

Influencia de los Efectos Térmicos en la Circulación de la Bahía Interna de Cartagena

SERGUEI LONIN PH.D, Oceanólogo, LUIS GIRALDO, Ing. Oceanólogo

División de Estudios Ambientales Marinos, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia

RESUMEN

Empleando las capacidades del modelo hidrodinámico MECCA (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment), los autores analizan la importancia de los efectos térmicos de la atmósfera en la formación de los campos hidrodinámicos en la Bahía Interna de Cartagena. Los resultados relacionados con la distribución espacial de la temperatura del agua, calculados con el modelo y comparados con mediciones directas en el área, presentan oscilaciones temporales significativas en las zonas de bajas profundidades, especialmente en el bajo de La Virgen, donde, con frecuencia, se observan movimientos ascendentes a lo largo de las paredes del bajo que producen disminución de la temperatura. Se demuestra que la acción térmica de la atmósfera produce relaciones inversas en el sistema "régimen dinámico - régimen térmico", los cuales son, en ocasiones, de naturaleza local y, en otras, no-local y producen como resultado final, el aumento de la velocidad de las corrientes entre dos y tres veces.

ABSTRACT

Using the capabilities of the MECCA model, authors study the importance of the atmosphere thermal effects for the hydrodynamic fields. The water temperature field, calculated by the model and compared with direct measurements in the area, shows significant time oscillations on the sectors with low depths, particularly in the La Virgen shoal, where, frequently, ascendent vertical water movements are observed, which produce a decreasing of temperature. Paper shows that the atmosphere thermic action produce inverse relationships in the "dynamic regime - thermic regime" system, that have local and no-local origins and produce an increasing of the current velocities of two - three times.

1. INTRODUCCION

En el trabajo de Lonin y Giraldo (1995a) sobre la circulación de la bahía interna de Cartagena, con base en el modelo de Lonin (1993) se determinaron las principales características del régimen dinámico de la bahía interna de Cartagena. Los cálculos tuvieron un carácter preliminar y fueron realizados sin tener en cuenta la acción térmica de la atmósfera. En ese trabajo se estableció que el viento ejerce una acción dominante en la formación de la circulación en esta zona, mientras que los efectos térmicos y de las mareas son poco significativos.

En la realidad, la circulación por efectos de las mareas, según los resultados dados por (Lonin y Giraldo 1995a), presenta velocidades del orden de 1 cm/s. En otro trabajo (Lonin y Giraldo, v. este mismo Boletín), dedicado a la dinámica en el sistema de caños y lagunas de Cartagena, se señala que sólo en la zona donde

los caños son más angostos las corrientes de mareas superan a las de deriva en intensidad.

Con base en conceptos generales se puede concluir que la circulación termohalina en la bahía interna de Cartagena es bastante débil, en comparación con la de deriva. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la estratificación térmica puede ejercer una influencia significativa en el régimen turbulento y, por lo tanto, en la dinámica de la bahía. El presente trabajo está dedicado al análisis de este tema.

Con base en resultados obtenidos utilizando el modelo MECCA (Hess, 1989), en este documento se analiza la importancia de los efectos térmicos de la atmósfera en la formación del campo dinámico en la bahía interna de Cartagena. Este problema reviste de un gran interés por sí solo, al igual que es una etapa obligada en la formación de un modelo acoplado océano - atmósfera de media escala.

2. ALGUNAS PROPIEDADES DEL MODELO E INFORMACION INICIAL

El MECCA es un modelo hidrodinámico tridimensional no estacionario, diseñado para la descripción de procesos que tienen lugar en aguas someras, incluyendo estuarios y otros cuerpos de agua de configuración compleja. Una ventaja indiscutible del modelo, en comparación con otros que se están utilizando en el mundo, es la posibilidad de calcular simultáneamente procesos a escalas de grilla y de subgrilla.

Para un mejor entendimiento de los objetivos del trabajo y de los aspectos teóricos que nos ocuparán más adelante, cabe detenerse en el siguiente concepto: La descripción matemática de los procesos termodinámicos en zonas someras, depende en gran medida de la formulación de las condiciones de contorno para la ecuación de transmisión del calor en el fondo de la zona. Este problema fue analizado en el trabajo de (Lonin y Giraldo 1995b), en el que se determinó que la condición de contorno de primera clase para temperatura, da mejores resultados que la de segunda clase para flujo de calor nulo. Desde el punto de vista práctico, dar un valor constante de la temperatura del sedimento del fondo equivale a solucionar el problema acoplado de intercambio de calor entre el agua y los sedimentos. En una de las versiones del modelo MECCA existe el bloque para dar solución a ese problema, mientras que en la versión de que disponen los autores del presente artículo se da una condición de relajación, fijándose la temperatura del fondo en el tiempo. De esta forma, el flujo de radiación solar que alcanza el fondo no participa en los procesos de intercambio de calor y se considera absorbido totalmente por los sedimentos, mientras que el flujo turbulento de calor es determinado por la diferencia entre la temperatura del fondo y el agua vecina, es decir

$$D_v \partial T / \partial z = \gamma (T_b - T), \quad (1)$$

donde D_v - coeficiente de difusión vertical turbulenta del calor; z - coordenada vertical; γ es un coeficiente empírico o una función que depende de la velocidad de las corrientes del fondo; T_b , T - temperaturas del sedimento del fondo y del agua, respectivamente.

