



*Serguei Lonin
slonin@costa.net.co

*Carlos Parra
cedat@cioh.org.co

**Carlos Andrade
candrade@buzcald.com

***Yves-François Thomas
thomas@cnrs-bellevue.fr

*CIOH
**GIO-ENAP
***CNRS, U. De París

CIOH
www.cioh.org.co

Patrones de la pluma turbia del canal del Dique en la bahía de Cartagena

Resumen

Se describen los patrones de dispersión de la pluma turbia del canal del Dique en la bahía de Cartagena mediante el análisis de 69 imágenes SPOT y los resultados de una simulación numérica para determinar los principales mecanismos de formación de los patrones de la pluma turbia en la bahía. Se detectaron seis patrones principales de la dispersión de la pluma, mediante la selección de casos homólogos. El modelo hidrodinámico aplicado permitió imitar la pluma turbia e identificar las condiciones hidro-meteorológicas para cada uno de los patrones.

Palabras claves: Bahía de Cartagena, imágenes SPOT, modelos numéricos, turbidez, canal del Dique.

Abstract

The dispersion patterns of the turbid plume of Canal del Dique in Cartagena Bay are described through the analysis of 69 SPOT images and the results of the numerical modeling designed to detect the principal mechanisms for the formation of the turbid plume patterns from the Dique channel at the Cartagena Bay. Six different patterns of the plume were detected based on homologous selection. The implemented hydrodynamic model simulated the turbid plume and identified the hydro-meteorological conditions for each pattern.

Key words: Cartagena Bay, SPOT images, numerical models, turbidity, Dique Channel.

Introducción

La hidrodinámica de la bahía de Cartagena de Indias ha sido

motivo de estudio desde hace más de dos décadas, cuando se empezaron a establecer los primeros institutos en la ciudad. De esa manera, los primeros estudios hechos en el CIOH para tal fin se encuentran por ejemplo en el estudio integral de Pagliardini et al. (1982).

Más adelante, con la ayuda de los sensores remotos, se realizó el estudio de los sedimentos en suspensión e hidrodinámica al Sureste del delta del río Magdalena (Andrade y Thomas, 1988) que observó la influencia de la pluma turbia en la parte externa de Cartagena y otro estudio sobre la turbidez, circulación y erosión en la región de Cartagena (Andrade et al, 1988); posteriormente se analizó la dinámica de la pluma de turbidez del canal del Dique en la bahía de Cartagena (Urbano et al, 1992).

Más recientemente una modelación hidrodinámica fue realizada en la bahía interna de Cartagena, cuerpo de agua semi-cerrado con una sola entrada entre la punta del faro de Castillogrande y la isla de Manzanillo. El propósito del estudio (Lonin y Giraldo, 1995) estuvo dirigido a la implementación inicial del modelo MECCA en su versión original (Hess, 1989), una verificación del modelo basado en observaciones de boyas de deriva y una inter-calibración del modelo con otro, elaborado por Lonin (1994), cuya versión posterior se llamó CODEGO (el nombre indígena de la bahía de Cartagena).

Posteriormente se estudió la capacidad del modelo CODEGO para reproducir la dinámica en los canales y caños angostos, cuyo ancho es inferior al paso espacial de la malla regular del modelo. El modelo se destaca por su aplicación a los cuerpos de agua con presencia de canales, caños, islas y otras irregularidades morfológicas de distintas escalas, Lonin y Giraldo (1996a). Este estudio

fue efectuado dentro del sistema de los canales del “Eje2” de Cartagena.

El desarrollo de los modelos continuó con los estudios sobre la influencia de la estratificación termohalina en la bahía interna donde se encontró que la estratificación térmica, formada por el intercambio de calor con la atmósfera es de gran importancia para el caso de la bahía de Cartagena, Lonin y Giraldo, (1996b).

La primera versión del bloque de transporte fue aplicado para el estudio de la trayectoria de basuras flotantes en la bahía interna, (Lonin y Giraldo, 1995). Más tarde, el modelo fue implementado con un bloque de cálculo de la transparencia del agua, basado en el transporte de partículas suspendidas, generalmente provenientes del canal del Dique. Se compararon las situaciones correspondientes a las épocas seca y húmeda del año (Lonin, 1997a). El modelo representó adecuadamente las diferencias en la carga sólida, el caudal del canal del Dique y el régimen de vientos.

A continuación, se desarrollo una versión avanzada del bloque de transporte específicamente para el transporte de manchas de hidrocarburo (Lonin, 1999), la cual fue aplicada en el modelo de derrame para la bahía, con base en el modelo CODEGO (Lonin, 1997b). El modelo CODEGO también fue aplicado en el estudio de impacto del canal del Dique en las bahías de Cartagena y Barbacoas (Tuchkovenko, et al, 2000, 2002) y (Tuchkovenko y Lonin, 2003).

El trabajo actual utiliza toda la estructura numérica anteriormente mencionada. Sin embargo, para resolver detalladamente los procesos hidrodinámicos en las cercanías a la desembocadura del canal del Dique y simular adecuadamente el transporte de la pluma turbia, fue necesario adaptar el modelo en la

parte física consistente en: la utilización de una malla más densa (60 m de resolución) para toda la bahía, la aplicación de un modelo de alto nivel de clausura de los momentos de turbulencia (Mellor & Yamada, 1974) y el uso del bloque de trazadores desarrollado (Lonin, 1999).

