda” que comienza

en mayo con mayores precipitaciones y vientos en direcciones variables con predominio de componentes del sur y velocidades bajas.

A sus aguas llegan numerosos afluentes, entre los que se destaca el río Atrato, que entra al golfo por siete bocas llamadas: Tarena, El Roto, Las Pavas, Matuntugo, Coco Grande, Urabá y Leoncito (de norte a sur), siendo la más caudalosa de ellas El Roto, que aporta aproximadamente el 65% de la descarga total. El caudal y la carga sólida del Atrato fueron estimados por Restrepo y Kjerfve (2000) en $2571 \text{ m}^3/\text{s}$ y 357 kg/s respectivamente. Otros tributarios que tienen su desembocadura dentro del golfo de Urabá son los ríos: León, Turbo, Currulao, Suriquí, Caimán Nuevo y Caimán Viejo.

En el golfo de Urabá se presenta un régimen de mareas semidiurno mixto con amplitudes máximas de 40 cm (Correa y Vernet, 2004). El oleaje proveniente del mar Caribe incide con mayor fuerza en la parte norte del golfo y su altura promedio en todo el cuerpo de agua es del orden de 0.53 m, mientras sus periodos predominantes son de 5 s aproximadamente (Molina *et al.*, 1992).

La interacción de las placas de Nazca, Suramérica y Caribe, hacen del golfo de Urabá un área de actividad sísmica significativa, por lo que la Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica (1999) ha catalogado la totalidad de su costado occidental como zona de amenaza sísmica alta y solo al nororiente como zona de amenaza sísmica intermedia.

La economía de la zona, se basa principalmente en el cultivo del banano para exportación. Lastimosamente y ante la falta de una estructura portuaria adecuada, las cargas de la fruta se llevan en bongos y remolcadores desde los canales de Zungo y Nueva Colonia (aguas arriba de la desembocadura del río León), hasta los buques fondeados en bahía Colombia (al sur del golfo) donde se realizan

continuos dragados debido a las tendencias de sedimentación que en ella se han reportado.

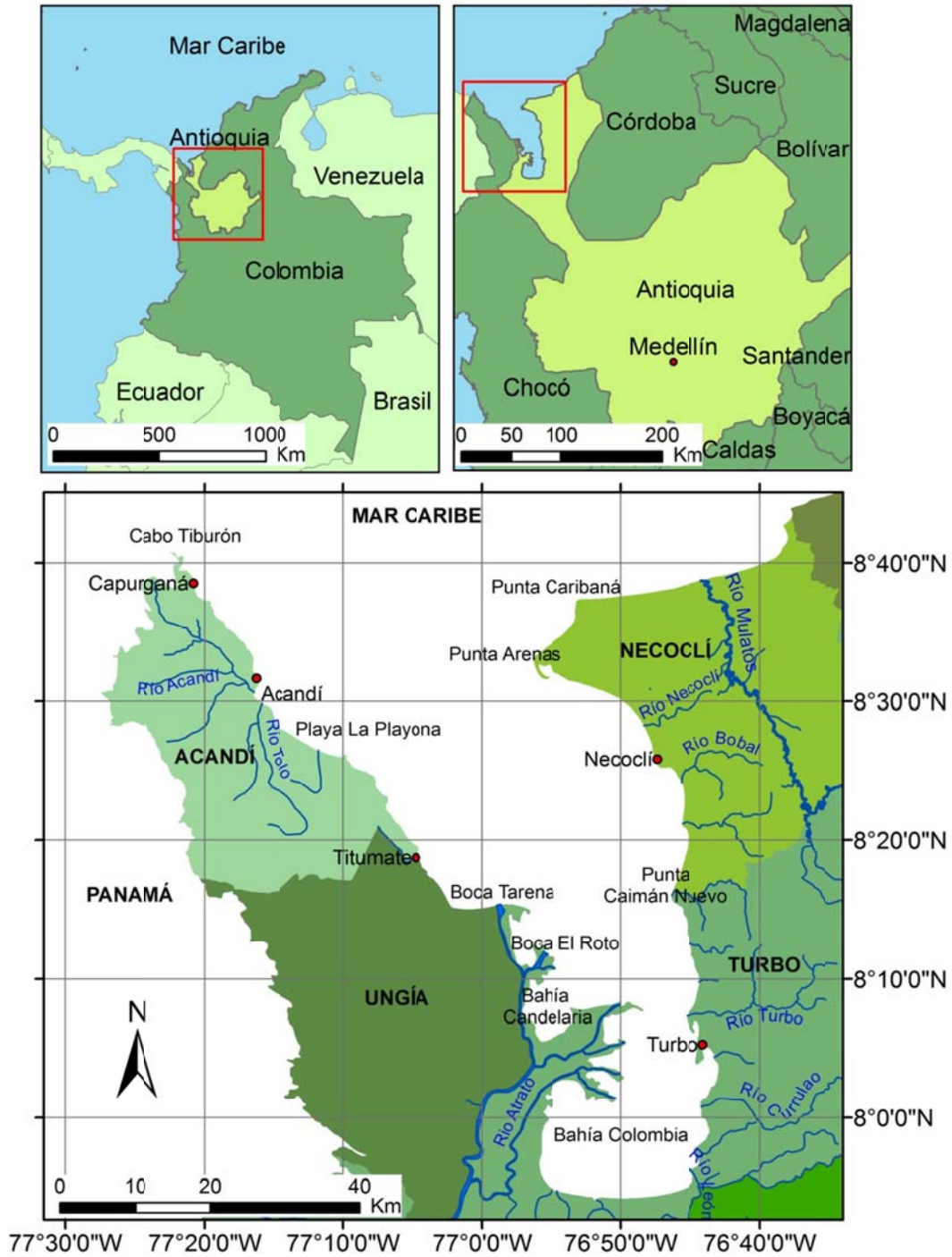


Figura 1. Área de estudio

1.3 ESTRUCTURA Y CONTENIDOS

La estructura del documento inicia en el capítulo 2 con el marco teórico, en el que se incluyeron algunos conceptos básicos de análisis de sensibilidad y transporte de sedimentos, junto con un recuento de algunos de los planteamientos matemáticos que han surgido para modelar el fenómeno.

En los capítulos 3 y 4 se encuentran todas las herramientas, equipos y fuentes de información que fueron utilizadas durante el desarrollo del proyecto de grado; Además se describen las actividades de campo llevadas a cabo.

En el capítulo 5, se detallan los procedimientos y avances que se han hecho hasta la fecha para la implementación del monitoreo remoto de concentración de sedimentos en el golfo.

La descripción del modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos se hace en el capítulo 6. En él que se encuentran las características de ambos modelos y las condiciones de frontera para los periodos simulados.

Por último, en los capítulos 7, 8 y 9 se presentan los resultados del análisis de sensibilidad, de la aplicación preliminar del modelo de transporte de sedimentos, y las conclusiones a las que se llegaron luego de analizar los resultados obtenidos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Como lo menciona Toro (2004), toda modelación matemática consta de un procedimiento compuesto por cuatro etapas que deben ser llevadas a cabo en el siguiente orden: análisis de sensibilidad, calibración, validación y aplicación. Cada una de estas etapas depende de la anterior y mejora los resultados hasta la obtención de un modelo que represente adecuadamente escenarios reales.

El análisis de sensibilidad se realiza al inicio de la modelación, “en este punto el modelador hace suposiciones y simplificaciones” (Toro, 2004), lo que ayuda a identificar el efecto que tienen los cambios realizados en los datos de entrada sobre los resultados de una simulación. Su finalidad es que el investigador conozca aquellos parámetros de los cuales es fundamental obtener mediciones y aquellos cuyos valores pueden ser asumidos sin causar efectos considerables en los resultados. Lo que se resume en la optimización de recursos y priorización de búsqueda de información (Escobar y Pérez, 2009).

Existen diversas metodologías para realizar un análisis de sensibilidad, Saltelli *et al.* (2000) hacen una clasificación en dos categorías, la primera de ellas reúne los métodos globales cuantitativos, los cuales no dependen del tipo de modelo y cubren todo el rango entre el cual pueden variar los parámetros de estudio. En este grupo se encuentran los métodos basados en la varianza, como el FAST desarrollado por Cukier *et al.* (1973) y el método de Sobol (1990).

El segundo grupo consta de los métodos locales, que son comúnmente usados en ingeniería hidráulica e hidrología (Hall *et al.*, 2009). En ellos se evalúa el efecto de los cambios en las entradas del modelo en ciertos puntos de interés (localmente). Dentro de este último grupo están los métodos basados en derivadas y el método

OAT (*One-At-a-Time*) utilizado en este estudio, en el que se establece una modelación patrón y se cambia un único parámetro de entrada a la vez para determinar su influencia en la solución del modelo.

2.2 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Los sedimentos son partículas que se forman por la degradación de las rocas causada por procesos físicos o químicos, originados por las condiciones climáticas y geológicas de la zona en la que se encuentran (Van Rijn, 1993). Se clasifican de forma general como cohesivos (fino granulares) y no cohesivos (grueso granulares).

Las arenas, material no cohesivo o friccionante, están compuestas por partículas sueltas cuyo tamaño varía entre 63 y 2000 μm . Mientras los 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 su plasticidad mediante la que sufren una deformación permanente sin romperse. En la Tabla 1 propuesta por Lane *et al.* (1947) se puede observar la clasificación general de los sedimentos por su tamaño.

Las propiedades de los sedimentos logran caracterizarlos y a su vez influyen en los procesos de suspensión, transporte y posterior asentamiento de los mismos. Las hay de carácter individual y de conjunto, componiendo el primer grupo: tamaño, forma, densidad y velocidad de asentamiento, y el segundo: distribución del tamaño de las partículas, peso específico y porosidad.

Tabla 1. Clasificación de los sedimentos (Lane et al., 1947)

Nombre	Rango de tamaños		Denominación del tamiz	
	(mm)	(μ m)	Tyler	Estándar EE.UU.
Cantos rodados grandes	256-128			
Cantos rodados pequeños	128-64			
Grava muy gruesa	64-32			
Grava gruesa	32-16			
Grava media	16-8		2-1/2	
Grava fina	8-4		5	5
Grava muy fina	4-2		9	10
Arena muy gruesa	2-1	2000-1000	16	18
Arena gruesa	1-0.5	1000-500	32	35
Arena media	0.5-0.25	500-250	60	60
Arena fina	0.25-0.125	250-125	115	120
Arena muy fina	0.125-0.062	125-62	250	230
Limo grueso	0.062-0.031	62-31		
Limo medio	0.031-0.016	31-16		
Limo fino	0.016-0.008	16-8		
Limo muy fino	0.008-0.004	8-4		
Arcilla gruesa	0.004-0.002	4-2		
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		

2.2.1 Movimiento inicial en sedimentos no cohesivos. Dada la naturaleza estocástica del movimiento de los sedimentos en el agua, se hace difícil determinar la condición de flujo exacta para la cual una partícula comienza a moverse (Yang y Stall, 1974); para comprender este fenómeno se debe tener en cuenta que las fuerzas que experimenta una partícula de sedimento sumergida en un fluido son: 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. Para Yang y Stall (1974), al presentarse un desequilibrio en estas fuerzas comenzará el

movimiento y justo antes de este momento el esfuerzo de cizalladura, la velocidad o la profundidad tomarán valores críticos.

2.2.1.1 Esfuerzo de cizalladura crítico. Shields (1936) aplicó un análisis dimensional mediante el que se obtienen dos parámetros adimensionales (R_* , τ_*), para determinar el esfuerzo cortante promedio que ejerce el fluido sobre las partículas del fondo al comenzar el movimiento y los relaciona mediante su reconocido diagrama (véase Figura 2). Los puntos por encima de la curva representan aquellos para los cuales la partícula se moverá.

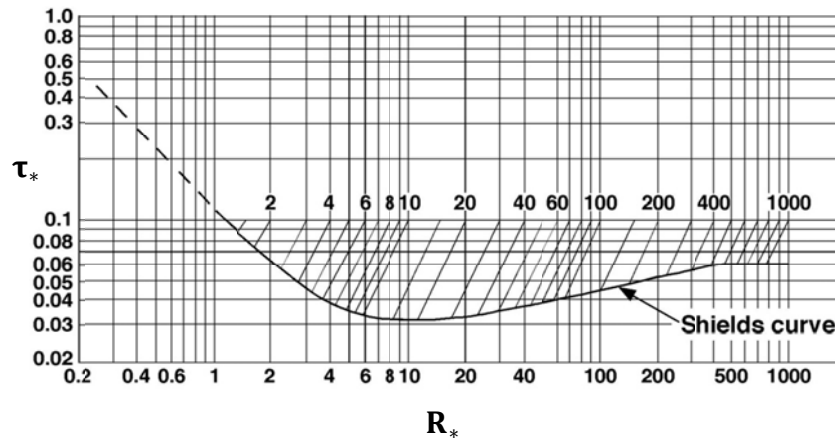


Figura 2. Diagrama de Shields, 1936

Coefficiente adimensional de esfuerzo cortante:

$$\tau_* = \frac{\tau}{d(\rho_s - \rho_f)g} \quad (2.1)$$

Donde:

τ = esfuerzo de cizalladura

d = diámetro de la partícula

g = aceleración de la gravedad

$\rho_s - \rho_f$ = diferencia entre la densidad del sedimento y la del fluido

Numero de Reynolds límite:

$$R_* = \frac{U_* d}{\nu} \quad (2.2)$$

Donde:

U_* = velocidad cortante

d = diámetro de la partícula

ν = viscosidad cinemática

2.2.1.2 Velocidad crítica. Basado en un estudio de la velocidad promedio de flujo, Hjulström (1935) obtuvo una relación entre ésta y el diámetro de las partículas que transporta, a partir de la que diferenció tres campos: erosión, transporte y asentamiento. En su estudio queda en evidencia la necesidad de un flujo más veloz para mover partículas muy finas, y muy gruesas, debido al aumento de la cohesión y el peso, respectivamente

Otra forma de conocer la condición de flujo para el movimiento inicial de partículas fue presentada por Yang (1973), para ello utilizó conceptos básicos de mecánica de fluidos y de capa límite. La determinación de la velocidad crítica se logra en términos de dos coeficientes conocidos como coeficiente adimensional de velocidad crítica y numero de Reynolds para velocidad cortante (véase Figura 3).

2.2.2 Movimiento inicial en sedimentos cohesivos. El movimiento inicial de los sedimentos fino granulares se calcula mediante las formulaciones de Partherniaades (1965):

$$E = M S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}) \quad (2.3)$$

$$D = w_s c_b S(\tau_{cw}, \tau_{cr,d}) \quad (2.4)$$

Donde:

E = erosión

M = parámetro de erosión

D = Sedimentación

w_s = velocidad de asentamiento

c_b = concentración de sedimentos promedio en las cercanías del fondo

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

$$S(\tau_{cw}, \tau_{cr,e}) = 0 \quad \text{si } \tau_{cw} \leq \tau_{cr,e} \quad (2.5)$$

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

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

τ_{cw} = esfuerzo de corte máximo debido a las corrientes y el oleaje

$\tau_{cr,e}$ = esfuerzo de corte critico de erosión

$\tau_{cr,d}$ = esfuerzo de corte critico de asentamiento

2.3 MODELOS DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos en el agua ocurre de dos maneras, ya sea en suspensión o como carga de fondo. Son muchos los modelos que han surgido para reproducir ambos movimientos, a continuación se presentan algunos de ellos.

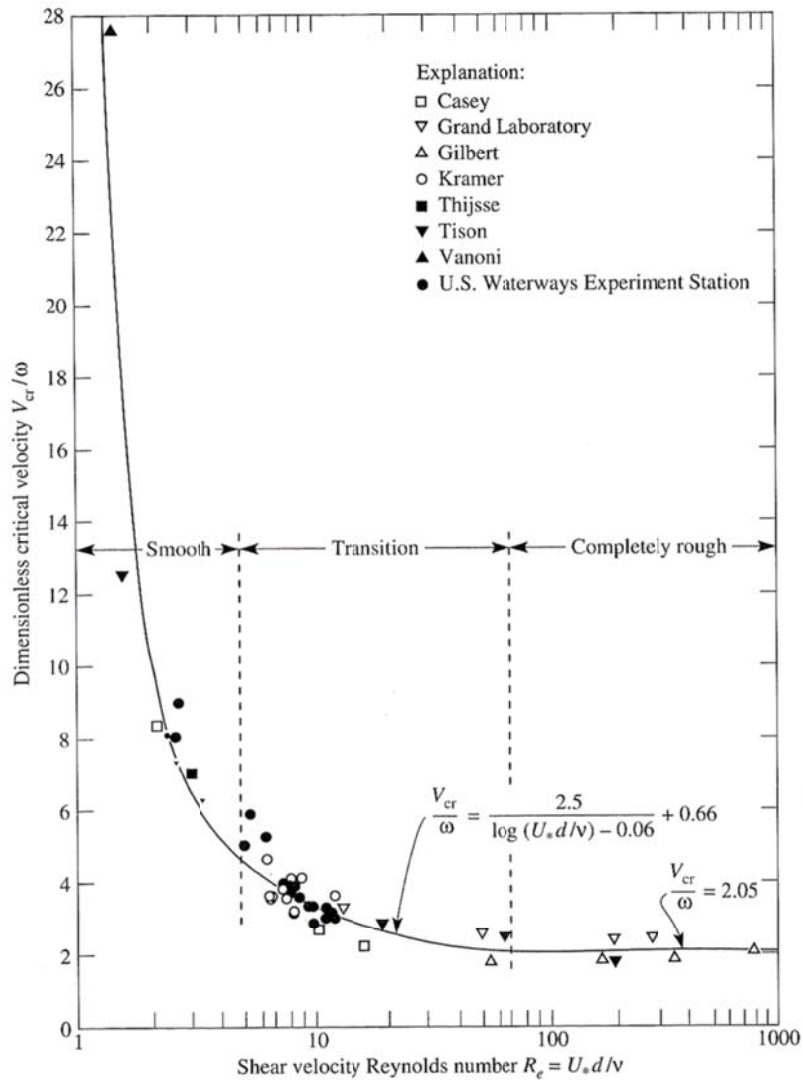


Figura 3. Diagrama de Yang, 1973

2.3.1 Transporte de carga de fondo. Se conoce como transporte de sedimentos de fondo a aquel movimiento de las partículas sobre el lecho sin perder la totalidad del contacto con el mismo. Las tres formas en las que se presenta este movimiento son: deslizamiento, rodamiento y saltación. A pesar de que este tipo de transporte es mucho menos representativo que el de suspensión, adquiere gran importancia para estudios de evolución morfológica (Escobar, 2007).

2.3.1.1 Meyer-Peter y Muller (1948). Su formulación es empírica y se basa en experimentos llevados a cabo por 16 años en Suiza. La relación de variables obtenida permite estimar el transporte de fondo en un canal abierto en función del exceso de esfuerzo cortante ejercido por el agua.

$$S_b = 8 \left[\frac{\mu h S_o}{\Delta d_m} - 0.047 \right]^{3/2} d_m^{3/2} (g\Delta)^{1/2} \quad (2.6)$$

Donde:

S_b = transporte de carga de fondo

d_m = diámetro medio de las partículas

h = profundidad del agua

S_o = pendiente

g = gravedad

$\mu = \left(\frac{C}{C'} \right)^{3/2}$ = factor de forma de fondo

$C = 18 \log \left(\frac{12h}{k_s} \right)$ = coeficiente de rugosidad total de Chezy

$C' = 18 \log \left(\frac{12h}{d_{90}} \right)$ = coeficiente de rugosidad de Chezy debido a la partícula

k_s = rugosidad efectiva de fondo

$\Delta = \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)$ = densidad relativa de la sedimentos

2.3.1.2 Bagnold (1966). Su planteamiento se basó en el estudio de corrientes de agua y en él relacionó el trabajo, la energía y la cantidad de sedimentos transportados. Según su modelo, las partículas de fondo son transportadas por el flujo a través de las interacciones entre ellas.

$$S_b = \frac{e_b \tau_b \bar{u}}{(\rho_s - \rho)g(\tan \phi - \tan \beta)} \quad (2.7)$$

Donde:

S_b = transporte de carga de fondo

e_b = coeficiente de eficiencia (entre 0.1 y 0.2)

τ_b = $\rho g h S_o$ = esfuerzo cortante total de fondo

\bar{u} = velocidad promedio en profundidad

ϕ = ángulo de fricción interna de los sedimentos de fondo

β = ángulo de la pendiente del fondo

ρ_s y ρ = densidad del sedimento y del fluido, respectivamente

2.3.1.3 Van Rijn (1984). Su modelo calcula el transporte de la carga de fondo como el producto de la altura de saltación, la velocidad de la partícula y la concentración de fondo.

$$S_b = 0.053(s - 1)^{0.5} g^{0.5} d_{50}^{1.5} D_*^{-0.3} T^{2.1} \quad (2.8)$$

Donde:

S_b = carga de fondo

s = densidad relativa de los sedimentos

g = gravedad

d_{50} = diámetro medio

$D_* = \left[\frac{(s-1)g}{v^2} \right]^{1/3} d_{50}$ = parámetro adimensional relativo a la partícula

$T = \frac{(u'_*)^2 - (u_{*cr})^2}{(u_{*cr})^2}$ = parámetro adimensional de esfuerzo cortante del lecho

- v = viscosidad cinemática
 u'_* = velocidad de corte relativa a las partículas
 u_{*cr} = velocidad de corte crítica según Shields

2.3.2 Transporte en suspensión. El transporte de sedimentos en suspensión se refiere al movimiento de aquellas partículas, que siendo más densas que el fluido, son soportadas por la componente ascendente de las corrientes turbulentas y permanecen sin tocar el fondo por un tiempo considerable.