Cuando $\gamma = 0$ se tiene una condición de igualdad a cero del flujo de calor a través de la superficie del fondo marino, mientras que si $\gamma \rightarrow \infty$, se tiene una condición de contorno de primera clase para la temperatura. En el presente trabajo se ha empleado la condición (1), en la cual γ se determinó por resultados de cálculos preliminares.

Estos mismos cálculos demostraron la no conveniencia de utilizar condiciones de contorno tipo Orlansky para la temperatura en la frontera líquida del área, por lo cual la condición adoptada fue:

$$\partial T / \partial n = 0, \quad (2)$$

donde n - normal externa a la frontera líquida. (Aquí y en adelante los caracteres en negrilla denotan vectores).

Para el cálculo del régimen térmico con base en el modelo descrito, se emplearon datos horarios reales para el período del 9 al 29 de agosto de 1995. Los datos de viento durante este período fueron los utilizados por Lonin y Giraldo, (1995a) y Lonin y Giraldo, (v. este mismo Boletín). Además, se emplearon datos sobre el comportamiento temporal de la temperatura del aire, nubosidad y humedad del aire. El promedio durante este período de la temperatura del aire fue $T_a = 27.8$ °C. Este valor fue utilizado en calidad de condición inicial para la temperatura del agua T , es decir, $T(x,y,z,t=0) = T_a$, donde x,y, t - coordenadas horizontales y tiempo.

El albedo de la superficie del mar se tomó igual a 10%, los valores de humedad relativa del aire y cantidad total de nubes fueron iguales a 85% y 6/10, respectivamente. Se dieron datos fijos de estos parámetros, debido a que en esta versión del modelo no es posible tener en cuenta su variación en el tiempo. Esta circunstancia es una limitación bastante seria para el cálculo de las distribuciones reales de los parámetros hidrofísicos y debe ser complementada.

La transparencia del agua (profundidad hasta la cual llega el 10% de la radiación solar) en diferentes experimentos numéricos se dió igual a 6 y 0.5 metros, con el fin de establecer la sensibilidad del modelo a la variación de estos parámetros. En este artículo se dan solo los resultados de los cálculos realizados para una transparencia igual a 0.5 metros.

Los demás parámetros del modelo y de la grilla de diferencias finitas se tomaron como en Lonin y Giraldo, (1995a).

3. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Se realizaron tres series de experimentos numéricos. En la primera se tuvieron en cuenta los efectos térmicos de la acción de la atmósfera, mientras que en las otras dos series se efectuaron los cálculos para una estratificación neutral de las aguas bajo condiciones de viento real y de calma, respectivamente. Para el análisis de los resultados se eligieron tres puntos en la zona (Figura 1), ubicados, el primero en el canal de navegación entre Manzanillo y Castillogrande (punto 2), el segundo en el bajo de La Virgen (punto 3) y el tercero a la entrada de la bahía de Las Animas (punto 7).

En la Figura 2 se da el comportamiento temporal de la temperatura del agua en el canal y en el bajo de La Virgen (en esta y en las demás Figuras se presentan solo segmentos del período analizado en el eje de las abscisas, con el objeto de permitir una mejor observación de los fenómenos descritos). Al comparar estos

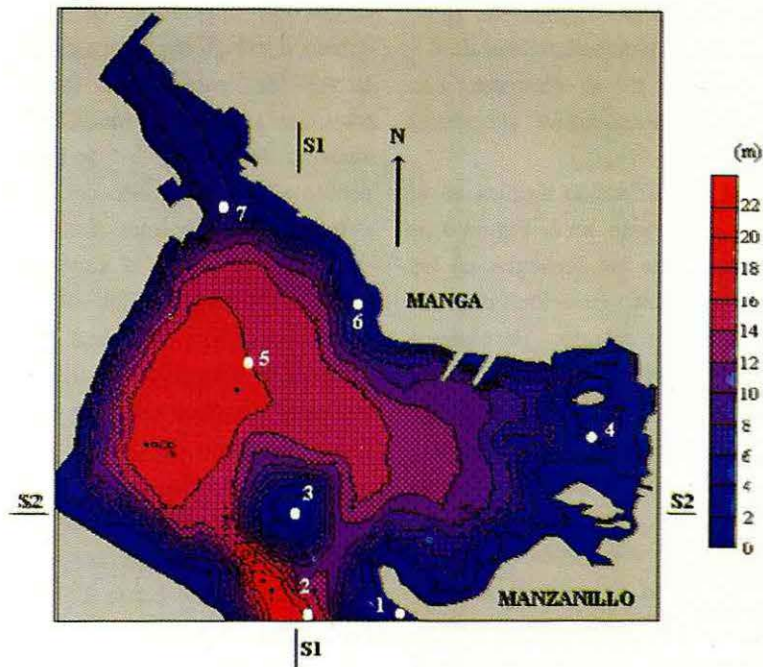


Fig. 1. Relieve submarino en la bahía interna de Cartagena, posición de los puntos analizados y de los perfiles S1 y S2.