El presente estudio es una contribución adicional a las anteriores, enfocándose en la dinámica de la pluma del canal del Dique en la bahía de Cartagena con el fin de establecer los mecanismos que la gobiernan. En el siguiente apartado se hace una descripción física de la bahía; se describe la metodología aplicada, basada en el uso de los sensores remotos y la modelación numérica; los resultados muestran los patrones de la pluma de turbidez de la bahía y se presentan algunas conclusiones importantes con base en la modelación.

Área de estudio

La bahía de Cartagena de Indias, Colombia, ubicada geográficamente entre las coordenadas $10^{\circ} 16'$, $10^{\circ} 26'$ N y $75^{\circ} 30'$, $75^{\circ} 35'$ W, tiene una extensión meridional de 16 Km y la zonal alcanza 9 Km. El área del espejo de agua es de 82.6 Km^2 , la profundidad promedio es de 16 m y la máxima es alrededor de 30 m.

La bahía está conectada con el Mar Caribe a través de varios estrechos. En el norte, el paso entre la isla de Tierrabomba y el Laguito, Bocagrade, que tiene la Escollera con una profundidad entre 0.6 y 2.1 m y con un ancho de 2 km. En el sur hay tres estrechos: uno de los cuales es Bocachica, el actual canal de navegación, con profundidad de unos 30 m y ancho de 500 m; otro es el canal de Varadero, con una profundidad de 2 m y un ancho de 500

m; y un último es el conformado entre las islas Draga y Abanico, con profundidad de 2 m y ancho de 300 m. (Carta náutica Col268), Figura 1.

En el sur de la bahía entra el canal del Dique con las aguas dulces provenientes del río Magdalena. El canal tiene un ancho aproximado de 100 m, una profundidad variable entre 2 y 3 m y un caudal entre 55 y $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El límite máximo fue estimado con base en los cálculos hidráulicos y está confirmado por las mediciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, como por ejemplo los datos en Pasacaballos, del 20 de agosto de 2001.

Los sedimentos transportados por el canal son de carácter terrígeno con un bajo contenido de arenas. La mayoría de las partículas son limos, con un tamaño de grano de unas micras, y arcillas, que se encuentran en menor cantidad. La concentración de los sólidos en suspensión puede superar $1,000 \text{ mg L}^{-1}$ en Pasacaballos. El sedimento se transporta tanto por el arrastre del fondo como en suspensión. La formación de los flóculos tiene lugar en la desembocadura del canal donde se encuentra el frente entre las aguas dulces y salobres, con salinidades alrededor de 10 (Krone, 1962). La floculación favorece una intensa sedimentación en la boca del canal.

La bahía de Cartagena se clasifica como un estuario, por la presencia del canal del Dique. La salinidad superficial es variable, entre 0 y 30, en distancias cortas (unos kilómetros), entre la desembocadura del canal y las bocas de la bahía. La estratificación salina es el principal factor que influye en la dinámica de la bahía, formada, por lo general, por el flujo de aguas dulces del canal, los vientos y la marea.

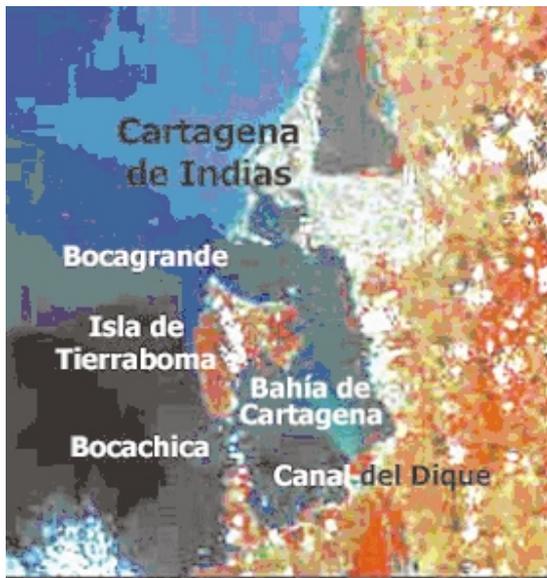


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Composición en falso color obtenida a partir de imagen SPOT del 29 de diciembre de 1992.

El régimen de los vientos en la bahía es estacional. Durante la época seca del año, de diciembre a abril, soplan los vientos Alisios del Norte con una velocidad promedio de 8 m s^{-1} y una dirección estable del Noreste. En Cartagena los vientos Alisios tienen intensidad variable, pero la dirección se mantiene con pocas alteraciones. Durante la época húmeda, entre agosto y noviembre, los vientos son débiles variables con un promedio en la velocidad menor a 3 m s^{-1} y las direcciones predominantes del sector Suroeste. Vendavales ocurren con frecuencia durante este período del año; son de poca duración (unas horas) y están relacionados con la actividad convectiva en la atmósfera, favorecida por el paso de las ondas del Este. Los ciclones tropicales tienen una influencia lejana, que se manifiesta en forma de vientos fuertes y olas de mar de fondo que entran a la bahía durante unos días al año.

En este sentido, es importante mencionar que los vientos fuertes de la época seca y la ausencia

de lluvias locales, en la mayor parte de la cuenca del río Magdalena, están asociados con un bajo caudal del canal del Dique, mientras que los vientos débiles variables en la época húmeda del año indirectamente están acompañados de un caudal pronunciado del canal.

