



ARTÍCULO

Efecto del cambio de los caudales del Canal del Dique sobre el patrón de transporte horizontal en la bahía de Barbacoas

Effects of changes in the Canal del Dique discharges on the horizontal transport patterns in Barbacoas Bay

Fecha recepción: 2009-06-25 Fecha aceptación: 2009-10-28

Andrés Gómez Giraldo, eagomezgi@unalmed.edu.co
Andrés Fernando Osorio Arias, afosorioar@unal.edu.co
Francisco Mauricio Toro, fmtoro@unalmed.edu.co
Juan David Osorio Cano, jdosori0@unalmed.edu.co
Oscar Andrés Álvarez, oaalvare@unalmed.edu.co

Grupo de Investigación en Oceanografía e Ingeniería Costera (OCEÁNICOS),
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia.

Resumen

En este artículo se evalúa cómo los cambios en el aporte de caudal líquido a través de los brazos del Canal del Dique afecta el patrón de transporte de sedimentos en la bahía Barbacoas y hacia las Islas del Rosario. Los cambios corresponden a seis alternativas planteadas para disminuir la carga de sedimentos hacia la Bahía de Cartagena. Se utiliza simulación matemática con el modelo tridimensional ELCOM, el cual fue calibrado y validado con datos recolectados en campo incluyendo mediciones de las variables que caracterizan el forzamiento externo ejercido sobre el cuerpo de agua y de variables que caracterizan la dinámica del flujo estratificado que se presenta al interior de la bahía. El transporte horizontal fue estudiado mediante la propagación de un trazador inerte y con flotabilidad neutra y no fue considerado el proceso de sedimentación, por lo que los resultados obtenidos muestran el patrón de transporte horizontal y se interpretan como casos más críticos que la situación real. El patrón de corrientes está influenciado fuertemente por el régimen de vientos en la bahía. El trazador alcanza las Islas del Rosario, en bajas concentraciones y de manera esporádica. No se observa ninguna corriente periférica dominante que pudiera ser un medio preferencial para el transporte de sedimentos y se identifica la variabilidad en la dirección del viento como un factor importante para el transporte horizontal hasta las Islas del Rosario. La comparación de alternativas de modificación de las descargas de los brazos del Canal del Dique permitió identificar aquella que produce un menor transporte hacia las Islas del Rosario.

Palabras claves: Bahía Barbacoas, simulación hidrodinámica, circulación estuarina, flujo estratificado, Canal del Dique.

Abstract

This study evaluates how the changing of solid and liquid discharge through the Canal del Dique channels affects the sediment transport pattern in the Barbacoas bay and towards Islas del Rosario. The changes correspond to six alternatives brought up in order to diminish the sediments discharge towards the Cartagena Bay. The study is based on mathematical modeling using the tridimensional method ELCOM after calibration and validation with

field measurements of the variables representing the external forcing and variables representing the internal dynamics of the stratified flow characteristic of the bay. The horizontal transport pattern was simulated by following an inert and neutrally buoyant tracer. The sedimentation process was not considered hence, only the horizontal transport is described and the results illustrate a situation more adverse for Islas del Rosario than the actual situation. The results show that the transport pattern is strongly influenced by the wind at the Bay. The tracer reaches Islas del Rosario, in low concentrations and sporadically. There was not a peripheral concentrated current that could produce most of the sediment horizontal transport and the wind direction variability was identified as a key factor to produce transport towards Islas del Rosario. The comparison of the alternatives for changing the liquid and solid discharge through the channels of the Canal del Dique allowed to identify that one which would produce less transport towards the Islas del Rosario.

Key words: Barbacoas bay, hydrodynamic simulation, estuarine circulation, stratified flow, Canal del Dique.

Introducción

El Canal del Dique es un canal artificial cuya alineación actual fue establecida en 1952 y que fue construido para permitir la comunicación fluvial en el río Magdalena en el tramo de Calamar a la Bahía de Cartagena en el sector de Pasacaballos. En 1958 fueron abiertas las bocas de Lequerica y Matunilla (figura 1) que desembocan a la bahía de Barbacoas con el fin de disminuir la carga de sedimentos que llegaba en aquel entonces a la bahía de Cartagena. El caudal líquido que transporta el canal es un componente fundamental del balance hídrico de los cuerpos cenagosos que se localizan alrededor del canal [1].

Varios sectores de la comunidad cartagenera creen que los sedimentos transportados por el canal hasta la Bahía de Cartagena repercuten negativamente en la navegación y en las condiciones ambientales y paisajísticas de la bahía, por lo que han planteado la necesidad de reducir el aporte de sedimentos mediante la reducción del caudal líquido que le sirve como medio de transporte. En un estudio adelantado en la sede de Bogotá de la Universidad Nacional de

Colombia (UNAL) [1], se expone que la reducción drástica del caudal líquido que fluye por el canal mediante obras hidráulicas ubicadas cerca a la entrada del canal en Calamar generaría graves consecuencias para los ecosistemas cenagosos vecinos al canal y para la fuente de agua del acueducto de la ciudad de Cartagena, entre otros problemas. Por ello, UNAL [1] ha planteado seis alternativas que combinan diferentes intervenciones posibles para reducir el caudal que llega a la Bahía de Cartagena mediante la construcción de obras hidráulicas que no afecten el intercambio hídrico entre el canal y el complejo cenagoso. Estas alternativas modifican los caudales que son descargados a la bahía Barbacoas y al mar Caribe a través de los caños Correa, Matunilla y Lequerica.

Esta modificación de la descarga al mar Caribe y a la bahía de Barbacoas estaría acompañada de una modificación al aporte de sedimentos finos que serían, eventualmente, transportados por las corrientes marinas de la bahía hasta zonas de riqueza ecológica como las Islas del Rosario, con la posibilidad de generar grandes daños ambientales. Debido a este riesgo, se adelantó un estudio de las condiciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos en la región del mar Caribe comprendida entre las desembocaduras de los caños Correa, Matunilla y Lequerica y las Islas del Rosario, en donde se estudiaron los patrones de circulación y de transporte de sedimentos y se evaluó el impacto de cada una de las seis alternativas propuestas.

Circulación en estuarios

Un estuario es un cuerpo de agua costero, semiconfinado, que tiene una conexión abierta con el mar y dentro del cual el agua de mar se mezcla con agua fresca derivada del drenaje terrestre [2]. La bahía de Barbacoas se considera un estuario ya que allí descargan aguas frescas provenientes del Canal del Dique.

El movimiento del agua en un estuario está regulado por variables geomorfológicas y forzadores externos [3]. Entre estos últimos está la marea, que genera movimientos horizontales asociados a la variación del nivel del mar. La densidad también juega un papel importante en la circulación, así algunos estuarios permanecen estratificados verticalmente de tal forma que el agua dulce de los ríos, menos densa, circula sobre el agua salada más densa. Si las corrientes en el

estuario son lo suficientemente débiles no produce mezcla importante y se forma una cuña salada que penetra hacia el interior del estuario [4]. En otros estuarios el agua dulce se mezcla con agua marina, creándose un gradiente de densidad horizontal en el estuario. Los gradientes de densidad generados por diferencias de salinidad, de temperatura o concentración de sólidos suspendidos generan corrientes gravitacionales y afectan la forma en que los forzadores externos modifican la dinámica. Adicionalmente, el viento genera esfuerzos de corte sobre la superficie del agua y la arrastra en la dirección del viento añadiendo energía cinética que produce corrientes superficiales, mareas meteorológicas y surgencia de aguas profundas hacia la superficie [4]. Por su parte, los caudales afluentes aportan energía cinética al entrar en contacto con el agua del estuario.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la hidrodinámica del estuario está estrechamente relacionada con los mecanismos de sedimentación. En la medida en que la energía de las corrientes se disipa, los sedimentos se transportan, mezclados, intercambiados o acumulados y la geometría del fondo se modifica [4].

Antecedentes

Uno de los primeros y de los pocos estudios realizados sobre la hidrodinámica y la sedimentología de la zona de estudio es el de Leble y Cuignon [5], quienes tomaron muestras de sedimentos y realizaron mediciones mensuales de temperatura, salinidad y turbidez del agua de mar durante un año en zonas aledañas a las Islas del Rosario para estudiar, entre otros, la influencia del Canal del Dique sobre las islas.

Los primeros estudios hidrodinámicos sobre la desembocadura del Canal del Dique fueron llevados a cabo por Lonin [6], quien usó su modelo CODEGO para estimar el transporte de partículas suspendidas provenientes del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. Posteriormente, ese mismo modelo se aplicó en estudios de impacto ambiental del Canal sobre las bahías de Cartagena y de Barbacoas [7]. En 2004, se realizaron nuevas simulaciones de transporte de sedimentos en la Bahía de Cartagena con el modelo CODEGO, esta vez refinando la malla de cálculo y comparando los resultados del modelo con imágenes de sensores remotos [8].

La UNAL [9] desarrolló un completo estudio sobre la geomorfología de la bahía de Barbacoas, en donde se

hace una aproximación a la circulación de las aguas superficiales en las bahías de Cartagena y Barbacoas en función de las corrientes litorales y oceánicas reportadas en la literatura. En este estudio, además, se revisa la evolución morfológica durante varias décadas de las bocas Matunilla y Lequerica utilizando fotografías aéreas de diferentes épocas que evidencian su crecimiento.

El trabajo más reciente sobre el Canal del Dique fue desarrollado por UNAL [1]. En este estudio se evaluaron varias alternativas para el manejo hidrosedimentario del canal. Una de las conclusiones de este estudio fue que no es posible entender los procesos, ni recomendar actuaciones definitivas para el manejo hidrosedimentológico del canal sin conocer claramente el clima marítimo y la hidrodinámica en las zonas litorales de influencia del canal. Dentro de este marco de referencia, la UNAL [10] realizó estudios de circulación de la bahía de Barbacoas utilizando el modelo hidrodinámico ELCOM desarrollado por la Universidad de Australia Occidental [11].

Zona de estudio

Localización y descripción de la zona de estudio

La bahía de Barbacoas se encuentra localizada entre las coordenadas 10°07'00"N y 10°15'00"N y las coordenadas 75°31'00"W y 75°43'00"W en el litoral Caribe colombiano, al sur de la Bahía de Cartagena y al este de las Islas del Rosario y tiene un área aproximada de 120 km² (ver figura 1).

Las Islas del Rosario y sus inmediaciones son el hábitat de arrecifes de coral y por tanto de una gran variedad de fauna y flora. Los corales necesitan agua con baja turbidez y bajo contenido de materia orgánica para su conservación y desarrollo, para que penetre la luz solar y haya una adecuada concentración de oxígeno disuelto. En general, las descargas de sedimentos pueden ocasionar blanqueamiento y necrosis de ciertas partes del tejido vivo y muerte de las colonias de corales [12]. La pluma de sedimentos proveniente del Canal del Dique se caracteriza precisamente por aumentar la turbidez y el contenido de materia orgánica. El conocimiento del patrón de circulación hidrodinámica en la bahía Barbacoas y sus alrededores es indispensable para determinar el posible impacto de la entrada de la pluma del canal del

Dique al mar a través de sus bocas Lequerica y Matunilla.