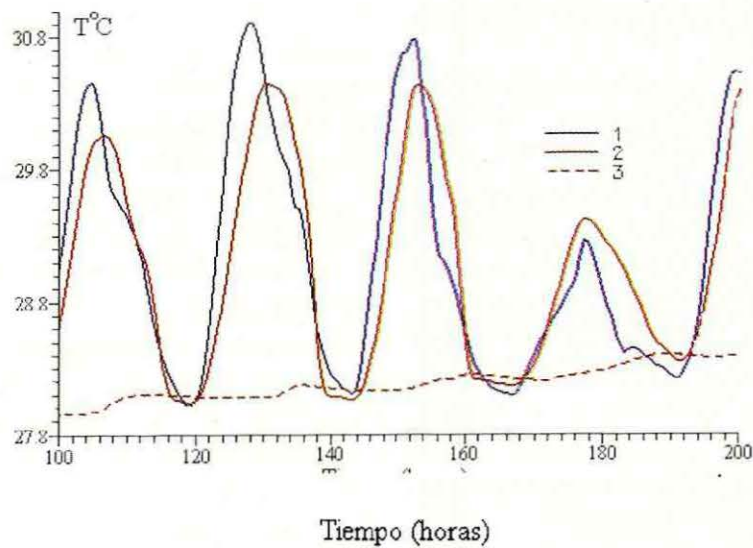


Fig. 2. Comportamiento de la temperatura superficial del agua en el punto número 3 (curva 1) y en el punto número 2 en superficie (curva 2) y a 8.3 metros de profundidad (curva 3). La posición de los puntos se da en la Figura 1.

resultados entre sí, observamos que en la zona más somera del bajo la temperatura del agua sufre oscilaciones de mayor amplitud, debido a un menor contenido de calor de la columna de agua, mientras que en el canal de navegación, a una profundidad de 8.3 metros, estas oscilaciones prácticamente no se observan. Las amplitudes de las oscilaciones de la temperatura superficial superan 1 °C.

Se estima ahora los efectos de la estratificación térmica en el régimen dinámico de la bahía. Con este objeto, en la Figura 3 se comparan los resultados de los cálculos de las corrientes en los puntos 2 y 7, teniendo en cuenta la estratificación, con los obtenidos cuando esta no participa en los cálculos. En algunos casos la estratificación térmica puede provocar un aumento de la velocidad de las corrientes de más de dos veces. Así por ejemplo, si en el canal de navegación la corriente generada por el viento tiene valores del orden de 2 - 4 cm/s, al tener en cuenta los efectos térmicos estos aumentan hasta 8 - 9 cm/s. Estas diferencias son menores en el punto 7, lo que se explica por su ubicación en una zona con un relieve submarino más homogéneo. En efecto, al haber variaciones bruscas de la topografía del fondo entre Manzanillo y Castillogrande y debido a la presencia de la zona somera del bajo de La Virgen (Figura 1), se dan las condiciones para que se formen perturbaciones térmicas en esta zona de la bahía. Asimismo, es curioso que las corrientes de marea (curva 3 en las Figuras) son poco significativas en el punto 2 (velocidades hasta 1 cm/s) y luego se hacen comparables con las de deriva en el punto 7, es decir, en las zonas más estrechas. Efectivamente, según los resultados presentados por *Lonin y Giraldo*, (v. este mismo Boletín), las mareas ejercen una influencia predominante en la dinámica del sistema de caños y lagunas, donde las velocidades pueden alcanzar 10 cm/s.

Así, es posible afirmar que los efectos térmicos de la atmósfera son sustanciales en las zonas donde existen variaciones bruscas del relieve del fondo. Sin embargo, se debe señalar que en este trabajo no se discute el tema sobre la influencia en los resultados de las condiciones dadas en la frontera líquida. Dado que el punto 2 se encuentra muy cerca a esta, las inexactitudes de indeterminación al dar las condiciones de contorno pueden ser también importantes. De todas formas, los resultados obtenidos reflejan en forma correcta la física de los procesos. Continuando con el análisis del comportamiento del sistema, la acción térmica de la atmósfera sobre el régimen dinámico de la bahía puede identificarse en dos procesos: De un lado, en la formación de una circulación baroclínica y de otro, en la realización de un trabajo por parte de las pulsaciones turbulentas en contra de la fuerza de boyancia. Suponiendo que la circulación baroclínica "local" en el área de estudio no es importante y analizando como influye la estratificación térmica en el régimen turbulento y las corrientes.