Debido a las entradas limitadas (por el ancho en el sur y la poca profundidad en el norte), las aguas saladas del mar tienen un intercambio débil dentro de la bahía. Sin embargo, la capa inferior a la endulzada (por debajo de unos 2-4 m) está bien aislada de la mezcla con las aguas salobres superficiales por una fuerte estratificación.

El modelo conceptual en lo concerniente a la estratificación del agua de la bahía fue elaborado con base en el análisis de mediciones de campo. La estratificación salina disminuye la difusión del flujo de impulso de turbulencia, proveniente desde la superficie por la acción de viento y el oleaje. En la época húmeda, la capa de mezcla se forma durante períodos cortos de tiempo cuando las olas producidas por el viento en la bahía, son suficientemente altas (correspondiente a un umbral de viento entre 6 y 7 m s^{-1}). Durante la época seca, gracias a los fuertes vientos y bajo caudal del canal del Dique, la capa de mezcla sí se puede presentar en forma permanente y la ventilación de la capa inferior de la bahía es mayor.

Debido a la estratificación salina, los sedimentos finos del canal se atrapan en la capa superficial, donde la turbulencia es relativamente alta, suficiente para mantener las partículas en forma suspendida. La absorción de la luz es mayor en la capa turbia en la superficie, lo que aumenta la estratificación de la densidad de agua y fortalece la frontera entre las aguas superficiales endulzadas y las profundas

oceánicas. La estratificación salina puede alcanzar unos 10 a 15 ppm en los primeros 2 m del agua; la temperatura también varía en esta capa drásticamente ($0.2^{\circ} \text{ m}^{-1}$); la turbidez en esta capa es del orden de 10 a 20 NTU en comparación con las concentraciones de 2 a 4 NTU en la capa inferior.

La dinámica del estuario, por lo tanto, se puede describir de la siguiente manera: la capa superficial se comporta de acuerdo con el régimen de los vientos y el caudal del canal. Durante la época húmeda, las aguas superficiales endulzadas tienden a evacuarse de la bahía a través de los dos estrechos (Bocagrande y Bocachica), aunque la marea del momento puede ser entrante. La capa del fondo se comporta aisladamente, de acuerdo con el régimen de la marea.

Durante la época seca (vientos fuertes y bajo caudal del canal), la capa superficial experimenta un mayor efecto del viento. La penetración del impulso hacia el fondo es más fácil y la estratificación del agua es mucho más débil. La bahía se comporta muy parecida a como si estuviera conformada por una sola capa profunda con estrechos someros. La corriente de la marea entra fácilmente por el canal de Bocachica; en la Bocagrande puede formarse una convergencia de los flujos superficiales en el caso de la marea entrante y los producidos por los vientos Alisios, así que el agua salada del mar tiende a hundirse a lo largo del talud de la Escollera.

El oleaje tiene un efecto preponderante. Por un lado, las olas producidas por el viento, con alturas de 10-50 cm, que se forman dentro de la bahía pueden favorecer la mezcla superficial. Por el otro, el oleaje oceánico que penetra a la bahía (usualmente son olas relativamente largas, de "Swell") causa una alteración de la estructura de las corrientes. Estas olas se reflejan en las costas (observado a

lo largo de Castillogrande), propagándose con ángulos distintos en tales situaciones, lo que hace difícil predecir su influencia en la circulación superficial.

Metodología

Hidrografía

La adquisición de nuevos puntos de sondeo destinados al mejoramiento de la batimetría actual de la bahía (Levantamiento batimétrico 2004), se efectuaron con una resolución de 50 m. Los equipos utilizados en este estudio estuvieron constituidos por una lancha de 6 metros, propulsada por un motor fuera de borda y equipada con un GPS diferencial THALES «6502 SK/MK», ecosonda ODOM «HYDROTRAC» con un transductor de 200 khz y un software de adquisición COASTAL OCEANOGRAPHICS INC., «HYPACK». Este trabajo fue conducido por el Servicio Hidrográfico del CIOH y terminado en abril de 2004; el archivo de sondeo y la línea de costa fue proporcionado con el propósito de implementarlos en el modelo.

Teledetección

Se estudió un conjunto de 69 "Quick Looks" de imágenes de la bahía de Cartagena de Indias, obtenidas entre el 27/03/1986 y el 11/10/2003 por los satélites SPOT, para constituir una crónica.

Simultáneamente, se trató un conjunto de 15 imágenes satelitales: del radiómetro TM de los satélites LANDSAT 4 y 5 (4 imágenes), del radiómetro ETM del satélite LANDSAT 7 (4 imágenes) y del radiómetro HRV de los satélites SPOT 1 al 4 (7 imágenes) cubriendo el período comprendido entre enero de 1986 y enero del 2003. Cada imagen fue georeferenciada en coordenadas UTM (Datum WGS 84) y corregida radiométricamente mediante el empleo del

software «6S» antes de estudiar las respuestas del penacho turbio en las bandas TM2 o ETM2 o XS1.

En cada imagen, se realizó un análisis visual de la dinámica de la estructura de los sólidos en suspensión de la pluma turbia del canal del Dique en la bahía de Cartagena para determinar patrones de la pluma de turbidez semejantes en su comportamiento.

