

Modelo unidimensional de corrientes en Bahía San Quintín, B. C., México

M. A. Monreal G. y D. A. Salas de León
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM

Recibido: 23 de octubre, 1990; aceptado: 30 de noviembre, 1990

RESUMEN

Se calculan las velocidades en Bahía San Quintín mediante un modelo unidimensional basado en la ecuación de conservación de la masa, que utiliza series de altura de marea. Se presenta un método para la reconstrucción de series de marea parcialmente interrumpidas, el cual se basa en el uso de la transformada Z y requiere dos series dependientes y simultáneas. Se analizan los efectos astronómicos y no-astronómicos en las corrientes de marea. Los resultados de las velocidades obtenidas del modelo se comparan con datos obtenidos de correntómetros, mostrando una buena concordancia entre sí; este método puede ser utilizado para calcular corrientes de marea en lagunas costeras, obteniendo resultados satisfactorios.

PALABRAS CLAVE: Bahía San Quintín, mareas, modelo unidimensional.

ABSTRACT

Velocities of currents in San Quintin Bay are computed by means of a one-dimensional model based on the mass conservation equation and observed tidal elevations. A method for the reconstruction of tidal gapped series is described. This method uses the Z transform and requires two dependent and simultaneous series. Astronomical and non-astronomical effects on the tidal currents were analyzed. Velocities as computed were compared with current-meter data showing good agreement. The method can be used for computing tidal currents in coastal lagoons.

KEY WORDS: San Quintin Bay, tides, one-dimensional model.

INTRODUCCION

Bahía San Quintín es un sistema lagunar bifurcado que se encuentra situado en la Península de Baja California, México, entre las latitudes 30°24' y 30°30'N y entre las longitudes 115°57' y 116°01'W. Consta de dos brazos, denominados Bahía Falsa y Bahía San Simón, que están orientados en dirección NW. Bahía Falsa es muy somera; su canal principal tiene una profundidad promedio de 4 m, mientras que en Bahía San Simón el canal tiene 8 m de profundidad en promedio, siendo más profundo cerca de la boca. Existe una conexión con el mar abierto a través de un canal de aproximadamente 1 200 m de ancho.

Los estudios hidrográficos en la bahía han sido numerosos. Entre otros, se pueden citar los realizados por Chávez de Nishikawa y Alvarez-Borrego (1974); Alvarez-Borrego *et al.* (1975 y 1977); y Zertuche-González y Alvarez-Borrego (1978).

Bahía San Quintín ha tomado una gran importancia económica, por el desarrollo del cultivo de ostión y recientemente de abulón. La dinámica de las aguas está fuertemente influenciada por las ondas de marea, el esfuerzo de viento y las diferencias de densidad que se generan a raíz de la evaporación, presentando una característica de anti-estuario con aguas más densas en la parte más alejada de la boca. En este trabajo se aplica un modelo unidimensional de descarga para simular la circulación en la bahía y se efectúa un análisis del efecto de la onda de marea, del viento y de las diferencias de densidad en el sistema.

DATOS

El anclaje de correntómetros es una labor difícil y costosa. En las regiones costeras se prefiere calcular la velocidad de la corriente a partir de un conjunto de registros simultáneos de la variación del nivel del mar, tratando de que estos registros sean lo más largos posible. Sin embargo, en ciertos casos, los registros pueden verse interrumpidos, o los datos pueden no ser muy confiables en un intervalo determinado. Surge entonces la necesidad de reconstruir las partes faltantes de la serie, lo cual puede realizarse mediante el uso de la transformada Z.

En Bahía San Quintín fueron instalados cinco mareógrafos y tres correntómetros (figura 1) por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), del 5 de julio al 3 de agosto de 1977. Un análisis preliminar de esta información fue realizado por Monreal Gómez (1980).

El presente estudio se llevó a cabo seccionando la bahía en 16 segmentos y utilizando los datos obtenidos de los instrumentos mencionados anteriormente. Las alturas de marea están referidas al nivel de baja mar media inferior.