Se sabe (*Monin y Yaglom*, 1971) que la formación de una estratificación estable conduce a la disminución de la turbulencia en una determinada capa de bloqueo (que puede ser la termoclina), debido al trabajo que deben efectuar las pulsaciones turbulentas de la velocidad para superar la boyancia. El debilitamiento de la transmisión del impulso turbulento hacia el fondo favorece el aumento de la velocidad de las corrientes en la capa superficial, debido a que el impulso del viento en este caso actúa sobre un volumen menor de agua. A su vez, el aumento de la velocidad en esta capa intensifica el cizallamiento vertical en ella, es decir, conduce al aumento de los valores de las tensiones de Reynolds en la frontera inferior de la capa. En consecuencia, la capa turbulenta aumenta su espesor y las corrientes se debilitan. Finalmente, bajo una presión externa constante se alcanza un régimen estacionario y la relación inversa descrita se hace negativa. Esta relación inversa negativa en el sistema (régimen dinámico - régimen térmico) es local, es decir, su significado físico aparece en cada uno de los puntos del área en forma independiente de los demás.

En el trabajo de *Lonin*, (1995) al estudiar la influencia de los sedimentos suspendidos en el régimen dinámico de una zona somera, se observó que existen, además de las locales, relaciones de carácter global. Asimismo, se determinó que las propiedades no locales del sistema pueden observarse también al analizar los efectos de la estratificación térmica. El estudio de los mecanismos no locales en el sistema "régimen dinámico - régimen térmico" se puede realizar a través del cálculo de la circulación barotrópica.

En la Figura 4 se dan las distribuciones espaciales de la circulación residual barotrópica, considerando en un caso los efectos de la estratificación térmica y sin tenerlos en cuenta, en el otro. En términos generales, es posible que la acción térmica de la atmósfera se efectúe sobre la circulación barotrópica por dos mecanismos diferentes, como son: 1) El efecto conjunto de la baroclinidad y del relieve del fondo y 2) El proceso no local que transcurre en el sistema dinámico, mencionado anteriormente y que será descrito más adelante.

El primero de estos efectos debe su procedencia a la presencia del rotacional entre el vector baroclínico y el gradiente del relieve del fondo, es decir, $\nabla\rho \times \nabla H \neq 0$, donde ρ , H - densidad y profundidad del agua, respectivamente; ∇ - operador de Hamilton. Obviamente, en la zona del bajo de La Virgen los gradientes de profundidad son tan intensos que, en conjunto con las irregularidades del campo de densidad, favorecen la intensificación de la circulación barotrópica.

Por su parte, el proceso no local (global) de la influencia de la estratificación sobre el régimen dinámico, como se mostró en el trabajo de *Lonin*, (1995), funciona de la siguiente forma: el viento es el principal factor que sostiene la circulación de gradiente (integral) bajo la presencia de costas o bordes y de variaciones del

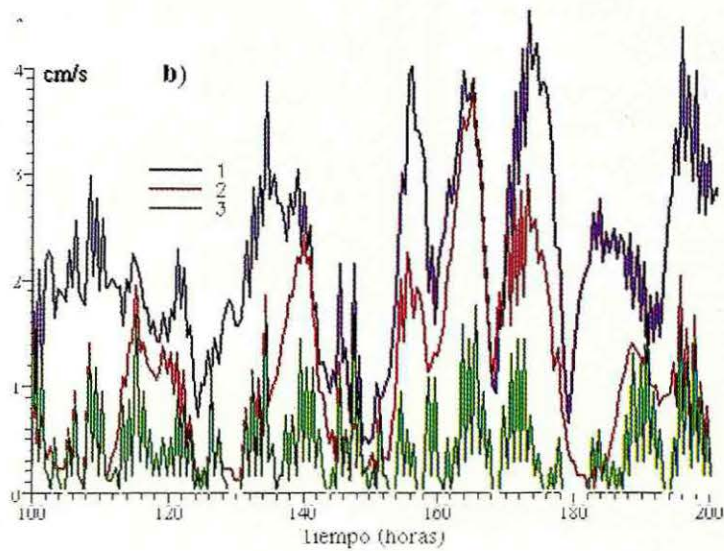
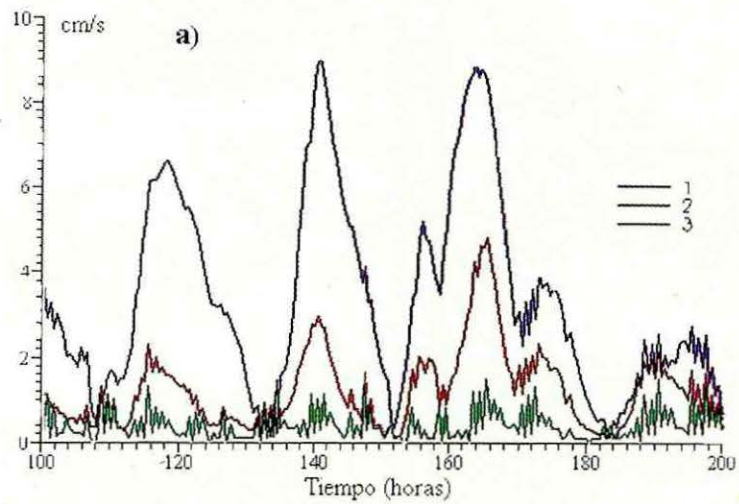