Cada imagen de un patrón dado fue caracterizada a partir de parámetros oceanográficos: la marea observada en el mareógrafo de Cartagena de Indias y la marea calculada a partir de las armónicas de las tablas de mareas de los grandes puertos del Mundo publicadas por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Marina Francesa (SHOM, 1984); hidrológicos: caudal del canal del Dique a la altura de Pasacaballos; climatológicos: presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, visibilidad horizontal. Estos datos fueron preparados para alimentar el modelo e identificar con su ayuda la naturaleza física de cada patrón, evaluado con base en las imágenes.

Modelación hidrodinámica

La versión inicial del modelo disponía de 64 por 37 nodos de cálculo en el plano horizontal y 10 niveles en el plano vertical, el espacio de la bahía entonces estaba cubierto por celdas cuadradas de 250 por 250 metros.

Actualmente, el modelo se aplica con una malla de cálculo de una resolución espacial de 60 metros. Así, el ancho del canal del Dique está determinado explícitamente, mientras que varios canales de la bahía, cuyo ancho es inferior a 60 metros se integran implícitamente. La nueva malla está compuesta de 157 por 295 nodos de cálculo.

La utilización del modelo 3D es más adecuado que el de una dimensión menor, debido a la características físicas del área, como fueron descritas en el ítem “Área de estudio” y considerando que:

La bahía de Cartagena es un cuerpo profundo donde el agua dulce llegada del canal del Dique produce una estratificación en la columna de agua. La intensidad de la turbulencia en la vertical afecta los perfiles hidrodinámicos y por esta razón se necesita una descripción explícita de la estructura termohalina.

Las partículas sólidas en suspensión muestran por si mismas, una distribución estratificada; se supone que esta estratificación vertical no es homogénea en el plano horizontal. Los efectos de estratificación producto de las suspensiones pueden jugar un papel importante en la hidrodinámica de la bahía, ellos fueron descritos en Lonin (1995).

En la capa fótica de la bahía, las partículas en suspensión afectan el campo térmico por la absorción de la luz. Este fenómeno puede crear otras cadenas de realimentación en el sistema "agua-sedimento".

Además de lo anterior, en el modelo, los trazadores simulan las partículas del sedimento. La única fuente de inyección de estas partículas está localizada en la boca del canal del Dique en el límite del dominio de cálculo. Las partículas se inyectan en forma permanente en el tiempo de cálculo, atendiendo un patrón hidrodinámico dado. Los patrones serán caracterizados para cada época del año (por el débito líquido del canal y la carga sólida) y la especificación del estado del tiempo (parámetros meteorológicos). Un ejemplo de la inyección de los trazadores y su comportamiento se presenta en la Figura 2.

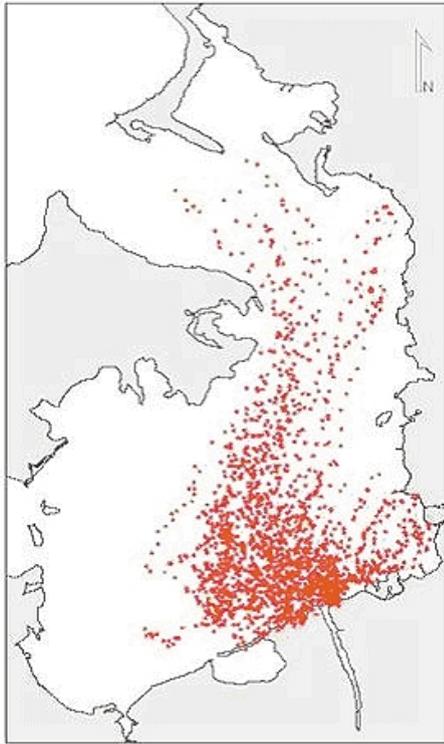


Figura 2. Ejemplo de la simulación de los trazadores, imitación de los sólidos suspendidos.

Se propone definir las partículas inyectadas mediante un espectro de distribución del tamaño de grano de tal manera que permita la simulación simultánea de un sistema multi-componente. La simulación de diferentes patrones se manejará para intervalos del tiempo, correspondiendo a la escala morfológica para estimar los cambios del fondo producidos por la presencia del canal.

Mediciones hidrológicas

Se abordó el análisis en tres dimensiones de la pluma turbia del canal del Dique en la bahía de Cartagena. La sonda CTD marca YSI, permitió medir la temperatura, en °C, la conductividad, en mS.cm⁻¹, la presión, en psi y la turbidez, en unidades NTU, de las aguas entre la superficie y el fondo, empleando 125 perfiles, (ver Figura 3).

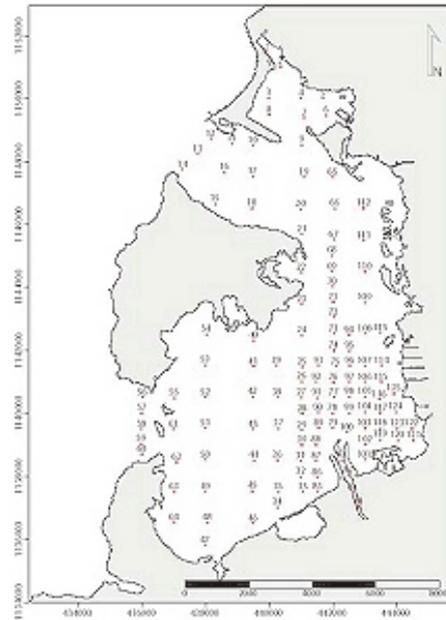


Figura 3. Diagrama del muestreo hidrológico efectuado en la bahía de Cartagena de Indias durante la campaña de abril de 2004.

