

# MODELACION DE CORRIENTES SOBRE LA PLATAFORMA CONTINENTAL FORZADAS POR EL VIENTO

*Luis Fernando Zamudio López*

*Manuel López Mariscal*

*Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada  
Apdo. Postal 2732, Ensenada, B. C., 22800 México*

## RESUMEN

El modelo numérico bidimensional de Chen y Wang (1990) ha sido extendido para incluir el gradiente de presión a lo largo de la costa ( $\partial p/\partial y$ ) como un "forzamiento" externo que es calculado con el modelo lineal de ondas atrapadas a la costa (OAC).

El modelo que incluye  $\partial p/\partial y$  como un forzamiento externo ha sido utilizado para simular los campos de temperatura y velocidad en la región del experimento CODE 2 (Norte de California). Los resultados del modelo han sido comparados con observaciones y con los resultados del modelo puramente bidimensional. La velocidad paralela a la costa simulada con el modelo extendido muestra mejorías significativas con respecto al modelo bidimensional.

## I.- INTRODUCCION.

El viento es uno de los principales mecanismos de generación de corrientes sobre la plataforma continental. Uno de los estudios más completos sobre corrientes de baja frecuencia (períodos de unos 2 ó 3 días hasta unos 20 días) fueron los programas CODE 1 y CODE 2 (de sus siglas en inglés). Las observaciones de los experimentos CODE, que incluyen mediciones de viento, temperatura y corrientes, pueden ser de gran utilidad en la prueba y verificación de modelos numéricos de circulación costera.

Por otro lado, la teoría lineal de ondas atrapadas a la costa (OAC) es uno de los modelos que más ha contribuido a entender e interpretar correctamente las oscilaciones (nivel del mar y corrientes) de baja frecuencia sobre la plataforma continental. La teoría de OAC se ha extendido para estudiar movimientos forzados por el viento en un océano estratificado y con disipación mediante fricción en el fondo (Clarke y Van Gorder, 1986).

Chapman (1987), utilizando la teoría de OAC, modeló los campos de temperatura y velocidad en la

zona de los experimentos CODE. La comparación de los campos modelados con las observaciones, muestra buenos resultados al simular la velocidad paralela a la costa; sin embargo, la velocidad perpendicular a la costa y la temperatura no se comparan favorablemente con las observaciones. En base a esto, es de esperarse que la velocidad perpendicular a la costa y el campo de temperatura sean afectados por procesos físicos que no han sido incluidos en los modelos citados [v. gr. frentes de surgencia, la capa de mezcla (Chapman, 1987) y la advección del campo de densidad (Send et al., 1987; Rudnick y Davis, 1988)].

Por otro lado, autores como Wang (1982), Blumberg y Mellor (1987) y Chen y Wang (1990), han desarrollado modelos numéricos no lineales con los que se pueden estudiar los movimientos producidos por el viento sobre los mrgenes continentales. Chen y Wang (1990) utilizaron un modelo no lineal en dos dimensiones (profundidad y distancia perpendicular a la costa) para simular las corrientes y la temperatura durante CODE 2. Al comparar sus resultados con los datos, encuentran que su modelación de la velocidad perpendicular a la costa y del campo de temperatura es mejor que en el caso de OAC; sin embargo la velocidad paralela a la costa no es simulada muy bien. Los autores atribuyen este último resultado al hecho de no estar considerando el gradiente de presión a lo largo de la costa.

Los estudios lineales que utilizan la teoría de OAC y la simulación numérica de Chen y Wang (1990) parecen indicar que tanto la dinámica de la capa de mezcla y los frentes de surgencia, como el gradiente de presión a lo largo de la costa, son dinámicamente importantes en la determinación de las corrientes y la temperatura en la zona de los experimentos CODE. El modelo de Chen y Wang incluye los efectos de la capa de mezcla y de los frentes de surgencia pero no incluye variaciones a lo largo de la costa. Por lo tanto, es un objetivo de este trabajo incluir el gradiente de presión a lo largo de la costa ( $\partial p/\partial y$ ) como un "forzamiento" en el modelo de Chen y Wang.

La idea básica consiste en calcular el gradiente de presión a lo largo de la costa utilizando la teoría de OAC y después incluirlo como un "forzamiento" adicional en el modelo bidimensional de Chen y Wang. Las ventajas de incluir  $\delta p/\delta y$  como un forzamiento calculado a partir de otro modelo, son que no es necesario extender el modelo bidimensional a tres dimensiones, lo cual representaría un esfuerzo considerable, tanto para extender el algoritmo como para lograr correrlo en algunas de las computadoras disponibles. Además, obteniendo  $\delta p/\delta y$  del modelo de OAC se evita tener que manejar las fronteras abiertas perpendiculares a la costa que tendrían que ser incluidas en un modelo de tres dimensiones.