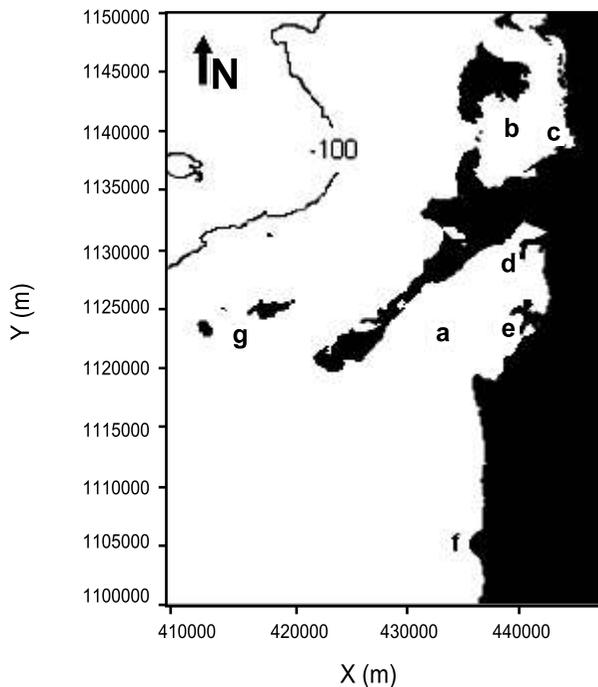


Figura 1. Zona de estudio en donde se identifican: a) bahía de Barbacoas; b) bahía de Cartagena. c) boca Pasacaballos del Canal del Dique; d) boca Lequerica; e) boca Matunilla; f) caño Correa; g) Islas del Rosario. Sistema de coordenadas UTM, dátum Bogotá, zona 18N.

Climatología de la zona

El ciclo anual de la hidro-climatología de Colombia está dominado por fenómenos físicos como la migración latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la actividad del chorro del Chocó y los sistemas conectivos de mesoescala [13]. Entre estos fenómenos, el más determinante para la climatología de la bahía de Barbacoas es el relacionado con la migración de la ZCIT.

La ZCIT está asociada con la dinámica trans-ecuatorial de advección de humedad por los vientos alisios del este. Durante el mes de agosto, la principal zona de bajas presiones de la ZCIT está localizada en el hemisferio norte sobre el mar Caribe aproximadamente a 10°N de la línea ecuatorial (en la zona de bahía Barbacoas). En esta época los vientos alisios que cruzan el Ecuador desde el hemisferio sur adquieren una componente hacia el oeste y se

caracterizan por magnitudes bajas y direcciones variables, mientras que en enero la ZCIT se encuentra en su posición más al sur, generando fuertes y constantes vientos alisios provenientes del noreste [14].

En cuanto al caudal del Canal del Dique, las series históricas y los resultados de modelaciones realizadas por UNAL [1], sostienen, que en promedio, el 24% del caudal del canal llega a la Bahía de Cartagena por la boca Pasacaballos, el 14% sale por el caño Correa, el 21% por la boca Matunilla y el 5% por la boca Lequerica. El 36% restante desemboca por caños menores o se queda almacenado en el sistema cenagoso.

Por otra parte, Poveda [13] ha demostrado una importante correlación entre el fenómeno macroclimático ENSO (El Niño South Oscillation) y los caudales del río Magdalena en Calamar, la entrada del Canal del Dique. Esto indica que no basta con analizar el régimen hidrológico del canal para eventos o años particulares, sino que es indispensable incluir en los análisis la variabilidad interanual del sistema.

De los registros de humedad de la estación del aeropuerto Rafael Núñez de Cartagena, se concluye que la humedad relativa en la zona no tiene un comportamiento periódico fuertemente asociado a alguna escala temporal. El promedio multianual de la humedad relativa es del 82% con valores mínimos de 67% y valores máximos de 95%. Los registros de temperatura del aire para la misma estación si presentan un marcado ciclo anual unimodal con valores máximos en los meses de junio (promedios diarios del orden de 29 °C), julio y agosto y valores mínimos en los meses de noviembre, diciembre y enero, con promedios diarios del orden de 25 °C [1].

Metodología

La estimación de la dinámica de los sedimentos en la bahía de Barbacoas y su posible transporte hasta las Islas del Rosario, se realizó mediante simulación numérica. No se modeló explícitamente el transporte de sedimentos debido a que no se contó con información primaria ni secundaria sobre las características de los sedimentos como densidad, distribución de tamaños de grano y, en especial,

potencial de floculación. Se modelaron, entonces, las condiciones hidrodinámicas de la bahía para determinar su patrón general de circulación hidrodinámica y así obtener una buena aproximación de los patrones de transporte de sedimentos finos que viajan en suspensión y que son candidatos a ser transportados largas distancias, posiblemente hasta las Islas del Rosario. Para identificar la trayectoria a lo largo de la cual el material suspendido se transportaría si no se sedimentara, se utilizó un trazador inerte y de flotabilidad neutra que, al ser inyectado con los caudales afluentes en los caños, permite simular el patrón de transporte horizontal y describir la trayectoria a lo largo de la cual se espera la sedimentación en función del tamaño y peso de los sedimentos. La concentración del trazador se presenta en porcentaje de la concentración de entrada por las bocas.

El modelo matemático utilizado se calibró y validó con información recolectada de campañas de medición de dos tipos de variables. Las primeras corresponden a las variables que caracterizan el forzamiento externo ejercido sobre el cuerpo de agua, tales como, la velocidad y dirección del viento, los niveles de marea en las fronteras abiertas del dominio, los caudales afluentes, entre otros. El segundo tipo de variables incluye aquellas que caracterizan la dinámica al interior del cuerpo de agua (salinidad, superficie libre, etc), las cuales se usan para comparar los resultados obtenidos con el modelo con aquellos medidos en campo y así determinar la fiabilidad de los resultados de la modelación. El modelo se calibró verificando la forma en que reproduce la variabilidad de la densidad en lugar de comparar velocidades directamente debido a que la medición de éstas requiere de equipos más costosos y escasos que los utilizados en este estudio. Esta forma de calibrar se basa en la relación estrecha que existe entre los campos de velocidad y densidad y se utiliza comúnmente en Oceanografía [15] y Limnología [16]. Con el fin de garantizar la fiabilidad del modelo, en el proceso de calibración se ajustaron algunos parámetros físicos y numéricos del modelo con el fin de mejorar los resultados, de tal forma que reproduzca adecuadamente las mediciones. Además de la información recolectada en campo, se utilizó información secundaria como cartas náuticas, series de climatología de la zona y series de caudal en los caños que vienen del Canal del Dique, entre otros.

Basados en información histórica, se simularon escenarios críticos y luego se simularon otras situaciones modificando los caudales afluentes según las predicciones realizadas al considerar las intervenciones en el Canal del Dique. La comparación entre las simulaciones con la información histórica y las simulaciones con los caudales incrementados permite identificar los cambios generados por las modificaciones y permitirá evaluar si dichos cambios inducen cambios significativos en el transporte hacia las Islas del Rosario.

El modelo utilizado para la simulación es el modelo ELCOM (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model). Este modelo es una herramienta de simulación numérica tridimensional para lagos y estuarios desarrollada por el Centro de Estudios del Agua (CWR) de la Universidad de Australia Occidental [11] que modela los procesos hidrodinámicos y termodinámicos en cuerpos de agua estratificados sometidos a forzamientos ambientales externos y que busca simular el comportamiento espacial y temporal de variables como velocidad, temperatura y salinidad. Para resolver numéricamente las ecuaciones gobernantes de la hidrodinámica en tres dimensiones, el modelo hace uso de un esquema semi-implícito en diferencias finitas desarrollado por Casulli y Cheng [17]. Este modelo ha sido aplicado exitosamente en una gran variedad de proyectos en golfos, estuarios y lagos, como se puede verificar en [18–22].

Campaña de campo

Con el propósito de reunir información de campo adecuada para calibrar y validar el modelo hidrodinámico, se realizó una campaña de mediciones entre el 13 y el 25 de octubre del 2008, durante la cual se midieron parámetros físicos del agua (temperatura, salinidad, turbidez, velocidad) en diferentes estaciones de la bahía, niveles del agua en dos estaciones, así como parámetros climáticos como velocidad del viento, temperatura del aire, etc. Algunas de estas variables son condiciones de frontera para el modelo, otras se usan para validar los resultados del modelo matemático.

Las variaciones del nivel del mar se registraron cada 5 minutos en dos estaciones cuya localización se muestra en la figura 2. El registro en la primera estación (marea-Cholón) sirvió para preparar las condiciones de frontera del modelo numérico en su

etapa de calibración y el segundo registro (marea – La Paz) se utilizó para evaluar la calidad de los resultados del modelo [23].

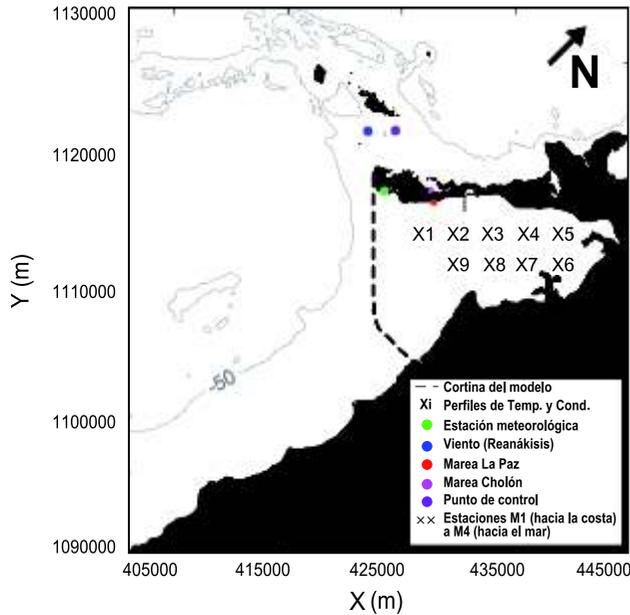


Figura 2. Ubicación de los equipos de medición de niveles de superficie libre y la distribución espacial de los perfiles levantados durante la campaña de campo.

La figura 3 muestra las dos series obtenidas y la señal de marea para la zona generada con el software WX_tide que genera series sintéticas de marea en cualquier punto del mar Caribe con base en un análisis de armónicos [24]. La correspondencia entre las señales es buena, aunque se muestran un desfase de la serie sintética y unos valores de niveles mínimos menores que las mediciones, diferencias que pueden estar asociadas a efectos meteorológicos (presión y viento) y deformación de la onda al propagarse al interior de la bahía, entre otros. Sin embargo, es importante resaltar que la serie sintética generada con el WX_tide, la cual representa bastante bien la marea astronómica, fue utilizada para forzar el modelo en la condición de contorno mar afuera.

La información de vientos locales, humedad relativa y temperatura del aire se registró cada 30 minutos en la estación meteorológica instalada en Punta Barú (ver figura 2).

Debido a que no existen registros de radiación solar, o de onda corta y no se contaba con un radiómetro, se procedió a estimarla con expresiones reportadas en la

literatura [4] en función de la latitud, la longitud, la fecha, la hora, y algunas características atmosféricas.

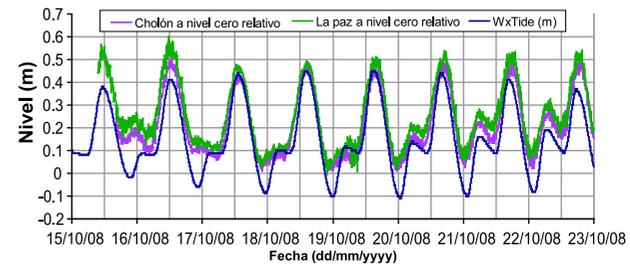


Figura 3. Nivel del mar durante el período 15-22 de octubre de 2008 medidos en las estaciones de Cholón y la Paz y obtenidos con el software WX_tide.

La figura 4 presenta, a manera de ejemplo, campos de densidad y turbidez a lo largo de un corte vertical construido a partir de perfiles medidos en las estaciones M1, M2, M3 y M4 (ver figura 2). Estas variables permiten identificar masas de agua diferentes, lo que proporciona información clave sobre aspectos como la profundidad sobre la cual el viento distribuye momentum, el espesor de la capa de agua dulce y menos densa y su variabilidad espacial, y sobre la manera como la concentración de sedimentos suspendidos, asociados con la turbidez, varía espacialmente.