2.3.2.1 Einstein (1950). Presenta un enfoque probabilístico para el transporte de sedimentos, relacionándolo con las fluctuaciones turbulentas del flujo. Su metodología se constituyó en la primera en apoyarse en planteamientos matemáticos y estadísticos para el cálculo de transporte de sedimentos.

$$S_s = 11.6 U'_* C_a a \left[2.303 \log \left(\frac{30.2 D}{\Delta} \right) I_1 + I_2 \right] \quad (2.9)$$

Donde:

$$I_1 = 0.216 \frac{E^{z-1}}{(1-E)^z} \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^z dy \quad (2.10)$$

$$I_2 = 0.216 \frac{E^{z-1}}{(1-E)^z} \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^z \ln y dy \quad (2.11)$$

$$a = 2d \quad (2.12)$$

$$\Delta = \frac{d_{65}}{a} \quad (2.13)$$

$$C_a = \frac{S_b}{11.6 U_*' a} = \text{concentración de referencia}$$

S_s = transporte de carga en suspensión

d = diámetro representativo de las partículas de fondo

$E = a/D$ = nivel de referencia adimensional

$y = y'/D$ = coordenada vertical adimensional

D = profundidad del agua

y' = coordenada vertical

$Z = \frac{w_s}{0.4 U_*'}$ = coeficiente de suspensión

w_s = velocidad de caída del sedimento

U_*' = velocidad de corte

S_s = transporte de carga en suspensión

2.3.2.2 Bagnold (1966). Para Bagnold, el transporte de sedimentos en suspensión es soportado por el flujo mediante la difusión turbulenta, y se puede calcular de la siguiente manera:

$$S_s = \frac{e_s (1 - e_b) \tau_b \bar{u}}{(\rho_s - \rho) g \cos \beta [(w_s/\bar{u}) - \tan \beta]} \quad (2.14)$$

Donde:

S_s = transporte de carga en suspensión

e_s = factor de eficiencia de la carga en suspensión (entre 0.01 y 0.02)

e_b = factor de eficiencia de carga de fondo (entre 0.1 y 0.2)

τ_b = esfuerzo cortante total de fondo debido a la corriente

\bar{u} = velocidad promedio en profundidad

ρ_s y ρ = densidad del sedimento y del fluido respectivamente

β = ángulo de la pendiente del fondo

w_s = velocidad de caída del sedimento

2.3.2.3 Van Rijn (1984). Van Rijn calculó la carga en suspensión como el producto, integrado en la profundidad, de la concentración local y la velocidad del flujo. Su modelo presenta a la velocidad de asentamiento y al coeficiente de difusión del sedimento, como los parámetros hidráulicos que controlan la carga en suspensión.

$$S_s = F V h c_a \quad (2.15)$$

Donde:

V = velocidad media

h = profundidad del agua

$$F = \frac{(a/h)^{Z'} - (a/h)^{1.2}}{(1 - a/h)^{Z'} (1.2 - Z')} \quad (2.16)$$

$$C_a = \frac{0.015 d_{50} T^{1.5}}{a D_*^{0.3}} \quad (2.17)$$

$Z' = Z + \psi$ = coeficiente de suspensión modificado

$Z = \frac{w_s}{0.4 \beta U_*}$ = coeficiente de suspensión

$$\beta = 1 + 2 \left(\frac{w_s}{U_*} \right)^2 \quad (2.18)$$

$$\psi = 2.5 \left(\frac{w_s}{U_*} \right)^{0.8} \left(\frac{C_a}{0.65} \right)^{0.4} \quad (2.19)$$

a = nivel de referencia

w_s = velocidad de caída del sedimento

U_* = velocidad de corte

T = parámetro adimensional de esfuerzo cortante del lecho

D_* = parámetro adimensional relativo a la partícula

2.3.2.4 Ecuación de Advección – Difusión. El transporte de cantidades escalares es reconocido como una combinación de dos procesos físicos: la

advección y la difusión. La advección se refiere a la propagación de una cantidad escalar en el mismo sentido del flujo, mientras la difusión tiende a suavizar la distribución debido a los movimientos moleculares y turbulentos (Abbott y Pricel, 1994). La ecuación de advección – difusión es comúnmente usada para simular el transporte de masa o energía de un fluido en movimiento, y su formulación general se presenta a continuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i C) - C \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_i \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad (2.20)$$

Donde:

C = cantidad transportada

u_i = componente de la velocidad en la dirección x_i

D_i = coeficiente direccional de difusión

t = tiempo

El primer término denota el cambio local en el tiempo, el segundo representa el cambio en el espacio debido a la advección y el término de la derecha es la contribución de la difusión.

3. DATOS, MATERIALES Y HERRAMIENTAS

La mayoría de la información utilizada proviene de dos proyectos de investigación del Área de Ciencias del Mar de la Universidad EAFIT: “Erosión costera en Antioquia I: Dinámica sedimentaria del golfo de Urabá (erosión-depositación) durante los últimos 10.000 años” y “Erosión costera en Antioquia II: Modelación de la evolución morfológica en el golfo de Urabá”.

Ambos proyectos han sido financiados por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación – Colciencias y a partir de los datos de sus campañas de medición y de los análisis llevados a cabo, se estimaron gran parte de las condiciones de frontera, los parámetros físicos y los numéricos que requieren el modelo hidrodinámico y el de transporte de sedimentos.

3.1 SOFTWARE.

A continuación se presenta una breve descripción de las principales herramientas computacionales utilizadas durante el desarrollo del proyecto de grado, junto con una síntesis de sus aplicaciones.

3.1.1 Delft3D. La plataforma de simulación Delft3D desarrollada en Holanda por WL | Delft Hydraulics, es el sistema multidimensional (2D o 3D) que se utilizó para realizar el análisis de sensibilidad de un modelo de transporte de sedimentos en el golfo de Urabá. Este software resuelve flujos no estacionarios y fenómenos de transporte sobre mallas rectilíneas o curvilíneas, apoyándose en las condiciones iniciales y de frontera que se impongan en la zona de estudio.

Delft3D es un software reconocido a nivel mundial como una herramienta computacional de alta calidad para la simulación de procesos de tipo

hidrodinámico, de transporte de sedimentos, oleaje y cambios morfológicos que tienen lugar en zonas costeras, estuarios y ríos.

Entre sus aplicaciones sobresale la simulación de oleajes extremos, cambios en el nivel del mar, calidad de aguas y procesos morfológicos llevada a cabo para la construcción de la isla Jumeirah, la primera de las famosas islas palmera que se han venido construyendo desde el 2001 en los Emiratos Árabes Unidos.

3.1.2 ArcGIS. Sistema de Información Geográfica (SIG) producido y comercializado por ESRI. Es una herramienta computacional capaz de almacenar, manipular, reunir y mostrar información geográficamente referenciada.

Las facilidades en el manejo de la información hacen del ArcGIS una herramienta para la toma de decisiones en diversas áreas del conocimiento, como la ingeniería, las ciencias sociales y políticas, la biología, la geología, entre otras. Su aplicación en la ingeniería civil abarca la realización de mapas, el manejo de información vectorial, la delimitación de cuencas, la identificación de zonas de riesgo, etc.

3.1.3 ENVI. Software cuyas siglas en inglés significan: *Environment for Visualizing Images*. ENVI fue lanzado al mercado en 1994 como una plataforma para procesamiento, análisis de imágenes y recolección de datos desde sensores aerotransportados y satelitales.

Es una herramienta útil para lograr la comprensión de los procesos terrestres, además de la planeación de estrategias militares y la observación y análisis de fenómenos atmosféricos.

3.1.4 Matlab. Es considerado un lenguaje computacional técnico avanzado y una plataforma interactiva para el desarrollo de algoritmos, visualización de datos,

análisis de información y computación numérica. Entre sus aplicaciones esta el procesamiento de imágenes, control de diseño, modelación financiera, etc.

3.2 MATERIAL CARTOGRÁFICO.

Para la generación de la batimetría por medio de interpolación, se utilizaron los puntos de la carta náutica COL412 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH). Se hizo uso además, de los mapas de sedimentos de fondo presentados por García (2007), a partir de los cuales, se elaboró el mapa de sedimentos de fondo para el modelo de transporte de sedimentos.

La malla de cálculo utilizada para el análisis de sensibilidad, fue hecha en la fase I de los proyectos investigativos mencionados al inicio de este capítulo. Para su elaboración se utilizaron la carta náutica COL412 y la línea de costa del golfo de Urabá trazada a partir de imágenes aéreas tomadas en el 2009, dentro del proyecto de largo alcance: “Expedición Antioquia 2013”.

3.3 BASES DE DATOS

Se utilizaron las series temporales de radiación total y viento publicadas por el NCEP/NCAR Reanalysis Project (Kalnay *et al.*, 1996).

Adicionalmente, se utilizaron los datos de temperatura y humedad relativa registrados por la estación climatológica del IDEAM ubicada en Capurganá, corregimiento de Acandí, Chocó.

4. CAMPAÑAS DE MEDICIÓN

En el marco de las fases I y II de los proyectos de investigación de la erosión costera en el golfo de Urabá, se llevaron a cabo dos campañas de medición de las cuales se obtuvo información para la realización de este proyecto de grado. Se describen a continuación los equipos para medición de corrientes y concentración de sedimentos utilizados y se hace un acercamiento a sus principios de funcionamiento. Por último se presenta una síntesis de las campañas de medición y de los datos obtenidos en ellas.

4.1 EQUIPOS DE MEDICIÓN

4.1.1 ADCP. Los procedimientos generales para la realización de aforos se describen en el documento escrito por Davidian (1969), el más utilizado de ellos es el método del correntómetro que consiste en la partición de una sección transversal del cauce de un río en subáreas y en la medición de velocidades de manera puntual a lo largo de verticales.

Con el desarrollo de la física acústica, han aparecido nuevas formas de aforo con alta resolución espacial que utilizan equipos como el *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) para obtener las tres componentes de la velocidad a lo largo de toda la columna de agua. La variable se corrige por el movimiento de la embarcación mediante los sensores de *Bottom tracking, pitch and roll* (seguimiento del fondo, cabeceo y balanceo).

El *Acoustic Doppler Current Profiler* mide la velocidad del agua mediante el principio Doppler, el cual relaciona el cambio en la frecuencia de una fuente sonora con las velocidades relativas del emisor y el receptor. En la Figura 4, se

presenta el ADCP de 600 kHz con el que se realizaron las mediciones en campo que se describirán más adelante en este capítulo.

El ADCP transmite un pulso acústico en la columna de agua y luego “escucha” el eco que se devuelve al chocar con las partículas suspendidas en el medio. El cambio entre el pulso emitido y el eco que llega al equipo es proporcional a la velocidad relativa entre el ADCP y las partículas en suspensión; esto permite determinar la velocidad relativa de estas últimas con respecto al equipo y teniendo en cuenta que las partículas se mueven a la misma velocidad del agua, el parámetro de interés es finalmente medido.

A pesar de estas ventajas, el ADCP tiene restricciones de cobertura en las áreas superficiales y cercanas al fondo, por lo que se requiere la implementación de correcciones y extrapolaciones para consolidar su información. La descripción general de las restricciones, procedimientos de corrección y causas de error se describen en detalle en Simpson (2001).

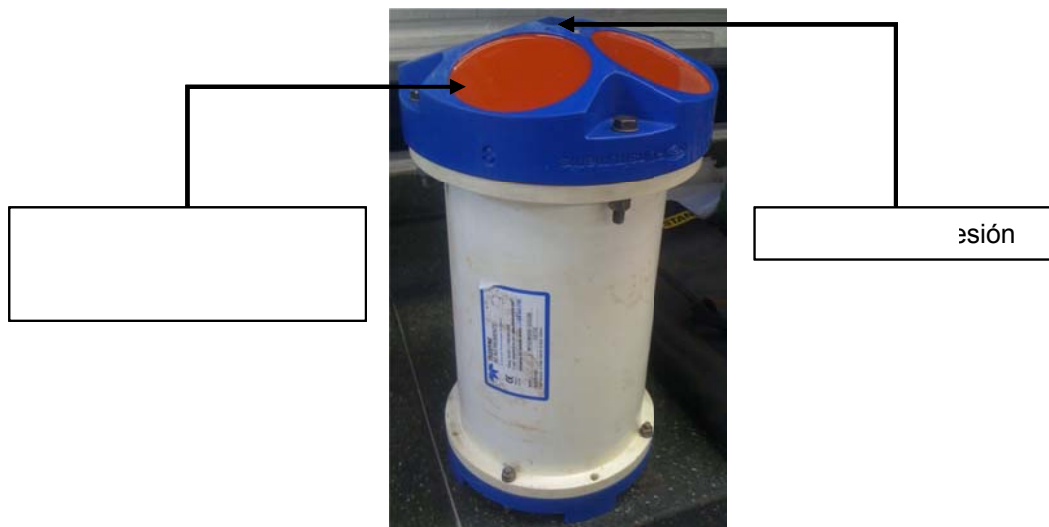


Figura 4. Acoustic Doppler Current Profiler

4.1.2 Muestreadores mecánicos. La medición de concentraciones es fundamental para el desarrollo de cualquier modelo de transporte de sedimentos,

la forma más laboriosa pero más confiable de obtener esta variable es el muestreo mecánico de aguas. Otras opciones que facilitan las labores de campo son los equipos de tipo óptico y acústico que permiten determinar las concentraciones de sedimentos de manera indirecta, un ejemplo del uso de estas metodologías se encuentra en Poerbandono (2003).

Para la toma de muestras de agua se utilizaron dos tipos de muestreadores de 1.2 litros conocidos como botella Nansen y su versión mejorada, la botella Niskin (véase Figura 5). Ambos instrumentos cuentan con un sistema de resorte que mantiene abiertas las tapas en sus extremos, una vez la botella se introduce en el agua verticalmente y se lleva a la profundidad de muestreo, se deja caer un testigo (peso) a lo largo de la cuerda que une la botella con la embarcación, el golpe de este peso libera la tensión en el resorte y se cierran automáticamente ambas tapas.

La botella Niskin se diferencia de la Nansen en que su diseño permite el cerrado simultáneo de las tapas ubicadas en sus extremos, mientras la más antigua requiere que el testigo active el cerrado de cada tapa por separado.

4.1.3 CTD. “La salinidad y la temperatura del agua no se alteran significativamente por procesos diferentes a la mezcla y la difusión, lo que las clasifica como propiedades conservativas del agua” (Thurman, 1985). Comúnmente, para la medición de estas variables se utiliza un CTD, cuyas siglas en inglés indican *Conductivity – Temperature – Depth* (Conductividad – Temperatura – Profundidad). En algunos casos se usan además para medir Oxígeno disuelto por lo que pasan a llamarse CTDO.



Figura 5. Botellas para muestreo mecánico A. Nansen y B. Niskin

Un CTD registra datos del agua mientras va viajando asegurado en una embarcación, mientras se hace descender a lo largo de una columna de agua o en un punto determinado. Este equipo utiliza un sensor de presión para obtener los datos de profundidad, un termómetro y un sistema eléctrico que indica la conductividad del agua, lo que permite a su vez conocer los valores de salinidad.

Cabe aclarar que en las campañas de medición descritas en la próxima sección se realizaron numerosos perfiles de CTD para aportar información de campo a otros trabajos que se están desarrollando actualmente. Para este proyecto de grado únicamente se utilizó su información como base para determinar la distribución de la malla vertical sobre la que se resuelve el modelo.

4.2 ESTRATEGIAS DE MEDICIÓN

Las campañas de medición realizadas tuvieron como objetivo la adquisición de información de corrientes, caudales, sedimentos en suspensión y propiedades conservativas de las aguas del golfo de Urabá y de la desembocadura de su principal afluente, el río Atrato. Con el fin de lograr este objetivo, se planearon recorridos transversales y longitudinales a bordo de una embarcación para la medición de corrientes, en los que además, se realizaron estaciones para la toma de muestras de agua y perfiles de CTD.

Los recorridos que se realizaron en campo, se acercan lo máximo posible a transectos trazados en tierra durante la planeación de las salidas, los cuales pretenden abarcar la zona centro del golfo, el estrechamiento que sufre el mismo en las cercanías de Matuntugo (boca del Atrato) y bahía Colombia.

En la Figura 6, se plasma la forma como se utilizó el ADCP para la medición de corrientes en el golfo de Urabá (con las membranas direccionadas hacia el fondo del mar) y las posiciones dentro de la embarcación para el muestreo de aguas y la medición de propiedades conservativas.

Se describen a continuación las dos campañas de medición realizadas en el año 2010, la primera hace parte de la fase inicial de la investigación en Urabá y la última da comienzo al proyecto “Erosión costera en Antioquia: Modelación de la evolución morfológica en el golfo de Urabá”

4.2.1 Campaña golfo de Urabá I-2010. Se llevó a cabo entre los días 8 y 19 del mes de abril de 2010 a bordo de la embarcación “María Auxiliadora” a la que se le realizaron las adecuaciones necesarias para ubicar el ADCP en la proa y hacer descender el CTD por babor mediante un cabestrante eléctrico.

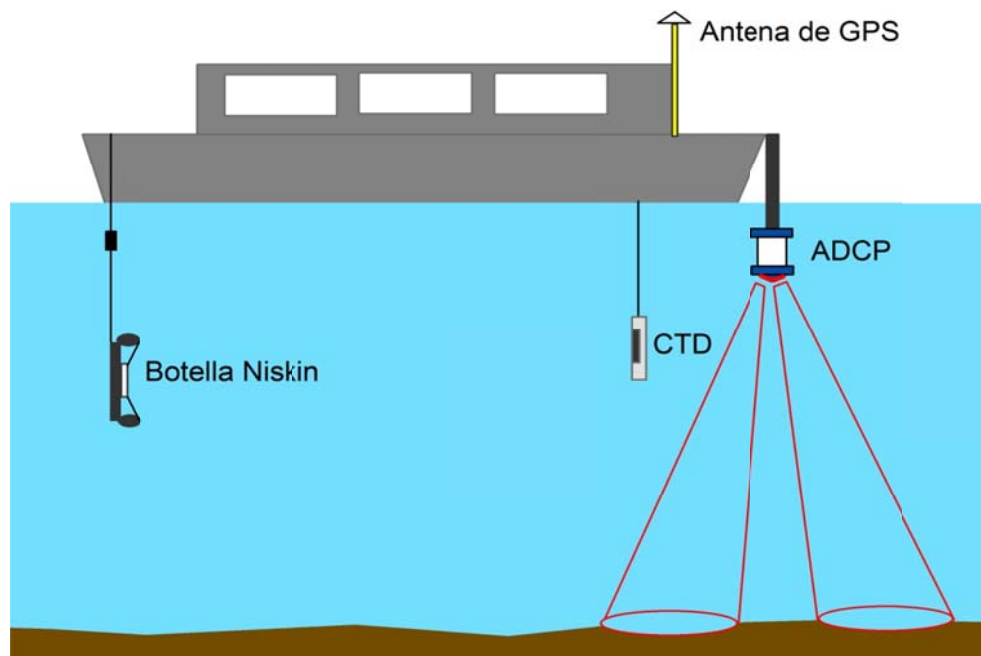


Figura 6. Montaje de equipos oceanográficos en la embarcación

Durante esta campaña se hicieron mediciones de corrientes combinadas con muestreo de aguas y perfiles de CTD en el golfo de Urabá, en la Figura 7.A se observan los recorridos en los que se obtuvo la información.