## II.- DESCRIPCION DEL MODELO.

El modelo de Chen y Wang (1990) consiste en un modelo de circulación de ecuaciones primitivas en dos dimensiones, acoplado con un modelo unidimensional (vertical) de la capa de mezcla. Las ecuaciones que se resuelven en el modelo de circulación son:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_H \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ A_V \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + w \frac{\partial v}{\partial z} + f v = \frac{\partial}{\partial x} \left[ A_H \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ A_V \frac{\partial v}{\partial z} \right] - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_0}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_H \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_V \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{\partial I}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_H \frac{\partial S}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_V \frac{\partial S}{\partial z} \right] \quad (6)$$

En estas ecuaciones  $x, y$  y  $z$  representan las coordenadas perpendicular y paralela a la costa y la coordenada vertical, respectivamente,  $u, v$  y  $w$  son las velocidades en las direcciones  $x, y$  y  $z$ ,  $T$  es temperatura,  $S$  salinidad,  $p$  presión,  $\rho$  densidad,  $\rho_0$  es la densidad promedio (constante),  $f$  es el parámetro de Coriolis,  $t$  es tiempo,  $g$  es la aceleración debida a la gravedad,  $A_H$  y  $A_V$  son los coeficientes de viscosidad turbulenta horizontal y vertical respectivamente,  $K_H$  y  $K_V$  son los coeficientes de difusión horizontal y vertical,  $I$  es la radiación solar incidente y  $\partial p/\partial y$  es el gradiente de presión a lo largo de la costa, el cual se calcula en forma independiente utilizando el modelo de OAC.

Para resolver el sistema de ecuaciones anterior (1-6), se aproximan las derivadas espaciales mediante diferencias finitas centradas, las derivadas temporales con un salto de rana y la difusión se toma retrasada en el tiempo. Se utiliza una malla alternada y los modos externo e interno son tratados en forma

separada. Para calcular la densidad  $\rho$  se utiliza la temperatura ( $T$ ) y la salinidad ( $S$ ) utilizando la formula de Fofonoff (1962).

En el submodelo de capa de mezcla (que se acopla al modelo de circulación) se resuelven las ecuaciones horizontales de momento en la vertical. El propósito de este submodelo es proveer al modelo de circulación los coeficientes verticales turbulentos de viscosidad ( $A_V$ ) y difusión ( $K_V$ ), que reflejan la estructura vertical de la capa de mezcla.

## III.- MODIFICACION DEL MODELO.

El término del gradiente de presión a lo largo de la costa  $\partial p_0/\partial y$  se calcula utilizando el modelo de OAC, las características principales de este modelo son: (1) la componente del esfuerzo del viento a lo largo de la costa genera señales de baja frecuencia (menores que las inerciales), (2) se hace la suposición de ondas largas a lo largo de la costa. Bajo las dos consideraciones anteriores las ecuaciones de movimiento son resueltas expandiendo la presión de la siguiente manera:

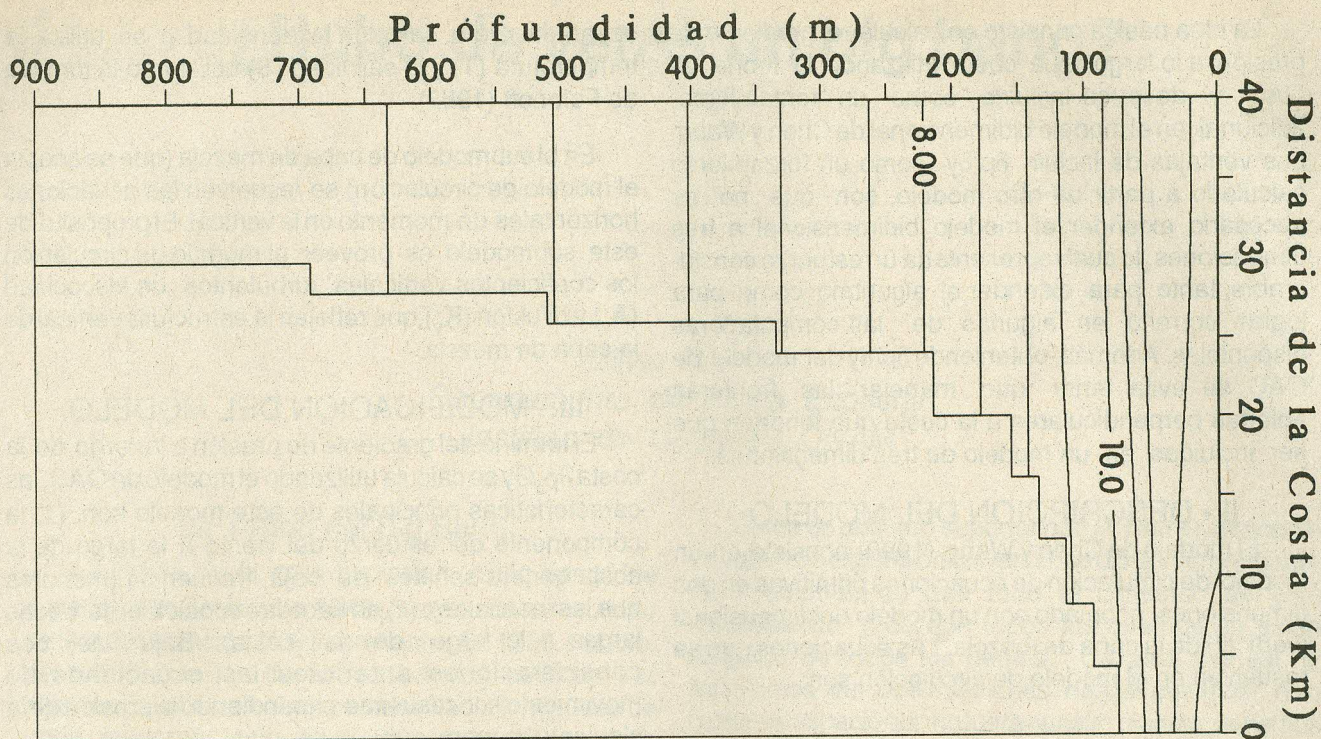
$$p_0(x, y, z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} F_n(x, z) \phi_n(y, t)$$