Modelo Elcom

Para la simulación numérica, se escogió un dominio que abarca toda la bahía Barbacoas, las Islas del Rosario, una región al norte antes de la isla de Tierra Bomba y una región al sur de las bocas del Caño Correa (figura 2). En los contornos abiertos se especificó una salinidad de 36 psu y una temperatura de 24.5 °C.

Luego de realizar un análisis de sensibilidad al tamaño de las celdas de cálculo se decidió trabajar con una malla horizontal con celdas de 500 m x 500 m y 21 capas horizontales de altura variable, partiendo desde 0,25 m cerca a la superficie hasta celdas de 5 m cerca al fondo. Se encontró que para efectos de interpretación de resultados en lo relacionado con corrientes y transporte horizontal de los sedimentos en suspensión, la precisión y la resolución espacial obtenida con estas mallas es suficiente. En [23] se presenta el detalle sobre el análisis de sensibilidad de estos parámetros numéricos.

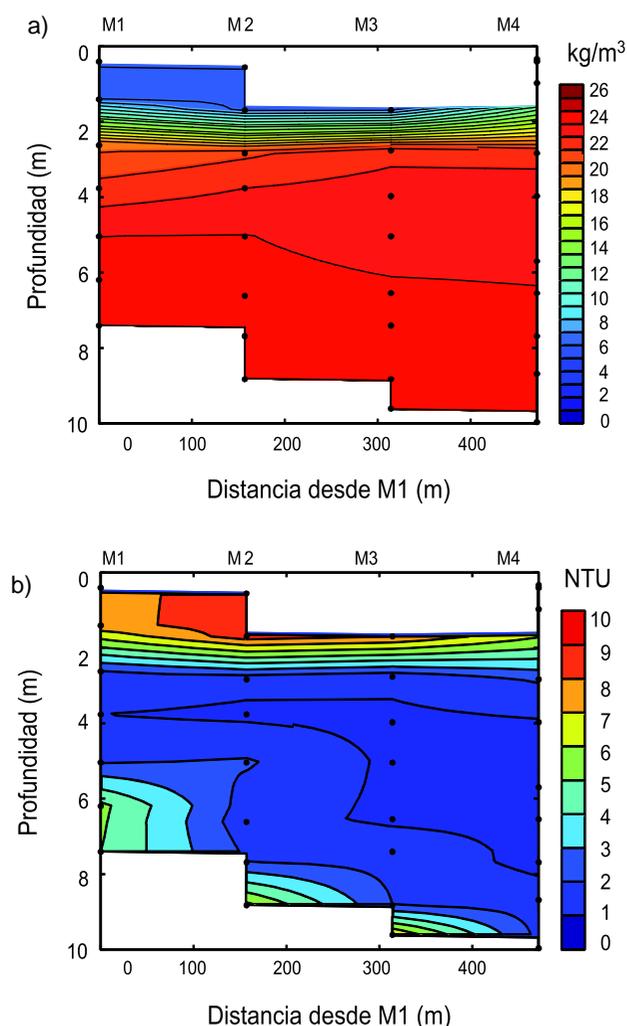


Figura 4. Contornos de (a) densidad del agua en kg/m^3 y (b) turbidez del agua en la mañana del 16 de octubre a lo largo de un corte vertical construido a partir de perfiles medidos en las estaciones M1, M2, M3 y M4. Los puntos indican los lugares y profundidades en donde se recolectaron datos.

Calibración y validación del modelo. El proceso de calibración del modelo ELCOM implicó hacer ajustes en las variables que inciden en el intercambio de calor con la atmósfera y en las condiciones de frontera para la salinidad.

Para la campaña de medición, se definieron las estaciones X01 a X09 mostradas en la figura 2. En estas estaciones se realizaron mediciones los días 18 y 22 de octubre. El 18 de octubre se recorrieron estas estaciones en sentido horario, comenzando a las

6:40 a.m. en la estación X01 y terminando a la 1:40 p.m. en la estación X09. El 22 se hizo el recorrido en sentido anti horario, comenzando a las 8:11 a.m. en la estación X09 y terminando a las 2:32 p.m. en la estación X01. Debido a que no se pudieron realizar otras campañas de campo durante condiciones hidrológicas diferentes, se realizó la calibración del modelo con los datos medidos el 18 de octubre, mientras que la validación se realizó con los datos medidos el 22 de octubre. Los detalles de este proceso se presentan en [23]. La figura 5 presenta, a manera de ejemplo, los resultados de la validación del modelo comparando los perfiles de salinidad simulados con aquellos medidos en el día 22 de octubre de 2008 para las estaciones X1, X3, X4 y X5. Los resultados muestran que el modelo captura bien las características del perfil medido, en especial la localización de la haloclina y la magnitud de los gradientes verticales, parámetros importantes en el cálculo de la distribución vertical del momentum impartido por el viento. La densidad, calculada a partir de la fórmula de la UNESCO [25], y que para estuarios depende fundamentalmente de la salinidad, también es bien estimada por el modelo.

Como parte del proceso de calibración, también se observó que el modelo reproduce adecuadamente los niveles de superficie libre observados en campo, tal como lo muestra la figura 6 para el sitio conocido como La Paz.

Los resultados de la calibración, indican que el modelo es adecuado para estimar los patrones de circulación y de transporte en bahía Barbacoas.

Selección de casos de estudio. De las simulaciones preliminares y de la calibración del modelo, se detectó que las fuerzas externas más importantes en la dinámica de la bahía y sus alrededores son los vientos y los caudales afluentes.

De las series históricas de caudales y de magnitud y dirección del viento se detectó, además, que los ciclos de estas series no están en fase, es decir que cuando se presentan los vientos más fuertes por lo general no se presentan los mayores caudales y viceversa. Esto implica que hay condiciones críticas para el transporte de sedimentos hacia las Islas del Rosario que están determinadas por altos caudales afluentes, como también otros escenarios críticos definidos por fuertes

vientos. Se consideró, entonces, que para tener una idea real de las condiciones de largo plazo del sistema no basta con analizar un par de situaciones críticas y por tanto para la elección de los escenarios de

modelación se realizó un análisis de probabilidad conjunta de ocurrencia de vientos y caudales para poder justificar adecuadamente los escenarios de simulación más representativos.

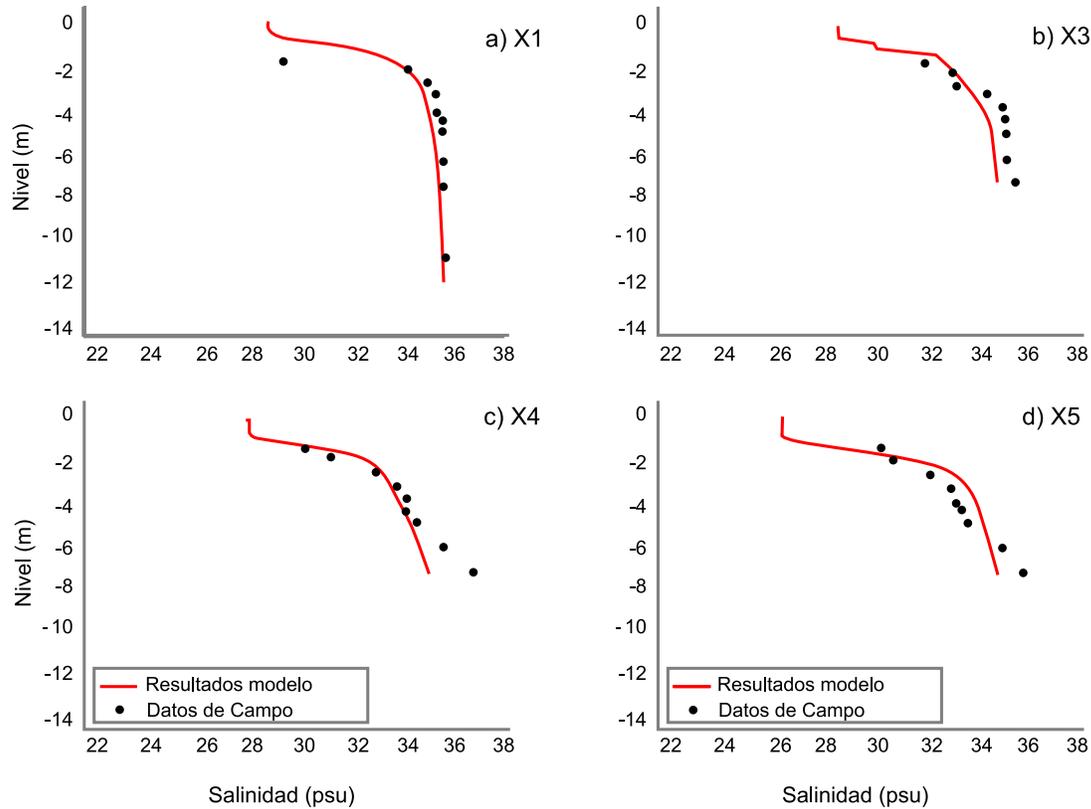


Figura 5. Resultados del proceso de validación. Perfiles de salinidad simulados y medidos el día 22 en las estaciones X1, X3, X4 y X5.

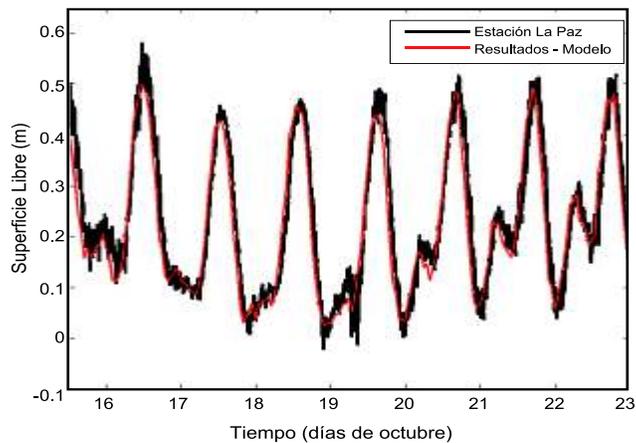


Figura 6. Superficie libre medida y simulada (15 al 22 de octubre de 2008).

Los datos de velocidad y dirección del viento para el análisis de probabilidad conjunta fueron tomados de la base de datos del modelo de reanálisis regional (NARR) NCEP/NCAR [26]. Los datos de este modelo tienen resolución temporal de 3 horas y resolución espacial de 0.25 grados de arco. Esta base de datos cubre el período entre el primero de enero de 1979 y el 31 de diciembre de 2006.

La figura 2 muestra la ubicación del punto de la malla del modelo de reanálisis que se tomó para el análisis de probabilidad (círculo azul). Se escogió este nodo por ser el punto del modelo más cercano a las Islas del Rosario. La rosa de direcciones de viento para la serie de reanálisis (figura 7) muestra una alta probabilidad asociada a vientos provenientes del nor-noreste (30% aproximadamente), seguida de las direcciones norte y del noreste con probabilidades de ocurrencia del 11% y 9%, respectivamente.

Para las simulaciones se consideró que los forzadores predominantes del sistema son el viento y la marea y no se tuvo en cuenta las corrientes de rotura generadas por el oleaje. Esto debido a que en el mar Caribe colombiano el oleaje predominante (swell) proviene del norte y del noreste [27, 28], en correspondencia con los vientos predominantes (ver figura 7), así que para ingresar en la bahía de Barbacoas éste debe difractarse hasta 180 grados (ver figura 1) lo que generaría corrientes hacia el interior del cuerpo de agua, y por tanto desfavorece el transporte de sedimentos hacia las Islas del Rosario.