Alturas de marea

Las mediciones obtenidas de los mareógrafos de registro continuo se digitalizaron en intervalos de tiempo de una hora, para las cinco estaciones. Sin embargo, se observaron algunas interrupciones en el funcionamiento de los ins-

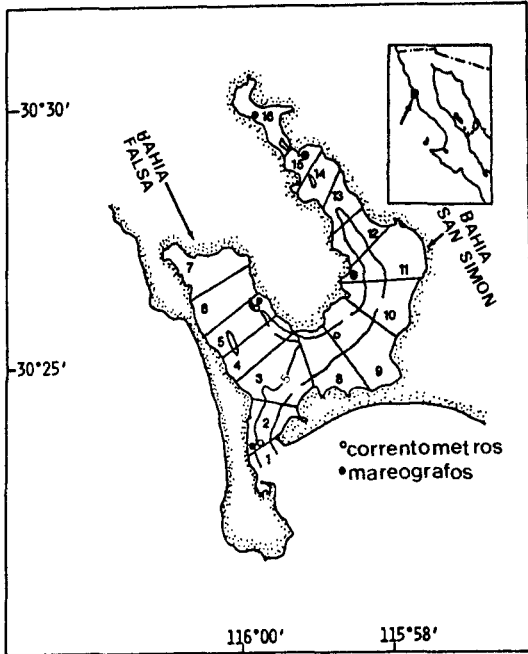


Fig. 1. Segmentación de Bahía San Quintín y localización de los instrumentos.

trumentos en las estaciones 'Pedregal', del 6 al 15 de julio, y 'Cabeza', del 6 al 16 de julio (segmentos 11 y 16). La estación 'Molino Viejo' (segmento 15) funcionó sin interrupciones y se pudo utilizar para reconstruir las partes faltantes en las otras estaciones.

Sean dos series $f(t)$ y $h(t)$ que tienen el mismo intervalo de muestreo (una hora) y que fueron registradas en dos estaciones mareográficas diferentes, A y B, respectivamente, con diferente duración. La serie $f(t)$ tiene datos confiables en el intervalo $0 \leq t \leq p$ horas, mientras que $h(t)$ cuenta con datos confiables sólo en $0 \leq t \leq m$ horas, donde $m < p$, esto es, en un intervalo menor.

La parte faltante de la serie $h(t)$ en el intervalo $m+1 \leq t \leq p$ se reconstruye utilizando primero las partes comunes de ambas series para obtener la dependencia o relación entre ellas durante el intervalo $0 \leq t \leq m$. En seguida, suponiendo que la dependencia entre los registros de altura de marea de las estaciones A y B se conserva, se introduce la función que explica la dependencia entre las dos series en $m+1 \leq t \leq p$.

La función de transferencia o de dependencia entre las dos series se establece obteniendo las transformadas Z, $F(Z)$ y $H(Z)$, que tienen una forma similar a polinomios en Z cuyos coeficientes son los valores secuenciales de la serie temporal respectiva. Z juega el papel de un operador unitario de retardo de la serie, el cual explica el retardo de una señal entre un punto y otro. Así $f(t)$ se manifestará en la estación B con un retardo de n unidades de tiempo y la

señal será representada por los coeficientes del polinomio $FB(Z) = Z^n F(Z)$. Este operador es la parte modular en la reconstrucción de la serie. La onda de marea que se observa en la estación A será observada en la estación B con cierto retardo y amortiguamiento, y así las transformadas Z representan un medio de estudio de la dependencia que existe entre las series $f(t)$ y $h(t)$.

