

RELEVANCIA DE PROCESOS COSTEROS EN LA HIDRODINÁMICA DEL GOLFO DE URABÁ (CARIBE COLOMBIANO)

Carlos A. Escobar S.

Universidad EAFIT, Área de Ciencias del Mar, Carrera 49 No. 7 Sur-50, Medellín, Colombia. carloses@eafit.edu.co

RESUMEN

Se presenta en este artículo una metodología a través de la cual se determina cuantitativamente el efecto en la hidrodinámica del golfo de Urabá de un grupo de procesos costeros y forzamientos externos, los cuales, inicialmente, se asumen relevantes en el comportamiento del flujo. De acuerdo con este propósito, se realiza la simulación numérica del flujo y el oleaje en el golfo a través de la plataforma de modelación Delft3D. La modelación considera los siguientes procesos: (i) la influencia marina a través del forzamiento de la marea en la frontera norte del golfo; (ii) el oleaje; (iii) la estratificación termo-salina; (iv) el arrastre del viento y (v) la influencia fluvial a través de la descarga del río Atrato y otros tributarios secundarios. La importancia de un determinado proceso y la sub-área en el interior del golfo donde este es predominante se determina a través de la metodología propuesta, de allí se destaca el efecto notorio y extendido del río Atrato y las corrientes de densidad en la magnitud de las velocidades del flujo. Los otros procesos se toman relevantes en áreas específicas del golfo, las cuales por alguna condición particular (profundidad, energía, forma de la costa, época del año, entre otras) permiten que estos sobresalgan respecto a los procesos principales.

PALABRAS CLAVES: Golfo de Urabá, Procesos costeros, Análisis de sensibilidad espacial, Modelación numérica.

ABSTRACT

Relevance of coastal processes on the hydrodynamics of the Gulf of Urabá (Colombian Caribbean Sea). This paper deals with a methodology to quantitatively determine the effect of a number of coastal processes and external forcing on the hydrodynamics of the Urabá Gulf, which are preliminarily assumed to affect flow behavior. According to this purpose, a coupled flow-wave numerical simulation at the Uraba Gulf is performed by means of the Delft3D modeling system. The simulation includes the following processes: (i) the marine influence through the tidal forcing at the northern boundary of the Gulf; (ii) waves; (iii) thermal and salinity stratification; (iv) wind drag, and (v) fluvial influence through the discharges of the Atrato river and other secondary tributaries. The importance of a specific process and the region inside the Gulf where it is predominant, is defined through the proposed methodology. The analysis evidences the importance, and extended effect, of the Atrato river and the density currents on the magnitude of the flow velocities. Other processes are relevant over certain areas of the Gulf, which present special conditions, such as depth, energy, season, and coastal landforms, thus allowing them to stand out when compared to the main processes.

KEY WORDS: Uraba Gulf, Coastal processes, Spatial sensitivity analysis, Numerical modeling.



INTRODUCCIÓN

La zona de Urabá es un polo de desarrollo indiscutible dada su posición geoestratégica, que le permitiría ser un pilar fundamental en el papel que juega Colombia en la globalización de mercados. De acuerdo con estas posibilidades, la navegabilidad, el diseño de infraestructura marina (puertos, canales, obras de protección), la dinámica del litoral y el ecosistema marino del golfo son temas que se tornan relevantes y urgentes ante la magnitud de las inversiones previstas en el corto y mediano plazo (BIRD, 2007). El estudio apropiado de estos tópicos requiere de antemano información confiable de las características hidrodinámicas en el golfo.

De acuerdo con este requerimiento, se han desarrollado a partir de los últimos veinte años un número de investigaciones que permitieron conocer a través de imágenes satelitales los patrones de circulación superficial en el golfo (Molina *et al.*, 1992; Chevillot *et al.*, 1993). Posteriormente, de acuerdo con el avance de las herramientas computacionales, se han desarrollado algunos modelos hidrodinámicos 3D para el golfo de Urabá. Estos modelos se basan en los sistemas de modelación ELCOM y ECOMSED, los cuales aportaron conocimiento valioso sobre las corrientes subsuperficiales y los patrones de circulación en distintas escalas temporales. Los resultados de estas modelaciones hidrodinámicas se han aplicado en investigaciones sobre la dispersión de sedimentos y la contaminación por coliformes en el golfo (Lonin y Vásquez, 2005; Montoya *et al.*, 2005; Roldán, 2007).

Futuras aplicaciones de la modelación hidrodinámica en el golfo son previsibles, dada la gran importancia y posibilidades de esta región. Predecir las características hidrodinámicas y su variabilidad espacio-temporal son la base de estudios multidisciplinarios (ambientales, ingenieriles, geológicos, geográficos, navales, ecológicos, entre otros); de los cuales se espera obtener una orientación que conduzca a la conservación y desarrollo sostenible del ecosistema existente. De allí que se requiera emprender ciertas acciones que permitan identificar los aspectos susceptibles de mejoría en este tipo de herramientas; indicando hacia donde se deben enfocar los esfuerzos que permitan robustecer la modelación matemática de la hidrodinámica.

De acuerdo con lo anterior, se plantea en este artículo un estudio de sensibilidad espacial; que posibilite identificar donde y en qué grado son relevantes los distintos procesos costeros y forzamientos que intervienen en el área de interés. De esta forma, los recursos disponibles se podrán dirigir en primera instancia a obtener una mayor información de los factores realmente significativos y específicamente en las subáreas de influencia. Es decir, puede no ser necesaria la modelación de cierto

proceso físico o el refinamiento espacio-temporal de algún forzamiento (condición de frontera) si este es irrelevante en el cálculo de los patrones de circulación, niveles del mar o estratificación del golfo.

ÁREA DE ESTUDIO

El golfo de Urabá es el más grande sobre el Caribe colombiano. Su ancho varía entre 5.9 y 48.5 km en los cerca de 80 km de penetración en el continente (Figura 1). La franja costera del golfo tiene una extensión cercana a 543 km de borde litoral, localizados entre Cabo Tiburón y Punta Arboletes (García y Sierra, 2007). La dinámica marina del golfo de Urabá es influenciada fundamentalmente por la descarga solida y líquida de importantes tributarios (ríos Atrato, León, Currulao), el arrastre del viento, el oleaje, la marea y las corrientes de densidad debidas a la estratificación termo-salina (Lonin y Vásquez, 2005; Montoya *et al.*, 2005, 2008). Los factores anteriores presentan a su vez marcadas diferencias entre la temporada seca (diciembre-abril) y la húmeda (meses restantes) las cuales a su vez concuerdan con el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical “ZCIT” (Mesa *et al.*, 1997).