En esta campaña se tomaron muestras de agua superficiales y se realizaron aforos con el ADCP en seis de las siete principales bocas del Atrato (véase Figura 8: 1.Tarena, 2.El Roto, 3.Matuntugo, 4.Coco Grande, 5.Urabá y 6.Leoncito). No se pudo acceder a la boca Las Pavas debido a que se encontraba bloqueada por acumulación de sedimentos. Las secciones de aforo, se ubicaron en las bocas del río a las se tuvo acceso tratando de acercarse al máximo a los requerimientos físicos que debe cumplir una sección de aforo especificados por Davidian (1969).

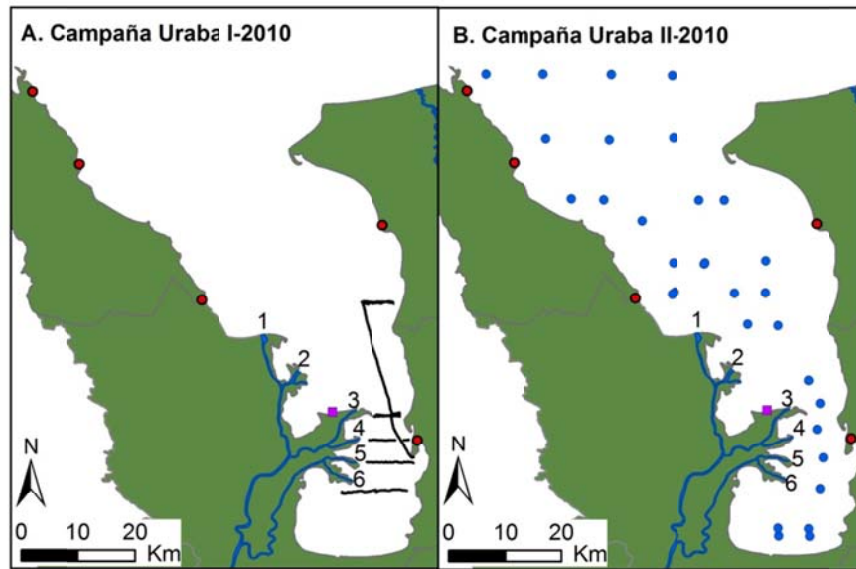
A pesar de no corresponder exactamente con las fechas, durante la primera semana del mes de abril de 2010 el CIOH realizó un crucero oceanográfico a bordo del ARC Malpelo en el que se tomaron perfiles adicionales de CTD y turbidez superficial en 35 estaciones distribuidas en el golfo.

4.2.2. Campaña golfo de Urabá II-2010. Realizada entre el 4 y el 13 de noviembre de 2010 en conjunto CIOH-EAFIT, esta campaña se dividió en dos fases, la primera se hizo a bordo del buque oceanográfico ARC Malpelo. Consistió en un recorrido a lo largo y ancho del golfo de Urabá en el que se realizaron 32 estaciones con perfiles de CTD y muestreo de aguas a 0, 3, 5 y 10 m de profundidad.

La segunda fase se realizó a bordo de la embarcación Skorpio II, consistió en la ejecución de aforos con el ADCP y en la toma de muestras de agua; Todo esto, hecho en las secciones transversales de las seis principales bocas del Atrato en las que ya se habían realizado mediciones en la campaña golfo de Urabá I-2010.

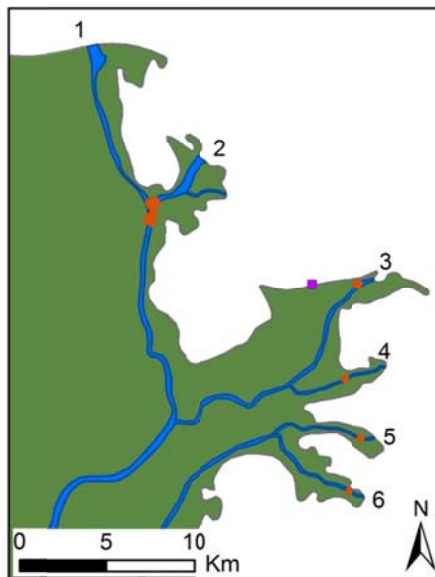
Para ambas fases se pudo además, determinar la turbidez de cada muestra de agua por medio de un turbidímetro WPA modelo TU140 (equipo del CIOH que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 grados en un volumen de agua).

En la Figura 7.B se presenta la ubicación de las estaciones realizadas a bordo del ARC Malpelo en el mes de noviembre de 2010, que iniciaron de norte a sur y se completaron en menos de 24 horas. Cabe anotar que la distribución de las estaciones fue propuesta en la fase inicial del proyecto “Erosión costera en Antioquia” por Montoya (2010), con el fin de utilizarse en las investigaciones futuras y para conformar una base de datos completa en la zona.



- Transectos con ADCP
- Estaciones de muestreo
- Cabeceras municipales principales
- Las Pavas
- 1. Tarena
- 2. El Rcto
- 3. Matuntugo
- 4. Coco grande
- 5. Urabá
- 6. Leoncito

Figura 7. Campañas de medición: golfo de Urabá 2010



- 1. Tarena
- 2. El Roto
- 3. Matuntugo
- 4. Coco grande
- 5. Urabá
- 6. Leoncito
- Secciones de aforo
- Las Pavas

Figura 8. Secciones de aforo en seis bocas del río Atrato

5. MONITOREO REMOTO DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN

La información recolectada durante las campañas de medición descritas en el capítulo 4, hace parte de la base de datos de los proyectos de investigación de Erosión Costera en Antioquia y es de vital importancia para las fases de calibración y validación del modelo hidrodinámico y de transporte de sedimentos.

A pesar de que este proyecto de grado solo abarca unos cuantos parámetros del análisis de sensibilidad, la información de campo ha resultado útil para determinar condiciones de frontera de las cuales la información previa era escasa o nula, tal es el caso de la distribución del caudal del río Atrato a través de sus bocas (véase sección 6.4.2) y la concentración de sedimentos en la salida de este gran afluente.

Con el fin de aprovechar al máximo los datos obtenidos en campo y considerando que en el golfo de Urabá no se contó con información de sedimentos en los tributarios menores, se recurrió al uso de sensores remotos para aplicar la metodología propuesta por Rodriguez y Gilbes (2009), en la que se relaciona la percepción remota con información de campo para ampliar la cobertura espacial y temporal de concentración de sedimentos.

5.1 DATOS DE CAMPO

Para determinar las concentraciones de sedimentos en las estaciones realizadas durante las campañas de medición, las muestras de agua tomadas a tres profundidades en las bocas del Atrato y a cuatro profundidades en el golfo de Urabá, fueron filtradas a través de una membrana de fibra de vidrio GC50 y secadas a 103°C, siguiendo el procedimiento descrito en el método 2540D de la American Public Health Association *et al.* (1998).

5.2 SENSOR REMOTO MODIS

Los muestreos mecánicos a pesar de ser el método más confiable para la obtención de concentraciones de sedimentos implican esfuerzos, tiempo y costos elevados, es por esto que en parte, el uso de sensores remotos para mapear sedimentos en ambientes marinos se ha extendido considerablemente; un método común para lograr este fin es relacionar la reflectancia medida en la porción de 600 – 700 nm del espectro visible con concentraciones de material suspendido en el agua (Miller y Mckee, 2004).

Entre las opciones gratuitas con resolución temporal diaria que ofrece la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) para observar la Tierra desde el espacio, están las imágenes satelitales obtenidas por medio de un sensor MODIS (utilizadas en este proyecto de grado). En la Figura 9 se observa un ejemplo de este tipo de imagen con cobertura sobre el golfo de Urabá.



Figura 9. Imagen MODIS Terra (4 abril de 2010)

Las imágenes satelitales MODIS Terra, reciben su nombre del equipo que las genera: *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* y del satélite en el que se

encuentran, para este caso Terra. Un sensor MODIS reúne la información de la energía reflejada y emitida desde la superficie de la Tierra en 36 bandas espectrales que van desde 0.4 a 14.4 μm . Los datos radiométricos son almacenados con una resolución espacial de 250, 500 y 1000 m.

5.3 PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES SATELITALES MODIS TERRA

Partiendo de la suposición de que la distribución de concentraciones de sedimentos superficiales es estable durante una campaña de medición, se hizo la búsqueda de dos imágenes satelitales MODIS-Terra con resolución de 250 m, que tuvieran baja nubosidad en la zona del golfo y que temporalmente estuvieran lo más cercanas posible a la fecha en la que se hicieron los muestreos mecánicos y la medición de turbidez.

Las imágenes que cumplieron con estas características y que incluyen los valores de radiancia y reflectancia se descargaron en formato HDF desde el servidor LAADS Web y su base de datos MOD02QKM, Level 1B *Calibrated Radiances* – 250 m. La georreferenciación de las imágenes al sistema coordenado WGS84 se hizo en el software ENVI 4.7, al igual que la corrección atmosférica, proceso en el que se le sustrajo el valor de reflectancia del pixel más oscuro de la banda 2 a todos los valores de la banda 1.

Luego de hacerles estas modificaciones a las imágenes, se les superpusieron las estaciones en que se tomaron valores de turbidez durante las campañas Urabá I y II - 2010. Cada punto queda ubicado sobre un pixel, por lo que le corresponde un único valor de reflectancia de la banda 1, el cual fue extraído para la posterior correlación de datos.

5.4 CORRELACIÓN REFLECTANCIA – TURBIDEZ – CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS

Utilizando los datos de turbidez superficial de la campaña Urabá I-2010, se realizó una primera correlación entre esta variable y la reflectancia de la banda 1 de la imagen MODIS Terra correspondiente a la fecha de muestreo (véase Figura 10). La ecuación obtenida explica en un 79% la variabilidad de la turbidez superficial y puesto que el valor de P en la tabla ANOVA (Tabla 2) es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.

Posterior a la obtención de esta correlación se desarrolló la campaña de medición golfo de Urabá II-2010, donde se tomaron simultáneamente muestras de agua y se realizaron mediciones de turbidez. Estos datos, junto con la imagen satelital correspondiente, permitieron revisar la ecuación obtenida para la campaña de abril del CIOH y a la vez, el planteamiento de una correlación adicional entre la concentración superficial de sedimentos y la turbidez.

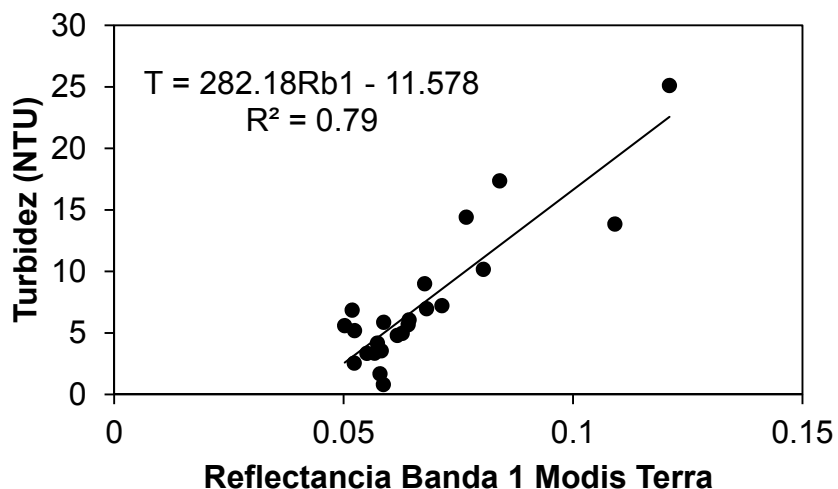


Figura 10. Correlación entre turbidez y reflectancia para abril de 2010

Tabla 2. ANOVA Correlación Turbidez vs Reflectancia de la banda 1 MODIS Terra

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	550.653	1	550.653	77.50	0.0000
Residuo	149.213	21	7.1054		
Total	699.866	22			

Las correlaciones obtenidas para noviembre de 2010 se presentan en las figuras 11 y 12, donde se observa un cambio drástico entre la ecuación que relaciona turbidez y reflectancia. Esta variación pudo aparecer debido al aumento del rango de las turbideces medidas en noviembre (0 - 350 NTU aprox.) con respecto al medido en abril de 2010 (0 - 25 NTU aprox.). Otro factor que puede afectar la correlación es el desfase temporal entre la medición de turbidez y la captura de la imagen, que corresponde a 1 día para abril y 2 días para noviembre.

A pesar de esto, para noviembre se tiene el mayor volumen de datos, incluidos los de concentración, por lo que haciendo uso de las correlaciones obtenidas para este periodo, se llegó a la expresión que relaciona la concentración de sedimentos superficial y la reflectancia de la banda 1 de una imagen MODIS Terra:

$$C = 0.6255 (2 \times 10^6 Rb1^{4.3442}) + 3.2719 \quad (5.1)$$

Donde:

C = concentración superficial de sedimentos (mg/l)

$Rb1$ = reflectancia de la banda 1 de una imagen MODIS Terra (%)

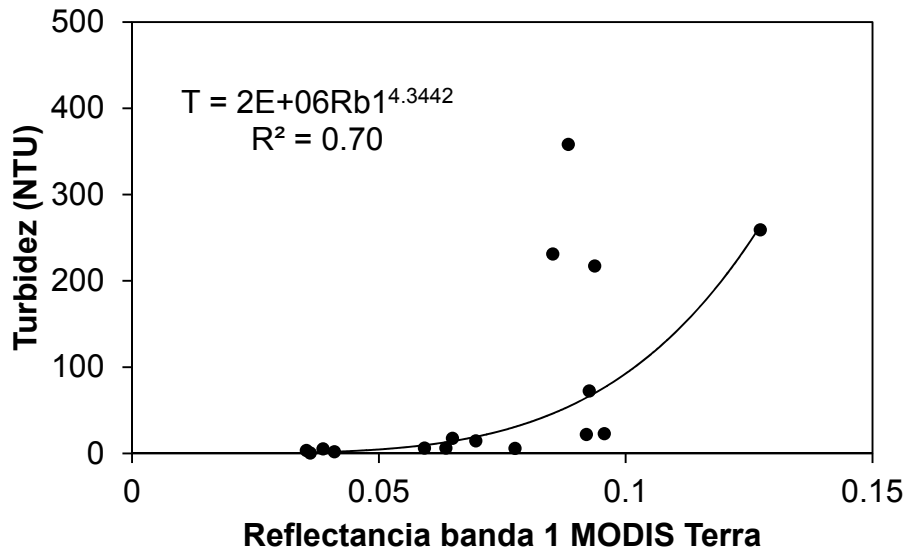


Figura 11. Correlación entre turbidez y reflectancia para noviembre de 2010

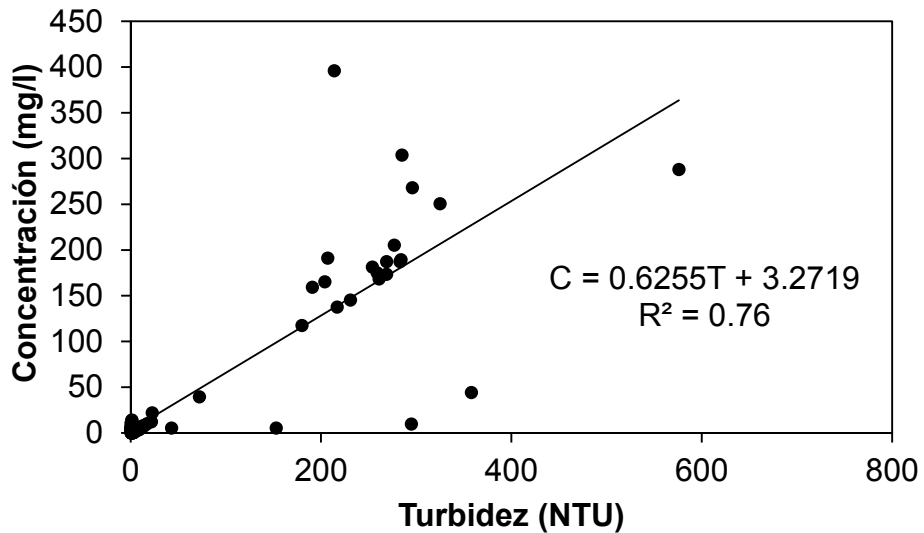


Figura 12. Correlación entre concentración de sedimentos y turbidez para noviembre de 2010

Partiendo de la ecuación 5.1, se usaron las reflectancias de una imagen MODIS Terra con escasa cobertura de nubes para calcular las concentraciones superficiales en las bocas del Atrato, los valores calculados se compararon con las

concentraciones medias obtenidas en los aforos; la comparación demostró que las concentraciones calculadas representan únicamente valores superficiales correspondientes al 6.5% de la concentración media en las desembocaduras. Al conocer este porcentaje, mediante una regla de tres simple, se determina que la concentración media para una boca se obtendrá al multiplicar la concentración calculada con la ecuación 5.1 por un factor de 15.38.

Con los datos anteriores y asumiendo condiciones de descarga sólida similares en todos los afluentes del golfo, se puede obtener de manera aproximada, las concentraciones promedio para el resto de las desembocaduras de los afluentes del golfo (véase sección 6.4.2, Tabla 6)

6. MODELACIÓN MATEMÁTICA

Se presentan en este capítulo, los forzamientos y las características del modelo de referencia para la realización del análisis de sensibilidad, el cual se plantea en 3D dadas las condiciones oceanográficas del golfo de Urabá, donde la desembocadura del Atrato causa cambios termo-salinos significativos tanto en el plano horizontal como en profundidad.

6.1 COBERTURA TEMPORAL

Las simulaciones implicadas en el análisis de sensibilidad se realizaron para la totalidad del mes de agosto de 2009, incluyendo en este periodo el tiempo de calentamiento (tiempo que tarda el modelo en conjugar las condiciones iniciales y de frontera y a partir del cual, se cumplen las leyes de conservación de la masa, momentum y energía). Los resultados del análisis de sensibilidad están enmarcados entre el 28 de agosto y el 1 de septiembre del año previamente mencionado.

Se realizaron dos simulaciones adicionales, la primera de ellas para representar la época seca, el periodo en el que se obtuvieron los resultados son: del 5 al 10 de enero de 2009; y la segunda para representar la ocurrencia de una condición meteorológica extrema en el golfo, cuyos resultados se obtuvieron desde el 29 de octubre hasta el 11 de noviembre de 2010, época durante la que el huracán Tomas atravesó el mar Caribe.

6.2 DOMINIO DE CÁLCULO

El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Navier Stokes sobre una malla curvilínea que se proyecta en profundidad en un sistema coordenado tipo σ ,

cuyas fronteras se acomodan a la forma del fondo y a la superficie libre (véase Figura 13). La malla vertical consiste en un número de capas constante, pero de espesor casi siempre variable, lo que permite tener capas más finas en las zonas de mayor interés para el modelador (Deltares, 2010).

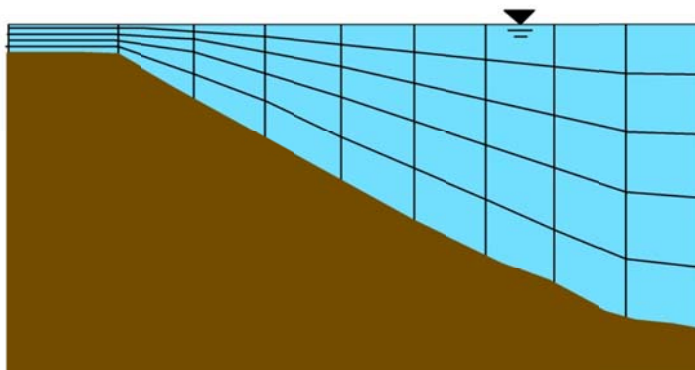


Figura 13. Ejemplo de sistema coordenado tipo σ

El modelo utilizado cuenta con un total de 20 capas; 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%. Esta distribución se hizo con base en las mediciones del CTD, donde se evidenciaron termoclinas y haloclinas marcadas en los primeros metros de profundidad.

Tabla 3. Distribución de las capas en la malla vertical del modelo

Rango de Capas	Espesor como porcentaje de la profundidad (%)
1 - 5	2.5
6 - 15	5
16 - 20	7.5

En la Figura 14 se observa la malla curvilínea compuesta por poco menos de 22000 celdas y que representa el plano horizontal del modelo. Su resolución varía entre 37.50 m en la zona más estrecha del golfo 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”. Adicionalmente se presenta la batimetría generada por interpolación a partir de los puntos de la carta náutica COL412 del CIOH.