La transformada Z de la serie $f(t)$ está dada por (Claerbout, 1976):

$$F(Z) = \sum_t f_t Z^t \tag{1}$$

donde f_t es la serie discreta de alturas de marea en $0 \leq t \leq m$ horas. La relación existente entre las transformadas Z de $f(t)$ y $h(t)$ se puede expresar como la convolución

$$F(Z) * G(Z) = H(Z) \tag{2}$$

donde $G(Z)$ es una función de transferencia a determinar, la cual expresa la dependencia entre $h(t)$ y $f(t)$. Dado que ambas series temporales son conocidas durante el período $0 \leq t \leq m$, $F(Z)$ y $H(Z)$ son calculadas mediante la ecuación (1), por lo que en (2) sólo queda por determinar la función de transferencia $G(Z)$. El producto de $F(Z)$ y $G(Z)$ en (2) está dado por la fórmula de convolución (e.g. Bendat y Piersol, 1971):

$$h_k = \sum_{j=0}^N f_{k-j} g_j, \text{ donde } j \leq k; 0 \leq k \leq m \tag{3}$$

En general, las series $f(t)$ y $h(t)$ pueden contar con registros previos a $t=0$, por lo que $H(Z)$ y $F(Z)$ pueden contener tanto potencias positivas como negativas. La ecuación (3) toma la siguiente forma matricial:

$$\begin{bmatrix} f_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ f_1 & f_0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ f_2 & f_1 & f_0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ f_3 & f_2 & f_1 & f_0 & 0 & \dots & 0 \\ f_4 & f_3 & f_2 & f_1 & f_0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_N & f_{N-1} & f_{N-2} & f_{N-3} & f_{N-4} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_m & f_{m-1} & f_{m-2} & f_{m-3} & f_{m-4} & \dots & f_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ \dots \\ g_N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ \dots \\ h_N \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

Con esta multiplicación matricial se encuentran los N ($N \leq m$) coeficientes de la función de transferencia.

Finalmente, la reconstrucción de la serie $h(t)$ de la estación B, durante el intervalo de interrupción $m+1 \leq t \leq p$,

utiliza los coeficientes de la función de transferencia $G(Z)$ obtenidos para el intervalo $0 \leq t \leq m$ y la serie $f(t)$ para el intervalo $m+1 \leq t \leq p$, efectuando la convolución entre ellas.

Este método permitió la reconstrucción de las partes faltantes de las series interrumpidas, obteniéndose así registros completos en cada una de las cinco estaciones mareográficas.

El error probable para las alturas de marea extrapoladas fue calculado en ± 0.034 m y se obtuvo usando una función de transferencia de 35 coeficientes (Monreal Gómez, 1980).

Alturas de marea en cada segmento de la Bahía

Las series de alturas de marea en cada uno de los segmentos se reconstruyeron con base en el retardo de la onda de marea entre estaciones adyacentes y en la velocidad de fase en cada segmento.

El retardo de la onda de marea entre pares de estaciones mareográficas se obtuvo utilizando la función de correlación cruzada (e.g. Bendat y Piersol, 1971; Tolstoy, 1973):

$$R_{fh}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) h(t + \tau) dt \quad (5)$$

donde τ es el retardo de la onda entre una estación A y otra B, y $f(t)$ y $h(t+\tau)$ son las series de alturas de marea en las estaciones A y B respectivamente. La función de correlación cruzada se calculó con un número de intervalos r que va de $-170 \leq r \leq 170$. La Tabla I muestra los retardos de la onda de marea entre estaciones adyacentes, los cuales son del orden de minutos.

Tabla 1

Retardo de la onda de marea entre pares de estaciones mareográficas.

Estaciones correlacionadas	Retardo (minutos)
Boca (Segmento 2)	Pedregal (Segmento 11) 36
Boca (Segmento 2)	M. Viejo (Segmento 15) 48
Pedregal (Segmento 11)	M. Viejo (Segmento 15) 12
M. Viejo (Segmento 15)	Cabeza (Segmento 16) 24
Boca (Segmento 2)	Mina Vieja (Segmento 5) 48

Finalmente, las series de elevaciones de la marea en cada uno de los i ($i=1, 2, \dots, 16$) segmentos en los que se dividió la bahía fueron construidas con base en el retardo de la onda de marea entre estaciones adyacentes y en su velocidad de fase ($c_i = \sqrt{gh_i}$) en cada segmento. La onda de marea en el segmento i tardará, para ir al segmento $i + 1$,

$$\tau_{i-(i+1)} = \frac{X_{i+1} - X_i}{c_i} \quad (6)$$

donde $X_{i+1} - X_i$ es la distancia entre los mareógrafos $i+1, i$.