Simultáneamente, se tomó una muestra de agua que permitió la determinación de la concentración de sólidos en suspensión en mg.l⁻¹. La comparación de estos datos y medidas de turbidez (Figura 4) permitió proponer una relación de la concentración de sólidos en suspensión en mg.l⁻¹ = F (turbidez, en NTU).

También se llevó a cabo una campaña en la época seca que permitió realizar 150 perfiles de CTD y de turbidez, estas medidas se acompañaron de análisis de las concentraciones de sólidos en suspensión, con las que se pudo establecer un esquema global de la circulación de las aguas marinas y fluviales en la bahía.

El posicionamiento de las estaciones fue asegurado mediante el uso de un sistema de posicionamiento GPS GARMIN «12 XL» y de un software de adquisición de datos COASTAL OCEANOGRAPHICS, INC. «HYPACK».

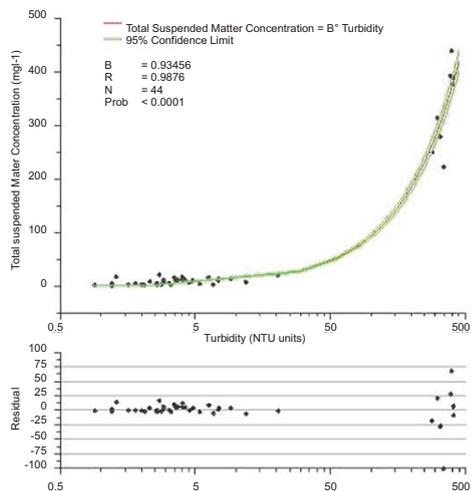


Figura 4. Calibración de las muestras de turbidez (NTU), en términos de concentración de material en suspensión total (mg.l^{-1}); los datos analizados fueron obtenidos en muestreo efectuado entre el 19 y el 23 de abril de 2004.

Resultados

Teledetección de las estructuras de turbidez

Es importante anotar que la estructura de la pluma del canal del Dique en la bahía de Cartagena, observada en un instante dado, es consecuencia de la acumulación de eventos meteorológicos e hidrológicos previos transcurridos durante un período de tiempo. Para determinar este tiempo hay que referirse al caudal característico del canal del Dique y la dimensión de la bahía. Tomando la longitud característica de la bahía como de 10 Km y la velocidad característica de las corrientes igual a 0.1 m s^{-1} , se obtuvo un tiempo de advección de la pluma de por lo menos 27 horas. Este tiempo es comparable con el ciclo de la marea e indica un período mínimo para la formación de un patrón de la pluma de turbidez. En otras palabras, se requiere como mínimo de dos días de datos históricos para establecer cada patrón. Se supone que la variabilidad temporal del caudal del canal, relacionada con los eventos de lluvia, es mayor o igual a este período.

Con el fin de ubicar la pluma en la bahía se planteó dividirla en cuatro partes denominadas “sectores” según su ubicación, así: noreste, sureste, suroeste y noroeste.

Los diferentes patrones de la pluma de turbidez en la bahía de Cartagena determinados mediante el empleo de las imágenes de satélite fueron:

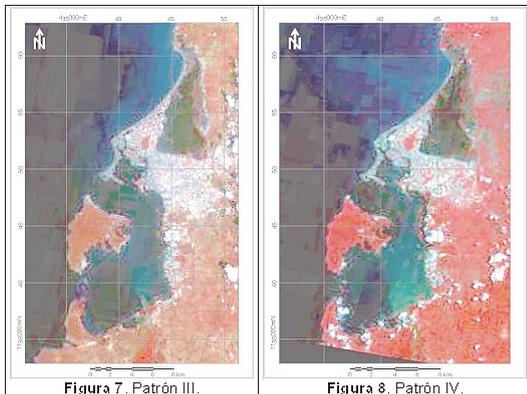
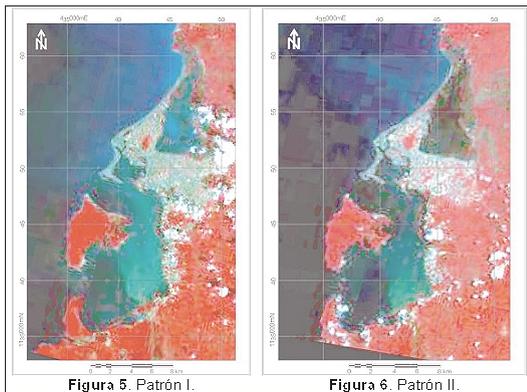
Patrón I: (Figura 5) Pluma con tendencia única en dirección Norte, gran magnitud de aporte de sedimentos y cubrimiento limitado de la parte lateral Este, extendiéndose hasta el sector más al Norte de la bahía, la bahía interior, es decir sectores noroeste y sureste. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un eventos previo de lluvias y a la ausencia de vientos.