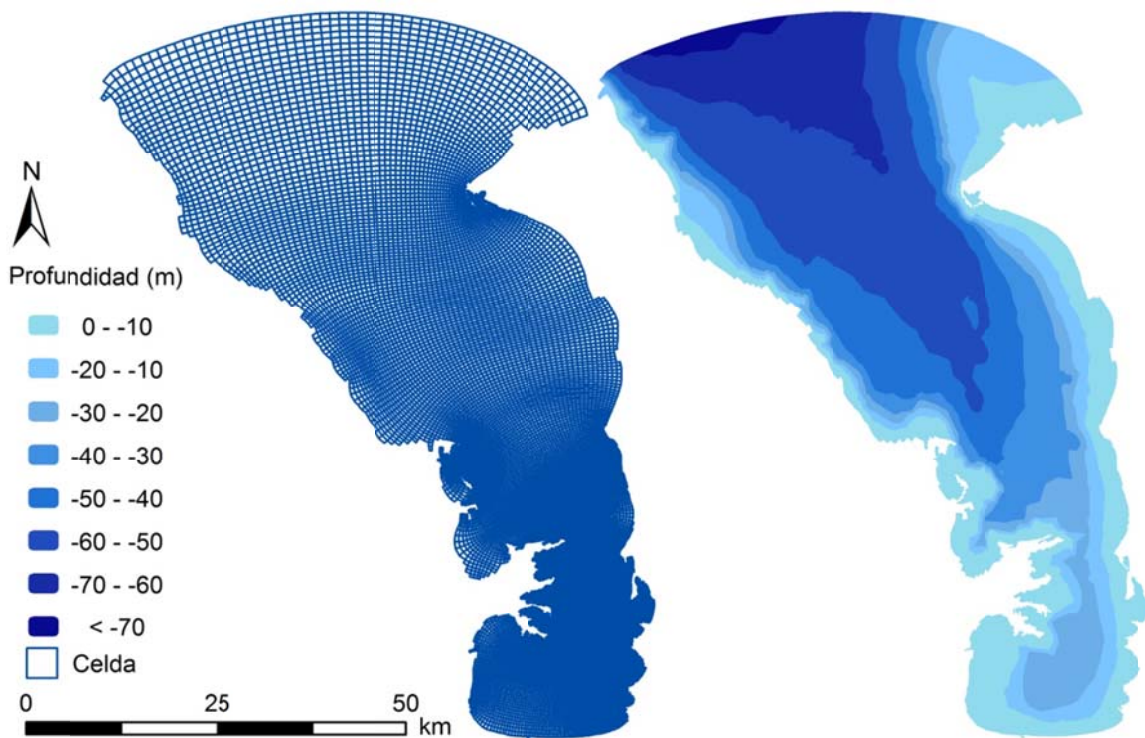


Figura 14. Malla de cálculo y batimetría del golfo de Urabá

6.3 CONDICIONES METEOROLÓGICAS

Se hizo uso de las series temporales de humedad relativa, temperatura del aire, radiación total, velocidad y dirección del viento, publicadas por las fuentes mencionadas en la sección 3.3.

En la Figura 15 se observan las condiciones de viento para los tres periodos simulados, en la época húmeda (agosto de 2009) se presentaron vientos con velocidades inferiores a los 4 m/s y provenientes en su mayoría del noroeste; durante la época seca (enero de 2009) los vientos fueron más veloces que los del periodo anteriormente mencionado y su proveniencia osciló entre el noreste y noroeste; Por último, durante los días en los que el huracán Tomas se movía por el Caribe (octubre – noviembre de 2010) los vientos fueron generalmente superiores a los 4 m/s y se desplazaron desde el oeste.

La temperatura del aire y la radiación de onda corta para los tres periodos simulados: época húmeda, seca y condición meteorológica extrema, se pueden observar en la Figura 16 en ese mismo orden. La resolución temporal de la información es de 6 horas por lo que se observan datos diurnos y nocturnos.

6.4 CONDICIONES DE FRONTERA

Además de la interfase aire-agua y suelo-agua, otras fronteras del modelo son los afluentes y el mar Caribe, ambos transmiten condiciones al área de estudio que afectan la hidrodinámica y el transporte de sedimentos.

6.4.1 Mar Caribe. La frontera más amplia se ubica al norte del dominio de cálculo y es la encargada de transmitirle al golfo de Urabá los forzamientos del mar Caribe (niveles, salinidad, temperatura y concentración de sedimentos).

Para lograr trasladar las condiciones de frontera del Caribe al golfo de Urabá, se utilizaron los resultados de un punto de control del modelo continental del Caribe (Proyecto de investigación “Erosión costera en Antioquia I”, en desarrollo). La cobertura de este modelo y el punto de control mencionado se observan en la Figura 17.

El modelo matemático 2D de gran escala, acopla la hidrodinámica y el oleaje en el mar Caribe. La discretización espacial del área de estudio, se hizo mediante una malla curvilínea de 68000 celdas aproximadamente, cuyos tamaños oscilan entre 1,5 y 7,5 km en cercanías a la línea de costa y en las zonas remotas respectivamente. (Posada *et al.*, 2010).

En la Figura 18 se observan las condiciones de oleaje obtenidas del punto de control del modelo continental del Caribe, la gráfica muestra los porcentajes de ocurrencia de alturas significativas de ola (Hs) con una dirección determinada. Para la época húmeda Hs no supera los 1.5 m, mientras en la época seca se obtuvieron oleajes provenientes del noreste con alturas significativas de olas superiores a los 2.5 m.

Durante la ocurrencia del huracán Tomas predominó el oleaje del noroeste con altura significativa de ola de 2.14 m. Esta información no se obtuvo del modelo del Caribe, sino, a partir de la información registrada por una boya oceanográfica ubicada al norte de Punta Caribaná, datos que hacen parte de la fase I del proyecto de investigación “Erosión Costera en Antioquia”.

Para el cálculo de la marea astronómica se ingresaron al modelo 36 componentes, las cuales fueron determinadas en el proyecto “Erosión costera en Antioquia I” (En desarrollo) mediante un análisis de armónicos realizado a los niveles registrados por el mareógrafo de San Cristóbal, Panamá (véase Tabla 4).

Adicionalmente, a partir de la revisión de la publicación de García (2007) y de las mediciones realizadas en campo, se impuso en la frontera norte del modelo una temperatura de 28 °C, una salinidad de 32 ppt y una concentración de sedimentos nula.

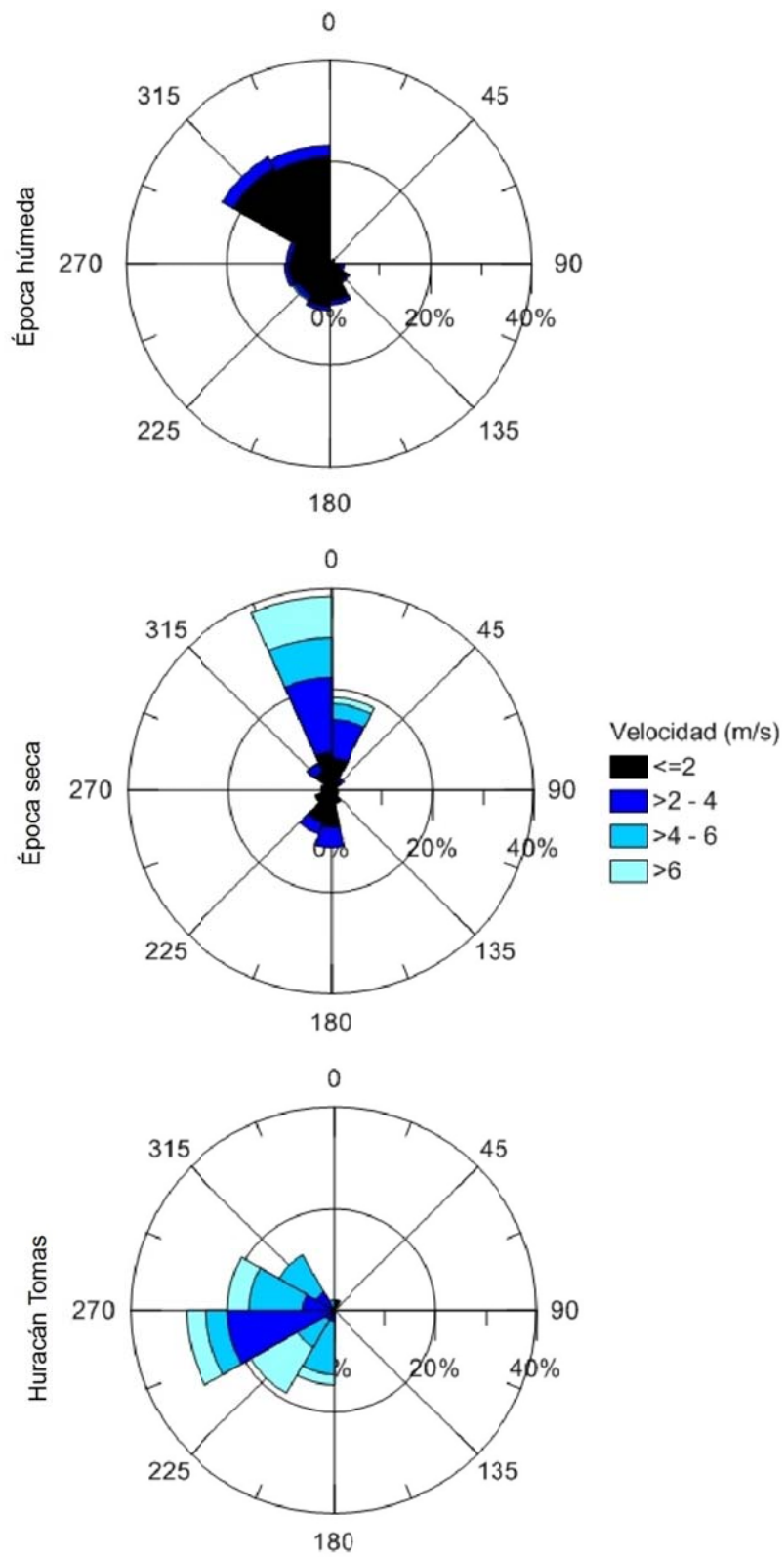


Figura 15. Viento para los periodos simulados

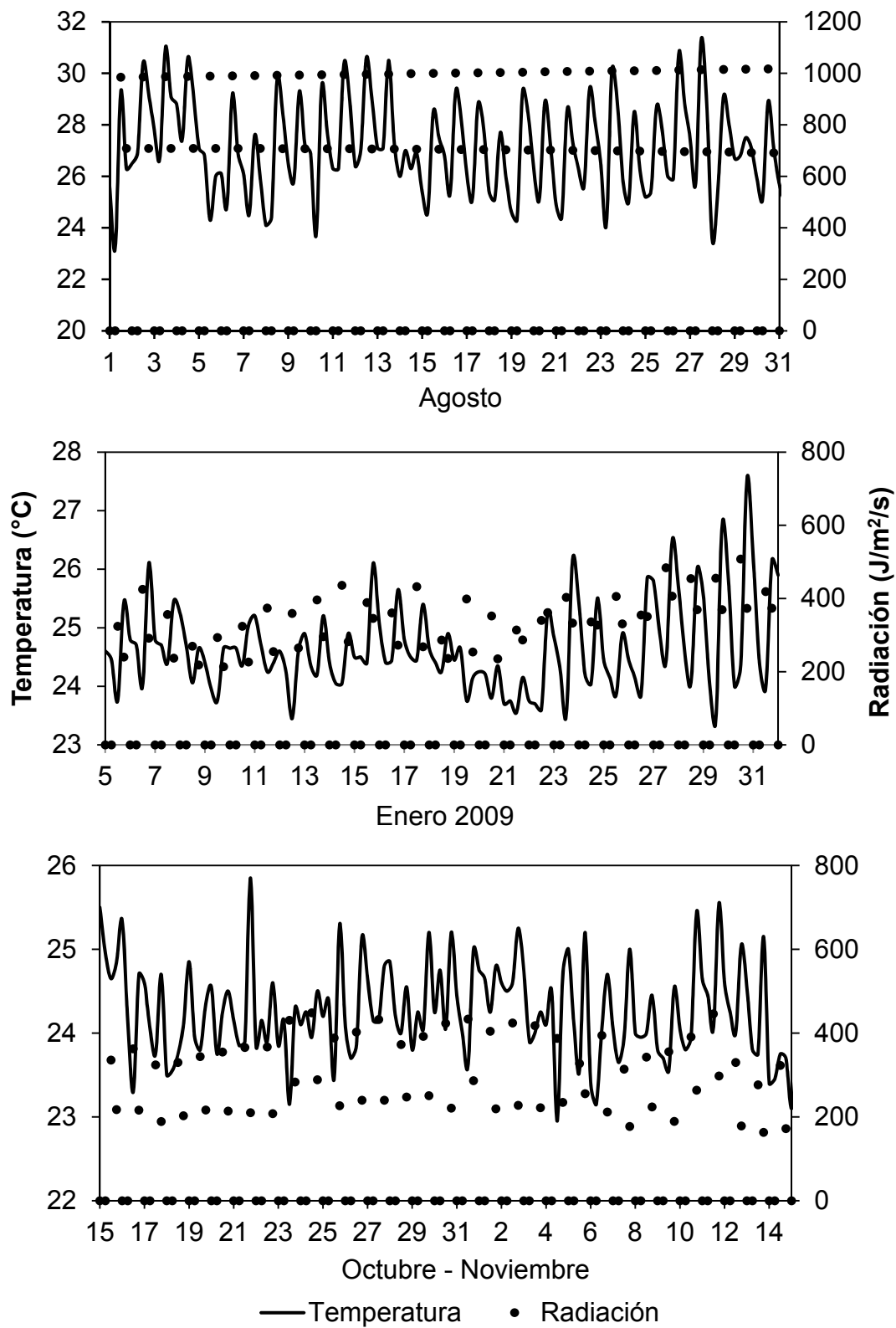


Figura 16. Temperatura y radiación de onda corta para los periodos simulados

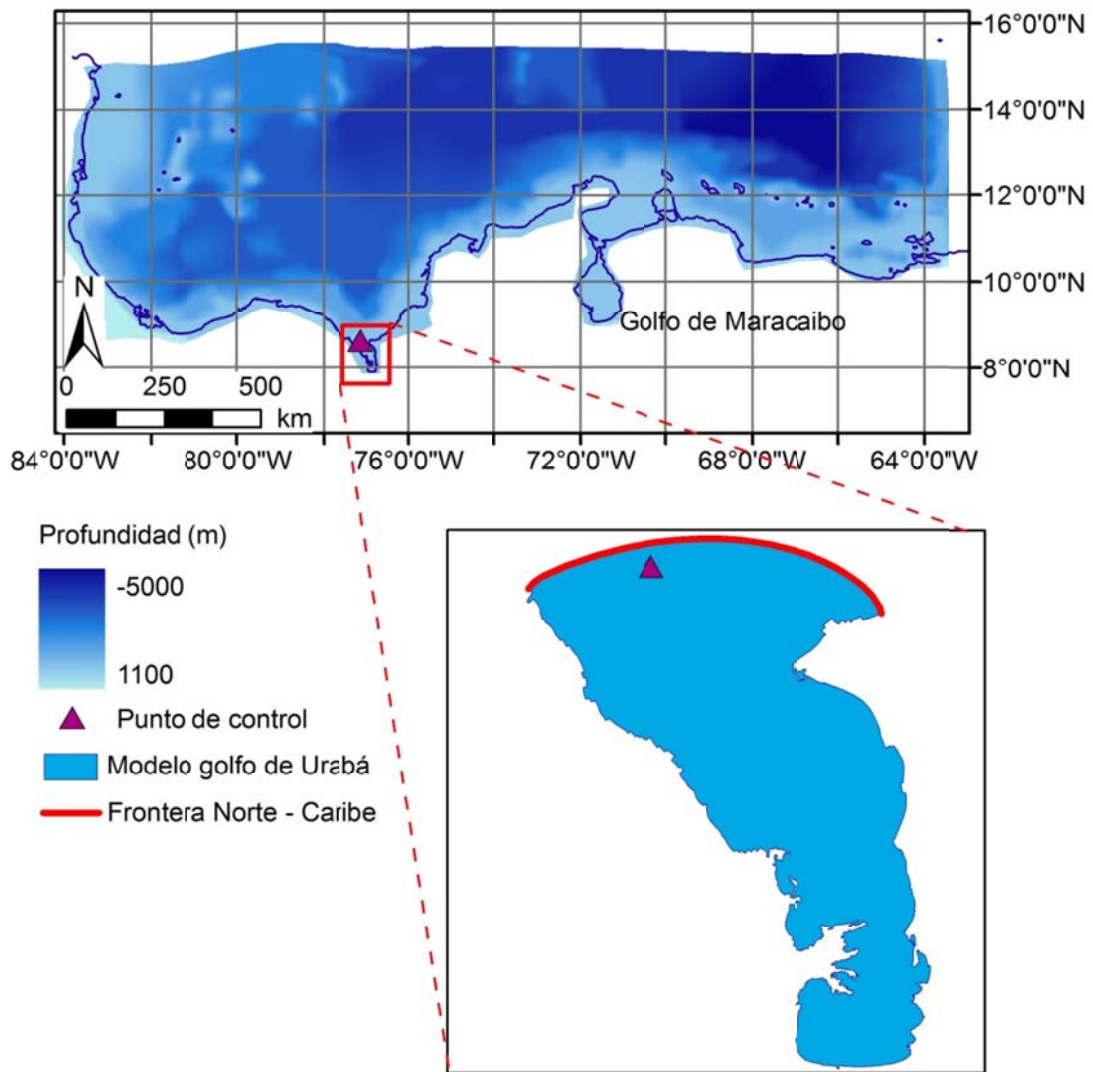


Figura 17. Cobertura del modelo del Caribe. Modificado de: Posada et al., 2010

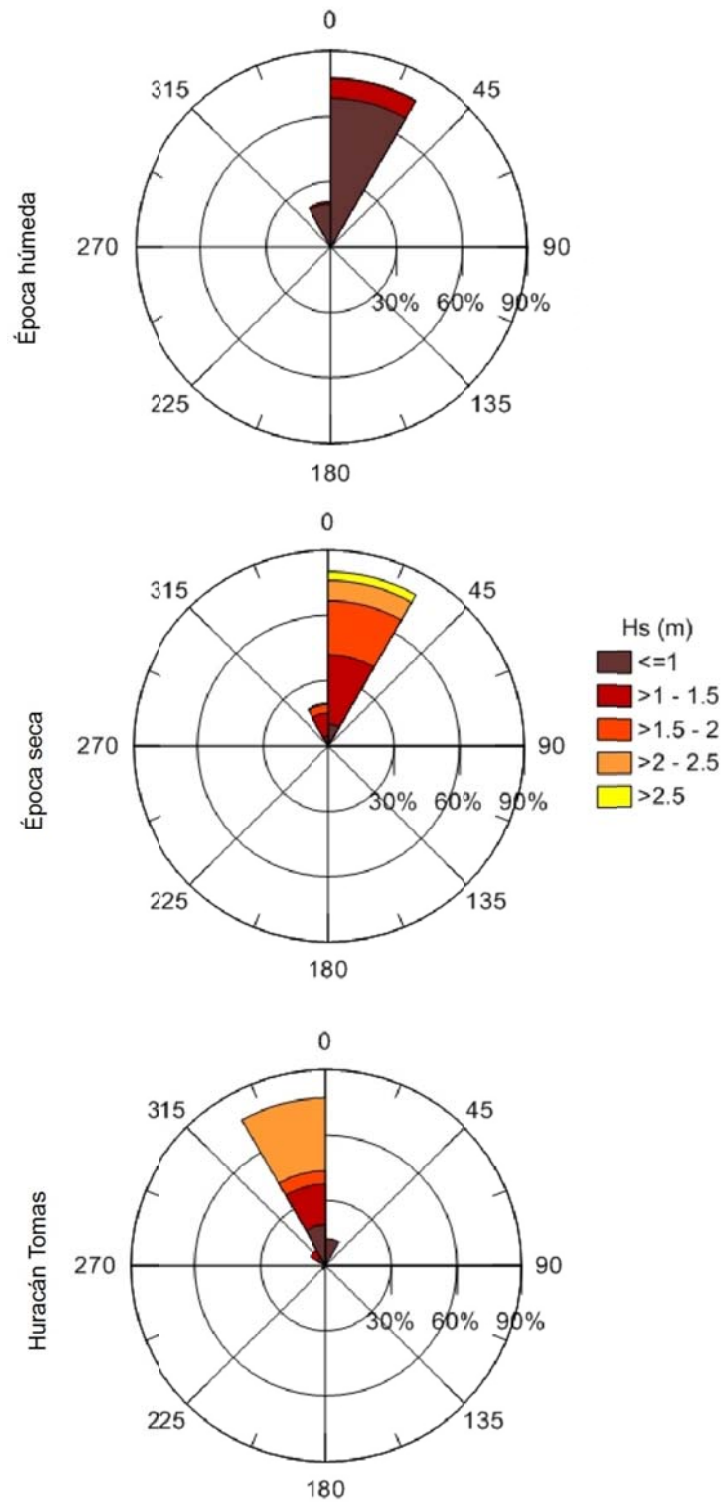


Figura 18. Oleaje para los periodos simulados

Tabla 4. Componentes de Marea al norte del golfo de Urabá (Tomado de: Proyecto “Erosión costera en Antioquia I”)

Componente	Amplitud (m)	Fase (°)	Componente	Amplitud (m)	Fase (°)
MM	0.0109	2.56	L2	0.0031	194
Q1	0.0089	252	S2	0.0152	41.8
RO1	0.0019	275	K2	0.0051	36.6
O1	0.0614	260	MO3	0.0012	348
NO1	0.14	233	M3	0.0024	157
P1	0.0311	262	MK3	0.0005	5.58
K1	0.102	261	SK3	0.0012	172
PI1	0.0013	189	MN4	0.0013	67.7
J1	0.0051	248	M4	0.0025	183
SO1	0.0021	288	SN4	0.0004	0.99
OO1	0.0059	252	MS4	0.0015	272
2N2	0.0048	147	S4	0.0009	51
MU2	0.0017	255	SK4	0.0009	64.9
N2	0.0242	168	2MN6	0.0005	324
NU2	0.005	171	M6	0.0008	10.8
M2	0.0755	205	2MS6	0.0007	174
MKS2	0.0028	121	2SM6	0.0002	314
LABDA2	0.0016	259	SSA	0.0116	86

6.4.2 Afluentes. Existen dos grupos de afluentes que descargan sus aguas en el golfo: Los afluentes menores y las bocas del Atrato. Los caudales utilizados para el primer grupo, corresponden a los caudales medios (i). Calculados por medio de un balance hidrológico de largo plazo dentro de la primera fase del proyecto de Erosión costera (En desarrollo) y (ii). Los presentados por Roldán (2008), obtenidos a partir de registros en estaciones de aforo. En cuanto a la concentración de sedimentos en sus desembocaduras, se les asignaron los valores obtenidos a partir de la metodología descrita en el capítulo 5.