Los datos de alturas de marea obtenidos como se explicó anteriormente, son alturas de marea total. En estas series se encuentran mezclados los efectos astronómicos, meteorológicos y locales. Estos últimos pueden ser debidos a densidad, topografía, etcétera, por lo que estas series contienen componentes de varias frecuencias.

Para separar cada una de las componentes involucradas se aplicó un filtro de Doodson, el cual permite separar las alturas de las componentes armónicas de tipo diurno, semidiurno y los armónicos resultantes de la distorsión por propagación en aguas superficiales. De la aplicación de este filtro se obtuvieron las variaciones de marea no-astronómica, que contienen las variaciones meteorológicas y por densidad. Las frecuencias que se separaron son la predominante del viento, que en este caso correspondió a un período de 6 horas (Del Valle Lucero, 1979), y las debidas a diferencias de densidad, para luego, por sustracción, obtener la marea astronómica, en cada segmento, cada hora, para todo el mes de julio.

MODELOS DE DESCARGAS Y CORRIENTES DE MAREA

Las descargas y velocidades instantáneas producidas por la marea fueron calculadas mediante un modelo unidimensional de conservación de masa, y comparadas con los datos obtenidos de los correntómetros.

La ecuación de continuidad o de conservación de masa para un flujo no-estacionario se escribe como (Henderson, 1966):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{dy}{dt} = 0 \quad (7)$$

donde: $Q = uA$ es la descarga a través de la sección de área transversal A del segmento, u es la velocidad media seccional de la corriente, B es el ancho superficial del segmento, y es la profundidad de flujo y x es el eje coordenado a lo largo del canal principal con origen en la boca de la bahía. La ecuación (7) fue aplicada a cada uno de los segmentos de la bahía.

Integrando (7) a lo largo del eje x entre los límites de cada segmento y suponiendo que el nivel del agua sube simultáneamente en todo el segmento, se llega a

$$\Delta Q = - B \Delta x \frac{dy}{dt} \quad (8)$$

donde $B \Delta x$ es el área superficial del segmento y dy/dt es el cambio en la altura de marea.

La ecuación (8) fue resuelta para cada segmento usando la aproximación en diferencias finitas hacia atrás (Von Rosenberg, 1969):

$$Q_{j-i} = Q_j + (B\Delta x) \frac{dy}{dt} \quad (9)$$

Se consideró la impermeabilidad en ambas cabezas de la bahía; es decir, no existe flujo en los extremos de los segmentos 7 y 16 (figura 1). De acuerdo con la ecuación discretizada (9), ello produce las condiciones de frontera:

$$Q_7 = (B \frac{dy}{dt} \Delta x)_7 \quad Q_{16} = (B \frac{dy}{dt} \Delta x)_{16} \quad (10)$$

La integración espacial de la ecuación (9) con las condiciones de frontera (10) se realizó a partir de la cabeza de cada rama, hasta la región común de ambas ramas; es decir, j decrece desde 16 hasta 9 en Bahía San Simón y desde 7 hasta 5 en Bahía Falsa. En la región común $j = 4$ la descarga se calculó de la siguiente manera:

$$Q_3 = Q_4 + Q_8 + (B \frac{dy}{dt} D x)_3 \quad (11)$$

La ecuación (9) es aplicada finalmente al segmento 2, ya que el segmento 1 está fuera del área de estudio, pues corresponde a mar abierto.

De la carta batimétrica realizada por la Dirección General de Obras Marítimas de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes se estimó el área transversal A en cada sección, mediante interpolaciones, lo que permitió calcular la velocidad para cada segmento:

$$v_i = \frac{Q_i}{A_i} \quad ; \quad i = 2, 3, \dots, 16 \quad (12)$$

RESULTADOS Y DISCUSIONES

La parte de la serie de altura de marea reconstruida mediante la transformada Z para la estación 'Pedregal' conserva la forma de la envolvente de la parte registrada (figura 2).