Fig. 3. Comportamiento del módulo de velocidad de las corrientes superficiales en el punto 2 (a) y en el punto 7 (b) considerando (1) y sin considerar (2) los efectos de la estratificación térmica. La curva 3 corresponde, únicamente, al caso de las corrientes de marea

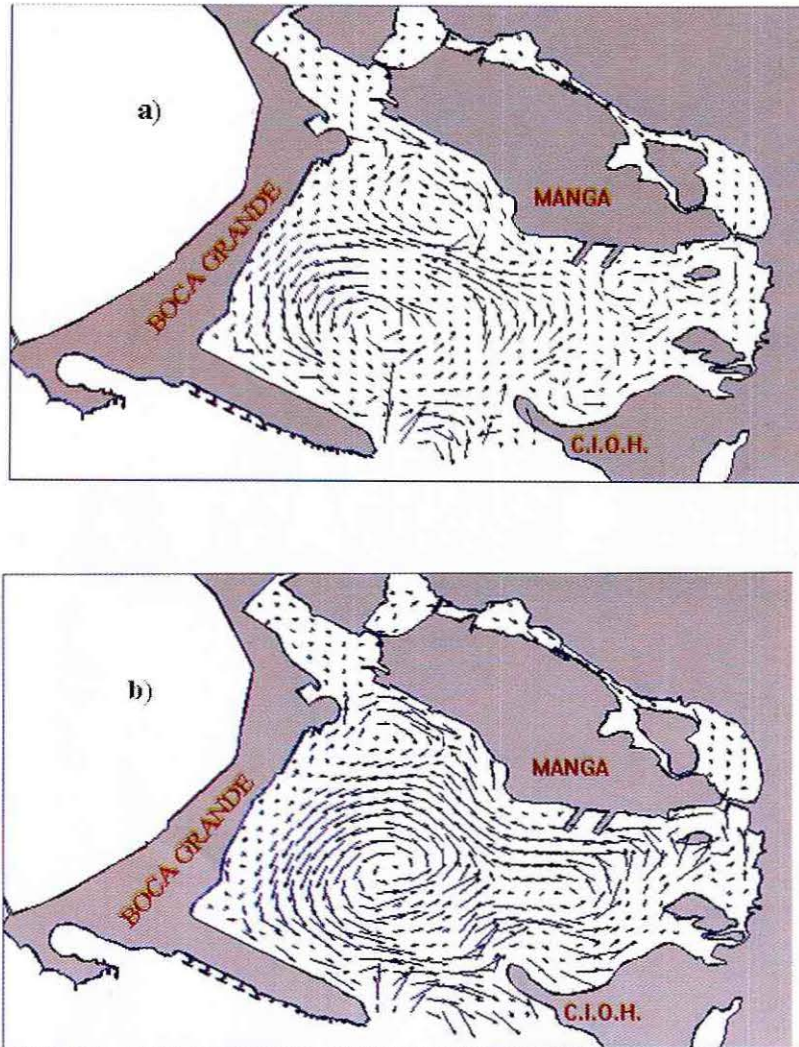


Fig. 4. Circulación residual barotrópica (promediada para un período de 288 horas) considerando (a) y sin considerar (b) los efectos de la estratificación térmica.

relieve del fondo. El vector de forzamiento de la circulación barotrópica gradiente se escribe:

$$\partial \xi / \partial t \sim \text{rot}[(\tau_s - \tau_b) / \rho_0 H], \quad (3)$$

donde ξ - vórtice plano de la velocidad de las corrientes; τ_s y τ_b - vectores de las tensiones tangenciales del viento en superficie y en el fondo, respectivamente; $\rho_0 = \text{const}$.

Bajo un campo de viento uniforme ($\tau_s \neq \tau_s(x,y)$) y de una variación espacial débil de τ_b , podemos obtener a partir de la expresión (3):

$$\text{rot}[(\tau_s - \tau_b) / \rho_0 H] \approx (\tau_s - \tau_b) / \rho_0 H^2 [i \partial H / \partial y - j \partial H / \partial x], \quad (4)$$

donde i y j - vectores unitarios en las direcciones x y y , respectivamente. La fórmula (4) demuestra que la intensidad de la circulación barotrópica es determinada por el gradiente de profundidad, en sentido perpendicular al movimiento del agua, (o sentido de la acción del viento). Dado que este tipo de circulación tiene una naturaleza no local, cualquier cambio del vector τ_b , aunque sea en un punto del área estudiada, es suficiente para que varíe el carácter de la circulación en toda la zona. En el caso de una estratificación térmica, la existencia de una capa de bloqueo provoca variaciones de τ_b . Se explica así el funcionamiento del proceso de influencia de la estratificación en la circulación barotrópica.