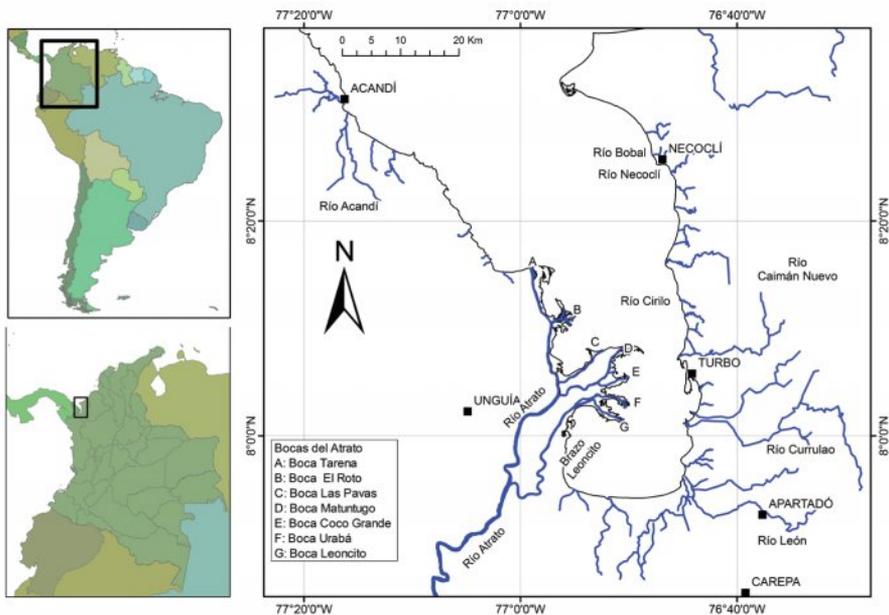


Figura 1. Área de estudio.

El caudal medio de los ríos Atrato, León y Currulao en estaciones cercanas al golfo es de 4500, 64 y 9.8 m³/s, respectivamente. El viento en la región tiene características bimodales con predominio de vientos fuertes del norte y del noroeste con velocidad media de 3-4 m/s en la temporada seca, en la temporada húmeda predominan vientos del sur y suroeste con velocidad media por debajo de los 2 m/s (Roldán, 2007). El oleaje en el golfo de Urabá y en general en el Caribe colombiano ha sido poco estudiado y las mediciones *in situ* son escasas (Osorio *et al.*, 2009). De acuerdo con información secundaria y mapas de procesos costeros, se infiere que la costa noroccidental del golfo recibe directamente el oleaje proveniente de mar abierto; por otra parte la zona oriental y la bahía Colombia se encuentran más protegidas. Registros indican oleaje NW con altura de hasta 1.2 m y SW con alturas de hasta 1 m (Aristizabal *et al.*, 1990; Bernal *et al.*, 2005). El golfo de Urabá presenta un régimen micromareal que, según Correa y Vernet (2004), es del tipo semidiurno mixto con amplitudes máximas del orden de 40 cm. En la extensión total del golfo se pueden observar variaciones en la temperatura del agua de hasta 4 °C en la dirección horizontal y vertical. Fluctuaciones de la salinidad que pueden alcanzar hasta 35 se han observado tanto en la superficie como en la columna de agua; aunque se anota que estas variaciones se reducen drásticamente a partir de los 10 m de profundidad, donde se encuentra una masa de agua más homogénea con características mixohalinas (François *et al.*, 2007).

MATERIALES Y MÉTODOS

Forzamientos del modelo

Afluentes

La descarga del río Atrato es uno de los principales forzamientos de la dinámica del golfo y de su estratificación termo-salina. La contribución hídrica del río Atrato al golfo sobresale con respecto al aporte de otros tributarios importantes (Figura 2). La Figura 2 muestra también las diferencias en los aportes mensuales de algunos tributarios; donde las descargas son consecuentes con las temporadas seca y húmeda características de la zona.

El modelo hidrodinámico utiliza en esta fase inicial de sensibilidad los caudales medios registrados en las estaciones hidrometeorológicas próximas a las desembocaduras de los tributarios. Sin embargo, la descarga media de 25 tributarios secundarios que no cuentan con estos registros se determinó utilizando el sistema de información geográfica HidroSig Java (Vélez *et al.*, 2000). El caudal del río Atrato se distribuyó en cada una de sus bocas de acuerdo con los resultados presentados en Roldán (2007).

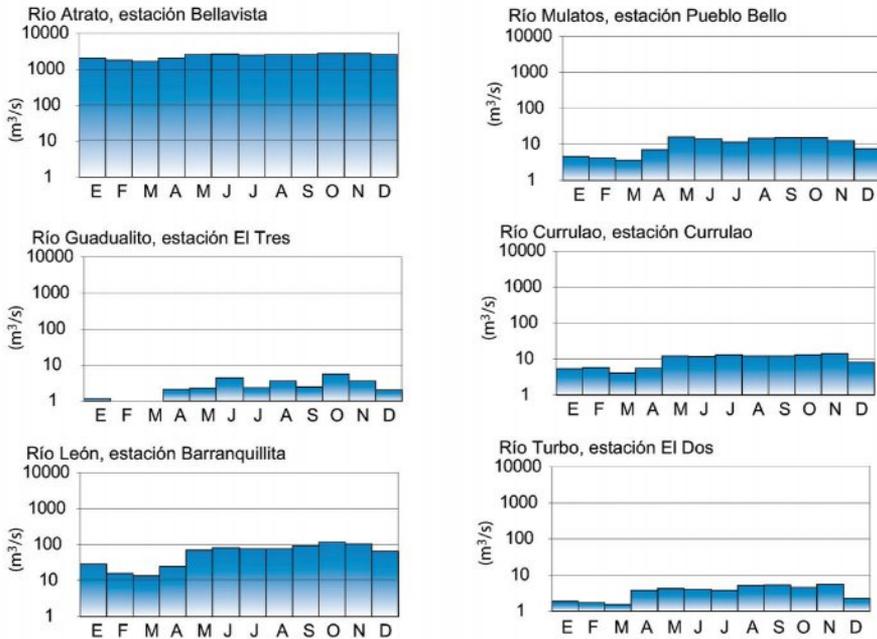


Figura 2. Caudal medio mensual de algunos tributarios importantes del golfo de Urabá (François *et al.*, 2007).

Viento. El esfuerzo ejercido por el viento podría afectar el flujo y la dispersión de sustancias en el golfo. Este esfuerzo se define a través de la expresión cuadrática comúnmente usada que se presenta a continuación:

$$|\bar{\tau}_s| = \rho_a C_d U_{10}^2 \quad (1)$$

Donde, ρ_a es la densidad del aire, C_d es el coeficiente de arrastre del viento y U_{10} es la velocidad del viento a 10 m sobre la superficie libre. El coeficiente de arrastre del viento se especifica de acuerdo con el planteamiento de Smith y Banke (1975). De tal forma que se refleje un incremento de la rugosidad en la superficie libre del agua al incrementarse la velocidad del viento.

En el golfo la época seca se caracteriza por vientos fuertes del noroeste principalmente y en la época húmeda predominan los vientos del sur (Molina *et al.*, 1992; Montoya *et al.*, 2008). La Figura 3 presenta la rosa de vientos de la estación Los Cedros ubicada al sur de la zona de estudio. Detalles de la variabilidad temporal del viento en la estación Turbo a nivel mensual y diurno pueden observarse en Roldán (2007). La relevancia del viento en la hidrodinámica del golfo se verifica para una condición típica en la época seca, con velocidad media de 3.5 m/s y dirección noroeste.