Aquí  $F_n(x, z)$  representa la estructura modal de ondas libres la cual solo varía en las direcciones perpendicular a la costa ( $x$ ) y vertical ( $z$ ).  $\phi_n(y, t)$  representa la amplitud modal, que tiene variaciones en la dirección paralela a la costa y en el tiempo. Detalles de la teoría de OAC pueden ser consultados en Clarke y van Gorder (1986).

## IV.- RESULTADOS PRELIMINARES.

El modelo modificado (que incluye el  $\partial p_0/\partial y$ ) fue utilizado para simular los campos de temperatura y velocidad en la región de los experimentos CODE 2 (Norte de California). En la Fig. 1 se muestra la condición inicial de temperatura y la batimetría utilizadas en el modelo. Los resultados del modelo han sido comparados con observaciones y con los resultados del modelo puramente bidimensional (Chen y Wang, 1990). Un ejemplo de lo obtenido se presenta en la Fig. 2.

En las figuras 2a, 2b y 2c se presentan las series de tiempo del campo de temperatura ( $T$ ) y de las velocidades perpendicular ( $u$ ) y paralela ( $v$ ) a la costa, respectivamente, a una profundidad de 10 metros en la plataforma media (en 90 metros de agua). En las figuras 2a y 2c se puede ver que el modelo modificado (en lo sucesivo MMOD) reproduce mejor las observaciones que el modelo puramente bidimensional (en lo sucesivo MBID). En particular, la Fig. 2c muestra que el MMOD reproduce significativamente mejor a tanto en su valor medio como en las fluctuaciones. Esto



**Figura 1 Distribución inicial de temperatura y batimetría del modelo. El intervalo de los contornos de temperatura es de  $0.5^{\circ}\text{C}$**

también se confirma con los coeficientes de correlación presentados en la tabla I. Para T, el aumento en los coeficientes de correlación es muy pequeño. De la gráfica 2b y de las correlaciones, también se ve que no se han obtenido resultados satisfactorios al modelar la velocidad perpendicular a la costa y que no hay mejoría al utilizar el MMOD.

#### LITERATURA CITADA.

Blumberg, A. F. y G. L. Mellor, 1987: A Description of a Three-dimensional Coastal Ocean Circulation Model. En: "Three-Dimensional Coastal Ocean Models", Coastal and Estuarine Sci., vol 4. Editado por N. S. Heaps. pp 1-16. AGU, Washington, D. C.

Chapman, D. C., 1987: Application of Wind-Forced, Long Coastal-Trapped Wave Theory Along the California Coast. J. Geophys. Res., 92, 1798-1816.

Chen, D. y D.-P. Wang, 1990: Simulating the Time-Variable Coastal Upwelling During CODE 2. J. Marine Res., 48, 335-358.