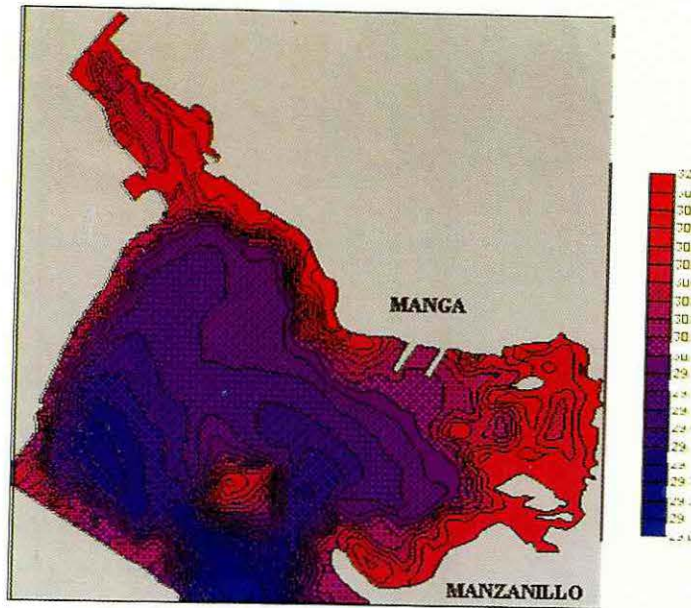


Fig. 5. Distribución espacial de la temperatura superficial del agua a las 21:00 del 13 de agosto de 1995, según los resultados de los cálculos.

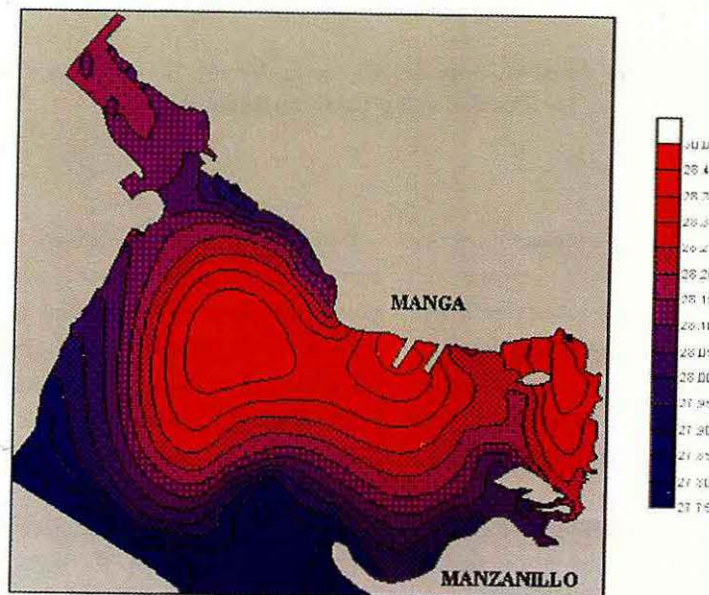


Fig. 6. Distribución espacial de la temperatura superficial del agua a las 15:00 del 12 de agosto de 1995, según los resultados de los cálculos.