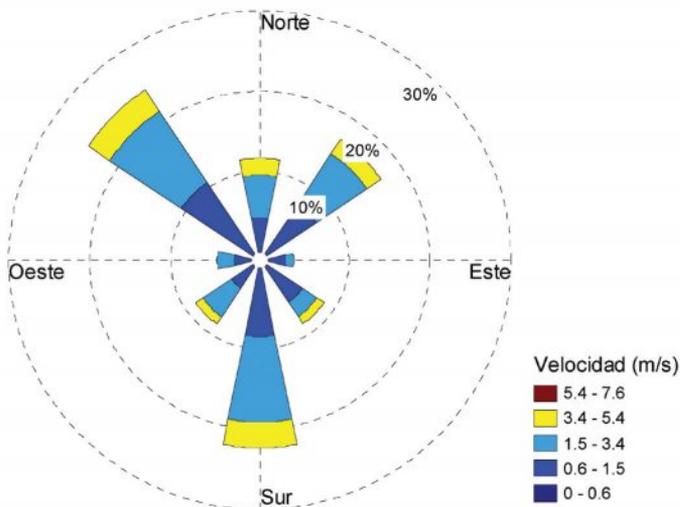


Figura 3. Rosa de vientos en la estación Los Cedros (Montoya *et al.*, 2008).

Oleaje. La propagación del oleaje en el interior del golfo, el oleaje que se forma localmente por acción del viento, las interacciones entre olas y su disipación (*whitecapping*, fricción del fondo, rompimiento de olas) se calculan a través del modelo de tercera generación SWAN (Booij *et al.*, 1999; Ris *et al.*, 1999). En este modelo, la topografía del lecho marino, la hidrodinámica, el forzamiento del viento y el oleaje en las fronteras abiertas (swell) son esenciales en el cálculo del oleaje. El modelo SWAN (Simulating WAVes Nearshore) describe el espectro de densidad del oleaje a través de la ecuación de balance de acción de ola (Hasselmann *et al.*, 1973) e incluye los términos que representan el crecimiento y decaimiento de las olas.

La definición de las condiciones de borde en la frontera del golfo con el mar Caribe “swell” es esencial para determinar el oleaje. Sin embargo, la pobre instrumentación y baja densidad de estaciones de medición disponibles conlleva a que esta información sólo sea asequible por medio de modelos de gran escala (en este caso con cobertura del mar Caribe), tal como el propuesto por Lonin *et al.* (1996) o de registros aislados; de los cuales se determinaron los siguientes parámetros para la época seca; a) altura de ola: 1.2 m; b) dirección náutica: 315°; c) periodo: 6 s. A través de estos parámetros se construye el modelo de oleaje, el cual se acopla con el modelo hidrodinámico; esto debido a que existe una continua interacción entre el oleaje y las corrientes que se manifiesta a través de varios procesos: a) incremento del mezclado debido a la turbulencia generada por “whitecapping”, rompimiento de olas y disipación de energía en el lecho; b) generación de un flujo neto de masa

(stokes drift) perpendicular a la costa; c) formación de corrientes; d) incremento de los esfuerzos de fricción en el fondo.

Marea. La marea astronómica en el golfo de Urabá se define a través del registro mareográfico en la estación San Cristóbal (Panamá), el cual está disponible en la base de datos del Centro del Nivel del Mar de la Universidad de Hawai (UHSLC). El análisis de marea se desarrolla por medio de la plataforma de modelación DELFT3D (TIDE). Para lo cual, se consideran las componentes astronómicas que permiten un ajuste con un 95 % de nivel de significancia (Montoya *et al.*, 2008). La Tabla 1 presenta las amplitudes y fases determinadas.

Tabla 1. Frecuencias dominantes en la estación mareográfica San Cristóbal (Panamá)

| | Frecuencia (°/h) | Amplitud (cm) | Fase (°) |
|-----|------------------|---------------|----------|
| MF | 1.0980331 | 1.874 | 13.7 |
| MQM | 2.1867825 | 0.05 | 57.2 |
| O1 | 13.9430356 | 6.13 | 253.5 |
| K1 | 15.0410686 | 10.20 | 256.6 |
| M2 | 28.9841042 | 7.60 | 194.3 |

Corrientes de densidad

La estratificación por salinidad y temperatura da origen a corrientes de densidad que afectan el patrón de circulación y su variabilidad espacio-temporal. Este fenómeno resulta por la influencia de la salinidad y la temperatura en la densidad del agua, la cual se puede calcular a través de la ecuación de estado propuesta por Eckart (1958) o la UNESCO (1981). El modelo resuelve la ecuación de advección-difusión en 3D para describir el transporte de salinidad y calor.

El flujo total de calor en la interfase aire-agua se define a partir de la relación:

$$Q_{tot} = Q_{sn} + Q_{an} - Q_{br} - Q_{ev} - Q_{co} \quad (2)$$

Donde, Q_{sn} es la radiación solar neta incidente (onda corta), Q_{an} es la radiación atmosférica neta incidente (onda larga); Q_{br} es la radiación del cuerpo de agua (onda larga), Q_{ev} flujo de calor debido a la evaporación, Q_{co} es el flujo turbulento de calor. Los términos en la ecuación 2 se definen a través de la metodología propuesta por Octavia *et al.* (1977), para lo cual se requiere el conocimiento de la humedad relativa, la temperatura del aire, la velocidad del viento, la cobertura de nubes y la radiación solar (onda corta) con cielo despejado en el área de estudio. Estas variables se describen para el golfo de Urabá en las Figuras 4 y 5 según el proyecto Reanalysis (Kalnay *et al.*, 1996).

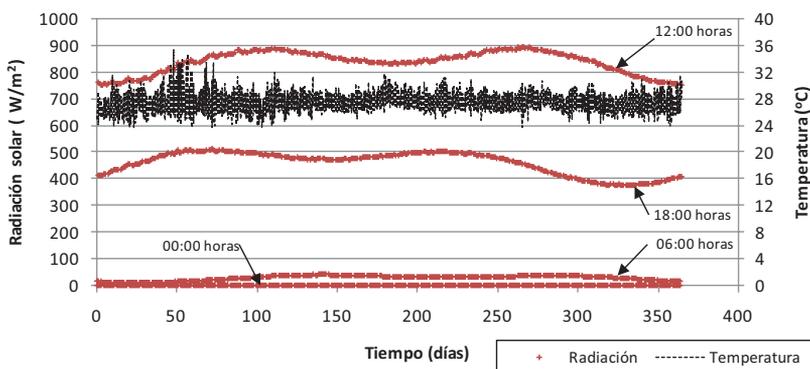


Figura 4. Radiación solar y temperatura en el área de estudio (2006).