Las correlaciones cruzadas dan información acerca del retardo de la onda de marea entre pares de estaciones, siendo éste del orden de minutos. El retardo existente entre las series de tiempo de alturas de marea total en las cinco estaciones mareográficas se muestra en la Tabla 1. La onda de marea en la bahía se comporta como una onda de agua somera, cuya velocidad de propagación depende de la pro-

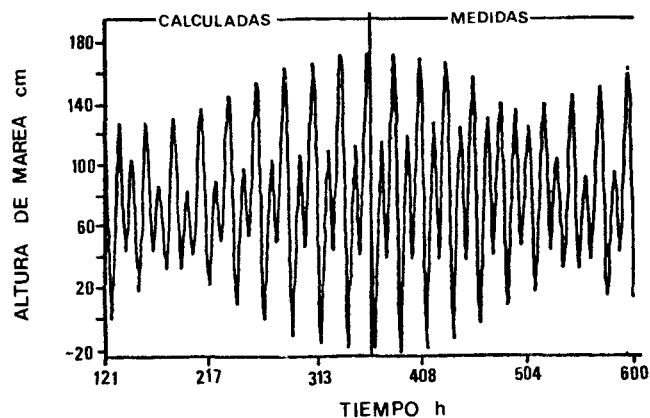


Fig. 2. Alturas de marea calculadas y medidas en la estación 'Pedregal' del 6 al 25 de julio.

fundidad en la cual se propaga. Aun cuando las distancias entre las estaciones 'Boca' y 'Mina Vieja' y entre 'Boca' y 'Molino Viejo' son diferentes, el retardo de la onda es el mismo. Así, la onda de marea se propaga más lentamente en Bahía Falsa que en Bahía San Simón, por ser menor la profundidad media en la primera. Entre las estaciones mareográficas 'Boca' y 'Pedregal' la profundidad es mayor que en el resto de la zona en estudio; en este caso se esperaría un retardo menor. El retardo de 36 minutos puede deberse a efectos de fricción al dividirse el flujo y cambiar de rumbo en la zona de separación entre ambas ramas.

El filtrado de alturas de marea total, para separar la altura de la marea astronómica de la no-astronómica, muestra que los efectos no-astronómicos generados por esfuerzos de viento, variaciones de presión atmosférica y gradientes de densidad en el agua, son relativamente mayores cerca de la cabeza de Bahía San Simón que en otras áreas de la zona en estudio (figuras 3, 4 y 5). La marea astronómica es dominante a lo largo de toda la bahía.

Las velocidades producidas por la marea astronómica, obtenidas mediante el modelo de descargas y utilizando las series reconstruidas de altura de marea muestran un decaimiento conforme se adentra a la bahía (figuras 6 y 7). Las velocidades calculadas son muy similares a las registradas por los correntómetros, existiendo diferencias máximas de 10% entre los valores observados y los calculados (figura 8).

Las velocidades inducidas por efectos no-astronómicos (figura 9) son mucho menores que las producidas por efectos astronómicos, observándose el mismo efecto de disminución conforme se introduce en la bahía.