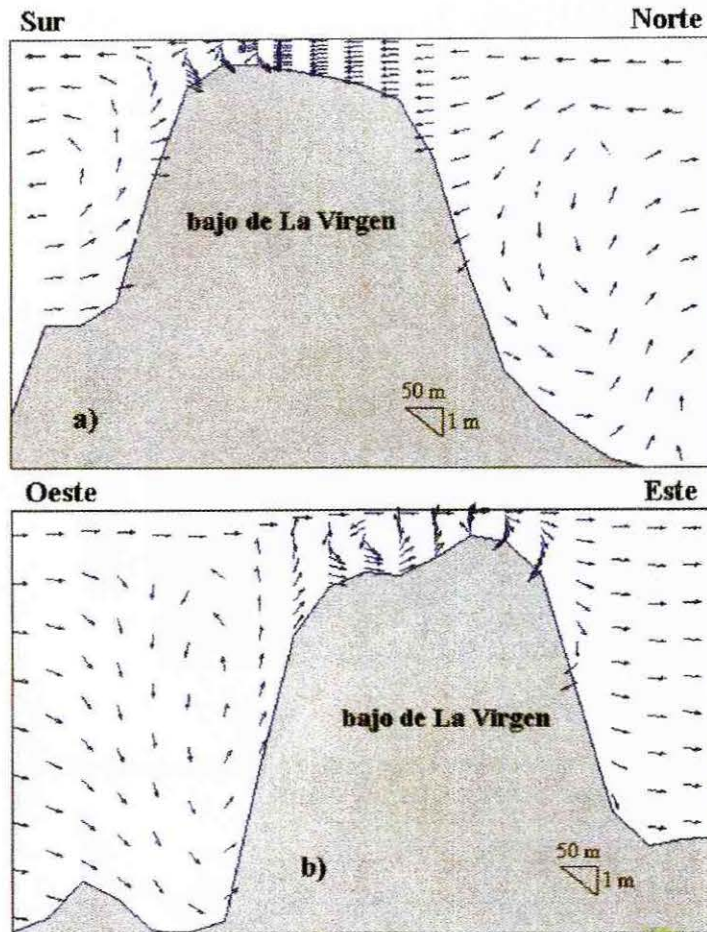


Fig. 7. Perfiles S1 (a) y S2 (b) en el sector del bajo de La Virgen. Se presentan los módulos unitarios de velocidad. La velocidad vertical se da multiplicada por 10^6 .

En el trabajo de Lonin, (1995) se expuso que la reacción inversa del sistema con este tipo de relaciones, también inversas no locales, puede presentarse gracias al estiramiento (compresión) de los tubos del vórtice absoluto y gracias a la difusión turbulenta de las líneas del mismo. En el caso de la circulación tridimensional es posible entonces un tercer proceso, reflejado en la inclinación de los tubos del vórtice absoluto en el campo de cizallamiento de la velocidad.

Así, la Figura 4 demuestra una influencia fuerte de los efectos térmicos en la circulación barotrópica. Las velocidades de las corrientes de gradiente, al considerar los efectos térmicos, aumentan aproximadamente dos veces. Esta Figura complementa lo presentado por Lonin y Giraldo, (v. este mismo Boletín), sobre la dinámica en el sistema de caños y lagunas, donde se observa un transporte de aguas desde la laguna de San Lázaro hacia la laguna Las Quintas, al parecer característico para la época húmeda.

De otro lado, es interesante analizar otra propiedad del régimen térmico de la bahía interna de Cartagena. En la Figura 5 se presenta la distribución espacial de la temperatura superficial del agua a las 21:00 del 13 de agosto de 1995, según resultados calculados. El máximo de temperatura se registra sobre el bajo de La Virgen, así como en las zonas someras del norte y este de la bahía interna¹. El resultado es lógico y se explica por la batimetría del lugar. Sin embargo, como se observa en la Figura 6, que registra la distribución de la temperatura superficial del agua a las 15:00 del 12 de agosto de 1995, sobre el bajo de la Virgen se pueden presentar durante el día aguas con temperaturas menores que en las zonas vecinas donde la profundidad es mayor. Los resultados de mediciones directas, realizadas el 10 de julio de

¹ En general, los cálculos presentan un máximo absoluto de temperatura en el sistema de caños y lagunas. Esto se explica por las bajas profundidades y el intercambio débil de agua entre el sistema y la bahía.

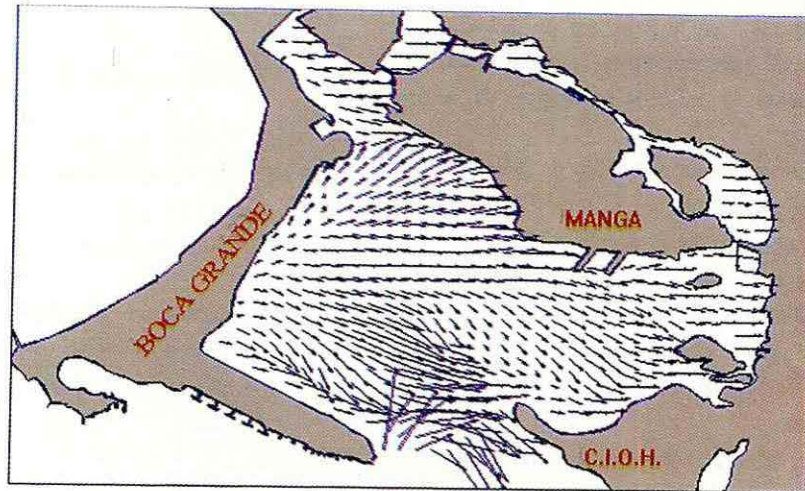


Fig. 8. Campo de corrientes superficiales a las 15:00 del 12 de agosto de 1995.

1996, entre las 10:45 y las 11:30 de la mañana, presentados en la Tabla 1, demuestran la presencia de este tipo de fenómenos.

Tabla 1. Resultados de mediciones directas de la temperatura superficial del agua, efectuados el 10 de julio de 1996 en las estaciones 1 - 7, señaladas en la Figura 1.