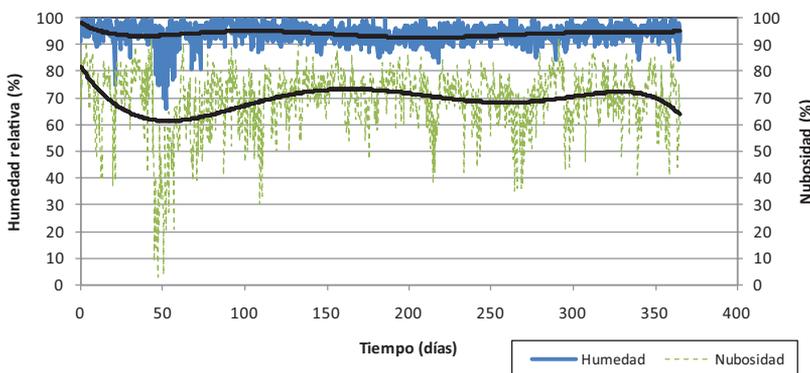


Figura 5. Humedad relativa y nubosidad en el área de estudio (2006).

La variación temporal de temperatura, humedad relativa y radiación de onda corta se define a través de su variación “típica” en un periodo de 24 horas. Esta variación se determinó con los valores promedios de estas variables en el año 2006, según los datos existentes a las 0, 6, 12 y 18 horas (Tabla 2), valores intermedios en los intervalos de 6 horas se determinan por interpolación lineal. La cobertura de nubes se definió en un 69.2 %; lo cual corresponde a su valor medio durante el año 2006.

Tabla 2. Ciclo diario típico de variables climáticas (2006). * Datos del proyecto Reanalysis se modifican ligeramente para mejorar el ajuste con la temperatura media de la región.

| Hora | 0:00 | 06:00 | 12:00 | 18:00 |
|-------------------------------------|------|-------|-------|-------|
| Temperatura (°C)* | 26.4 | 25.9 | 29.5 | 27.5 |
| Humedad relativa (%) | 92.7 | 96.1 | 93.9 | 94.0 |
| Radiación solar (W/m ²) | 0.0 | 28.0 | 841.6 | 461.8 |

Morfología

Este estudio obtuvo los datos batimétricos del golfo de Urabá a través de los levantamientos hidrográficos efectuados por la Dirección General Marítima. En particular, aquellos consignados en la carta COL412, donde se determinaron profundidades con una densidad aproximada de un dato cada 1.5 km.

La Figura 6 describe las principales características batimétricas del golfo. En sus 80 km de longitud pueden distinguirse el delta del río Atrato sobre la margen occidental y sus bocas principales: (1) Leoncito, (2) Burrera, (3) Coquitos, (4) Matutungo, (5) Pavas, (6) El Roto y (7) Tarena. Además de las respectivas bahías que se forman entre las bocas del río: (8) Marirrio, (9) Pichindi, (10) La Paila, (11) Coco Grande, (12) Candelaria y (13) Rotico. En la margen oriental del golfo se destacan al norte la ensenada de Rionegro (14); al sur la bahía de Turbo (15) y las espigas con orientación al sur que finalizan en Punta las Vacas (16) y Punta Yarumal (17). La ubicación de algunas cabeceras municipales está indicada en la Figura 6. Las profundidades máximas se encuentran al norte del golfo y alcanzan 70 m mientras que al sur en bahía Colombia difícilmente llegan a 30 m.

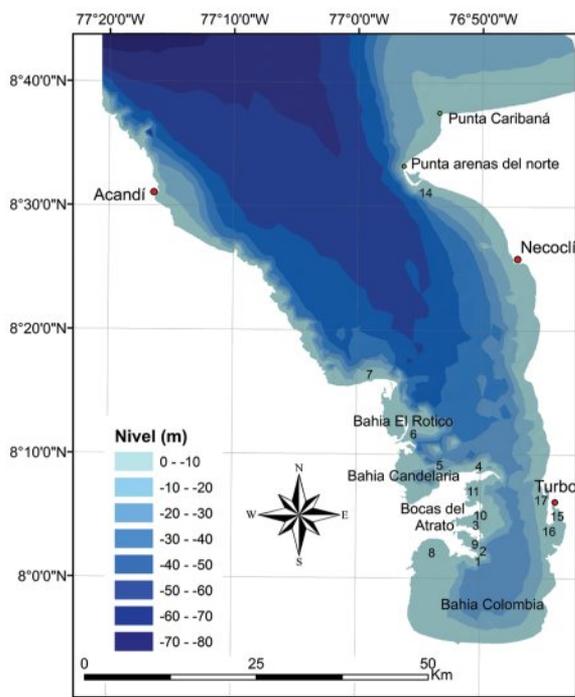


Figura 6. Batimetría del golfo de Urabá.

Las simulaciones hidrodinámicas realizadas en este estudio cubrieron cortas escalas temporales que oscilaron entre tres y cinco semanas. Por lo cual, los cambios batimétricos se despreciaron. Aunque se anota, que en esta corta escala temporal pueden tenerse cambios morfológicos considerables, debidos a eventuales deslizamientos o diapirismo.

Modelo hidrodinámico

La plataforma de modelación Delft3D desarrollada por WL|Delft Hydraulics en Holanda (Roelvink y Van Banning, 1994) es usada en la determinación del flujo no estacionario en el golfo de Urabá. La estratificación termo-salina en el golfo exige la construcción de un modelo 3D que permita considerar su existencia y la variabilidad espacio-temporal de las corrientes. El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de Navier Stokes sobre una malla curvilínea en combinación con un apropiado grupo de condiciones iniciales y de frontera que resultan del forzamiento debido a factores meteorológicos, densidad variable, mareas, descarga de ríos y oleaje. El modelo incluye las fluctuaciones turbulentas a través de los esfuerzos de Reynolds, definidos por medio del modelo de cierre de turbulencia $\kappa\text{-}\epsilon$ (WL-Delft Hydraulics, 2006).

La malla de cálculo superpuesta sobre el área de estudio está compuesta por 21500 celdas aproximadamente, con tamaños que oscilan entre 50 y 1800 m en las zonas remotas (Figura 7). En las simulaciones 3D, la dirección vertical se discretiza a través de una malla con sistema coordenado tipo sigma (Phillips, 1957) donde las capas están limitadas por dos planos; de los cuales, uno se aproxima a la superficie libre del agua y el otro a la topografía del fondo. El número de capas en la vertical es constante para la totalidad del área de estudio. En este modelo se consideraron 10 capas; de las cuales, las cinco más superficiales tienen un espesor equivalente al 5 % de la profundidad total y las cinco restantes al 15 %.

La integración temporal usada por el esquema de solución numérica (método “Cyclic”) se basa en el método ADI (Alternating Direction Implicit). Este esquema no impone restricciones al intervalo temporal de cálculo (Stelling y Leendertse, 1991). Por consiguiente, se consideró en las simulaciones realizadas un intervalo temporal igual a un minuto, procurando que el número de Courant no exceda un valor de 10 y con ello no afectar la calidad de la solución (WL-Delft Hydraulics, 2006).