Para determinar el caudal y la concentración de sedimentos del segundo grupo (bocas del Atrato), se utilizaron los datos de corrientes y los valores medios de concentración, obtenidos en los aforos hechos dentro de las campañas de medición Golfo de Urabá I y II. El procedimiento seguido para procesar la información del ADCP y determinar los caudales de las 7 bocas principales se describe a continuación:

Cada dato de velocidad del agua obtenido con el ADCP está dado para una celda (conocida como bin), cuyo tamaño depende de la configuración del equipo previa a la medición. Las dimensiones de una celda son: la profundidad, establecida por quien programa el equipo para la medición; y el ancho, dado por la frecuencia de obtención de información y la velocidad de la embarcación (véase Figura 19).

Para el cálculo de los caudales de las bocas del Atrato se generó un código en Matlab que descarta información errónea y que a partir de los parámetros de configuración del ADCP y de los datos de velocidad georreferenciados, obtiene el área de cada celda y la componente perpendicular de la velocidad para cada una, lo que da como resultado un perfil de velocidades, tal como se muestra en la Figura 20.

Por medio del mismo código de Matlab y con los datos obtenidos anteriormente se calcula el caudal que pasa por cada celda, mediante la expresión:

$$Q_i = v_i A_i \quad (6.1)$$

Donde:

Q_i = caudal de la celda i

v_i = componente de la velocidad normal a la celda i

A_i = área de la celda i

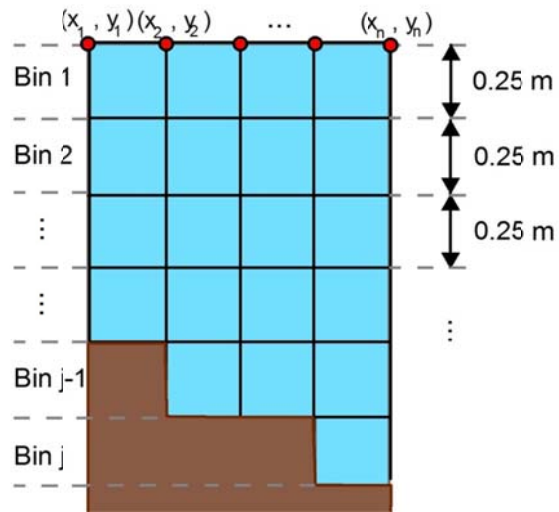


Figura 19. Celdas en las que el ADCP mide la velocidad

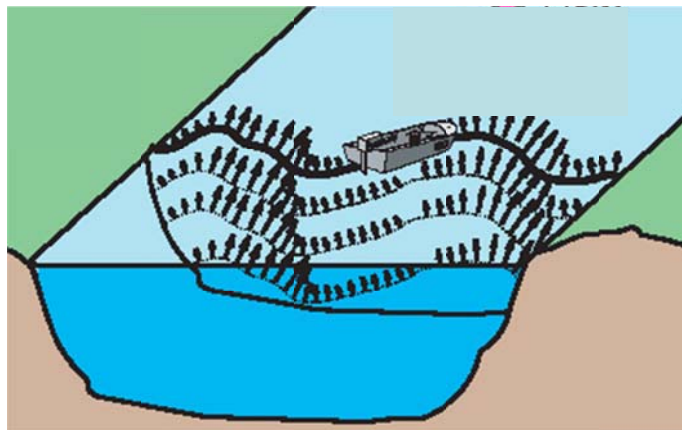


Figura 20. Componentes de la velocidad perpendiculares a la sección de aforo. Modificada de: Simpson 2001

Una vez se tienen los caudales de cada celda se calcula la descarga del afluente como una sumatoria, asumiendo que la desviación de la embarcación respecto a la perpendicular del cauce del río es despreciable, al igual que el cambio en el flujo durante la realización del aforo. El caudal total medido será entonces:

$$Q_{Tm} = \sum_{i=1}^j Q_i \quad (6.2)$$

Donde:

Q_{Tm} = caudal total medido

j = número de celdas

Q_i = caudal de la celda i

Al caudal total medido se le debe adicionar el caudal de aquellas zonas en las que el ADCP no tiene cobertura (véase Figura 21); estas zonas son la capa de agua por encima del equipo y aquella conocida en la literatura como “*blanking distance*”, término que define Simpson (2001) como la distancia recorrida por la señal acústica en el periodo de tiempo en que el transductor debe “descansar” antes de recibir el eco de un pulso previamente emitido.

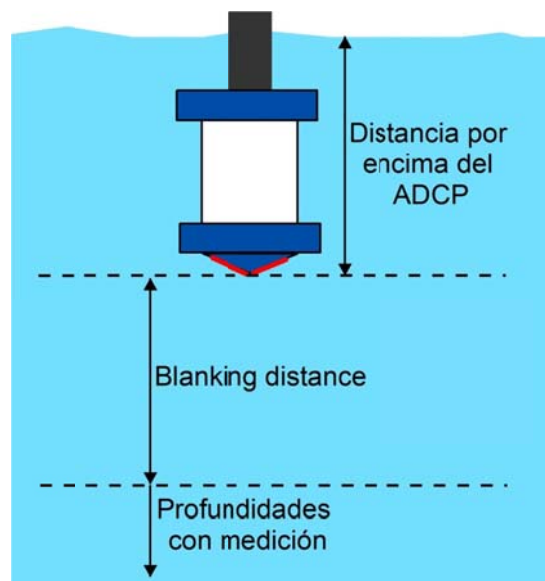


Figura 21. Cobertura espacial-vertical de un ADCP

A las zonas no medidas se les asignó el ancho y la velocidad de la celda por debajo de ellas y para el cálculo de sus caudales se obtuvo al igual que en el procedimiento descrito anteriormente, el área y la componente de la velocidad normal a ésta. Por lo que el caudal total del afluente se expresa como:

$$Q_T = Q_{Tm} + \sum_{i=1}^k Q_{nm_i} \quad (6.3)$$

Donde:

Q_T = caudal total

Q_{Tm} = caudal total medido

k = número celdas sin velocidad medida

Q_{nm_i} = caudal que pasa a través de la celda sin mediciones i .

Siguiendo esta metodología, se obtuvieron los caudales de seis de las siete principales bocas del Atrato para las dos campañas de medición realizadas en el 2010. Para la boca Las Pavas, se debió seguir un procedimiento diferente debido a que no se pudo aforar. Su caudal se obtuvo a partir de una correlación simple entre el ancho y los caudales de las demás bocas, un ejemplo del uso de esta metodología lo presenta Farias (2005).

Los anchos promedio de las bocas del Atrato se obtuvieron en ArcGIS haciendo uso de la imagen aérea orto rectificadas del golfo de Urabá, tomada en el 2009 dentro del programa investigativo de largo alcance "Expedición Antioquia 2013", del cual hace parte el grupo de investigación del Área de Ciencias del Mar de la Universidad EAFIT. Los caudales utilizados, fueron los calculados mediante la metodología previamente explicada. La correlación obtenida y con la que se calculó el caudal de la boca Las Pavas se observa en la Figura 22.

Los caudales calculados para las siete bocas del Atrato y el porcentaje que representan de la descarga total se resumen en la Tabla 5. La diferencia más grande entre aforos se encuentra en Boca Tarena debido a que en abril de 2010 no se logró ingresar completamente y su caudal quedó afectado por el del Roto (boca principal); por lo tanto se considera como el caudal más confiable para la boca Tarena el obtenido en el mes de noviembre.

En cuanto a los caudales de las demás bocas del Atrato, es claro que son poco variables y están dentro de los mismos rangos de magnitud. Los resultados indican que cerca del 90% de la descarga total del río ocurre por El Roto, Leoncito y Matuntugo.

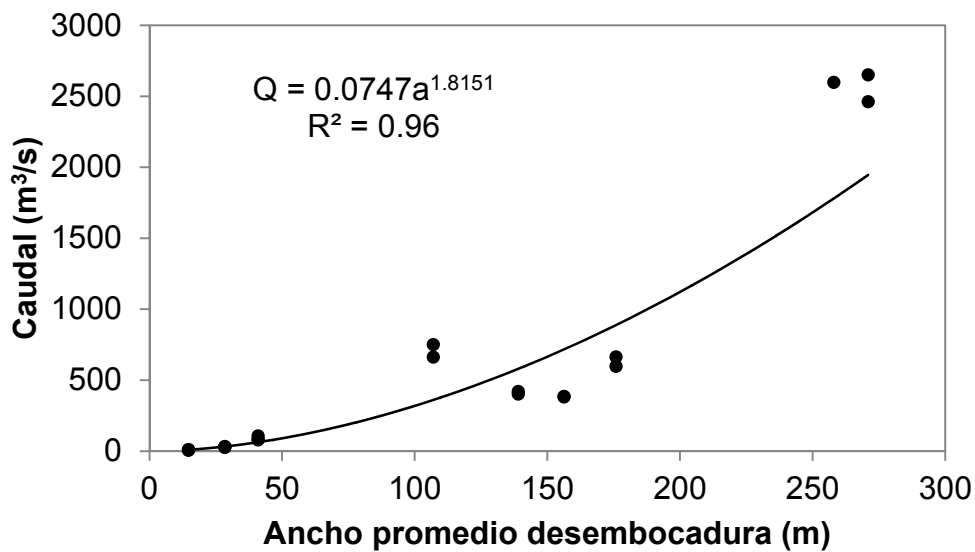


Figura 22. Correlación Caudal vs. Ancho para las bocas del Atrato

Tabla 5. Caudales de las bocas del Atrato calculados a partir de aforos en abril y noviembre de 2010

Boca	Abril 2010		Noviembre 2010	
	Caudal (m ³ /s)	% Descarga	Caudal (m ³ /s)	% Descarga
Tarena	323.44	9.72	29.75	0.80
Coco Grande	87.55	2.63	89.33	2.41
El Roto	2086.21	62.68	2462.24	66.37
Leoncito	470.53	14.14	706.72	19.05
Matuntugo	340.69	10.24	397.45	10.71
Urabá	4.43	0.13	8.80	0.24
Las Pavas	15.65	0.47	15.65	0.42
Atrato	3328.49	100.00	3709.94	100.00

Finalmente, al contar con información de dos aforos, los caudales de las diferentes bocas del Atrato utilizados como condiciones de frontera, corresponden al promedio de los caudales calculados, a excepción del caudal de boca Tarena, al que se le asignó el valor obtenido en la última campaña. El listado de todos los afluentes tenidos en cuenta en el modelo y sus respectivos caudales se presenta en Tabla 6 donde se señalan con un asterisco las siete bocas del Atrato.

Las concentraciones de sedimentos en las desembocaduras de los afluentes, se asignaron según los resultados de la aplicación de la metodología explicada en el capítulo 5; Dado el desconocimiento de las distribuciones de tamaños de partículas en las desembocaduras de los ríos, se asumió que los sedimentos gruesos representan el 3% de la concentración total, lo que resulta en los valores presentados en Tabla 6, donde se discretiza la concentración en cuatro grupos representados por su diámetro medio. (Los valores de tamaño medio de las partículas resultan de los grupos de sedimentos de fondo seleccionados para los mapas de fondo, véase sección 6.6.3).

Tabla 6. Caudal y concentración de sedimentos de los afluentes del modelo

Rio	Caudal (m ³ /s)	Concentración(kg/m ³)			
		< 64 µm	64 µm	140 µm	550 µm
Tarena*	29.75	0.162	0.00541	0.00541	0.00541
El Roto*	2274.22	0.286	0.00952	0.00952	0.00952
Pavas*	15.65	0.106	0.00353	0.00353	0.00353
Matuntugo*	369.07	0.185	0.00615	0.00615	0.00615
Coco Grande*	88.44	0.165	0.00551	0.00551	0.00551
Urabá*	6.61	0.071	0.00235	0.00235	0.00235
Leoncito*	588.63	0.273	0.00911	0.00911	0.00911
Acandí	8.69	0.237	0.0079	0.0079	0.0079
Tolo	8.69	0.112	0.00372	0.00372	0.00372
Titumate	0.8	0.018	0.0006	0.0006	0.0006
Caño Arastradero	0.52	0.028	0.00094	0.00094	0.00094
Suriquí	7.12	0.025	0.00083	0.00083	0.00083
León	75	0.6	0.02	0.02	0.02
Caño El viejo	1.82	0.09	0.003	0.003	0.003
Currulao	9.24	0.12	0.004	0.004	0.004
Guadualito	3.17	0.04	0.00133	0.00133	0.00133
Qda Guadualito	0.96	0.04	0.00133	0.00133	0.00133
Canal casanova	0.96	0.067	0.00223	0.00223	0.00223
Turbo	5.92	0.031	0.00105	0.00105	0.00105
Cope	0.31	0.029	0.00098	0.00098	0.00098
Pta de Piedra	0.36	0.208	0.00695	0.00695	0.00695
Cirilo	0.06	0.037	0.00124	0.00124	0.00124
Caimán nuevo	3.43	0.103	0.00344	0.00344	0.00344
El Totumo	0.39	0.044	0.00148	0.00148	0.00148
Caimán viejo	2.36	0.093	0.0031	0.0031	0.0031
Qda el Carlo	0.3	0.045	0.0015	0.0015	0.0015
Bobal	2.33	0.043	0.00143	0.00143	0.00143
Qda Emili	0.17	0.023	0.00078	0.00078	0.00078
Necoclí	0.36	0.082	0.00274	0.00274	0.00274

* Bocas del Atrato

6.5 MODELO HIDRODINÁMICO

Las ecuaciones de continuidad y conservación del momentum lineal se resuelven en el modelo hidrodinámico, que en últimas, es el encargado de entregar la información del flujo al módulo de transporte de sedimentos del Delft3D. A continuación, se presentan ambas ecuaciones en términos de las coordenadas curvilíneas.

6.5.1 Ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}}]}{\partial \xi} + \frac{1}{\sqrt{G_{\xi\xi}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial [(d + \zeta)V\sqrt{G_{\xi\xi}}]}{\partial \eta} = Q \quad (6.4)$$

Donde:

Q = Contribuciones por unidad de área debidas a descarga de agua, precipitación y evaporación.

ζ = elevación de la superficie libre sobre el nivel de referencia.

d = profundidad por debajo del nivel de referencia

U = velocidad del flujo en la dirección ξ

V = velocidad del flujo en la dirección η

ξ y η = coordenadas horizontales curvilíneas

$\sqrt{G_{\xi\xi}}$ y $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ = coeficiente para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares.

6.5.2 Conservación del momentum lineal

En ξ : (6.5)

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

En η : (6.6)

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

Donde:

ω = velocidad del fluido en la dirección z

σ = coordenada vertical escalada

v_v = vorticidad vertical

ρ_0 = densidad de referencia del agua

f_u y f_v = Fuerza de coriolis

P_ξ y P_η = Gradientes de presión

F_ξ y F_η = Representan el desequilibrio de los esfuerzos horizontales de Reynolds

M_ξ y M_η = Fuerzas externas

6.5.3 Parámetros físicos. Se presenta en la Tabla 7 el listado con los diferentes parámetros físicos utilizados en el modelo. Se debe tener en cuenta que algunos de ellos como por ejemplo la rugosidad, la viscosidad de remolino horizontal y el coeficiente de dragado del viento deben someterse a un análisis detallado en el que se determine el valor óptimo que permita un mayor grado de acercamiento entre simulaciones y escenarios reales.

Tabla 7. Parámetros físicos del modelo hidrodinámico

Parámetro	Valor	Unidad
Gravedad	9.81	m/s ²
Densidad del aire	1	kg/m ³
Coeficiente de dragado del viento a 0 m/s	0.00063	-
Coeficiente de dragado del viento a 100 m/s	0.00723	-
Coeficiente de rugosidad de Manning	0.02	s/m ^{1/3}
Viscosidad de remolino horizontal	10	m ² /s
Difusividad de remolino horizontal	10	m ² /s
Viscosidad de remolino vertical	0	m ² /s
Difusividad de remolino vertical	0	m ² /s
Intervalo temporal de cálculo	1	min

6.6 MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

El transporte de sedimentos en un fluido se puede presentar de dos formas, en suspensión o como carga de fondo, dependiendo del tamaño del material y de las condiciones de flujo (Van Rijn, 1984). Se presentan a continuación las ecuaciones que resuelve el modelo de transporte de sedimentos y los parámetros y condiciones de frontera establecidos.

6.6.1 Ecuación tridimensional de Advección-Difusión. Debe ser resuelta para el cálculo del transporte de sedimentos en suspensión. Las velocidades locales y

la difusividad de remolino se obtienen a partir del resultado de los cálculos hidrodinámicos.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uc}{\partial x} + \frac{\partial vc}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)c}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_{s,x} \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_{s,y} \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_{s,z} \frac{\partial c}{\partial z} \right) = 0 \quad (6.7)$$

Donde:

c = concentración de sedimentos en suspensión

w_s = velocidad de sedimentación de las partículas

u, v y w = componentes de la velocidad en las direcciones x, y y z respectivamente.