Por otro lado, cuando estos vientos entran a la bahía desde tierra no tienen un fetch geográfico [29] suficiente para producir olas de gran tamaño que resuspendan el sedimento y faciliten su transporte por corrientes desde el interior de la bahía hacia las islas. De igual manera, el oleaje generado por vientos provenientes del sur-oeste (de baja probabilidad de ocurrencia, ver figura 7) tampoco tendrá implicaciones en el patrón de circulación de sedimentos hacia las islas ya que el oleaje que es capaz de generar va en dirección opuesta y con alturas de ola poco desarrolladas. El único oleaje con implicaciones importantes en el complejo de islas sería un oleaje local (tipo sea) asociado a vientos provenientes del este, para lo cual la probabilidad de ocurrencia durante el año es nula (figura 7). Por estas razones no se considera el efecto del oleaje sobre el patrón de

transporte superficial de sedimentos hacia las Islas del Rosario.

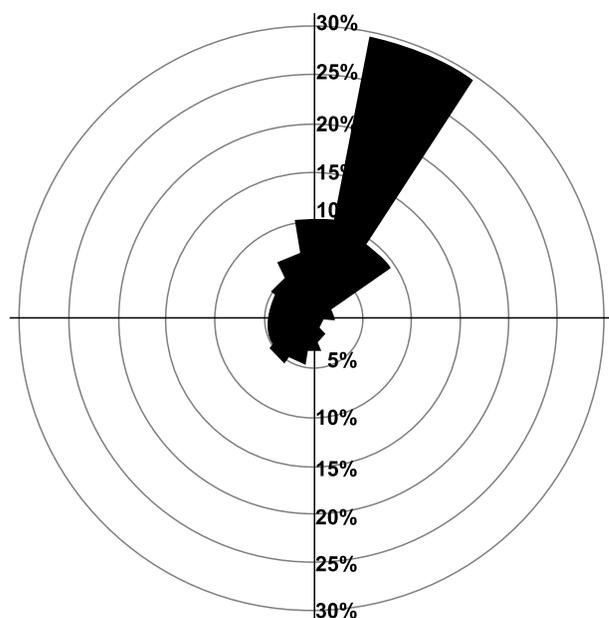


Figura 7. Rosa de direcciones de viento para la serie de reanálisis utilizada en las simulaciones.

Los caudales se tomaron de la modelación hidráulica del canal y sus caños [1] para las seis alternativas diferentes de intervención del canal y tienen resolución diaria. El efecto final de estas alternativas de intervención en la bahía Barbacoas es el cambio en los caudales fluviales que descargan allí por las tres bocas. Sin embargo, la concentración de sedimentos en estos caudales no se ve alterada por las intervenciones propuestas en las alternativas y por tanto, tampoco se varía la concentración inicial del trazador en las bocas del canal para las simulaciones de las alternativas.

Según UNAL [1] las alternativas de intervención sobre el canal son:

Alternativa 1 (A1): Condiciones actuales.

Alternativa 2 (A2): Canal con compuerta en el km 104 entre Lequerica y Matunilla.

Alternativa 3 (A3): Canal con tres contracciones y sin compuerta.

Alternativa 4 (A4): Canal con tres contracciones + compuerta en km 104

Alternativa 5 (A5): Canal con compuerta en k 110 aguas abajo de Lequerica.

Alternativa 6 (A6): Canal con compuerta en k 110 + tres contracciones.

Con la información de vientos y caudales, se hizo el análisis de probabilidad conjunta para estas dos variables para el período enero de 1984 a diciembre de 2000. Este período es suficiente para capturar la variabilidad intranual asociada a la variación de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) e interanual asociada a las dos fases del ENSO (El Niño y La Niña), incluyendo así las condiciones de invierno y verano extremos. Para considerar la variabilidad en la dirección del viento, se hace el análisis para cada una de las ocho direcciones principales del viento por separado, a saber: vientos provenientes del norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste. La figura 8 presenta los resultados del análisis de probabilidad para las direcciones noreste, noroeste, suroeste y sur. Se toman para el análisis final sólo estas cuatro direcciones por ser las de mayor probabilidad de ocurrencia (figura 7), o las más críticas en el sentido de favorecer el transporte superficial en dirección a las Islas del Rosario. Para las otras direcciones no se encontraron eventos que se pudieran considerar como muy probables o críticos. Los círculos en la figura 8 indican los casos puntuales escogidos como representativos para las simulaciones definitivas.

Una vez determinados los eventos de viento y de caudal más probables o más críticos, se procedió a identificar en las respectivas series de vientos y caudales las épocas en las cuales se presentaron conjuntamente. Para las simulaciones finales, se seleccionaron de estas series los cuatro períodos de 20 días más representativos en los resultados del análisis de probabilidad conjunta. Estos períodos son:

Período I: Entre el 10 de diciembre de 1990 hasta el 30 de diciembre de 1990.

Período II: Entre el primero de marzo de 1991 hasta el 20 de marzo de 1991.

Período III: Entre el primero de septiembre de 1989 hasta el 20 de septiembre de 1989.

Período IV: Entre el 5 de julio de 1990 hasta el 25 de julio de 1990.

El período I se caracteriza por una alta frecuencia de ocurrencia de vientos del noreste (cerca al 25% del tiempo). Esta dirección de vientos favorece las

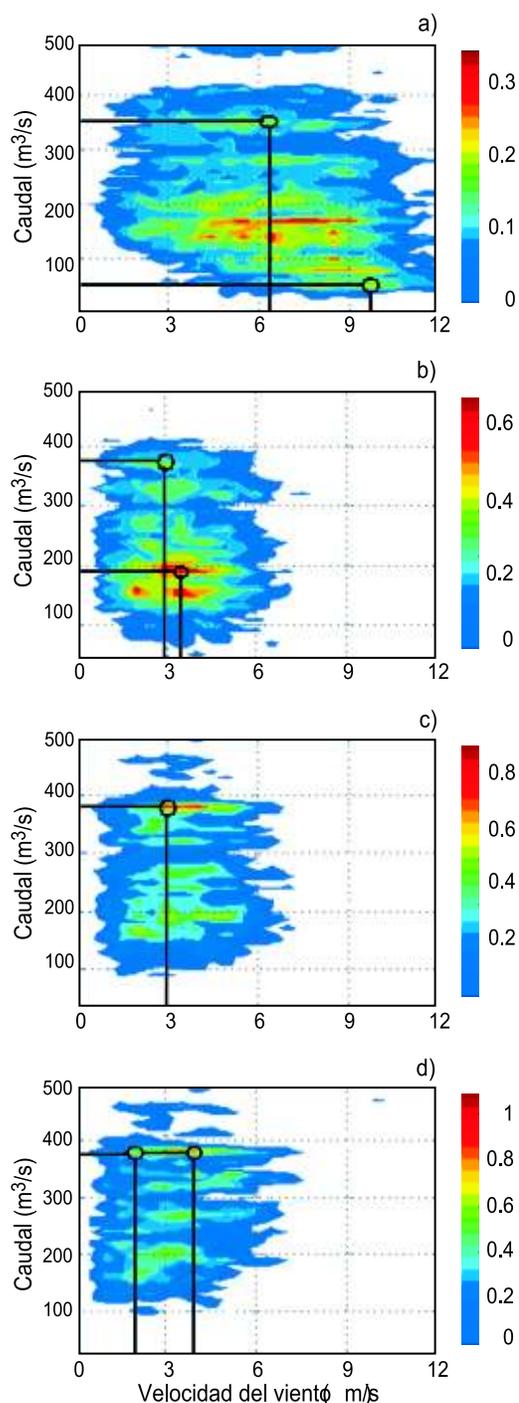


Figura 8. Probabilidad conjunta de ocurrencia de vientos y caudales totales por las bocas Correa, Matunilla y Lequerica. a) Para vientos en dirección noreste, b) Para vientos en dirección noroeste, c) Para vientos en dirección suroeste d) Para vientos en dirección sur. Los círculos indican las combinaciones de viento y caudal elegidas para la simulación de las diferentes alternativas.

corrientes superficiales saliendo de la bahía de Barbacoas y se caracteriza por caudales altos de los efluentes. El período II considera una situación similar del campo de vientos a la del período I, pero con mayor velocidad y caudales bajos. Los períodos III y IV no se caracterizan ni por altos valores de velocidad del viento ni de caudales, sino por su alta frecuencia de ocurrencia y por alta variabilidad en las direcciones del viento, lo cual favorece el transporte de sedimentos hacia las Islas del Rosario, como se observará en los resultados.

El promedio de los caudales afluentes para cada período seleccionado se presentan en la tabla 1, aclarando que para las simulaciones definitivas se utilizó la información completa de las series.

Resultados

Una vez seleccionadas los períodos climáticos a simular y los parámetros climáticos e hidrológicos para cada época, se utilizó el modelo ELCOM para simular las combinaciones de períodos climáticos con cada alternativa.

Los resultados de la modelación muestran que la concentración del trazador empleado para dar una idea del patrón de transporte horizontal de la pluma de

sedimentos en suspensión cambia en el tiempo y en el espacio como resultado de las corrientes generadas por la marea y, sobretodo, por el viento. La figura 9 muestra, a manera de ejemplo, la distribución superficial de concentración de trazador en cuatro instantes de tiempo durante un día para la alternativa A1 (condición actual) y durante un día del período climático III. Se aprecia cómo la pluma de trazador se contrae y luego se extiende. En este caso, la pluma es inicialmente transportada hacia la costa suroriental por la acción de los vientos. Al cesar la acción del viento, la pluma se extiende hacia el occidente debido a que la marea se encuentra en su fase de vaciado, cubriendo toda la bahía. No se observa ninguna corriente periférica dominante que pudiera ser un medio preferencial para el transporte del trazador. Se aprecia que el trazador llega a la costa de la isla de Barú proveniente de la boca del caño Matunilla atravesando transversalmente la bahía y no como una corriente continua a lo largo de la costa. Esta forma de transporte es típica en todas las alternativas estudiadas.

Para estudiar la estructura vertical de la pluma, se procesaron resultados del modelo en una franja longitudinal que va desde la punta de la isla Barú y un punto al norte de la desembocadura del caño Correa (ver figura 2).

Tabla 1. Caudales (m^3/s) por cada boca, para cada alternativa y cada período.

	Período I. 09 29 /12_1990			Período II. 28/02 20/03_1991		
	Correa	Matunilla	Lequerica	Correa	Matunilla	Lequerica
A1	87.36	213.61	58.99	68.52	52.03	14.36
A2	146.06	278.63	0.00	52.06	98.11	0.00
A3	103.37	161.29	44.55	56.44	38.20	10.55
A4	35.85	55.01	0.00	128.24	253.18	0.00
A5	124.72	290.12	174.02	39.85	92.25	55.33
A6	106.45	238.67	143.14	34.60	72.12	43.25
	Período III. 01 - 20 /09 1989			Período IV. 05 - 25 /07 1990		
	Correa	Matunilla	Lequerica	Correa	Matunilla	Lequerica
A1	102.64	132.51	36.59	101.54	127.28	35.15
A2	110.33	204.19	0.00	107.11	198.68	0.00
A3	93.67	87.57	24.18	93.91	89.95	24.84
A4	79.05	138.64	0.00	80.22	142.79	0.00
A5	85.34	198.80	119.24	81.86	192.85	115.68
A6	68.94	147.99	88.75	68.77	149.92	89.91

La figura 10 presenta la estructura vertical de la pluma para la época climática III para la alternativa A1. De la figura se tiene que las concentraciones importantes de trazador se observan en una delgada capa superficial de unos 2 m de espesor a excepción del extremo final del corte que se encuentra relativamente cerca de la boca del caño Correa, en donde se profundiza hasta unos 5 m. Esta estructura no cambia significativamente en todas las alternativas estudiadas. A pesar de que la profundidad de la pluma también varía debido fundamentalmente a cambios en la magnitud del viento, los valores significativos de concentración de trazador se encuentran siempre cerca de la superficie, por lo que los campos superficiales de trazador son un buen indicador para comparar las condiciones generadas por las diferentes alternativas.