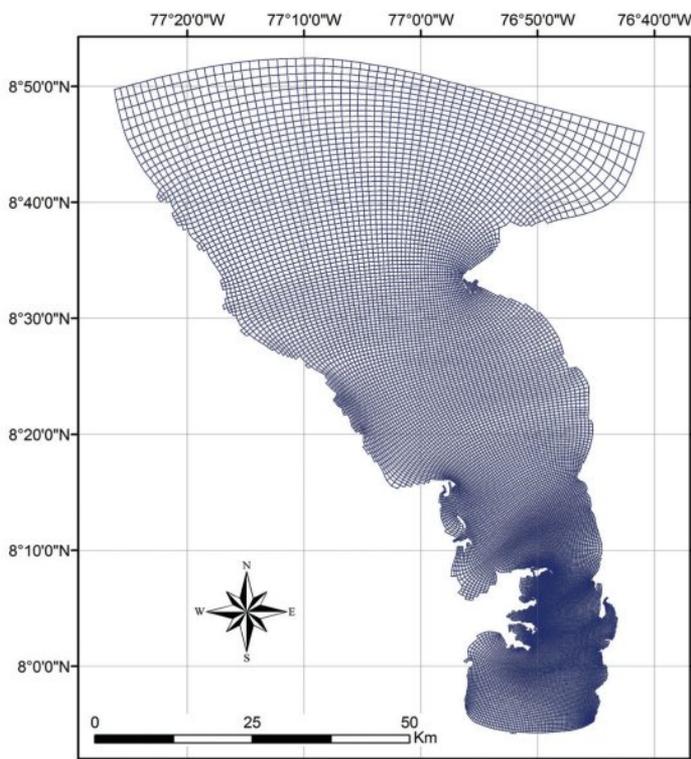


Figura 7. Malla de cálculo para el golfo de Urabá.

Relevancia de los procesos costeros en la hidrodinámica del golfo

En el golfo de Urabá se tienen un número de procesos que alteran en mayor o menor grado sus características hidrodinámicas. Cuantificar el efecto individual de cada uno de estos procesos es el propósito fundamental de este trabajo. Se consideran entre otros el efecto de la descarga de afluentes (tributarios principales y secundarios), la marea, el oleaje, las corrientes de densidad y factores atmosféricos.

Metodología

Se parte de una simulación inicial o base que incluye todos los procesos considerados en este estudio, los cuales se asumen relevantes en la hidrodinámica del golfo. Posteriormente, se hace una serie de simulaciones equivalente al número de procesos incluidos. Donde, cada una de ellas excluye un proceso distinto de aquellos que componen la simulación base. Es decir, todas las simulaciones con excepción de la inicial carecerán del efecto de un proceso costero (Figura 8).

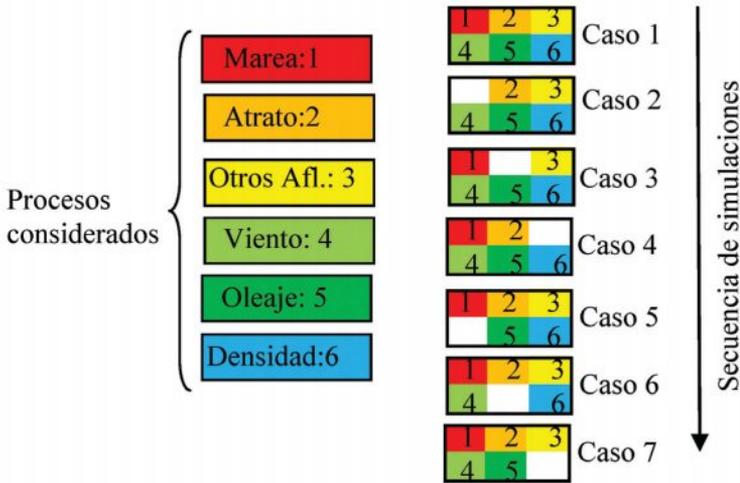


Figura 8. Secuencia de procesos simulados en el golfo de Urabá.

Definir la influencia que tiene cada uno de los procesos costeros en la hidrodinámica del golfo, conduce a considerar su efecto en las corrientes. Por lo cual, se utiliza la magnitud de la velocidad como parámetro de referencia. Se anota que el análisis anterior se realizó para la época seca (vientos del norte).

Inicialmente, se parte de un estado en el cual la velocidad para todo el golfo se define a partir del modelo inicial o base. Posteriormente, en cada una de las simulaciones restantes se excluye del modelo inicial un proceso costero distinto (Figura 8). La discrepancia entre la velocidad media del flujo obtenida de la simulación base y de las otras que excluyen algún proceso, refleja el efecto o aporte hidrodinámico del proceso que se ha excluido. Este efecto se determina en cada una de las celdas del dominio; dando origen al análisis de sensibilidad espacial. A través del cual, se puede determinar en cualquier punto del golfo la relevancia de un proceso específico. Esta relevancia se define por medio de un coeficiente de variación local “ CV_L ”:

$$CV_L = \frac{v_f - v}{v_f} \quad (3)$$

Donde, v es la variable de referencia sobre la cual se quiere determinar la sensibilidad del modelo; en este caso la velocidad media del flujo, v_f es el valor de la variable de referencia en la simulación inicial o base.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta en las Figuras 9 a 14 el efecto de las mareas, los afluentes (tributarios principales y secundarios), el oleaje, el viento y la estratificación termosalina en las corrientes del golfo para la época seca. El efecto de cada uno de estos procesos se cuantifica a través del incremento (izquierda) o reducción (derecha) relativa de la velocidad media del flujo “ CV_L ”. La escala de colores representa la relevancia espacial de cada proceso; donde el color azul oscuro indica un predominio importante del proceso y el color amarillo (valor numérico 0) sugiere por el contrario que el proceso tiene un efecto despreciable en las corrientes.

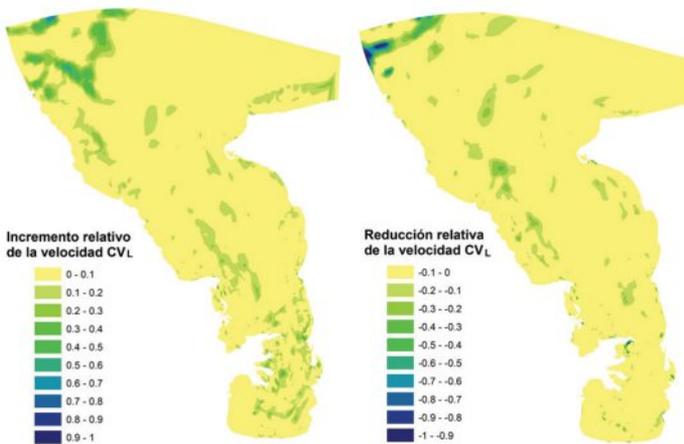


Figura 9. Relevancia de la marea en la hidrodinámica del golfo.