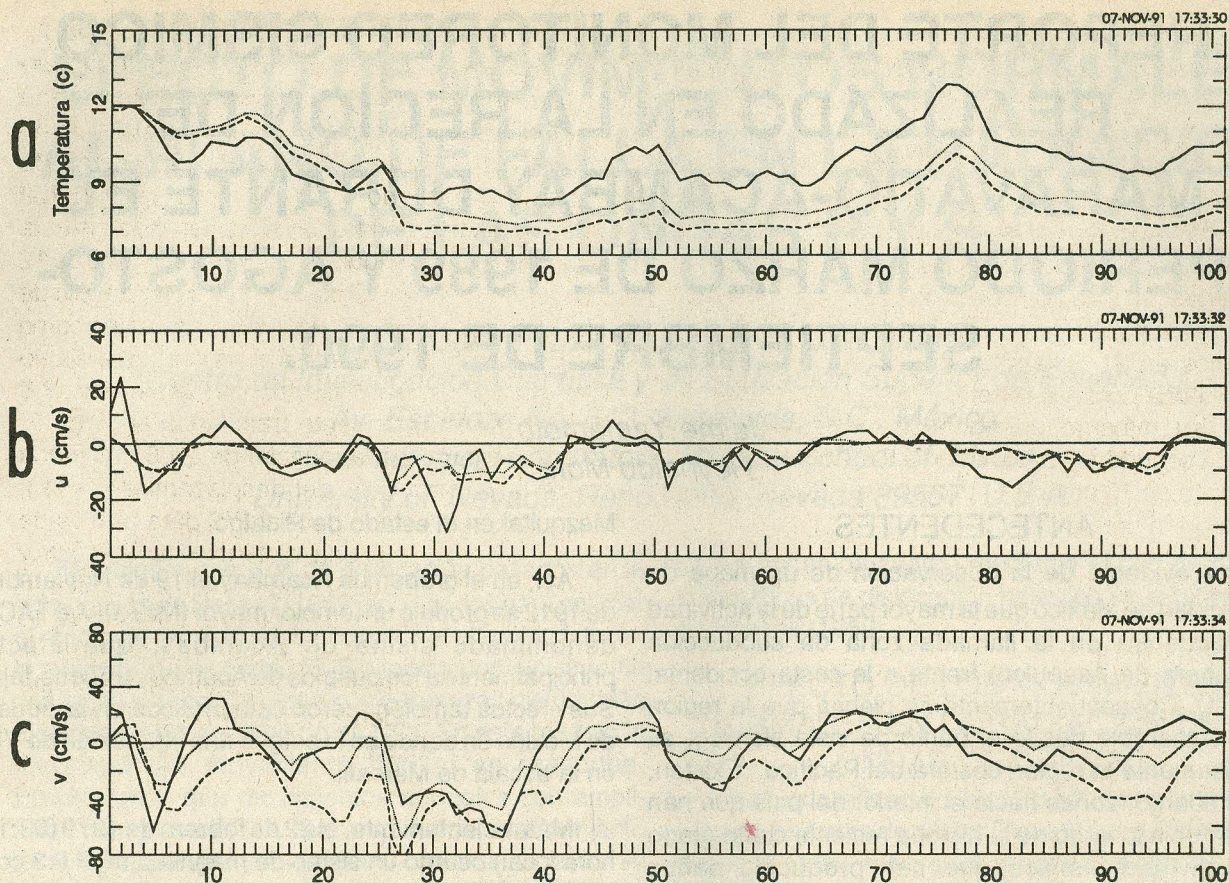
Clarke, A. J. y S. Van Gorder, 1986: A Method for Estimating Wind-Driven Frictional Time-Dependent, Stratified Shelf and Slope Water Flow. J. Phys. Oceanogr., 16, 1013-1028.

Fofonoff, N. P., 1962: Physical Properties of Sea-Water, en "The Sea", Vol. 1, Editado por M. N. Hill, Wiley-Interscience, 3-30.

Rudnick, D. L. y R. E. Davis, 1988: Mass and Heat Budgets on the Northern California Continental Shelf. J. Geophys. Res., 93, 14013-14024.

Send, U., R. C. Beardsley y C. D. Winant, 1987: Relaxation from Upwelling in the Coastal Ocean Dynamics Experiment. J. Geophys. Res., 92, 1683-1698.

Wang, D.-P., 1982: Development of a Three-Dimensional Limited-Area (Island) Shelf Circulation Model. J. Phys. Oceanogr., 12, 605-617



**Figura 2.** En a, b y c se presentan series de tiempo del campo de temperatura (T) y de las velocidades perpendicular (u) y paralela (v) a la costa, respectivamente, a una profundidad de 10 metros en la plataforma media (en 90 metros de agua). En cada gráfica la línea continua corresponde a las observaciones, la línea punteada a lo obtenido con MMOD y la discontinua es el resultado de MBID.

| VARIABLE | MODELO UTILIZADO | COEF.DE CORRELACION |
|----------|------------------|---------------------|
| T        | mmod             | 0.67                |
| u        | mmod             | 0.48                |
| v        | mmod             | 0.76                |
| T        | mbid             | 0.66                |
| u        | mbid             | 0.49                |
| v        | mbid             | 0.65                |

**TABLA I** Aquí T es temperatura, u es velocidad perpendicular a la costa y v es la velocidad paralela a la costa.