Dado el carácter cíclico del fenómeno, una forma adecuada de estudiar las condiciones en la bahía es mirar la concentración media en un período dado de tiempo que cubra varios ciclos diarios. La muestra la situación superficial para la concentración de trazador y la velocidad para todas las alternativas durante el período climático I, obtenida como el promedio de los últimos 10 días de simulación. Se aprecia que la pluma se mantiene recostada sobre la margen suroriental de la bahía y hacia el sur debido a la acción del viento, alejándose de las Islas del Rosario independientemente de la alternativa. Este comportamiento se repite durante la época climática II (no presentada), con la particularidad de que los vientos, más fuertes para esta época, concentran la pluma en una franja costera mucho más estrecha

Para la época climática III, correspondiente a caudales altos en los caños y vientos débiles con direcciones predominantes del noroeste, suroeste y sur, pero fluctuantes, la pluma de concentraciones medias se extiende más allá de la entrada de la bahía, cubriendo una gran área hacia el sur (figura 12). La concentración media de trazador del 1% de la concentración en los afluentes no alcanza las Islas del Rosario, pero se observa que la concentración media del 5% cubre toda la bahía Barbacoas y se extiende también hacia el sur, siendo las alternativas A2, A5 y A6 las que generan un mayor tamaño de la pluma.

Durante la época climática IV (figura 13), con menores caudales y con un régimen de vientos similar

al de la época III pero con mayor frecuencia de eventos provenientes del sur, se observa que la condición media de la pluma también se extiende más allá de los límites de la bahía, cubriendo una menor área que en el período climático III, pero ahora el extremo norte de la pluma se aproxima a las Islas del Rosario, especialmente en los alternativas A2, A5 y A6.

Otro parámetro importante en el estudio de plumas fluviales es la velocidad de avance del frente, pues da una idea del tiempo disponible para que se lleven a cabo procesos fisicoquímicos, de sedimentación y de difusión. Como una manera indirecta de estimar la velocidad de avance del frente de la pluma en bahía Barbacoas, se calculó el avance máximo que logró la pluma en las 36 horas siguientes al comienzo de inyección del trazador. En las figuras 14 y 15 se muestra el avance de estas plumas en términos de las concentraciones de 1% y 5% del valor de concentración especificado en las bocas de los caños, para las épocas climáticas III y IV (durante las épocas I y II la pluma no se acerca a las Islas del Rosario) y las seis alternativas de intervención del Canal del Dique. Estas figuras también indican que las alternativas A2, A5 y A6 son algo más críticas que las demás, aunque estas diferencias no son grandes.

Del análisis anterior, se deduce que las épocas en donde el viento presenta una mayor variabilidad en su dirección con eventos esporádicos importantes (épocas III y IV) son las críticas en términos de cubrimiento de la pluma y avance hasta Islas del Rosario. En estas épocas climáticas, se destacan como más desfavorables las alternativas A2, A5 y A6. En estos mismos términos, las alternativas A3 y A4 representan situaciones un poco benéficas con respecto a la alternativa A1 que es la condición actual.

Dado que el desplazamiento de la pluma es un proceso cíclico del cual se han presentado valores medios que encubren la variabilidad temporal, se presentan series de tiempo (figura 16) de la concentración superficial de trazador en un punto ("punto de control" en la figura 2) cercano a las Islas del Rosario para el período climático IV, resaltando las alternativas A1, que es la condición actual, y A4, que es la alternativa que genera mejores condiciones ambientales para el Canal del Dique y su complejo cenagoso. Se observa que las

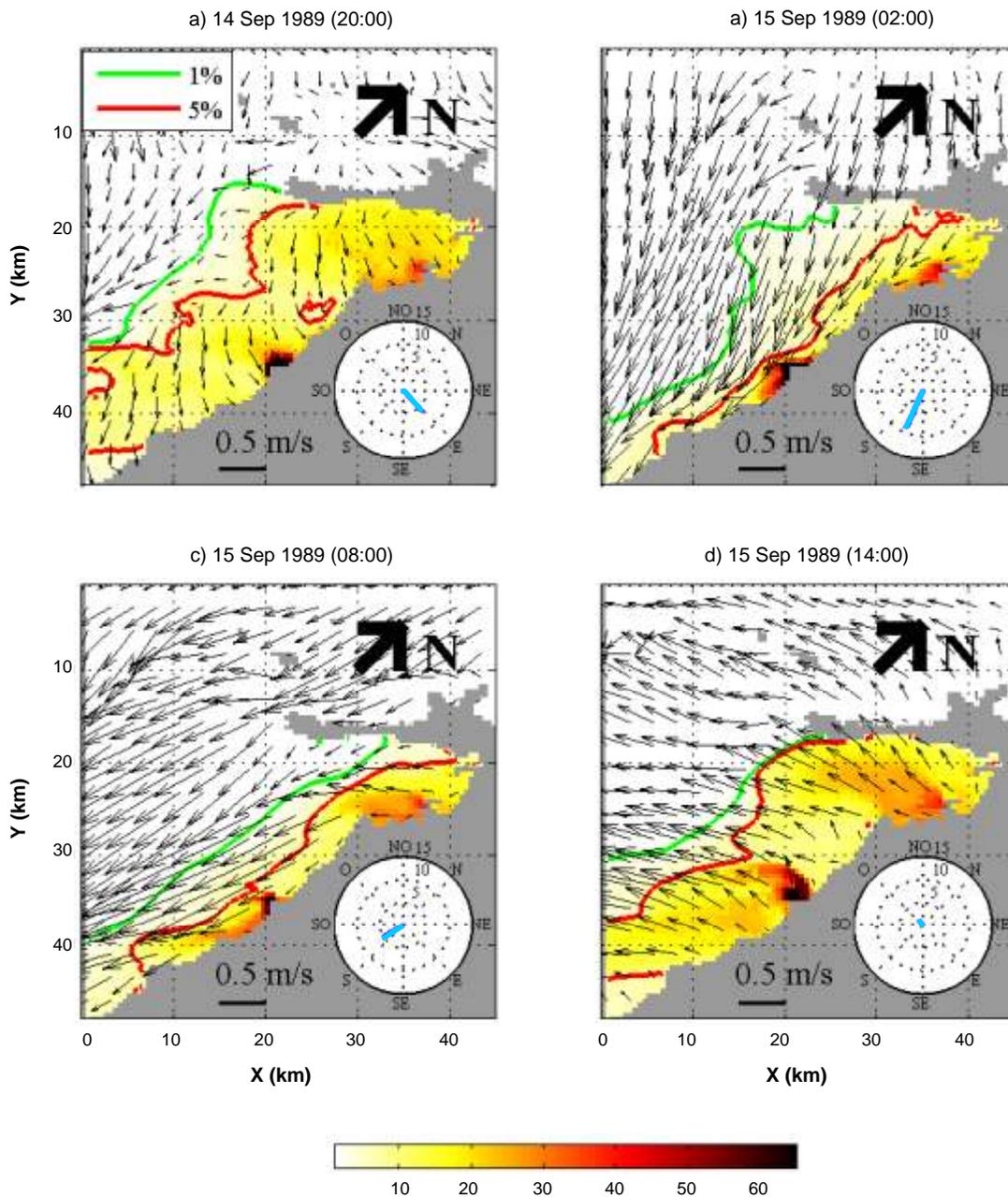


Figura 9. Instantes en un ciclo diario de la concentración de trazador (código de color) y de la velocidad en superficie (flechas negras) durante la época climática III sin modificaciones en los aportes del Canal del Dique. Se destacan las concentraciones de 1% y 5% especificada en la salida de los caños. La barra de colores expresa porcentaje de la concentración de trazador inyectado en las bocas de los caños. El recuadro muestra la magnitud y dirección del viento en cada instante.

mayores concentraciones se presentan como pulsos de corta duración. La alternativa A4 muestra una mejora (menor concentración de trazador) con respecto a las condiciones actuales, mientras que las alternativas A5 y A6 presentan condiciones más desfavorables.

Pensando en disminuir la concentración de sedimentos, los pulsos que alcanzan Islas del Rosario o la frecuencia de estos últimos, se exploraron, de manera preliminar, varias estrategias. Debido a que en ninguna de las simulaciones se observó que las plumas se movieran gracias a corrientes concentradas susceptibles de ser modificadas con obras perpendiculares a la costa y de proporciones razonables, no se exploró el efecto que obras de este tipo generarían sobre las concentraciones de trazador en las Islas del Rosario. En cambio, se analizó el efecto que tendría cambiar el alineamiento de la boca de Matunilla con respecto a la configuración actual buscando orientar el flujo hacia la parte más interna de bahía Barbacoas, de tal modo que se aumente el tiempo de viaje (o recorrido) de la pluma de este caño. Esta reorientación del flujo se logra en el modelo ELCOM, definiendo la dirección hacia la cual saldría el flujo desde tierra hacia la bahía. En este caso se busca que el caño Lequerica oriente el flujo en dirección sureste y el caño Matunilla en dirección noreste.

La figura 17 muestra cómo esta modificación incrementa significativamente las concentraciones en las Islas del Rosario, para la alternativa A6 durante la época climática IV. La simulación sugiere que esto se debe a que esta nueva configuración mantiene una pluma con alta concentración de trazador en el interior de la bahía la cual se transporta como un pulso de alta concentración cuando los vientos cambian de dirección. Debe recordarse aquí que las concentraciones calculadas son de un trazador inerte y neutralmente boyante. El sedimento real es

susceptible a floculación con las sales disueltas en el agua del mar, proceso que puede intensificarse al enfrentar las plumas de los caños Lequerica y Matunilla favoreciendo la sedimentación, así que los resultados de este experimento de modelación no son conclusivos y aún es posible que una modificación de este tipo en las bocas de los caños sirva para que la pluma que es transportada hacia fuera de la bahía tenga una menor concentración de sólidos suspendidos. Nuestros resultados sirven, sin embargo, para llamar la atención al indicar que para obtener una respuesta sobre los efectos reales de modificaciones de este tipo, deben hacerse simulaciones que permitan estimar la cantidad de sólidos suspendidos que se sedimentan.

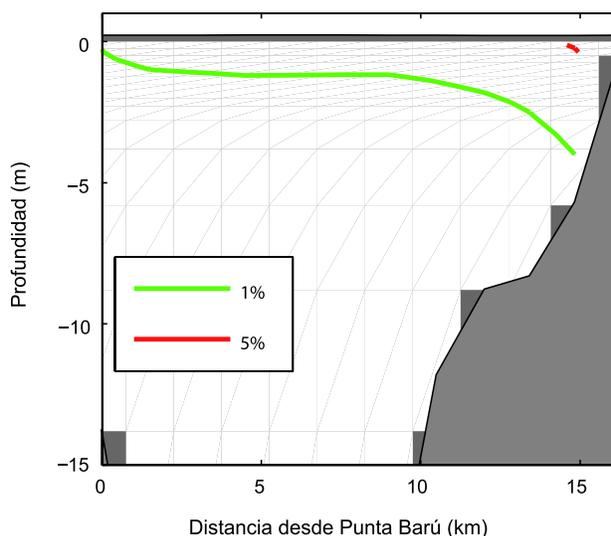


figura 10. Promedio de concentración de trazador en un corte vertical a la entrada de la bahía (ver figura 2) para la época climática III para la alternativa A1 (sin intervención del canal), obtenido al promediar los resultados de los últimos diez días de simulación.