No. de Estación	1	2	3	4	5	6	7
T °C	30.4	30.5	30.0	30.7	30.2	30.2	30.3

Para explicar esta situación se realizaron dos perfiles, uno en dirección sur - norte (perfil S1 en la Figura 1) y otro oeste - este (perfil S2) y se relacionaron con el campo de las corrientes superficiales a las 15:00 del 12 de agosto de 1995. Estos resultados se presentan en las Figuras 7 y 8, respectivamente, y corresponden al comportamiento registrado por la distribución espacial de temperatura en la Figura 6.

El campo de las corrientes superficiales (Figura 8) en ese momento estuvo sometido a la acción del viento del oeste, que estimulaba el transporte del oeste en toda la capa sobre la zona del

bajo de La Virgen (Figura 7b). Dado que el transporte sobre el bajo es limitado, de un lado se registra un aumento de las velocidades de las corrientes, así como un deslizamiento de las aguas por sus paredes, de otro, formándose una célula de circulación vertical con movimientos salientes en el sector occidental del bajo. La surgencia de aguas frías provoca una disminución de la temperatura, registrada en la figura 6. Como demuestran los cálculos numéricos, esta particularidad de la circulación se presenta con frecuencia.

4. CONCLUSIONES

Un resultado importante de este trabajo es la determinación de la influencia de los efectos térmicos de la atmósfera en el régimen dinámico de la bahía interna de Cartagena. Se estableció que estos efectos se reflejan, especialmente, en la acción de la boyancia sobre la turbulencia y la intensidad de las corrientes. Este proceso tiene una naturaleza local y conduce a un aumento de las velocidades de las corrientes superficiales entre dos y tres veces.

En forma paralela a la acción local, los efectos térmicos ejercen también una acción no local que conduce a la intensificación de la circulación barotrópica de gradiente. Esto último se explica por el efecto conjunto de la baroclinidad y el relieve del fondo de un lado

y la influencia de la estratificación local sobre la circulación integral, de otro.

Entre las particularidades geográficas de la zona estudiada se han registrado disminuciones de la temperatura del agua en la zona del bajo de La Virgen, lo que se explica por una surgencia de las aguas a lo largo de las paredes del bajo. En general, la presencia de variaciones bruscas de la profundidad en la parte sur de la bahía interna, favorece la formación de perturbaciones espaciales del campo de temperatura y aumenta la influencia térmica de la atmósfera en el régimen dinámico.

Los resultados del trabajo subrayan la importancia de tener en cuenta las irregularidades térmicas, incluso en la modelación de zonas con dimensiones no muy significativas como la bahía interna de Cartagena. Para un cálculo correcto de los campos hidrodinámicos es necesario disponer de información sobre el estado de la capa inferior de la atmósfera, próxima a la superficie marina y, finalmente, unificar los bloques atmosférico y oceánico en un sólo modelo de interacción.

Por último, con base en estos resultados y en trabajos anteriores, se señala que la exactitud en los cálculos de los campos hidrodinámicos en la zona dada se relaciona con los siguientes factores:

1. Formulación correcta de las condiciones de contorno en la frontera líquida y de la condición térmica en el fondo;
2. Tener en cuenta la nubosidad y humedad del aire, variables en el tiempo;
3. Tener en cuenta la distribución de la transparencia del agua en la zona;

4. Tener en cuenta las irregularidades espaciales del campo de viento.

Agradecimientos: Este trabajo fue realizado con el apoyo y co-financiación de Colciencias dentro del Proyecto: "Modelación Numérica de la Circulación Costera y su Aplicación al Estudio de los Procesos de Transporte de Sustancias Contaminantes en el Litoral Caribe Colombiano" (Cod. 0140-09-347-95).

BIBLIOGRAFIA

- Hess, K. W., *MECCA Programs Documentation NOAA Technical Report NESDIS 46*, Washington, D.C., 1989.
- Lonin, S.A., A mathematical model of the coastal water dynamics in a boundary - fitted coordinate system. *VINITI Publ. N. 3040*, 29 p., 1993.
- Lonin, S.A., Influence of Suspended Matter on Shallow Water Dynamics. *Izvestiya Akademii Nauk. Fizika Atmosferi i Okeana*. Vol. 31, N.4, pp. 577-586, 1995.
- Lonin, S., y L. Giraldo, Circulación de las aguas y transporte de contaminantes en la Bahía Interna de Cartagena. *Boletín Científico CIOH. N. 16*, Cartagena, pp. 25-56, 1995a.
- Lonin, S., y L. Giraldo, Influencia del Intercambio Térmico a Través del Fondo Marino en el Régimen de Temperatura de Zonas Costeras. *Bol. Cient. CIOH No. 16*, pp. 57-72, 1995b.
- Monin A.S. and Yaglom A.M. *Statistical Fluid Mechanics*. Vol. 1. Cambridge Mass., USA: MIT Press, 1971.