Patrón II: (Figura 6) Pluma con tendencia única en dirección Norte, gran magnitud de aporte de sedimentos y cubrimiento limitado a la mitad inferior, extendiéndose hasta la isla de Tierrabomba, sector Sureste. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de altas lluvias y presencia de vientos del Noreste.

Patrón III: (Figura 7) Pluma con tendencia única en dirección Norte, poco aporte de sedimentos y cubrimiento limitado a la parte inferior, concentrándose en la desembocadura del canal, es decir sector sureste. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de escasas lluvias y ausencia de vientos.

Patrón IV: (Figura 8) Pluma con tendencia única en dirección Noroeste, dirigida a la parte sureste de la isla de Tierraboma; aportes moderados de sedimentos, concentrado en la desembocadura del Canal y con cubrimiento parcial, localizado en el sector suroeste de la bahía.

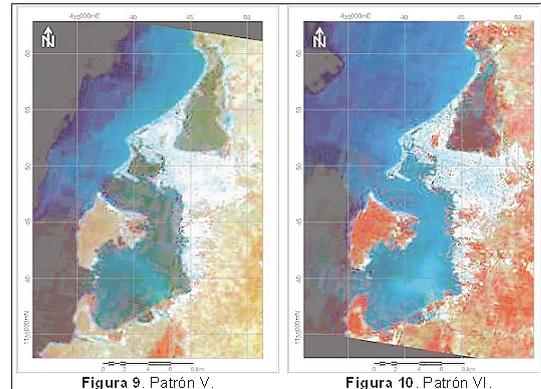
Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de pocas lluvias y presencia de vientos del Noroeste.



Patrón V: (Figura 9) Pluma con tendencia única en dirección Noroeste, magnitud moderada de aporte de sedimentos y cubrimiento limitado a la mitad inferior de la bahía, extendiéndose hasta la isla de Tierrabomba, sector sureste. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de escasas lluvias y ausencia de vientos.

Patrón VI: (Figura 10) Pluma dividida en dos brazos, uno al Norte, tendiendo a Tierraboma y un segundo al Oeste, dirigido al canal de Bocachica; gran cantidad de aportes de sedimentos, concentrado en los dos brazos y con cubrimiento extendido sobre la totalidad de la bahía, incluyendo la

bahía interior, es decir los cuatro sectores. Se presume que este tipo de comportamiento es consecuencia de un evento previo de lluvias y presencia de vientos del Noroeste.



Simulaciones

Las Figuras 11 y 12 muestran la distribución espacial de la pluma turbia del canal para distintas condiciones meteorológicas, pero con el mismo caudal de $140 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La pluma turbia aquí está asociada con la distribución de la salinidad, debido a que las mediciones realizadas en la bahía (Campaña Ecos-NORD, abril de 2004) mostraron una alta correlación entre uno y otro parámetro. De acuerdo con estas mediciones, la distribución de los sólidos suspendidos en la vertical es inversa: la mayor concentración de los sólidos, generalmente limos, se encuentran en la capa superior endulzada. La estratificación salina es fuerte y la capa superficial está relativamente aislada de la dinámica de la capa inferior, sujeta al intercambio con las aguas del mar abierto.

La distribución de la turbidez, mostrada en la Figura 11 corresponde a las condiciones meteorológicas recopiladas durante la campaña de mediciones de abril de 2004. La Figura 12 refleja el caso de ausencia de los vientos. Los cálculos mostraron que la posición de la pluma en cercanías a la

desembocadura no cambia significativamente, dependiendo de la fase de la marea, aunque en la parte periférica se aprecia su influencia.

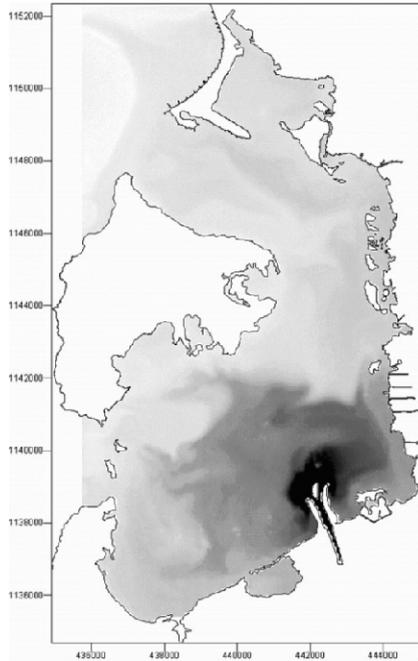


Figura 11. Patrón de salinidad/turbidez para los días de la campaña de mediciones 19-29 de abril de 2004, calculado por el modelo.

De los principales mecanismos que afectan la forma de la pluma, el de mayor impacto, por supuesto, es el flujo o aporte del canal, cuyas oscilaciones son del carácter estacional con perturbaciones pronunciadas, relacionadas con los eventos de lluvias en el recorrido del canal y el río de Magdalena. Un papel adicional en la distribución de la pluma juega el viento. La Figura 13 muestra el caso de los vientos Alisios, “frenando” la pluma en la desembocadura. En el campo de la salinidad se observa que la pluma, “inicialmente” formada frente a la boca del canal, fue desplazada hacia el oeste por los vientos. Definitivamente, en estos casos la convergencia de las corrientes está formando unos frentes salinos más pronunciados y dentro de la desembocadura, por la mezcla de aguas dulces y saladas el

proceso de floculación de las partículas suspendidas es más representativo. Esto último implica una mayor sedimentación en la boca del canal bajo estas condiciones.