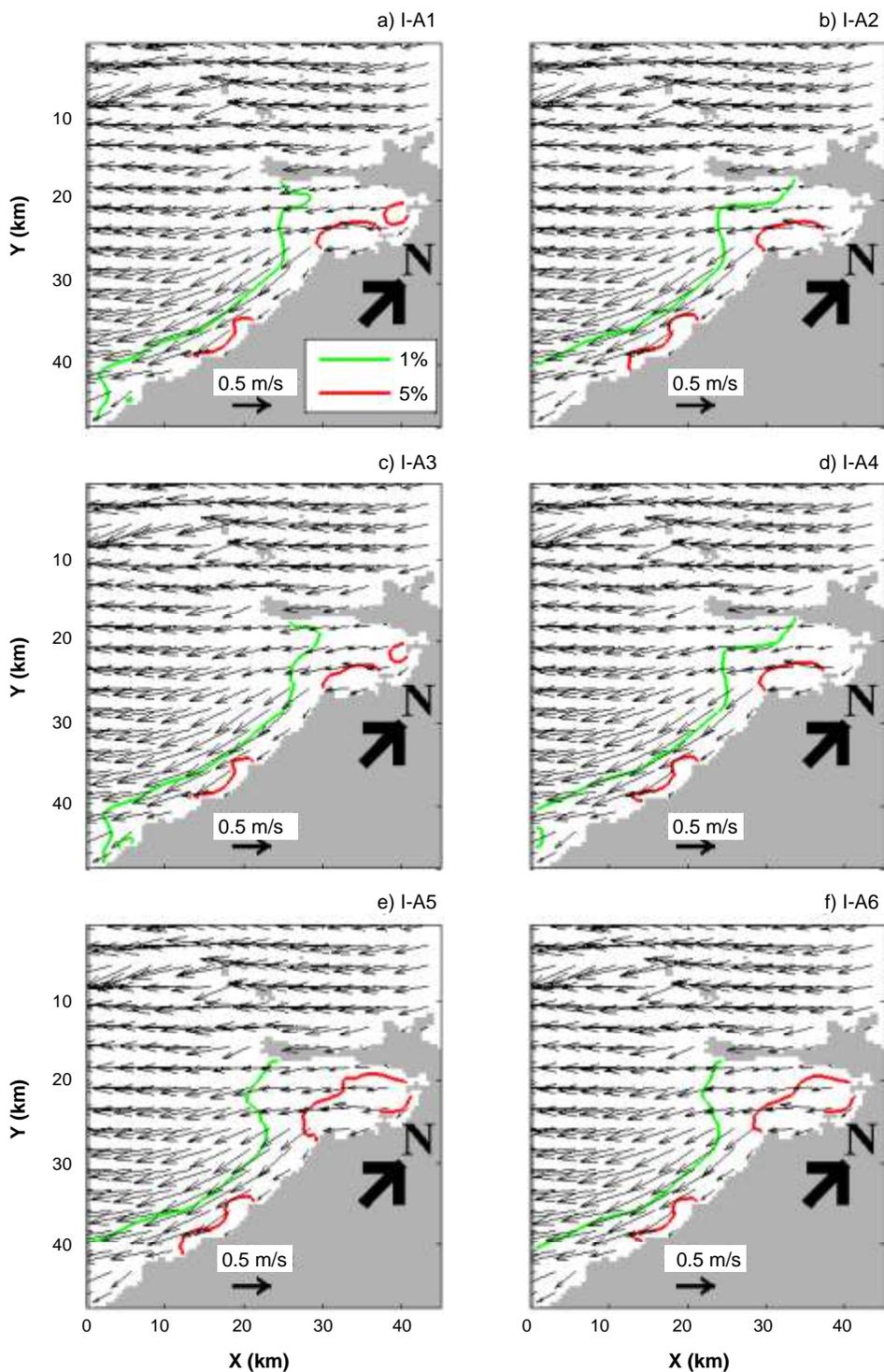


Figura 11. Promedio de los 10 últimos días de la simulación del campo de velocidad y de concentración de trazador superficiales para las seis alternativas durante la época climática I. Se presentan las concentraciones del 1% y del 5% del valor inyectado por las bocas de los caños. Paneles a), b), c), d), e) y f) corresponden a las alternativas A1, A2, A3, A4, A5 y A6 respectivamente.

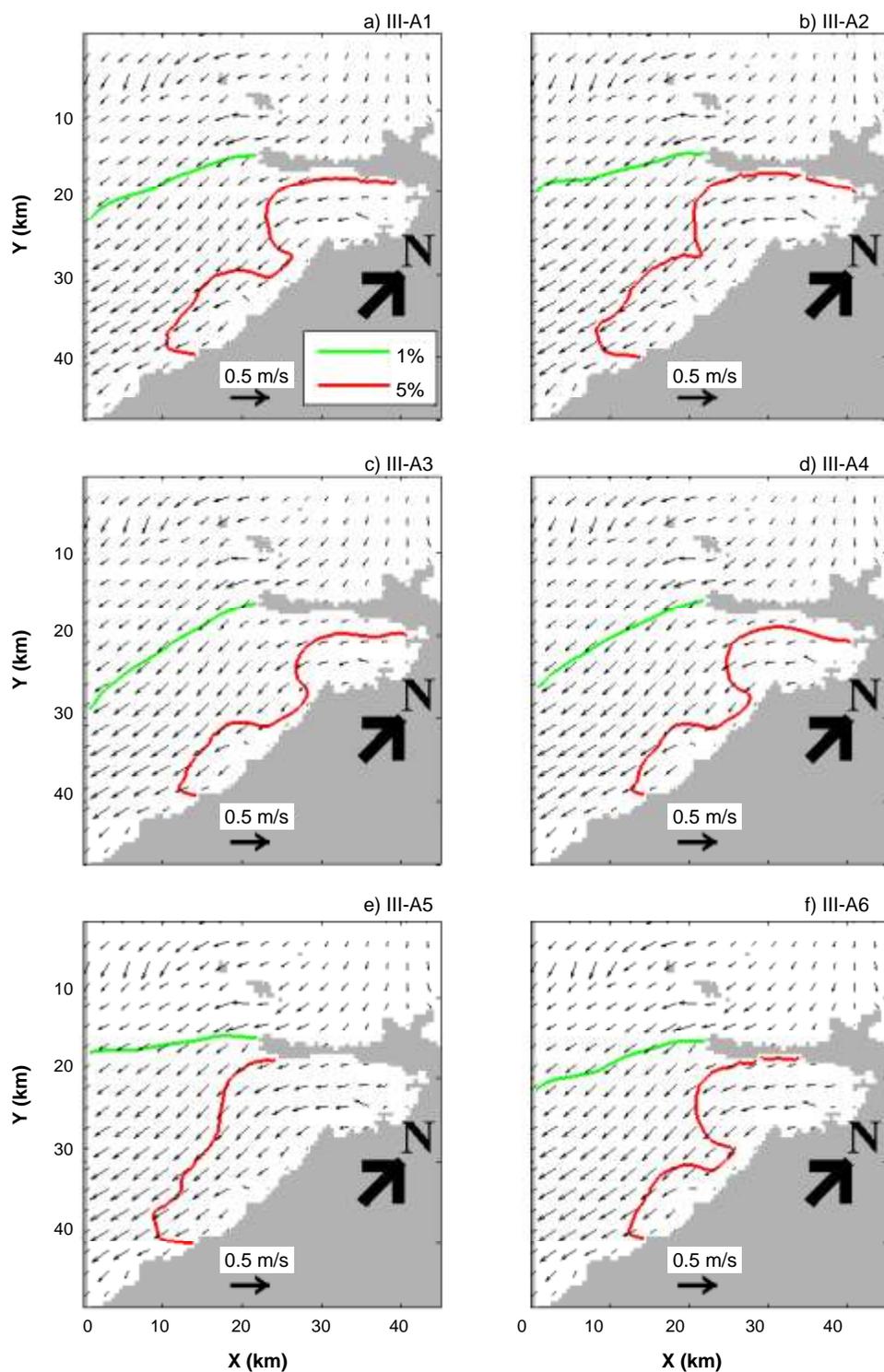


Figura 12. Promedio de los 10 últimos días de la simulación del campo de velocidad y de concentración de trazador superficiales para las seis alternativas durante la época climática III. Se presentan las concentraciones del 1% y del 5% del valor inyectado por las bocas de los caños. Paneles a), b), c), d), e) y f) corresponden a las alternativas A1, A2, A3, A4, A5 y A6 respectivamente.

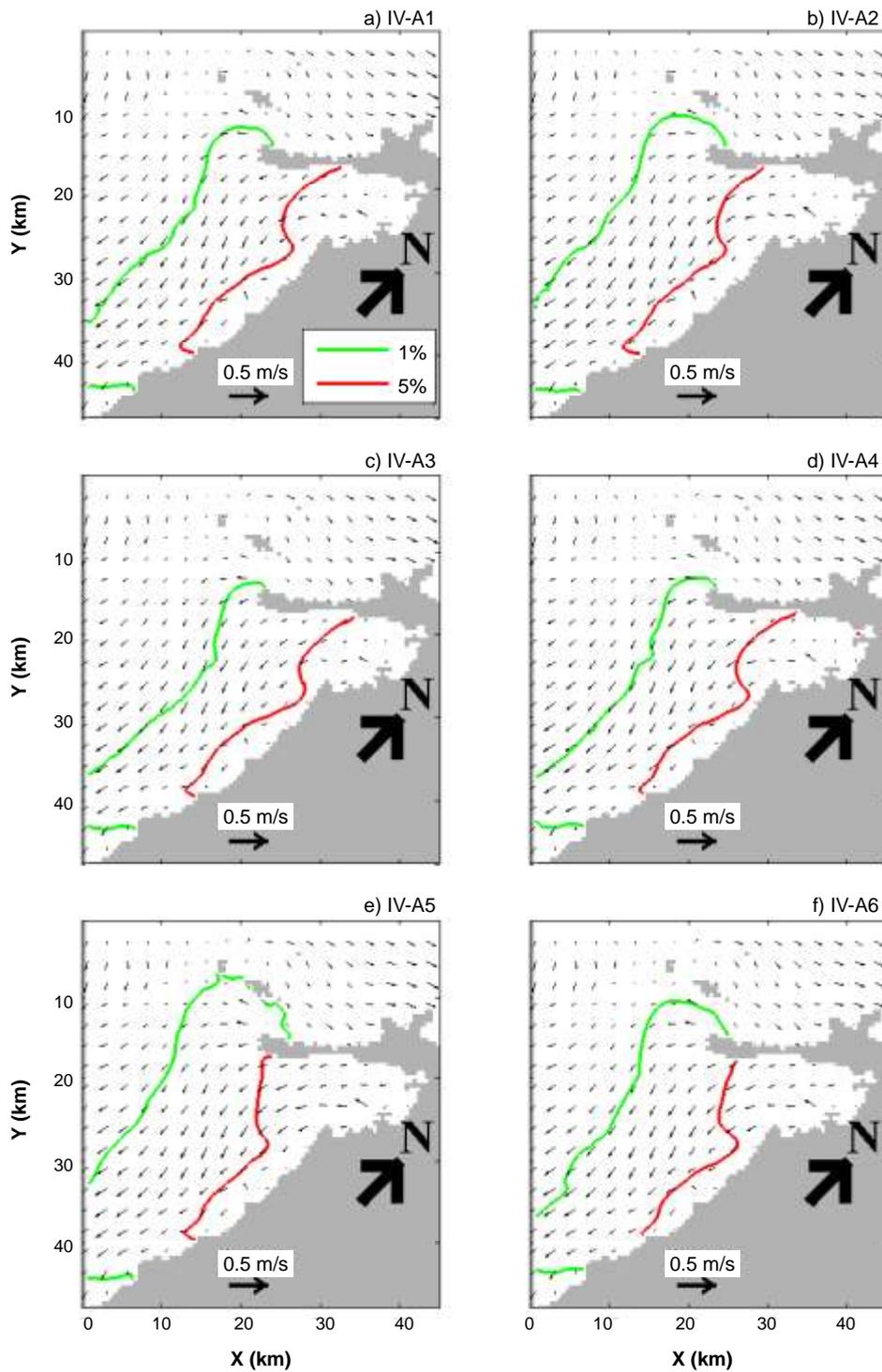


Figura 13. Promedio de los 10 últimos días de la simulación del campo de velocidad y de concentración de trazador superficiales para las seis alternativas durante la época climática IV. Se presentan las concentraciones del 1% y del 5% del valor inyectado por las bocas de los caños. Paneles a), b), c), d), e) y f) corresponden a las alternativas A1, A2, A3, A4, A5 y A6 respectivamente.