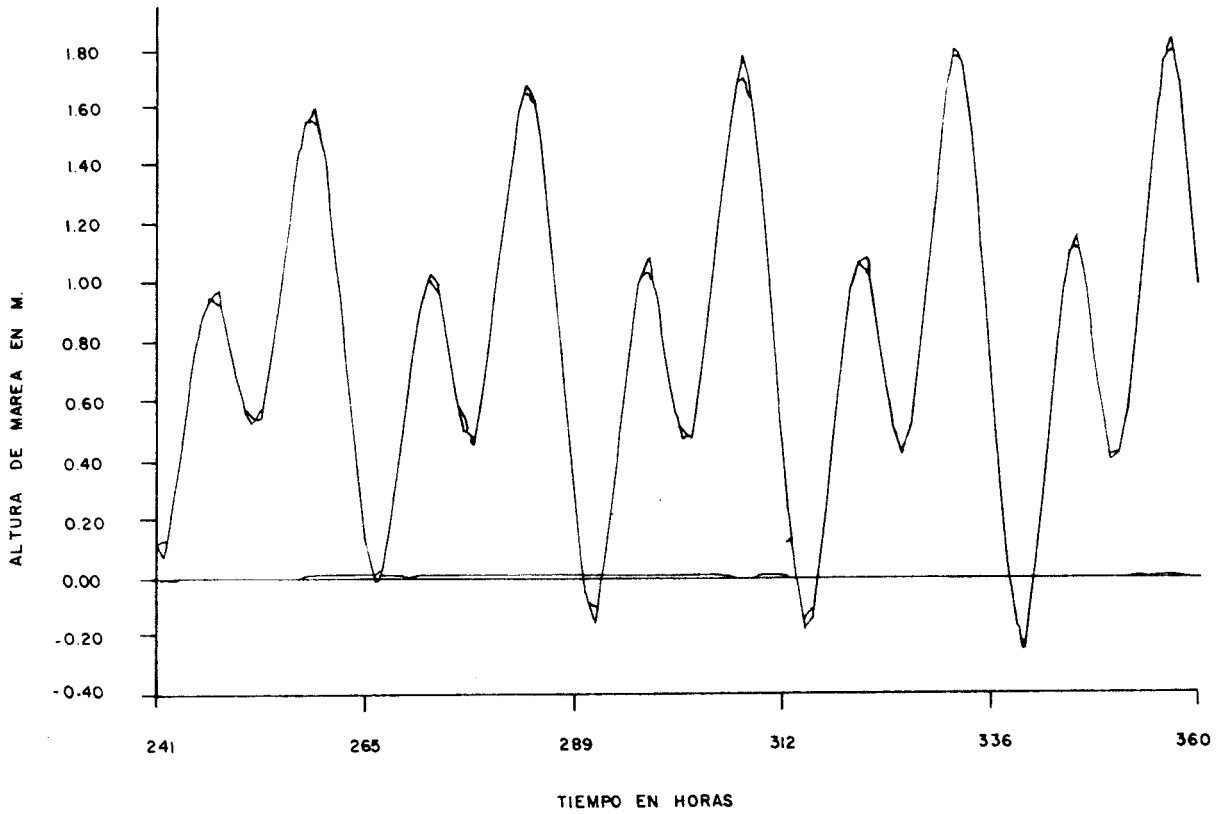


Fig. 3. Alturas de marea total, astronómica y no-astronómica del 11 al 16 de julio cerca de la boca (segmento 2).