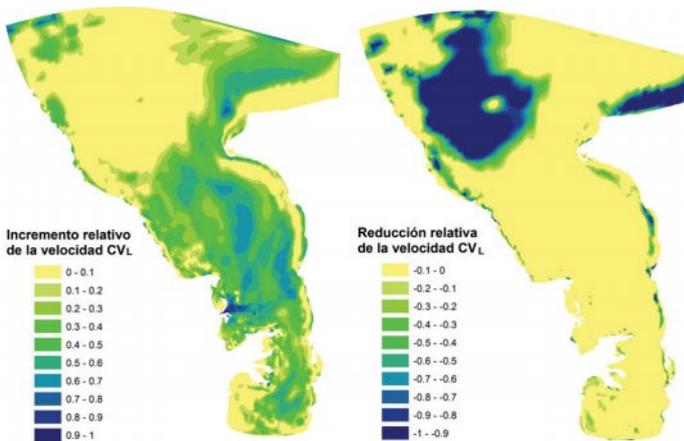


Figura 10. Relevancia del río Atrato en la hidrodinámica del golfo.

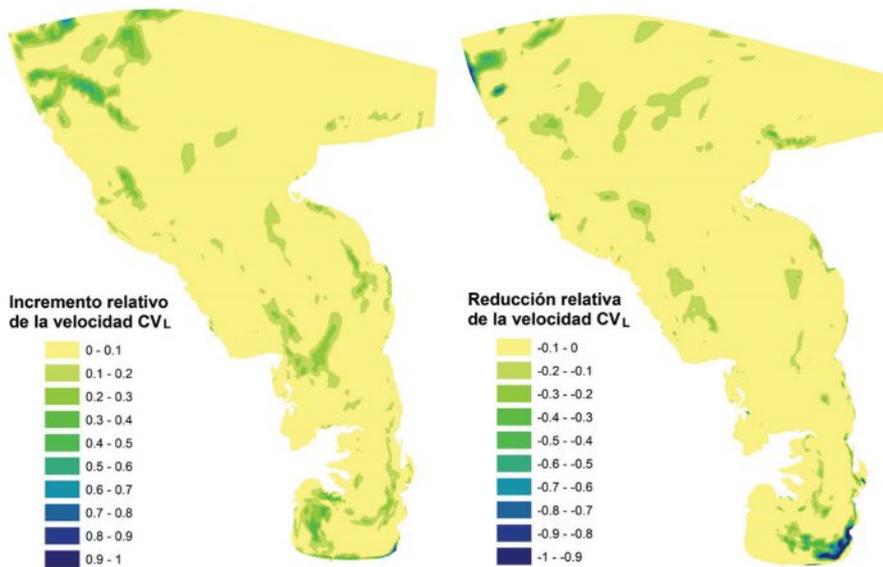


Figura 11. Relevancia de tributarios secundarios en la hidrodinámica del golfo.

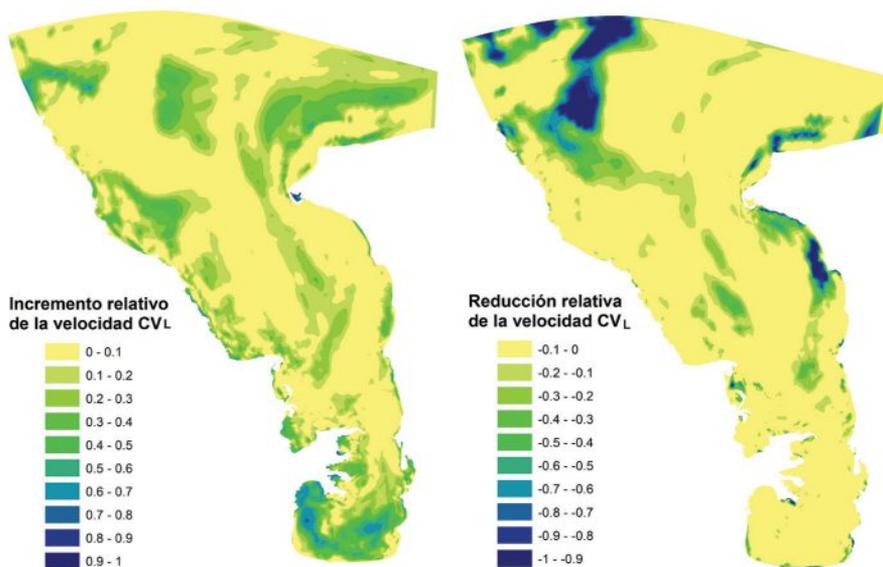


Figura 12. Relevancia del viento en la hidrodinámica del golfo.

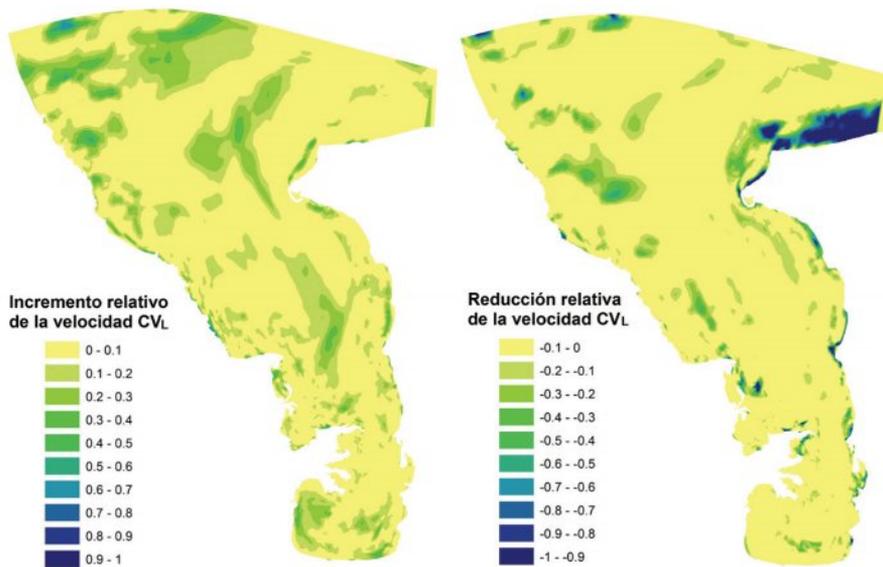


Figura 13. Relevancia del oleaje en la hidrodinámica del golfo.

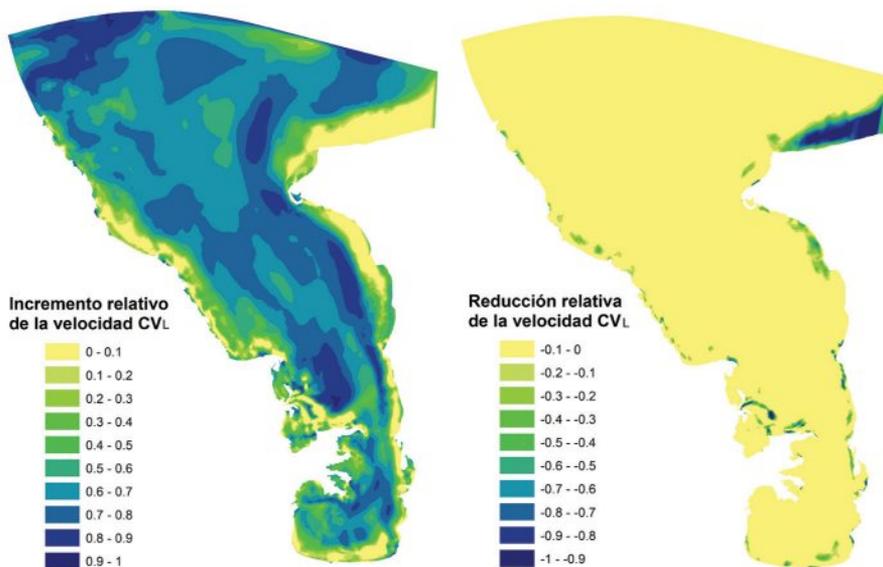


Figura 14. Relevancia de las corrientes de densidad en la hidrodinámica del golfo.