$\varepsilon_{s,x}, \varepsilon_{s,y}$ y $\varepsilon_{s,z}$ = difusividad de remolino

6.6.2 Transporte de sedimentos de fondo. Para el cálculo de transporte de fondo de sedimentos no cohesivos se utiliza el planteamiento de Van Rijn *et al.* (2004) donde las partículas son arrastradas en la columna de agua mediante la imposición de una concentración de referencia en un nivel a , que representa el límite entre lo que se considera transporte de fondo y en suspensión. Dicha concentración de referencia se calcula así:

$$c_a = 0.015 \eta \rho_s \frac{d_{50} T_a^{1.5}}{a D_*^{0.3}} \quad (6.8)$$

Donde:

η = disponibilidad relativa de las fracciones de sedimentos

ρ_s = densidad de los sedimentos

a = nivel de referencia

d_{50} = diámetro medio de los sedimentos

D_* = diámetro adimensional de partícula
 T_a = esfuerzo cortante adimensional en el fondo

Al incluir oleaje en la modelación, el transporte de fondo se calcula mediante el siguiente modelo:

$$S_b = \left(\frac{1}{T}\right) \int S_{b,t} dt \quad (6.9)$$

$$S_{b,t} = 0.5\rho_s d_{50} D_*^{-0.3} \left(\frac{\tau'_{b.cw,t}}{\rho}\right)^{0.5} \left(\frac{\max(0, \tau'_{b.cw,t} - \tau_{b.cr})}{\tau_{b.cr}}\right) \quad (6.10)$$

Donde:

ρ_s = densidad del sedimento
 d_{50} = diámetro medio de las partículas
 D_* = diámetro adimensional de las partículas
 ρ = densidad del fluido
 $\tau'_{b.cw,t}$ = esfuerzo cortante instantáneo por el movimiento de las corrientes y olas
 $\tau_{b.cr}$ = esfuerzo cortante crítico de Shields

6.6.3 Propiedades de los sedimentos. Para representar el fondo del golfo de Urabá, se creó un mapa de sedimentos de fondo (superficiales) basado en la información presentada por García (2007) en el que se diferencian 3 tamaños medios de sedimentos gruesos y una mayoría de sedimentos finos (véase Figura 23). En la Tabla 8 se presentan las características asumidas para dichos sedimentos, las cuales deberán ser sometidas a un análisis de sensibilidad más detallado en un estudio futuro.

Tabla 8. Propiedades de los sedimentos asumidas para en el modelo según su d50

Tamaño (d50)	(μm)	550	140	64	< 64
Densidad Específica	(kg/m^3)	2650	2650	2650	1800
Densidad seca de fondo	(kg/m^3)	1600	1600	1600	1600
Densidad de referencia para asentamiento en medio real	(kg/m^3)	1600	1600	1600	1600
Velocidad de asentamiento	(mm/s)	Van Rijn 1993	Van Rijn 1993	Van Rijn 1993	0.5
Cortante crítico de asentamiento	(N/m^2)	-	-	-	2
Cortante crítico de Erosión	(N/m^2)	-	-	-	0.75
Parámetro de Erosión	($\text{kg}/\text{m}^2/\text{s}$)	-	-	-	0.0005

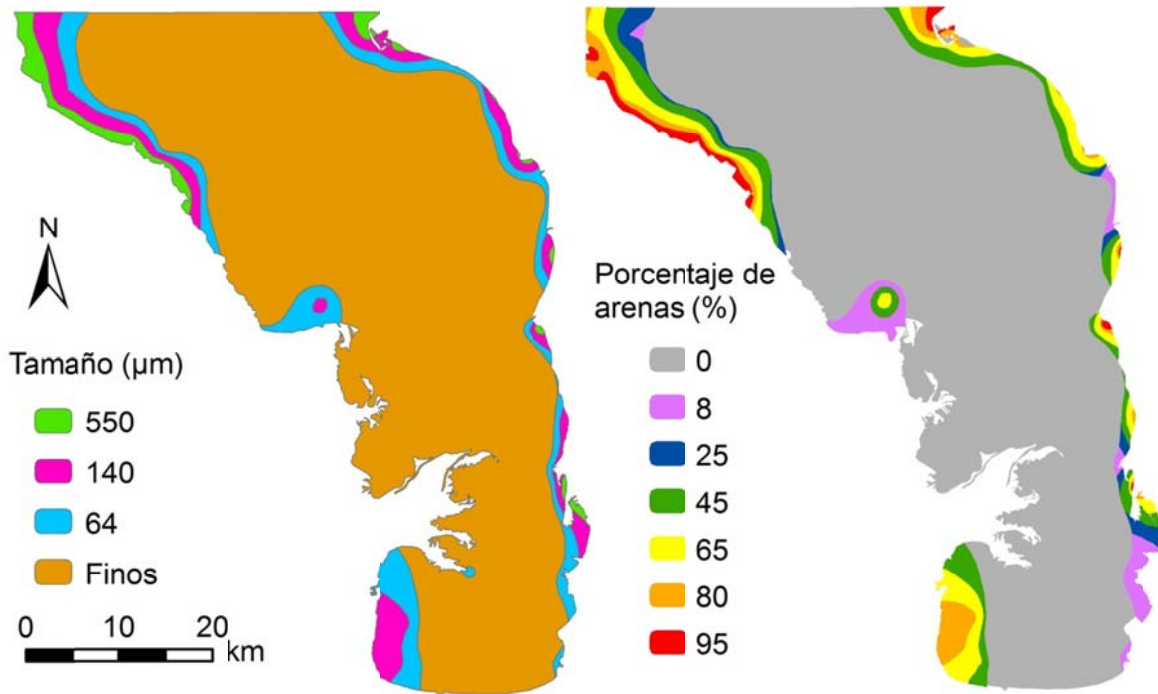


Figura 23. Distribución espacial y porcentual de los sedimentos de fondo en el golfo de Urabá

7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad presentado a continuación es de tipo espacial como el presentado por Escobar (2010); en él se hacen comparaciones entre una simulación patrón y simulaciones en las que se alteran parámetros de interés (uno a la vez); por medio de esta metodología, se estima dónde y en qué grado, las variables de interés están afectando de manera significativa los resultados del modelo y por ende, la necesidad de adquirir o no información detallada en campo. Adicionalmente, estas primeras simulaciones dan una idea general sobre el comportamiento del modelo y de que tan aproximado está a la realidad.

Cabe anotar que quedan sin analizar parámetros físicos, numéricos y forzamientos que podrían llegar a alterar considerablemente la solución del modelo (v.gr. velocidad de asentamiento de las partículas, rugosidad del fondo, tamaños de celda horizontal y vertical, etc.), y que por lo tanto deberán ser tenidos en cuenta en trabajos futuros.

7.1 METODOLOGÍA

El principio del análisis de sensibilidad realizado, es llevar a cabo una comparación espacial de las concentraciones de sedimentos obtenidas a partir de la solución de un modelo patrón y de un modelo idéntico a éste, al que se le modifica un único parámetro.

El procedimiento comparativo comienza una vez se tienen los resultados de una secuencia de simulaciones, que incluye la simulación patrón y todas aquellas a las que se les eliminan o varían los parámetros de interés. En la Tabla 9, se indican las simulaciones realizadas y el parámetro modificado respecto a la considerada como patrón.

Al realizar el análisis para un modelo de transporte de sedimentos, la variable a comparar entre simulaciones es la concentración media de sedimentos (integrada en la vertical y en el tiempo). La manera en la que se presentan las diferencias consiste en una resta simple entre modelos:

$$discrepancia = C_{SP} - C_{SM} \quad (7.1)$$

Donde:

discrepancia = diferencia de concentración entre simulaciones (mg/l)

C_{SP} = concentración simulación patrón (mg/l)

C_{SM} = concentración simulación modificada (mg/l)

Tabla 9. Simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad

Código	Parámetro de análisis	Variación respecto a la simulación patrón	Simulación patrón
101	Viento	SIN viento	Viento (base de datos NCEP/NCAR)
110	Oleaje	SIN oleaje	Oleaje del caribe (<i>swell</i>) y generado en el golfo (<i>sea</i>)
103	Procesos termo-salinos	SIN procesos termo-salinos	Salinidad (Afluentes = 0 ppt, Caribe = 32 ppt). Radiación, humedad relativa y temperatura del aire (base de datos NCEP/NCAR)
102	Marea	SIN marea	Componentes de marea (Fuente: Proyecto "Erosión costera en Antioquia I")
104	Intervalo temporal de cálculo	1 min	0.5 min
105	Intervalo temporal de cálculo	2 min	0.5 min
106	Intervalo temporal de cálculo	4 min	0.5 min

La representación gráfica de la discrepancia, permite al observador identificar las zonas donde las diferencias entre las concentraciones de la simulación patrón y de la simulación modificada son más significativas; y adicionalmente, las áreas en las que la exclusión o modificación del parámetro de interés, hacen disminuir o aumentar la concentración de sedimentos respecto a la simulación de referencia.

Se presenta además, una tabla en la que para cada simulación se relaciona su MAE (*Mean Absolute Error*), obtenido como el promedio de las diferencias en valor absoluto y su RMS (*Root Mean Square Error*), estadístico útil en análisis de sensibilidad donde se comparan “simulaciones con simulaciones” y que se define, según la variable de referencia previamente establecida, como:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_{SP} - C_{SM})^2}{N}} \quad (7.2)$$

Donde:

RMS = Root mean square error (mg/l)

C_{SP} = Concentración simulación patrón (mg/l)

C_{SM} = Concentración simulación con un parámetro modificado (mg/l)

N = número de parejas de datos

El RMS indica que tan cerca están los valores de concentración obtenidos al modificar la simulación patrón de aquellos que se consideran de referencia, dando una medida absoluta del ajuste entre ambas modelaciones. Valores bajos del RMS indican un mejor ajuste. Se debe tener en cuenta que para este análisis de sensibilidad, los estadísticos no representan errores, simplemente, diferencias entre dos simulaciones.

Por último, en el caso donde se analiza el intervalo temporal de cálculo, se identifica el valor óptimo de esta variable mediante un análisis de beneficio-costos como el presentado por Escobar (2010), en el que se busca que el costo computacional justifique la calidad de la solución numérica.

Para aplicar esta metodología, la discrepancia media y el tiempo de cómputo requerido por el equipo para llevar a cabo la simulación, se normalizan respecto a su valor máximo, para luego, contrastarse gráficamente y así determinar el intervalo temporal de cálculo que permite obtener la menor discrepancia y el menor costo computacional.

7.2 RESULTADOS

El alcance de este proyecto de grado comprende la realización del análisis de sensibilidad al modelo de transporte de sedimentos planteado en las secciones anteriores, respecto a los siguientes procesos físicos y un parámetro numérico:

1. Viento
2. Oleaje
3. Marea
4. Procesos termo-salinos
5. Intervalo temporal de cálculo

7.2.1 Viento. En la Figura 24 se observan tres zonas en la parte media del golfo en las que el efecto del viento produce diferencias en la concentración de sedimentos, la más evidente se encuentra en El Roto y puede estar relacionada con las condiciones del viento para el periodo simulado, el cual, era predominantemente del noroeste, por lo que en vez de ayudar a dispersar la pluma de sedimentos superficial hacia el norte, ejerce un efecto de retención de la misma; caso similar se presenta en la segunda zona, equivalente a la boca

Matuntugo, donde las concentraciones de sedimentos en suspensión son mayores debido a la permanencia de las partículas en las cercanías de la desembocadura cuando el viento está soplando hacia el sureste.

La tercera zona se extiende por el costado oriental del golfo entre las desembocaduras de los ríos Turbo y Caimán Nuevo, lo que indica que el viento es un factor importante para, de manera indirecta, poner en suspensión el material cercano a esta costa e incluso para movilizar la carga sólida proveniente de los afluentes antes mencionados.

A pesar de existir zonas puntuales donde la concentración de sedimentos cambió al excluir el viento de la simulación, la predominancia de zonas verdes y amarillas en la Figura 24 (abajo), indica que el viento, al menos durante la época húmeda, no es lo suficientemente fuerte como para alterar significativamente las concentraciones medias de sedimentos en el golfo.

7.2.2. Oleaje. Los efectos de la inclusión del oleaje en el modelo de transporte de sedimentos son mucho más marcados que los del viento, en especial, en los litorales ubicados en las zonas centro y norte del golfo, tal como se observa en la Figura 25, en la que además, es evidente que la tendencia mencionada implica que al eliminar el oleaje las concentraciones de sedimentos en aguas someras disminuyen.

Las discrepancias entre concentraciones que se observan en la gama de colores naranja a negro, clarifican las zonas en las que el oleaje proveniente del Caribe está incidiendo de manera directa y donde su efecto sobre el fondo es mayor. Se observa como la franja costera entre Capurganá y Titumate es afectada por este forzamiento, al igual que aquella comprendida entre el río Turbo y el río Caimán Nuevo.

A. Simulación Patrón

B. Simulación: Sin viento

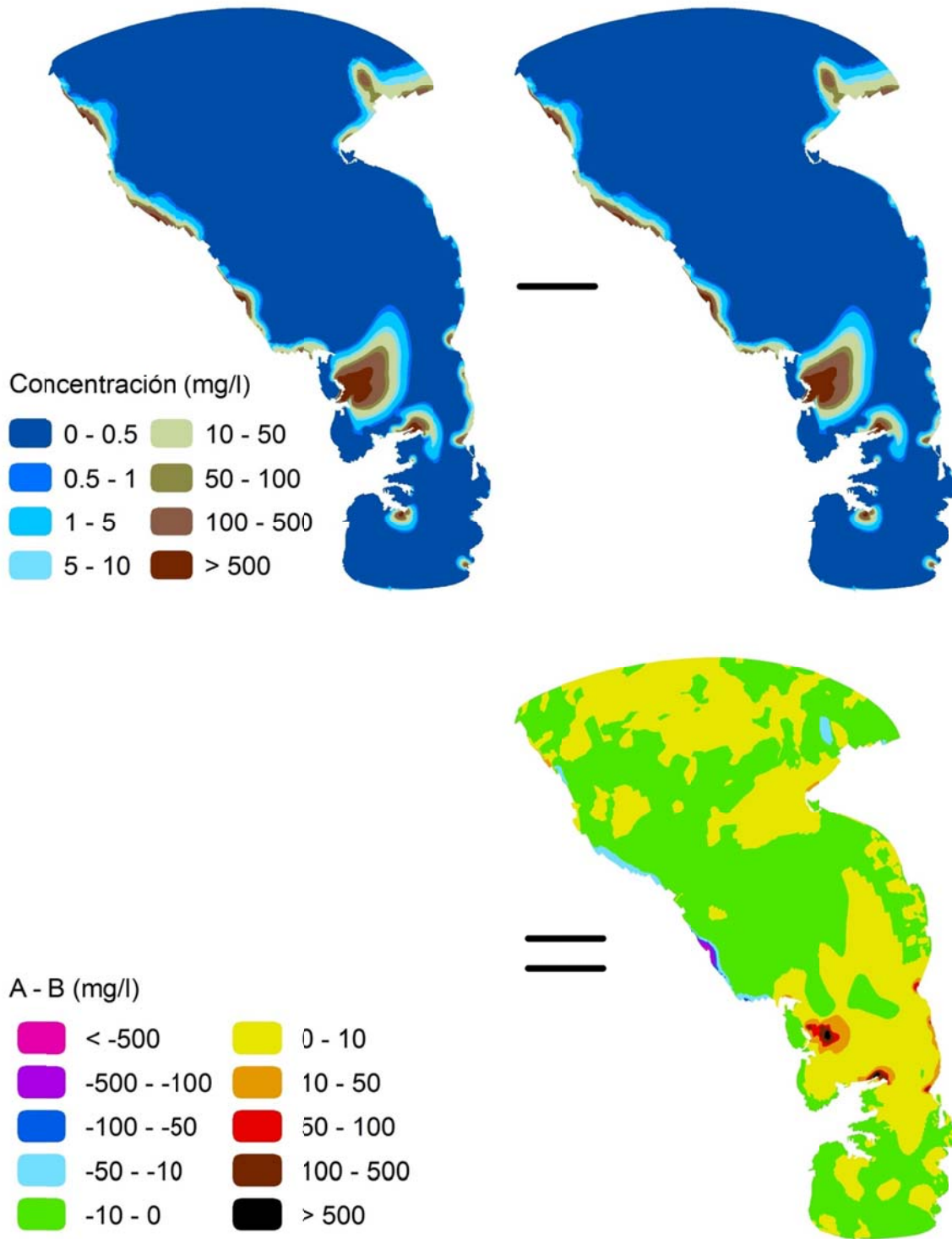


Figura 24. Discrepancia en la concentración de sedimentos a causa de la eliminación del viento

Otra zona poco profunda donde el oleaje influye en la concentración de sedimentos se encuentra al este de punta Caribaná. A pesar de que en la costa entre Punta Caimán Nuevo y Caribaná no se evidencian efectos significativos del oleaje, esto podría modificarse en caso de que la dirección del oleaje fuera distinta.

Las zonas diferentes a los litorales afectadas por la acción del oleaje son las bocas del Atrato direccionadas hacia el Norte (Tarena, El Roto, Las Pavas y Matuntugo), la gama de colores en la que se encuentran sus cercanías da a entender que en ausencia del oleaje las concentraciones de sedimentos en suspensión son menores; tendencia que puede estar relacionada con la dirección de incidencia del oleaje, la cual tenderá a re-suspender material depositado en las barras de sedimentos frente a las bocas.

Por último, queda claro que el oleaje no es un forzamiento relevante en aguas profundas, ni en bahía Colombia, donde el análisis de sensibilidad mostró que a pesar de eliminar el efecto de las olas las concentraciones se mantuvieron estables.

7.2.3. Marea. En general, al examinar la Figura 26 no se encuentran zonas donde las concentraciones hayan cambiado drásticamente al excluir la marea del modelo, solo se alcanzan a observar pequeñas áreas aledañas al Roto y Matuntugo, que incluso, no tienen un patrón definido de aumento o disminución de concentraciones.

Al eliminar el efecto de este forzamiento en la frontera norte no se presentan cambios grandes en las concentraciones, lo que sugiere que este parámetro no es relevante para el modelo de transporte de sedimentos, al menos respecto a esta variable escalar.