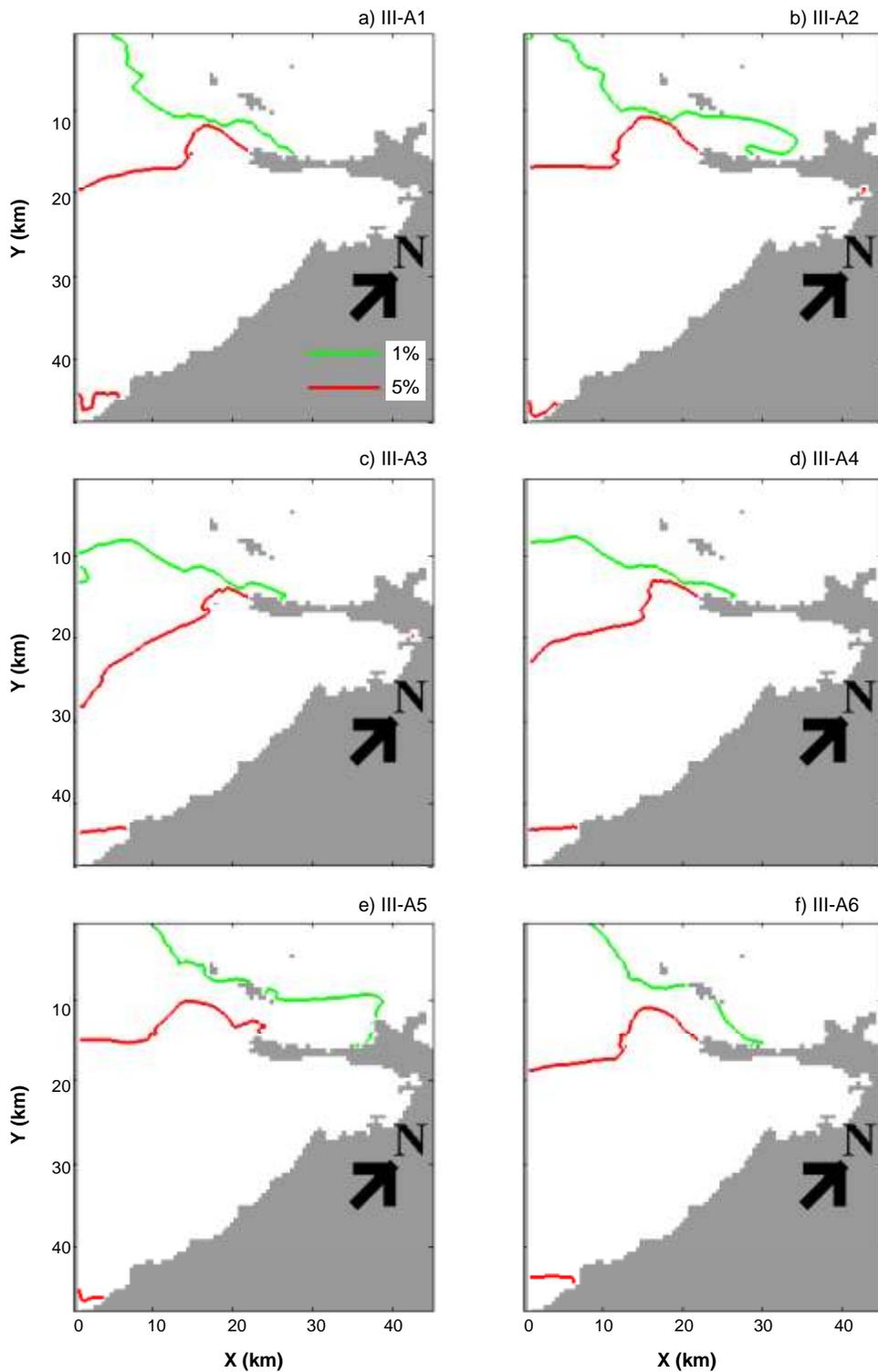


Figura 14. Máximo avance de la pluma superficial de trazador en 36 horas durante la época climática III, representado por los contornos del 1% y del 5% del valor de la concentración en las bocas de los caños. Los paneles a), b), c), d), e) y f) corresponden a las alternativas A1, A2, A3, A4, A5 y A6, respectivamente.

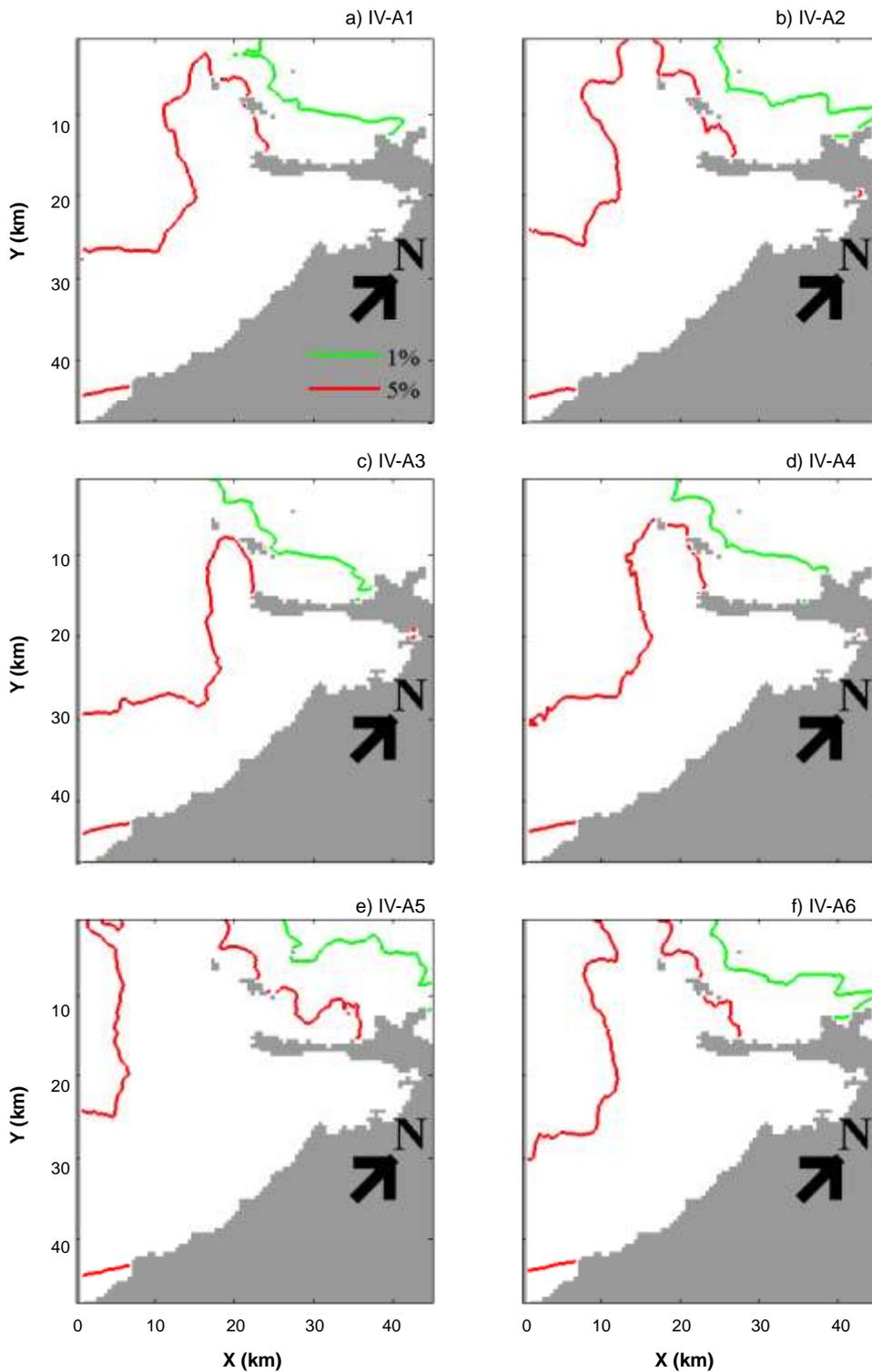


Figura 15. Máximo avance de la pluma superficial de trazador en 36 horas durante la época climática IV, representado por los contornos del 1% y del 5% del valor de la concentración en las bocas de los caños. Los paneles a), b), c), d), e) y f) corresponden a las alternativas A1, A2, A3, A4, A5 y A6, respectivamente.

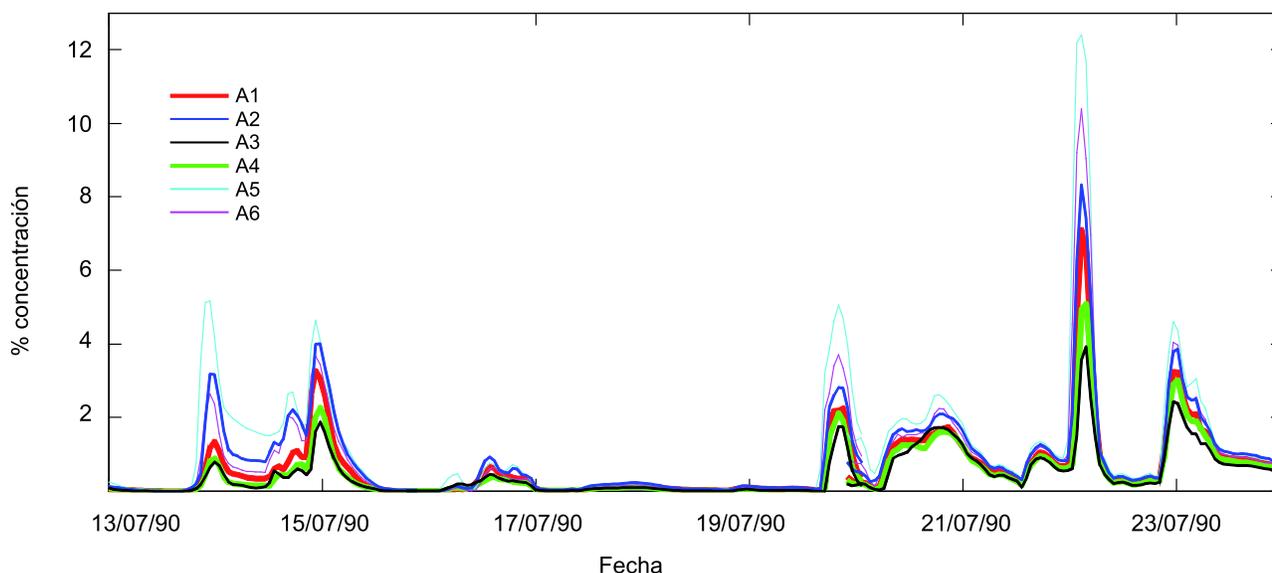


Figura 16. Concentración de trazador, para cada una de las alternativas y en un punto cerca de las Islas del Rosario durante la época climática IV, medida como porcentaje de la concentración de trazador inyectado por los caños del Canal del Dique.