Estos resultados se obtienen para unas condiciones “típicas” de la época seca. Por consiguiente, bajo condiciones hidrometeorológicas extremas es probable que la relevancia de ciertos procesos presente discrepancias significativas con respecto a la establecida en este artículo. La sensibilidad del modelo respecto a cada uno de los procesos estudiados se determinó considerando la magnitud de la velocidad del flujo como parámetro de referencia. Es decir, no necesariamente deben coincidir los resultados de este artículo, con aquellos que se obtendrían si se quiere analizar la relevancia de los mismos procesos en la dinámica de sedimentos, evolución morfológica y calidad de aguas.

Las figuras de la 9 a la 14 determinan para cada uno de los procesos y forzamientos externos considerados, las regiones del golfo donde son predominantes y su grado de influencia en la magnitud de las corrientes (escala de 0 a ± 1). Nótese en las figuras su carácter cuantitativo, la cobertura espacial y la interrelación entre los diferentes procesos estudiados; que permiten incrementar la calidad y cantidad de información disponible, con el fin de llevar a cabo las etapas posteriores de calibración y validación del modelo de una forma eficiente, utilizando los recursos disponibles en la obtención de información realmente significativa.

Incluir la velocidad del viento en las simulaciones hidrodinámicas conlleva la formación de corrientes debido al arrastre superficial, en consecuencia este proceso tiene un efecto directo sobre la velocidad del flujo. Adicionalmente, este factor tiene influencia en la generación local de oleaje, procesos de mezcla y evaporación. Por consiguiente, al excluir deliberadamente este forzamiento del modelo se afectara también el cálculo de las corrientes de densidad y aquellas originadas por el oleaje.

El nivel del mar en la frontera entre el golfo de Urabá y el mar Caribe se determinó a través de la marea astronómica. Sin embargo, para la simulación hidrodinámica del caso 2 (Figura 9) que excluye la marea de la modelación, se impone una condición de frontera con un nivel constante del mar (equivalente al nivel medio) con el propósito de permitir el flujo libre del agua a través de esta zona.

El efecto del oleaje en las corrientes se hace relevante en aguas someras. En aguas poco profundas, el transporte neto de masa y el *momentum* inducido por el oleaje origina corrientes de deriva o transversales a la costa que tornan este proceso relevante. Adicionalmente, la Figura 13 (izq.) muestra un incremento de las velocidades del flujo en la pluma del río Atrato. Lo cual puede ser un reflejo de las interacciones entre el oleaje y las corrientes. Algunos autores coinciden en observar un incremento de la velocidad superficial del flujo cuando el oleaje se propaga en dirección opuesta a la corriente (Kemp y Simons, 1983; van Rijn, 1994; Olabarrieta *et al.*, 2010).

Finalmente, se anota que los resultados de este estudio provienen del análisis de sensibilidad de un modelo hidrodinámico. Por consiguiente, no se hizo énfasis en la comparación de estos resultados con mediciones *in situ*, con estudios hidrodinámicos previos o con cualquier otro tipo de referencia que permita de algún modo determinar las bondades del modelo. Lo anterior corresponde con el propósito de este estudio, que es indicar *a priori* las variables de mayor relevancia y sobre éstas enfatizar posteriormente su observación.

CONCLUSIONES

Bajo condiciones hidrometeorológicas medias o “típicas” de la época seca en el golfo de Urabá y de acuerdo con los resultados del análisis de sensibilidad realizado, se concluye lo siguiente:

El régimen micromareal presente en el golfo de Urabá y la consideración de la marea residual en los cálculos, conduce a que el forzamiento debido a la marea tenga un efecto en la hidrodinámica del golfo (corrientes) relativamente bajo. El efecto de la marea fue cuantificado en variaciones a la velocidad media del flujo inferiores al 10 %. Aunque, algunas excepciones se presentan, entre otras en la frontera noroeste del golfo con el mar Caribe, donde el predominio del río Atrato y de la estratificación termo-salina se debilita (Figura 9). Sin embargo, se anota que el forzamiento de la marea (no residual), especialmente durante marea viva puede generar importantes variaciones en las corrientes. En particular, en las zonas más estrechas del golfo.

La relevancia del río Atrato es indiscutible en la hidrodinámica del golfo. Su efecto es generalizado y cubre casi la totalidad del dominio. Lo anterior contradice la escasez de información (caudales, temperatura, transporte de sedimentos) en cada una de las bocas del río. La aceleración del flujo debida a la descarga del Atrato es notoria desde bahía Colombia en el sur hasta la frontera norte del modelo, donde la pluma se recuesta preferencialmente sobre la margen oriental. Es de igual importancia notar que el río Atrato le resta energía cinética a las corrientes de la zona noroeste, lo cual podría interpretarse como un “tapón” a la penetración de las corrientes de marea (Figura 10).

La relevancia de los tributarios “menores” (no incluye la descarga del río Atrato) en la hidrodinámica del golfo bajo condiciones hidrológicas promedias es muy localizada y su influencia con excepción de la descarga del río León tiene una pequeña cobertura espacial (Figura 11). Bajo condiciones hidrometeorológicas extremas los resultados de este análisis podrían variar sustancialmente; no sólo en la hidrodinámica sino también en la dinámica de sedimentos.

El efecto del viento en la hidrodinámica del golfo se hace notorio en las bahías (Figura 12), como es el caso de bahía Colombia, Marirrio, Pichindi, La Paila, Coco Grande, Candelaria, Turbo y la ensenada de Rionegro. Estos lugares por su condición topográfica presentan una protección natural contra las corrientes más fuertes; por consiguiente el efecto del viento sobre estas zonas de aguas calmas genera un cambio relativo notorio en las velocidades medias del flujo. Adicionalmente, la influencia del viento en las corrientes de densidad y en la generación de oleaje conlleva a que su efecto se extienda por fuera de estas bahías (Figura 12). Se anota que en caso de presentarse vientos del norte con velocidades superiores a un umbral (aprox. entre los 7 y 9 m/s), puede generarse un cambio importante en la dirección de las corrientes superficiales, las cuales cambiarían su tendencia norte por una sur.

La relevancia de la estratificación termo-salina en la hidrodinámica del golfo de Urabá se confirma en este estudio (Figura 14); su influencia es ampliamente notoria en zonas de aguas profundas donde la altura relativa del oleaje es pequeña e insuficiente para homogeneizar la temperatura y salinidad en la columna de agua. Lo anterior no se cumple necesariamente en aguas someras donde la rotura del oleaje y las corrientes pueden tener la energía suficiente para romper la estratificación.