A. Simulación Patrón

B. Simulación: Sin oleaje

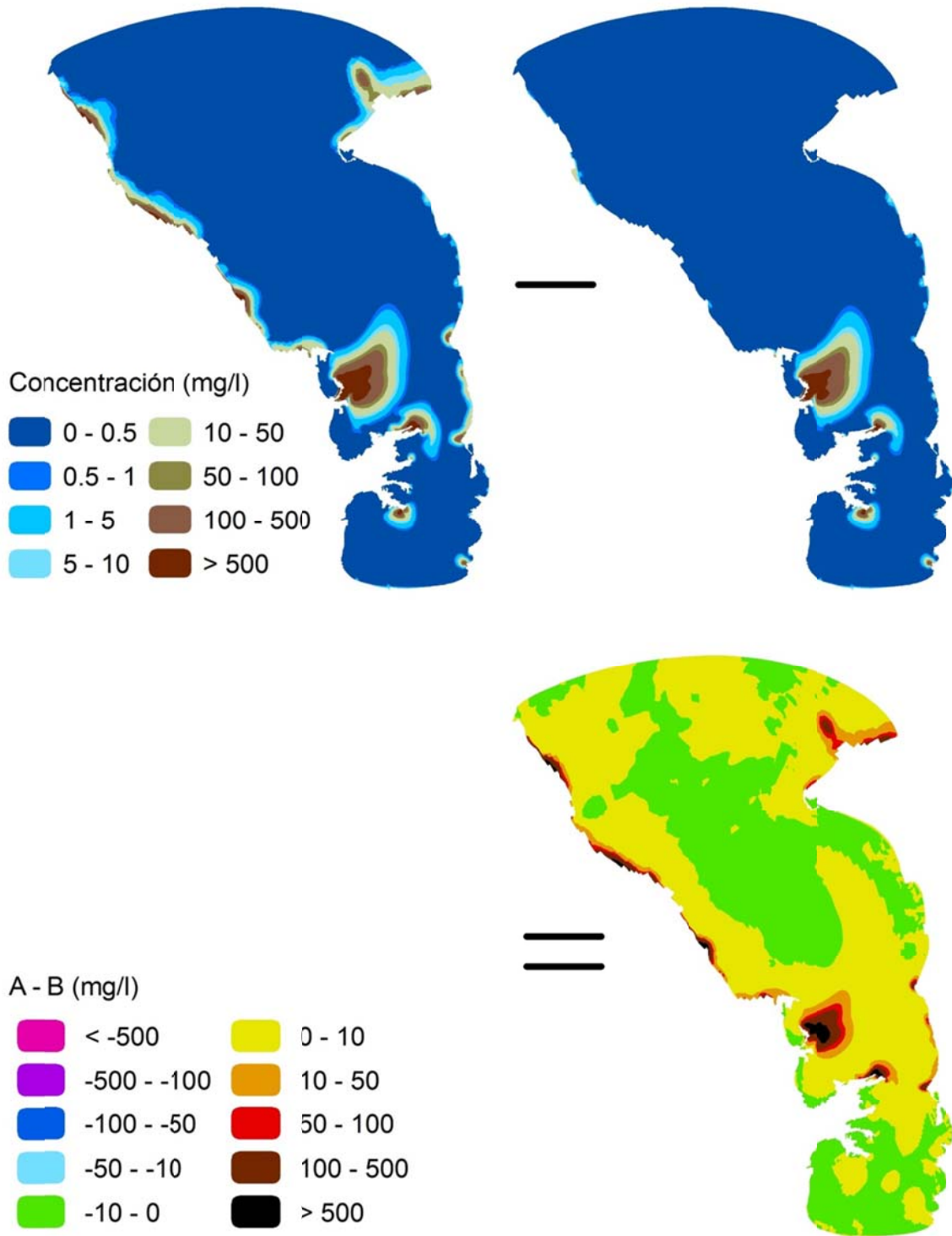


Figura 25. Discrepancia en la concentración de sedimentos a causa de la eliminación del oleaje

A. Simulación Patrón

B. Simulación: Sin marea

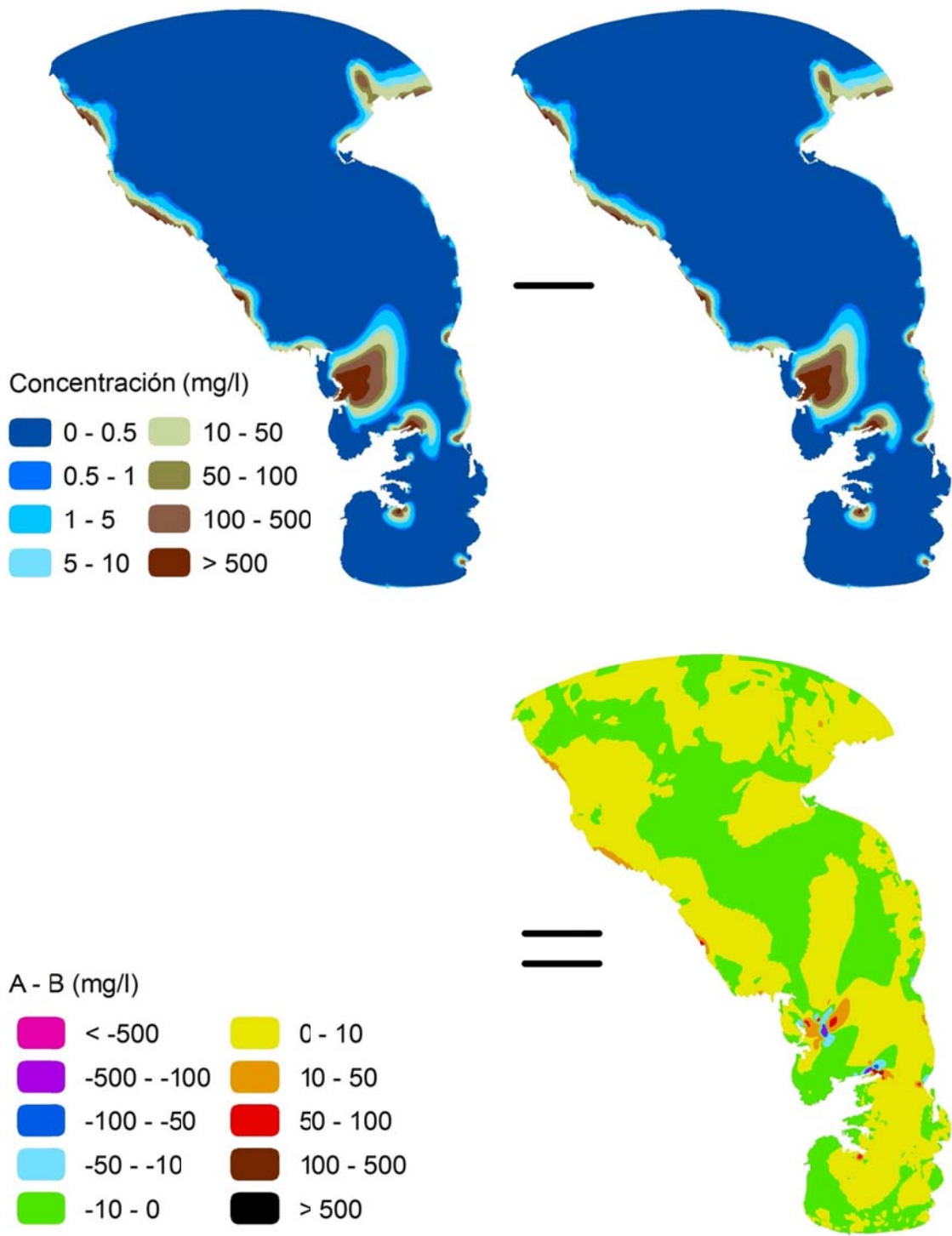


Figura 26. Discrepancia en la concentración de sedimentos a causa de la eliminación de la marea

7.2.4 Procesos termo-salinos. Cuando se eliminan los procesos termo-salinos en una simulación, se está asumiendo que ni la temperatura, ni la salinidad tienen efectos en la hidrodinámica del golfo, y por lo tanto no se presentarán corrientes de densidad en la solución del modelo. Esta simplificación genera cambios significativos en las concentraciones de las desembocaduras de los ríos y en algunas zonas de aguas someras (véase Figura 27).

Ante una igualdad de salinidades y temperaturas del golfo y de los afluentes, los procesos de mezcla de las aguas son más simples, por lo que la pluma turbia del Atrato tiende a disminuir su área de influencia. La tendencia observada en la Figura 27 muestra que al excluir los procesos termo-salinos, las concentraciones de sedimentos en los puntos de desembocadura aumentan respecto a la simulación patrón, pero una vez se adentran un poco más en el golfo, disminuyen rápidamente.

En la Figura 27, también es claro que al eliminar los procesos termo-salinos se produce un incremento de las concentraciones de sedimentos en suspensión en el costado noroccidental del golfo, efecto que podría estar relacionado con un cambio en las corrientes del norte una vez desaparece la influencia de la pluma menos densa proveniente del Atrato, la cual al perder fuerza, ya no transporta sedimentos de oeste a este de una manera tan directa.

7.2.5 Intervalo temporal de cálculo. Para revisar los efectos que tiene la modificación del intervalo temporal de cálculo en las concentraciones del golfo se utilizaron cuatro intervalos diferentes de 0.5, 1, 2 y 4 min. Las discrepancias de la solución de los modelos se calcularon con respecto a la simulación con $\Delta T=0.5$ min, de la cual se piensa podría ofrecer la mejor calidad en la solución.

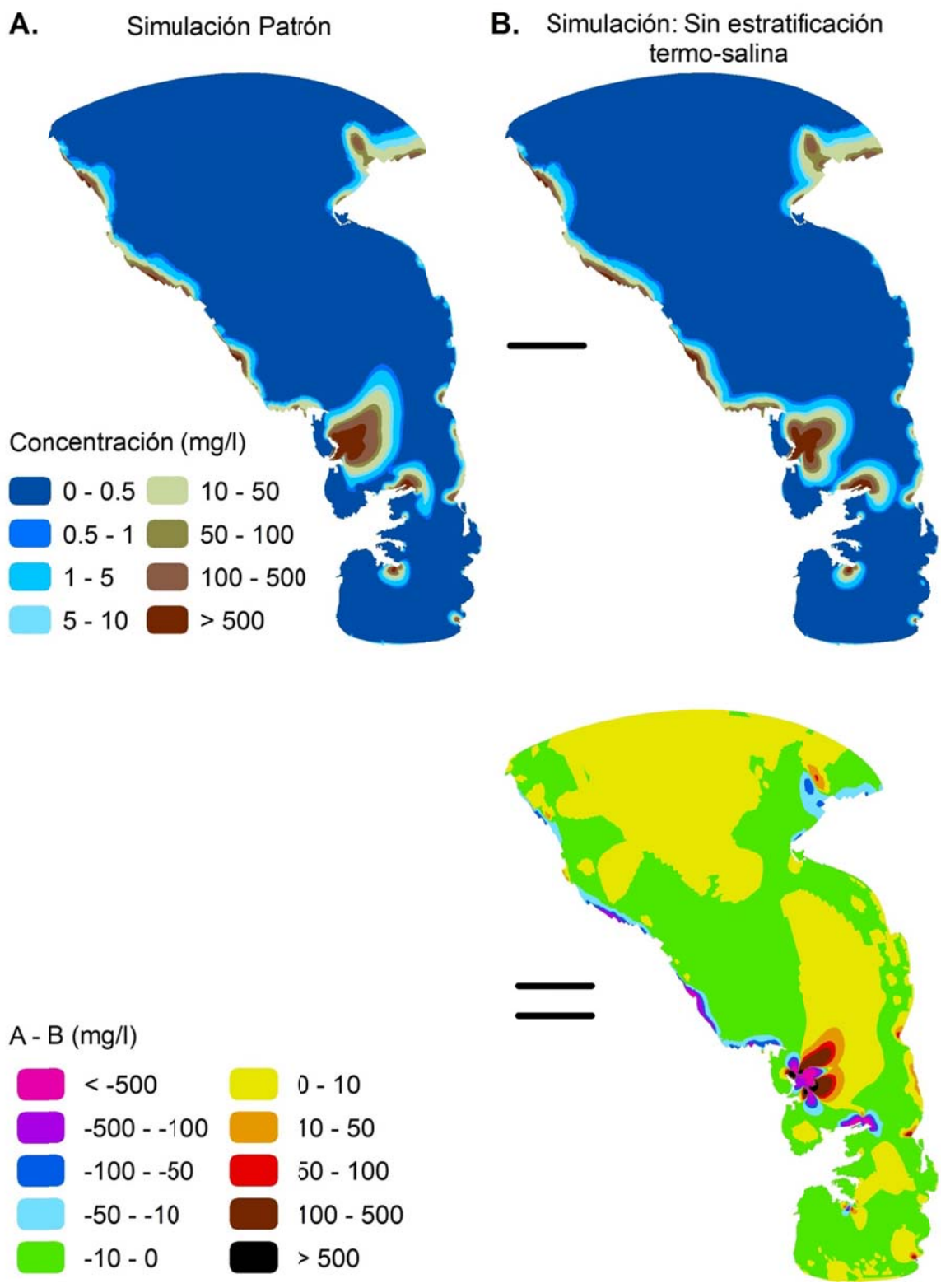


Figura 27. Discrepancia en la concentración de sedimentos a causa de la eliminación de los procesos termo-salinos

Al considerar las tres comparaciones se observa un cambio leve en la concentración de sedimentos en la desembocadura del Roto y en menor cuantía en Matuntugo (véase Figura 28). En el resto del dominio de cálculo, las discrepancias entre cada modelo y aquel con $\Delta T=0.5$ min, no superan los 10 mg/l.

En términos generales, el tiempo de cómputo tiende a disminuir cuando el intervalo de cálculo es mayor, lastimosamente, un menor tiempo computacional implica una solución a partir de aproximaciones más gruesas y por lo tanto a pérdidas en la calidad de la solución del modelo. En la Figura 29, se enfrentan las discrepancias entre modelaciones y tiempos de cómputo, ambos normalizados por su valor máximo. La abscisa del punto en el que las rectas se cruzan, representa el intervalo de cálculo óptimo (2.25 min), en el que se alcanza la menor discrepancia y menor tiempo de cómputo.

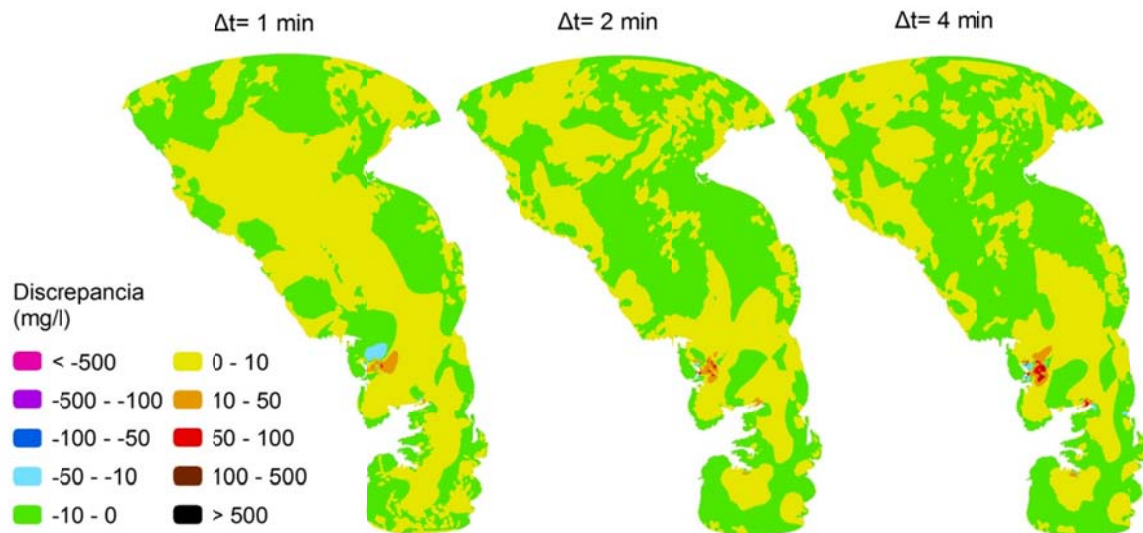


Figura 28. Discrepancias respecto a la simulación patrón al modificar el intervalo temporal de cálculo

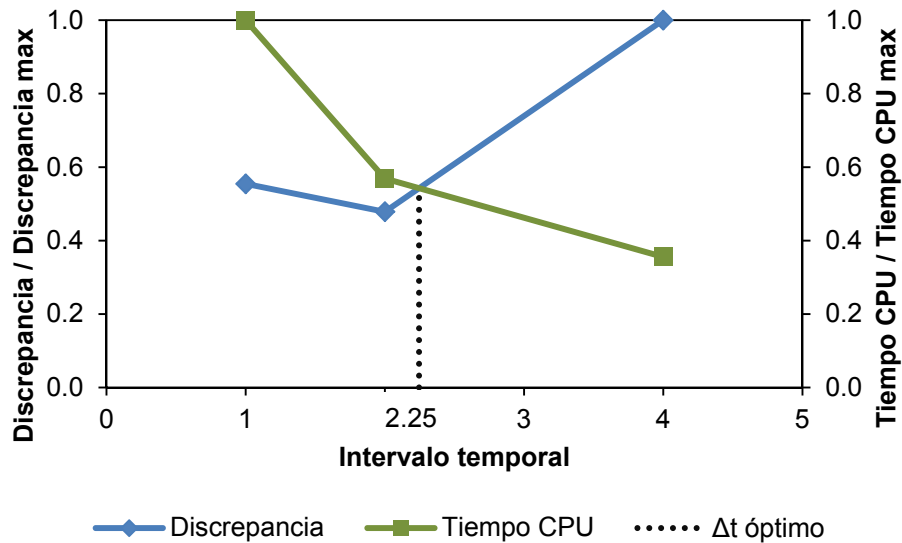


Figura 29. Intervalo de cálculo óptimo

7.2.6. MAE y RMS. En la Tabla 10 se presenta el resumen de los errores medios absolutos (MAE) y los errores medios relativos al cuadrado (RMS) de todas las simulaciones realizadas para el análisis de sensibilidad. Tal como se observó gráficamente, los estadísticos tomaron los valores más altos al excluir el oleaje y los procesos termo-salinos de la simulación patrón. Los valores elevados de los RMS con respecto a los MAE significan que las diferencias entre simulaciones no son homogéneas, que aparecen casi siempre zonificadas o de forma puntual en ciertas áreas del dominio de cálculo.

Tabla 10. MAE y RMS de todos los casos del análisis de sensibilidad

Parámetro	Valor del parámetro de análisis	MAE (mg/l)	RMS (mg/l)
Viento	Sin viento	5.15	44.72
Oleaje	Sin oleaje	15.98	127.75
Marea	Sin marea	2.10	13.31
Procesos termo-salinos	Sin procesos termo salinos	20.24	136.81
Intervalo temporal de cálculo	1 min	0.51	2.81
Intervalo temporal de cálculo	2 min	0.44	3.45
Intervalo temporal de cálculo	4 min	0.92	6.39

8. APLICACIÓN PRELIMINAR DEL MODELO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Se presentan en este capítulo los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo patrón para las temporadas seca y húmeda, además, el periodo en el cual pasó el huracán Tomas por el Caribe que se concibió como una condición meteorológica extrema.

Se utiliza la concentración de sedimentos superficiales como parámetro para hacer una comparación cualitativa entre las tres soluciones del modelo. Se debe aclarar, que las comparaciones son de carácter preliminar y por la fase de desarrollo en la que se encuentra el modelo, los resultados no pueden considerarse como definitivos.

Las condiciones meteorológicas y los periodos de simulación para las tres épocas se presentaron en las secciones 6.1, 6.3 y 6.4. Al partir de la simulación patrón y únicamente cambiar las condiciones de oleaje y meteorológicas (viento, temperatura del aire, radiación, humedad relativa), se observan los efectos que éstas tienen en la concentración de sedimentos superficial y su distribución en el golfo.

8.1 ÉPOCAS HÚMEDA Y SECA.

Son las dos temporadas climatológicas identificadas en el golfo de Urabá (Chevillot *et al.*, 1993). La diferencia principal entre ambas es la magnitud y dirección del viento y las condiciones de oleaje.

En la Figura 30, se observan las concentraciones superficiales para un instante de tiempo de las dos épocas climáticas. Es evidente la aparición de zonas de mayor

concentración de sedimentos en la época seca, todas ellas cercanas a la costa y con cobertura y valores mayores al norte del golfo. El costado oeste y el litoral al norte de punta Caribaná, son las zonas de cambios críticos, lo que al parecer, está directamente relacionado con oleajes y vientos más fuertes en época seca.

Para ambas épocas, las concentraciones superficiales entre el estrechamiento del golfo y el interior de bahía Colombia, parecen no alterarse significativamente, al igual que en las zonas centrales y más profundas del golfo.

A pesar de ser leve, en la Figura 31 se observa un incremento de la concentración de sedimentos superficiales (entre 1 y 50 mg/l) durante la época seca en las cercanías de Necoclí, zona en la Correa y Vernette (2004) identificaron 52 obras de defensa costera y en la que Correa *et al.*, (2005) reportan erosión generalizada, lo que la convierte en un área de interés para un estudio futuro de transporte de sedimentos.