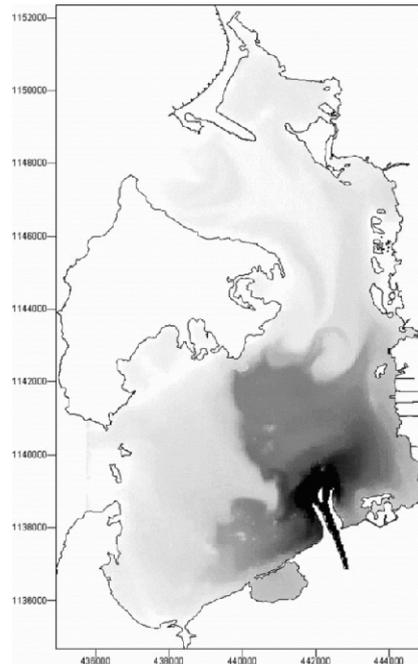


Figura 12. Patrón de salinidad/turbidez para las condiciones de calma, calculado por el modelo.

La dinámica de la desembocadura resultó distinta bajo condiciones de calma (Figura 14). Los procesos de mezcla hasta una salinidad en el intervalo de 5 a 10 (favorable para la intensificación del proceso de floculación, Krone, 1962), se encontraron fuera de la desembocadura del canal, así que este resultado concluye que la mayor sedimentación en la boca del canal debe ocurrir durante la época seca, cuando, además, los caudales son bajos. Esto sugiere la simple coincidencia entre el proceso de sedimentación en la boca del canal que debe ser mayor para los caudales bajos (condición climatológica) y la dirección de los vientos que predominan en la misma época (condición geográfica).

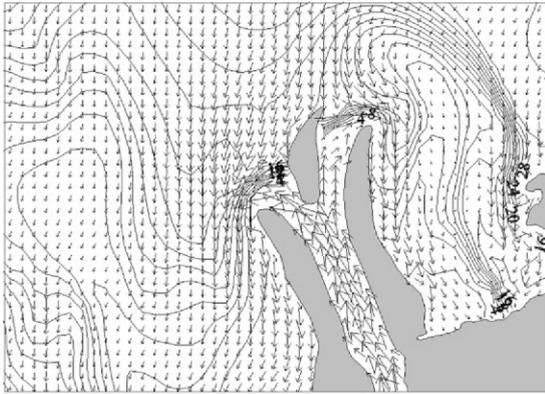


Figura 13. Campo de salinidad (isolíneas) y las corrientes (flechas) en la desembocadura del canal bajo los vientos alisios.

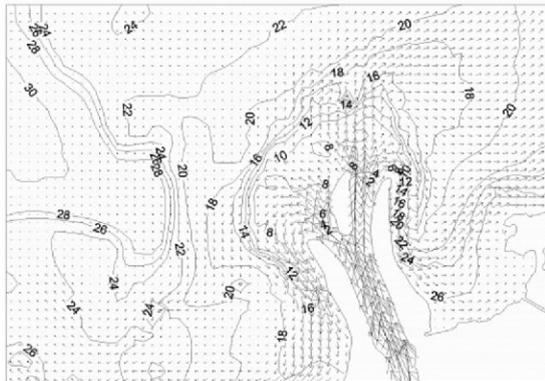


Figura 14. Campo de salinidad (isolíneas) y las corrientes (flechas) en la desembocadura del canal bajo las condiciones de calma.

Discusiones y conclusiones

Los sensores remotos, imágenes SPOT para este estudio, resultan ser una herramienta poderosa para la detección cualitativa y cuantitativa de los parámetros directos o indirectamente relacionados con los procesos hidrodinámicos. Así, las imágenes de turbidez recolectadas durante un período de 17 años permitieron identificar distintos patrones del comportamiento espacial de la pluma de turbidez.

Se encontraron seis patrones de comportamiento de la dinámica de la pluma de turbidez del canal del Dique en la bahía. Cada uno de los patrones está relacionado con varios factores físicos y su interrelación. El principal factor que afecta la posición de la pluma es el aporte del canal del Dique.

La magnitud del caudal del canal determina el aporte de las aguas dulces, produciendo un efecto dinámico a través de la boyancia en la capa superior y una inclinación del nivel de agua, que finalmente afectan las corrientes; un efecto cinemático en la desembocadura es también consecuencia del aporte de las aguas. El transporte de los sedimentos, cuya influencia acoplada con la salinidad, absorción de luz y boyancia propia de los sólidos suspendidos, hace necesario utilizar modelos numéricos sofisticados con el fin de describir su dinámica.

La aplicación de estas herramientas mostró la capacidad de reproducir situaciones hidrodinámicas que gobiernan la formación de los patrones detectados en las imágenes. Esto implica que los modelos pueden explicar las condiciones que favorecen la formación de cada patrón.

En particular se encontró que los vientos Alisios favorecen una mayor sedimentación en la desembocadura del canal del Dique en la bahía. Debido a que los vientos Alisios son predominantes para la época seca del año, cuando el caudal del canal es bajo, ambas circunstancias multiplican la tasa de sedimentación.