Finalmente, dada la gran relevancia que tiene el río Atrato y la estratificación salina en la magnitud de las corrientes del golfo, una mejor definición espacio-temporal de las condiciones de frontera asociadas a estos procesos, repercutirán significativamente en la calidad de los resultados provenientes de modelos matemáticos.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue desarrollada dentro del marco del proyecto “Erosión costera en Antioquia: Dinámica sedimentaria del golfo de Urabá (erosión-depositación) durante los últimos 10000 años”. El autor quiere agradecer al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas”-Colciencias, a la Universidad EAFIT, Universidad de Antioquia y Universidad Nacional de Colombia por financiar el proyecto. Agradece también a la Capitanía del Puerto en Turbo por el apoyo logístico prestado a las comisiones de campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aristizabal, O. C., M. J. Betancur y C. I. Vásquez. 1990. Erosión y sedimentación de la línea de costa entre Turbo y Necocli- Golfo de Urabá (Antioquia- Colombia). Tesis Geología, Univ. Eafit, Medellín. 345 p.
- Bernal, G., M. Toro, L. J. Montoya y C. Garizábal. 2005. La complejidad de la dimensión física en la problemática costera del golfo de Urabá, Colombia. *Gestión y Ambiente*, 8 (1): 123-135.

- BIRD. 2007. Proyectos estratégicos de conectividad para el noroccidente de Colombia. Banco de iniciativas regionales para el desarrollo de Antioquia, Itagüí, Colombia. 88 p.
- Booij, N., R. C. Ris y L. H. Holthuijsen. 1999. A third generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geophys. Res.*, 104 (C4): 7649-7666.
- Chevillot, P., A. Molina, L. Giraldo y C. Molina. 1993. Estudio geológico e hidrológico del golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH*, 14: 79-89.
- Correa, I., y G. Vernet. 2004. Introducción al problema de la erosión litoral en Urabá (sector Arboletes-Turbo) costa Caribe colombiana. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 33: 7-28.
- Eckart, C. 1958. Properties of water, Part II. The equation of state of water and sea water at low temperatures and pressures. *Am. J. Sci.*, 256: 225-240.
- François, Y., C. García, M. Cesaraccio y X. Rojas. 2007. El paisaje en el golfo. 75-127. En: García-Valencia, C. (Ed). Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR y Gobernación de Antioquia, Santa Marta. 180 p.
- García, C. y P. Sierra. 2007. Un golfo en el Caribe colombiano: 13-21. En: García-Valencia, C. (Ed). Atlas del golfo de Urabá: una mirada al Caribe de Antioquia y Chocó. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR y Gobernación de Antioquia, Santa Marta. 180 p.
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell y H. Walden. 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Dtsch. Hydrogr. Z. Suppl.*, 12 (A8): 1-95.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, R. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, Roy Jenne y D. Joseph. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437-470.
- Kemp, P. H. y R. R. Simons. 1983. The interaction of waves and a turbulent current: waves propagating against the current. *J. Fluid Mech.*, 130: 73-89.
- Lonin, S. y J. Vásquez. 2005. Hidrodinámica y distribución de coliformes en el golfo de Urabá. *Bol. Cient. CIOH*, 23: 76-89.
- Lonin, S. A., I. E. Lonina y Y. S. Tuchkovenko. 1996. Utilización del modelo NedWAM para el cálculo y pronóstico del oleaje en el mar Caribe. *Bol. Cient. CIOH*, 17: 37-46.
- Mesa, O., G. Poveda y L. F. Carvajal. 1997. Introducción al clima de Colombia. Univ. Nacional de Colombia, Medellín. 390 p.
- Molina, A., C. Molina y P. Chevillot. 1992. La percepción remota aplicada para determinar la circulación de las aguas superficiales del Golfo de Urabá y las variaciones de su línea de costa. *Bol. Cient. CIOH*, 11: 43-58.
- Montoya, L. J., M. Toro y G. Bernal. 2005. Dinámica oceanográfica del golfo de Urabá y su relación con la dispersión de sedimentos. 11-37. En: Bernal, G., M. Toro, L. Montoya y C. Garizábal (Eds.). Estudio de la dispersión de sedimentos del río Atrato y sus impactos sobre la problemática ambiental costera del golfo de Urabá. Informe final, Fondo ISA – Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 72 p.
- Montoya, L. J., F. M. Toro y A. Gómez. 2008. Modelación hidrodinámica de la pluma del río Atrato en el golfo de Urabá, Colombia. XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena. 15 p.

- Octavia, K. A. H., G. H. Jirka y D. R. F. Harleman. 1977. Vertical heat transport mechanisms in lakes and reservoirs. Report No. 227, Massachusetts Institute of Technology, Boston. 131 p.
- Olabarrieta, M., R. Medina y S. Castanedo. 2010. Effects of wave-current interaction on the current profile. *Coas. Eng.*, 57: 643-655.
- Osorio, A. F., R. D. Montoya, J. C. Mesa y G. R. Bernal. 2009. Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII™ y diferentes fuentes de datos. *Bol. Cient. CIOH*, 27: 37-56.
- Phillips, N. A. 1957. A co-ordinate system having some special advantages for numerical forecasting. *J. Meteorol.*, 14: 184-185.
- Ris, R. C., N. Booij y L. H. Holthuijsen. 1999. A third generation wave model for coastal regions, Part II, verification. *J. Geophys. Res.*, 104 (c4): 7667-7682.
- Roelvink, J. A. y G. K. F. M. Van Banning. 1994. Design and development of DELFT3D and application to coastal morphodynamics. 451-455. En: Verwey, A., A. W. Minns, V. Babovic y C. Maksimovic (Eds.). *Hydroinformatics' 94*, Rotterdam. 794 p.
- Roldán, P. A. 2007. Modelamiento del patrón de circulación de la bahía Colombia, golfo de Urabá- Implicaciones para el transporte de sedimentos. Tesis Recursos Hidráulicos, Univ. Nacional de Colombia, Medellín. 102 p.
- Smith, S. D. y E. G. Banke. 1975. Variation of the sea surface drag coefficient with wind speed. *Quart. J. R. Met. Society*, 101: 665-673.
- Stelling, G. S. y J. J. Leendertse. 1991. Approximation of convective processes by cyclic ADI methods. *Proceeding 2nd ASCE Conference on Estuarine and Coastal Modelling*, 771-782.
- UNESCO. 1981. The practical salinity scale 1978 and the international equation of state of seawater 1980, Tenth report of the Joint Panel on Oceanographic Tables and Standards (1981), (JPOTS), UNESCO Techn. Pap. Mar. Sci., 36. Sidney, B.C. 26 p.
- Van Rijn, L. C. 1994. Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas, and oceans. Aqua Publications, Delft, Holanda. 335 p.
- Vélez, J. I., G. Poveda y O. Mesa. 2000. Balances hidrológicos de Colombia. Univ. Nacional de Colombia, Medellín. 150 p.
- WL-Delft Hydraulics. 2006. Delft3D-FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual, Delft, Holanda. 630 p.

FECHA DE RECEPCIÓN: 27/10/2010

FECHA DE ACEPTACIÓN: 02/09/2011