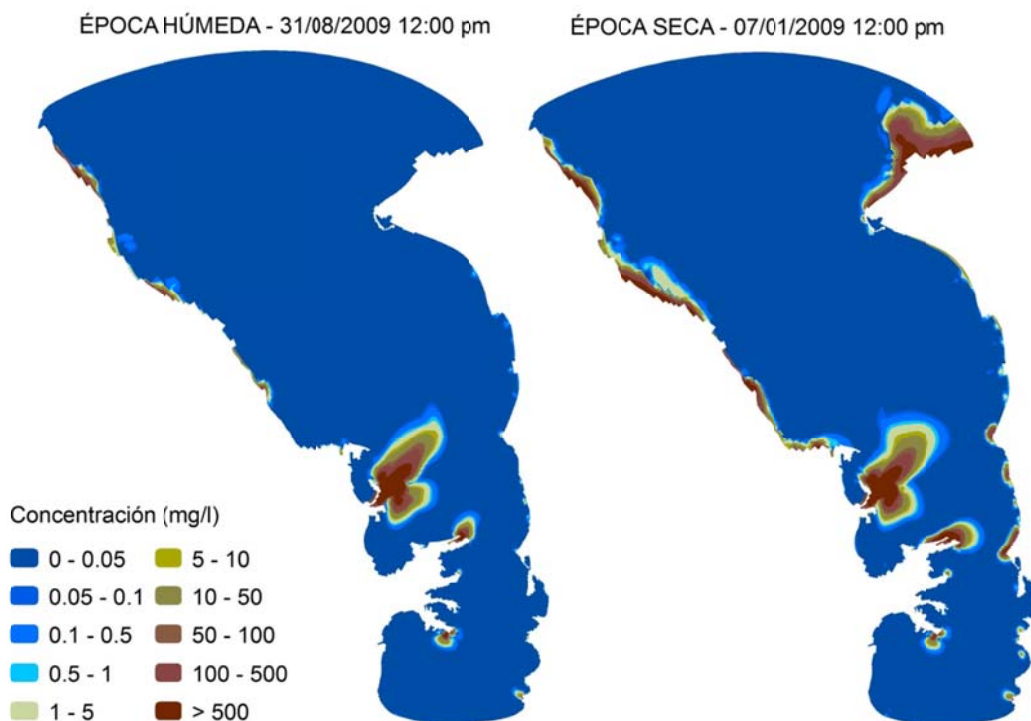


Figura 30. Concentración superficial en épocas húmeda y seca

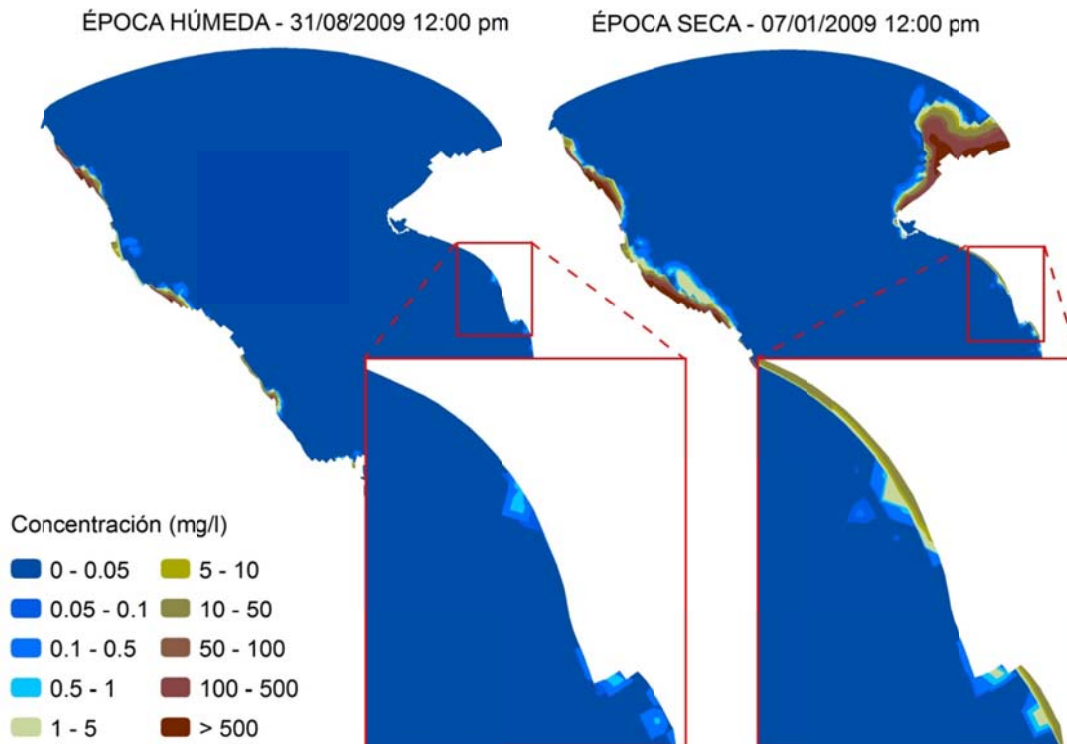


Figura 31. Concentración superficial en Necoclí, épocas húmeda y seca

8.2 CONDICIÓN METEOROLÓGICA EXTREMA

El paso del huracán Tomas por la región norte de Colombia a inicios de noviembre del 2010 fue la condición meteorológica extrema simulada. Tomas se formó el 29 de octubre de 2010 como una onda tropical que se desplazó desde el Atlántico este hacia el Caribe, (véase la trayectoria indicada en la Figura 32) hasta convertirse en un huracán de categoría 2 que afectó notablemente a Haití, Cuba, Costa Rica, entre otras. Su duración total fue de nueve días.

A pesar de que la trayectoria de este huracán no está enmarcada dentro de la zona de estudio, los vientos en ella alcanzaron los 36 km/h y el oleaje de tormenta llegó a la frontera norte del modelo como un *swell* con alturas de ola significativa de aproximadamente 2.2 m y periodos al pico de 9.9 s (valores más elevados que

de costumbre), lo que lo hace un evento interesante para observar la respuesta de las concentraciones de sedimentos al interior del golfo.

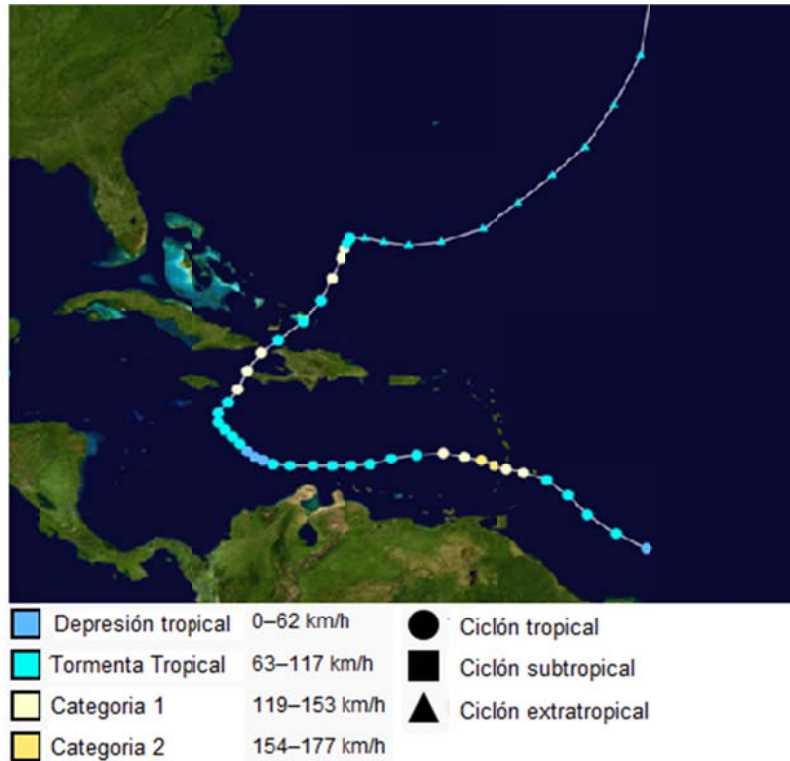


Figura 32. Trayectoria huracán Tomas. Imagen de dominio público editada de Wikimedia

En la Figura 33 (izquierda), se observan los resultados de la simulación para un instante de tiempo a finales del paso del huracán Tomas por el Caribe. A diferencia de los resultados observados para las épocas seca y húmeda, en este caso las concentraciones de sedimentos superficiales en el costado suroriental del golfo son muy elevadas, lo que indica que el oleaje proveniente del noroeste junto con los vientos del oeste causan aumentos significativos de las concentraciones superficiales en las zonas protegidas del golfo de Urabá. Lo opuesto ocurre en la zona centro – norte, donde los resultados indican concentraciones casi nulas.

Con el fin de tener una mejor fuente de comparación para este último caso, se superponen sobre la Figura 33 (derecha) las concentraciones superficiales

obtenidas luego del muestreo mecánico realizado en la campaña de medición Golfo de Urabá II-2010; Suponiendo que las concentraciones superficiales para los días de duración de esta campaña fueron constantes en el tiempo, se observan tendencias similares entre los datos medidos y los calculados.

En general, las concentraciones reales y las simuladas se encuentran en el mismo orden de magnitud, tal como se observa en las cercanías de Matuntugo, en bahía Colombia y en la zona norte del golfo.

Las discrepancias más notorias están a las afueras de la cobertura de las plumas provenientes de Matuntugo y el Roto y adicionalmente un punto al oeste de Necoclí en el que al parecer se presentó una concentración de sedimentos superior a la esperada. Al no contar con información de campo cercana a la costa, no se pudo verificar la ocurrencia de las altas concentraciones del costado este del golfo.

10/11/2009 11:00 am - FINALES DEL HURACÁN TOMAS

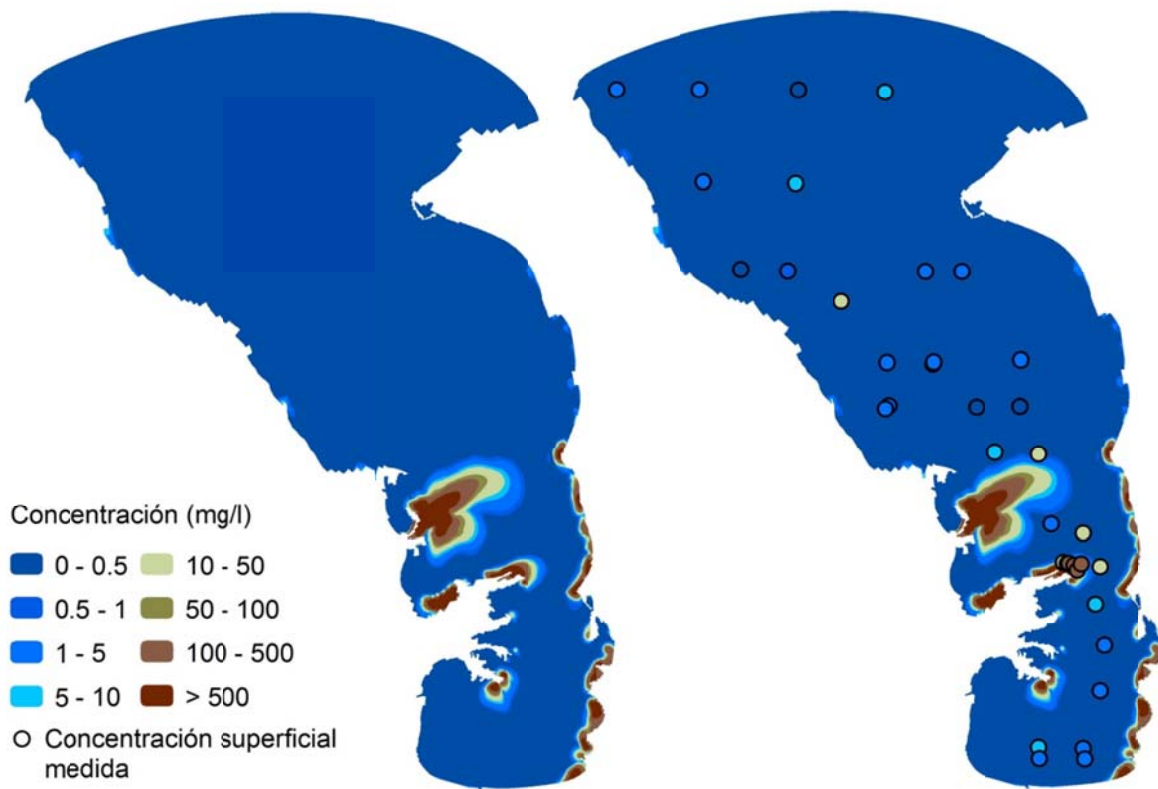


Figura 33. Concentración superficial simulada y medida, para el final del huracán Tomas

9. CONCLUSIONES

Las conclusiones presentadas a continuación surgieron a partir de un modelo de transporte de sedimentos sometido a un análisis de sensibilidad, por lo que son de carácter preliminar y podrían llegar a modificarse, una vez se analicen otros parámetros que no están dentro del alcance de este proyecto de grado.

Los procesos termo-salinos (generados por la descarga del río Atrato) y el oleaje son los parámetros más relevantes para el modelo de transporte de sedimentos y sus efectos en las concentraciones son mayores en las áreas cercanas al Roto, a la costa noroccidental del golfo y al litoral comprendido entre el río Turbo y el río Caimán Nuevo.

Bajo las condiciones medias utilizadas en las simulaciones:

El oleaje afecta principalmente la concentración de sedimentos en las aguas someras de la zona norte del golfo, esta zonificación se presenta por que las olas provenientes del Caribe llegan a la costa sin encontrarse con obstáculos que las hagan perder energía. El caso contrario ocurre en bahía Colombia, donde el oleaje se encuentra con barreras físicas antes de incidir directamente, razón por la cual, la relevancia de este forzamiento al sur del golfo es despreciable.

La estratificación termo-salina tiene un efecto directo en la hidrodinámica del golfo, lo que conlleva a uno indirecto en las concentraciones de sedimentos. El análisis de sensibilidad refleja la importancia de la pluma menos densa proveniente del Atrato y el papel que ejerce como medio de transporte de sedimentos en suspensión, protegiendo a las partículas del contacto con la sal y por lo tanto de una rápida floculación y posterior asentamiento.

Las simulaciones en tres periodos diferentes indicaron que el viento si tienen un efecto indirecto en las concentraciones de sedimentos en el golfo, aún así, las características del mismo utilizadas en el análisis de sensibilidad (vr.g. los coeficientes de dragado y las bajas velocidades) no permiten evidenciarlo de manera clara.

La marea es el forzamiento analizado de menor relevancia en el modelo de transporte de sedimentos planteado, pero debe tenerse en cuenta que se analizó su efecto residual, por lo que podría tornarse relevante al analizar un único ciclo de marea.

El intervalo temporal de cálculo óptimo para el modelo de transporte de sedimentos es de 2.25 min, con la modificación de este parámetro no se verá afectada la calidad de la solución del modelo y el gasto computacional se reducirá respecto al utilizado en la simulación patrón. Se debe tener en cuenta que la modificación del intervalo temporal de cálculo concentra su efecto en la desembocadura del Roto, zona crítica para el estudio de transporte de sedimentos en el golfo de Urabá.

A pesar de que los resultados obtenidos para octubre-noviembre de 2010 muestran que el modelo tiende a seguir patrones de distribución de sedimentos similares a los medidos en campo, debe continuarse con el análisis de sensibilidad respecto a otros parámetros como las descargas sólidas del Atrato y los pequeños afluentes, la velocidad de caída de las partículas, el coeficiente de rugosidad del fondo, el coeficiente de dragado del viento etc., y así proseguir con las etapas de calibración y validación en las que el modelo logre una representación mucho más precisa de la realidad.

La resolución temporal y el fácil acceso a la información de sensores remotos, hace de ellos una herramienta útil para la predicción aproximada de

concentraciones de sedimentos en zonas costeras donde la información es escasa o nula. Sus principales limitaciones son la nubosidad que puede llegar a cubrir zonas extensas por largos periodos de tiempo y su resolución espacial, que a pesar de ser buena, no permite un estudio detallado al interior de los afluentes del golfo.

A modo de recomendación, se sugiere la realización de muestreo mecánico de sedimentos en suspensión en el costado noroccidental del dominio de cálculo donde se evidenciaron concentraciones elevadas en la simulación patrón, y la realización de una campaña de medición durante la temporada seca.

10. REFERENCIAS

ABBOTT, M. B y PRICE, W. A. Coastal, Estuarial and Harbour Engineers' Reference Book. 1ra Edición. Londres: E & FN Spon, 1994. 727. p. ISBN: 0 419 15430 2.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION y AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. 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.

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA. Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente: NSR-98. 5ta Edición. Bogota: Asociación Colombiana de Ingeniería Sismica, 1999. Tomo I, 556. p.

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.

CHEVILLOT, Phillipe *et al.* Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. En: Boletín científico CIOH, 1993, p. 79-89.

CORREA, Iván Darío *et al.* Historical and Recent Shore Erosion along the Colombian Caribbean Coast. En: Journal of Coastal Research, 2005, 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.

CUKIER, R. I. *et al.* Study of the sensitivity of coupled reaction systems to uncertainties in rate coefficients. I. Theory. En: Journal of Chemical Physics, 1973, Vol. 59, p. 3873-3878.

DAVIDIAN, Jacob. General Procedure for gauging streams, Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, 1ra Edición, U.S Geological Survey, p. 13 capítulo: A6, Denver, 1969.

DELTARES. Delft3D-FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Delft: Deltares, 2010. 647 p.

EINSTEIN, Hans A. The bed load function for sediment transportation in open channel flows. En: U.S Department of Agriculture, Soil Conservation Service, 1950.

ESCOBAR, Carlos Alejandro. Análisis de sensibilidad espacial de un modelo hidrodinámico del embalse Punchiná (Antioquia). En: Revista EIA, 2010, Vol. 1, 14, p. 97-113.

_____ Modelling of sediment dynamics in the Dithmarschen Bight, German North Sea Coast. Kiel, 2007, 174 p. (Ph.D). Christian Albrechts University, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas.

ESCOBAR, Carlos Alejandro y PÉREZ, Jesús Alberto. Aplicación del análisis de sensibilidad de un modelo hidrodinámico en la determinación de la relevancia de los procesos físicos y forzamientos externos en las corrientes del embalse Punchiná (Antioquia). En: Revista Universidad EAFIT, 2009, Vol. 45, 156, p. 73 -89.

FARIAS, Hector Daniel. Geometría hidráulica de ríos de llanura. Enfoques analíticos considerando la influencia de las márgenes. En: Segundo Simposio

Regional sobre Hidráulica de Ríos (2005: Neuquén, Argentina). Cazeneuve Editores, p. 5-6.

GARCÍA, Carolina. Atlas del golfo de Urabá: Una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. 1ra 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.

GUZMÁN, W. *et al.* Programa Nacional de Investigación para la Prevención, Mitigación y Control de la Erosión Costera en Colombia - PNIEC: Plan de Acción 2009-2019. 1ra Edición. Santa Marta, Colombia: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar), 2008. 72. p. ISBN: 978-958-8448-07-7.

HALL, Jim W. *et al.* Sensitivity analysis for hydraulic models. En: Journal of Hydraulic Engineering, 2009, Vol. 135, 11, p. 959-969.

HJULSTRÖM, F. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. En: Bulletin of the Geological Institute University of Uppsala, 1935, Vol. 25, p. 221-527.

KALNAY, E. *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. En: Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, Vol. 77, p. 437-470.

LANE, E.W *et al.* Report of the Subcommittee on Sediment Terminology. En: Transaction of the American Geophysical Union, 1947, Vol. 28, 6, p. 936-938.

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

MILLER, Richard y McKEE, Brent. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentration of total suspended matter in coastal waters. En: Remote Sensing of Environment, 2004, Vol. 1, 93, p. 259 - 266.

MOLINA, Amparo *et al.* 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. 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.

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

POERBANDONO. Sediment transport measurements and modelling in the Meldorf Bight tidal channels, German North Sea coast. Kiel, 2003, 151 p. (Ph.D). Christian Albrechts University, Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas.

POSADA, Federico *et al.* Influencia del swell generado en el océano Atlántico en el oleaje incidente en la costa Caribe Colombiana. En: XIV Seminario Nacional de Ciencias y Tecnología del Mar SENALMAR (2010: Cali, Colombia). SENALMAR, 4 p.

RESTREPO, Juan Darío y KJERFVE, Bjorn. Water discharge and sediment load from the western slopes of the colombian Andes with focus on río San Juan. En: The Journal of Geology, 2000, Vol. 108, p.17-33.

RODRIGUEZ, Vilmaliz y GILBES, Fernando. Using MODIS 250 m Imagery to estimate total suspended sediment in a tropical open bay. En: International Journal of systems applications, engineering and development, 2009, Vol. 3, 1, p. 36-44.

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, Andrea *et al.* Sensitivity analysis as an ingredient of modelling. En: Statistical Science, 2000, Vol. 15, 4, p. 377-395.

SHIELDS, Albert. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources. California Institute of Technology, Reporte 167, 1936.

SIMPSON, Michael R. Discharge measurements using a broad-band acoustic doppler current profiler. U.S Geological Survey. Sacramento, California, 01-1, 2001.

SOBOL, I. M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. En: Matematicheskoe Modelirovanie, 1990, Vol. 2, p. 112-118.

THURMAN, Harold. Introductory Oceanography. 4ta Edición. Columbus: Bell and Howell, 1985. 503. p. ISBN: 0-675-20375-9.

TORO, Fernando. Sistemas de soporte de decisiones para la creación de modelos numéricos hidrodinámicos. En: Revista EIA, 2004, Vol. 2, p. 53-65.

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.

_____ Sediment transport, Part I: Bed load transport. En: Journal of Hydraulic Engineering, 1984, Vol. 110, 10, p. 1431-1456.

VAN RIJN, Leo C *et al.* Description of TRANSPORT2004 and implementation in Delft3D-Online. WL | Delft hydraulics. Delft, Reporte Z3748.10, 2004.

WIKIMEDIA, FOUNDATION. WikiProject Tropical cyclones/Tracks. <http://es.wikipedia.org/wiki/Temporada_de_huracanes_en_el_At%C3%A1ntico_de_2010> [citado: Marzo 2011].

YANG, Chih T. Insipient motion and sediment transport. En: ASCE Journal of the Hydraulics Division, 1973, Vol. 99, 10, p. 1679-1704.

YANG, Chih T y STALL, John B. Unit stream power for sediment transport in natural rivers. Urbana: University of Illinois, Reporte final, 1974.