La anterior es una conclusión tomada con base en consideraciones heurísticas. Se requiere una estimación cuantitativa del fenómeno para poder destacar el papel del proceso de floculación en la boca del canal dentro del proceso sedimentario, regulado por la estacionalidad de los procesos hidro-

meteorológicos. Con este fin sería conveniente implementar un modelo de floculación de las partículas sólidas, teniendo en cuenta los principales mecanismos de colisión e interacción de ellas.

Agradecimientos

Al CIOH por participar en el proyecto y dar el apoyo del personal, laboratorios, equipos y otros recursos acordados. Al CNRS por participar en el proyecto y dar el apoyo del personal, laboratorios, equipos y otros recursos acordados. A la ENAP por participar en el proyecto y dar el apoyo del personal y otros recursos acordados. Al CN. Hernán Mauricio Ospina, Director del CIOH por su permanente disposición y colaboración en todos los procesos. Al personal técnico del CIOH que apoyó en todas las actividades de campo y laboratorio. A los oficiales del curso de complementación profesional en oceanografía de la Escuela Naval por su participación en las tomas de los datos de campo. A COLCIENCIAS y al Comité EcosNord por subvencionar el proyecto “Un modelo geodinámico de bahía tropical: la bahía de Cartagena de Indias” permitiendo el intercambio de investigadores. A la economista Martha Cecilia Arrieta y al físico Juan Carlos Anduckia por sus acertados consejos y colaboración en el proceso de edición.

Referencias bibliográficas

- Andrade, C. y Thomas, F. (1988). Sedimentos en suspensión e hidrodinámica al sureste del delta del río Magdalena, Mar Caribe (Colombia). Boletín Científico CIOH, N. 8, Cartagena, pp. 27-34.
- Andrade, C., Arias F., y Thomas, F. (1988). Nota sobre la turbidez, circulación y erosión en la región de Cartagena (Colombia). Boletín Científico CIOH, N. 8, Cartagena, pp. 71-81.
- Hess, K.W. (1989). MECCA Programs Documentation. NESDIS, NOAA.
- Lonin, S. (1994). Simulación de la Circulación y la Dinámica de los Sedimentos en Suspensión en la Zona Somera del Mar Negro. Tesis Ph.D. Universidad Estatal de Hidrometeorología de Rusia, San Petersburgo.
- Lonin, S. (1995). Influence of Suspended Matter on Shallow Water Dynamics. Atmospheric and Oceanic Physics, AGU. Vol. 31, N. 4, pp. 577-586.
- Lonin, S. y Giraldo L. (1995). Circulación de las aguas y transporte de contaminantes en la Bahía Interna de Cartagena. Boletín Científico CIOH, N. 16, Cartagena, pp. 25-56.
- Lonin, S. y Giraldo L. (1996a). Resultados Preliminares del Estudio de la Dinámica del sistema de Caños y Lagunas de Cartagena. Boletín Científico CIOH, N. 17, Cartagena, pp. 17-26.
- Lonin, S., y Giraldo L. (1996b). Influencia de los Efectos Térmicos en la Circulación de la Bahía de Cartagena. Boletín Científico CIOH, N. 17, Cartagena, pp. 47-56.
- Lonin, S. (1997a). Cálculo de la Transparencia del Agua en la Bahía de Cartagena, Boletín Científico CIOH, N. 18, Cartagena, pp. 85-92.
- Lonin, S. (1997b). Hydrodynamic Modelling and the Problem of Oil Spills on the Colombian Caribbean Shoreline. Spill Technology Newsletter, Vol.22(1-4), pp.1-6.
- Lonin, S. (1999). Lagrangian model for oil spill diffusion at sea. Spill Science & Technology Bulletin, Vol. 5, N. 5/5-6, pp. 331-336.
- Mellor, G. and Yamada T. (1974). A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. J. Atmos. Sci., 31, 1791-1806.

Pagliardini J.L., Gómez M., Gutiérrez T., Zapata S., Jurado A., Garay J., Vernet G. (1982). Síntesis del Proyecto Bahía de Cartagena. Boletín Científico CIOH, N. 4. pp. 49-110.

SHOM. (1984). Table des marées des grands ports du monde. Paris, SHOM Ed.

Tuchkovenko, Yu.S., Lonin, S.A. y Calero, L.A. (2000) Modelación Ecológica de las Bahías de Cartagena y Barbacoas bajo la Influencia del Canal del Dique. Avances en Recursos Hidráulicos, N. 7, pp. 76-94.

Tuchkovenko, Yu.S., Lonin, S.A. y Calero, L.A. (2002). Modelo de eutroficación de la bahía de Cartagena y su aplicación práctica. Boletín Científico CIOH, N. 20, Cartagena, pp. 28-44.

Tuchkovenko, Yu.S. and Lonin, S.A. (2003). Mathematical Model of the Oxygen Regime of Cartagena Bay. Ecological Modelling, Vol. 165/1, pp. 91-106.

Urbano, J., Thomas, F., Parra, C, y Genet P. (1992). Dinámica de la pluma de turbidez del canal del Dique en la bahía de Cartagena. Boletín Científico CIOH, N. 11, Cartagena, pp. 3-14.

Krone, R. B. (1962). Flume studies on de transport of sediment in estuarine shoaling processes. Hydr. Eng. Laboratory, Univ. of Berkeley, California, USA.