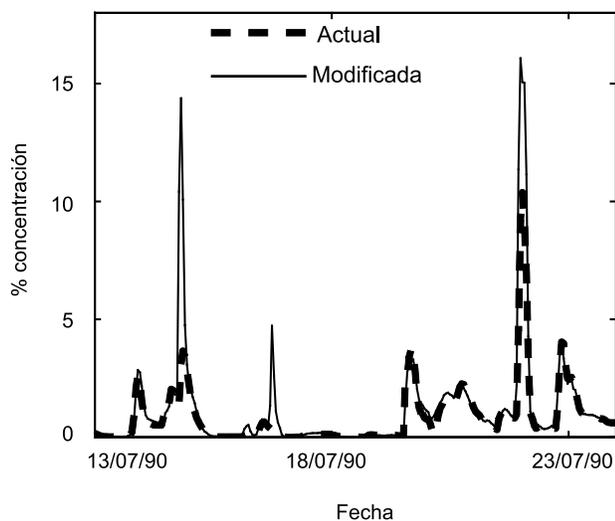


Figura 17. Concentración de trazador en un punto cerca de las Islas del Rosario con y sin modificación hipotética de la orientación de la boca del caño Matunilla en la alternativa A6 para el período climático IV.

Discusión y conclusiones

El uso de un trazador para identificar patrones de transporte horizontal permite estimar la ruta a lo largo del cual el material suspendido es susceptible de sedimentarse pero no permite evaluar el proceso de sedimentación. Un estudio del proceso de sedimentación requiere mediciones específicas y calibración rigurosa de los parámetros que gobiernan este proceso, lo cual resulta complejo por el proceso de floculación de los sedimentos finos con las sales disueltas en el agua de mar.

Las épocas críticas para el avance de la pluma hasta las Islas del Rosario son aquellas en las cuales la dirección de los vientos fluctúa. La situación se agrava si el caudal proveniente de los caños es alto. Las épocas de vientos fuertes no son críticas debido a que el viento sopla constantemente hacia el suroeste, alejando la pluma de las Islas del Rosario.

En el estudio realizado por Lable y Cuignon [5], los autores concluyen que durante los dos primeros trimestres del año los sedimentos que llegan a la bahía de Barbacoas provenientes del Canal del Dique son transportados hacia el sur y no alcanzan las islas. Durante el tercer trimestre del año las corrientes desplazan los sedimentos raramente hacia el norte y durante el cuarto trimestre las corrientes bañan las Islas del Rosario con las aguas del Canal del Dique. Estas conclusiones coinciden en gran medida con los resultados del presente estudio, en el que las épocas simuladas fueron seleccionadas a partir de un análisis de probabilidad conjunta, pero que cae cada una en un cuatrimestre diferente del año, que fue el criterio usado por Leble y Cuignon [5] para estudiar la variabilidad espacial. Ambos estudios indican que los sedimentos llegan a las Islas del Rosario durante el cuarto cuatrimestre del año. El presente estudio permite identificar que la variabilidad en la dirección de los vientos es el factor determinante y que los sedimentos llegan a las islas en pulsos y no en forma continua.

La comparación de alternativas realizada si permite evaluar cualitativamente la que menos impacto genera. Las concentraciones de trazador estimadas en las Islas del Rosario para las alternativas estudiadas indican que alternativas como la A3 y la A4 sugieren concentraciones menores que aquellas para las condiciones actuales. Las alternativas A2, A5 y A6 generan eventos con un aumento importante de las concentraciones con respecto a las condiciones actuales. Las concentraciones reportadas en este artículo sirven para dar idea de cómo la modificación de caudales influye sobre los patrones de transporte horizontal, siendo éste el aporte más importante de este estudio. Debido a que existe la posibilidad de que los sedimentos lleguen a Islas del Rosario provenientes de varias fuentes, y a que no se hizo un estudio real de transporte de sedimentos, no se puede concluir sobre las concentraciones reales de sedimentos que llegan a las islas provenientes del Canal del Dique ni sobre su importancia relativa a otras fuentes.

No se identifican corrientes concentradas que sirvan como medio dominante de propagación de la pluma. Por el contrario, la pluma presenta un frente ancho que se extiende por varios kilómetros y que se mueve a través de la bahía.

Si se desea evaluar la conveniencia de generar una zona de sedimentación controlada en la parte interna de la bahía de Barbacoas, específicamente en la zona comprendida entre las bocas de los caños Matunilla y Lequerica, se sugiere, como complemento al presente estudio, un análisis detallado, de las características de los sedimentos, con una malla de cálculo más fina, y explorando más combinaciones de forzadores externos, que permitan estimar adecuadamente concentraciones de sedimentos y de otras especies que afectan la calidad del agua en bahía Barbacoas y el área del mar Caribe hasta las Islas del Rosario.

Se sugiere también realizar simulaciones hidrodinámicas y de calidad de agua para evaluar el efecto que sobre la Bahía de Cartagena puede generar la modificación de los caudales que aporta el Canal del Dique. Aunque el propósito de las modificaciones al Canal del Dique objeto de este estudio es la reducción de la carga de sólidos suspendidos, la reducción del caudal líquido asociada puede afectar el balance hídrico de la Bahía de Cartagena, aumentando los tiempos de residencia del agua y con la posibilidad de generar problemas de calidad de agua. Un estudio de este tipo proporcionaría información importante sobre reglas de operación de las compuertas que se proponen en el Canal del Dique de tal manera que se permita alguna entrada de agua dulce para que no se generen problemas de calidad de agua en la Bahía de Cartagena.

Agradecimientos

El grupo de investigación OCEÁNICOS de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín agradece a la empresa Exocol y al Doctor Carlos Andrade por los recursos y el equipo de trabajo puesto en la campaña de campo; a la Universidad de Cartagena, a la empresa HidroConsultores Ltda. y al profesor Alfonso Arrieta por los equipos facilitados durante la campaña de campo, al hotel Sport Barú por facilitar sus instalaciones para el alojamiento e instalación de un medidor de nivel. Se agradece además a los estudiantes Ángela María Gómez y Julián Ceballos por su apoyo en el procesamiento de la información, a los profesores Jaime Iván Ordoñez y a Luis Alejandro Camacho de la Universidad Nacional – Sede Bogotá, al CWR por permitir la utilización del modelo ELCOM, y finalmente a Cormagdalena por financiar el proyecto denominado: “Estudio de

viabilidad de realizar sedimentación controlada en la bahía de Barbacoas y de reducción de la sección transversal del Canal del Dique”.

Referencias bibliográficas

- [1] Universidad Nacional de Colombia. Estudios e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del Canal del Dique; 2007.
- [2] Pritchard D. Observation of circulation in coastal plain estuaries. *Estuaries. Am. Assoc. Adv. Sci. Spec. Publ.* Lauff GH. 1967; 83: 37-44.
- [3] Chapra S. *Surface Water-Quality Modelling.* McGraw-Hill; 1997.
- [4] Martin J, McCutcheon S. *Hydrodynamics and transport for water quality modeling.* New York: Lewis Publishers; 1999.
- [5] Leble, S. y R. Cuignon. 1987. El Archipiélago de las Islas del Rosario, estudio morfológico, hidrodinámico y sedimentológico. *Boletín Científico CIOH.* 7: 37-52.
- [6] Lonin S. Cálculo de la transparencia del agua en la bahía de Cartagena, *Boletín Científico CIOH.* 1997; 18: 85-92.
- [7] Tuchkovenko Y, Lonin S, Calero L. Modelación ecológica de las bahías de Cartagena y Barbacoas bajo la influencia del Canal del Dique. *Avances en Recursos Hidráulicos.* 2000; 7: 76-94.
- [8] Lonin S, Parra C, Andrade C, Thomas Yv. Patrones de la pluma turbia del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. *Boletín Científico CIOH.* 2004; 22: 77-89.
- [9] Universidad Nacional de Colombia. *Dinámica Fluvial Deltaica y Litoral del Canal del Dique.* Ministerio del Medio Ambiente; 2002.
- [10] Universidad Nacional de Colombia. Estudio de viabilidad de realizar sedimentación controlada de la bahía de Barbacoas y de reducción de la sección transversal del Canal del Dique; 2008.
- [11] Hodges B, Dallimore C. *Estuary, lake and coastal ocean model: ELCOM, science manual.* Centre of Water Research: Univ. of Western Australia; 2006.
- [12] Hubbard DK. Sedimentation as a control of reef development. *Coral reef.* 1986; 5: 117-125.
- [13] Poveda G. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 2004; 28(107): 201-222.
- [14] Andrade C. Análisis de la velocidad del viento sobre el mar Caribe. *Boletín Científico CIOH.* 1993; 13: 33-44.
- [15] Hillmera I, Imberger J, Influence of advection on scales of ecological studies in a coastal equilibrium flow. *Continental Shelf Research.* 2007; 27: 134-153.
- [16] Gómez-Giraldo A, Imberger J, Antenucci JP. Spatial structure of the dominant basin-scale internal waves in Lake Kinneret. *Limnol. Oceanogr.* 2006; 51(1): 229-246.
- [17] Casulli V, Cheng R. Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *Int. J. Numer. Methods Fluids.* 1992; 15: 629-64.
- [18] Appt J, Imberger J, Helmut HK. Basin-scale motion in stratified Upper Lake Constance. *Limnol. Oceanogr.* 2004; 49(4): 919-933.
- [19] Hodges B, Imberger J, Saggio A, Winters K.B. Modeling basin-scale internal waves in a stratified lake. *Limnol. Oceanogr.* 2000; 45 (7): 1603-1620.
- [20] Stocker R, Imberger J. Horizontal transport and dispersion in the surface layer of a medium-sized lake. *Limnology and Oceanography.* 2003; 48(3): 971-982.
- [21] Laval B, Imberger J, Hodges BR, Stocker R. Modeling circulation in lakes: spatial and temporal variations. *Limnol. Oceanogr.* 2003; 48 (3): 983-994.
- [22] Dallimore CJ, Hodges BR, Imberger, J. Coupling an underflow model to a three-dimensional hydrodynamic model. *Journal of Hydraulic Engineering.* 2003; 129: 748-757.
- [23] Gómez-Giraldo EA, Osorio AF, Toro FM, Osorio JD, Álvarez OA. Patrón de transporte horizontal de sedimentos en bahía Barbacoas y su influencia sobre las Islas del Rosario. *Avances en Recursos Hidráulicos.* 2009; en imprenta.
- [24] WXTide32 Versión 4.7 [en Internet]. 2007 [Citado 2008 Oct 15]; Disponible en: URL:<http://www.wxtime32.com>
- [25] UNESCO, ICES, SCOR, IAPSO. Background papers and supporting data on the international equation of state of sea water. *Unesco Technical Paper on Marine Science.* París, 1981.
- [26] Kalnay E, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society.* 1996; 77 (3): 437-471.
- [27] Agudelo P, Restrepo AF, Molares R, Tejada CE, Torres R, Osorio AF. Determinación del clima de oleaje medio y extremal en el caribe colombiano, *Boletín Científico CIOH.* 2005; 23: 33-45.
- [28] Osorio AF, Montoya RD, Mesa JC, Bernal GR. Reconstrucción de cuarenta años de datos de oleaje en el mar Caribe colombiano empleando el modelo WWIII™ y diferentes fuentes de datos. *Boletín Científico CIOH.* 2009; 27 (In Press).
- [29] Massel SR. *Ocean surface waves : their physics and prediction.* World Scientific Publ., Singapore - New Jersey - London - Hong Kong; 1996. (Advance series on ocean engineering; vol 11).