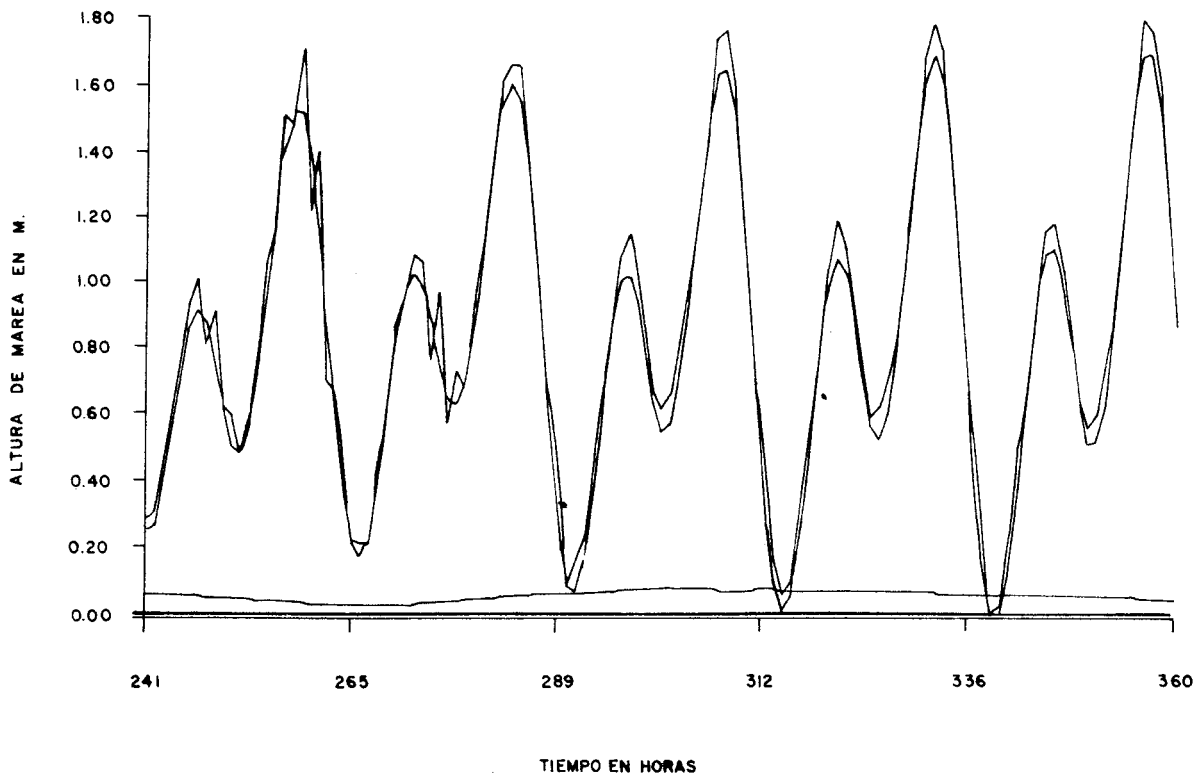


Fig. 4. Alturas de marea total, astronómica y no-astronómica en Bahía San Simón para el segmento 14, del 11 al 16 de julio.

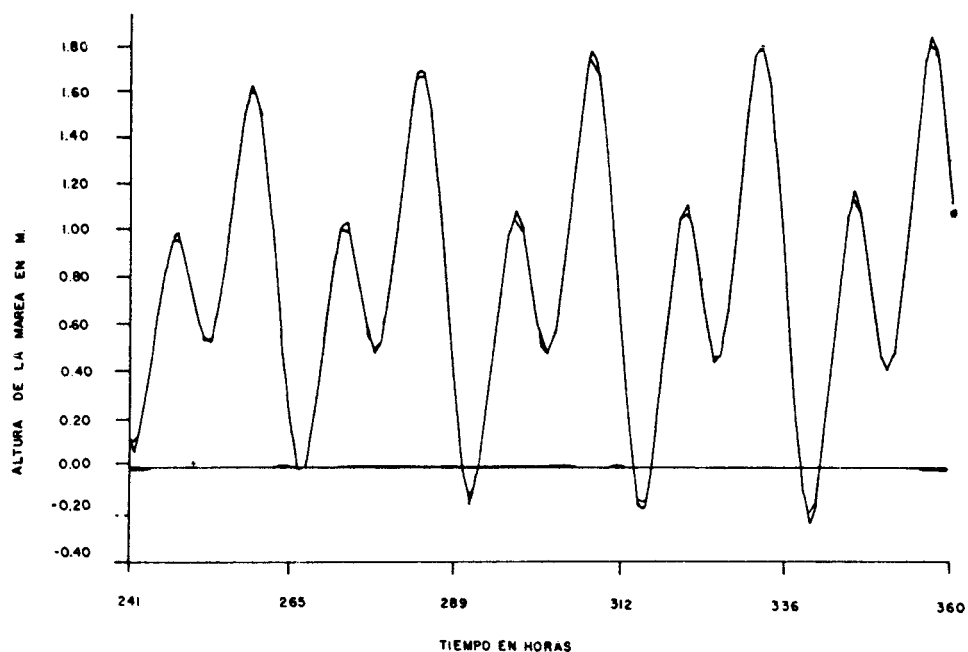


Fig. 5. Alturas de marea total, astronómica y no-astronómica en Bahía Falsa para el segmento 6, del 11 al 16 de julio.

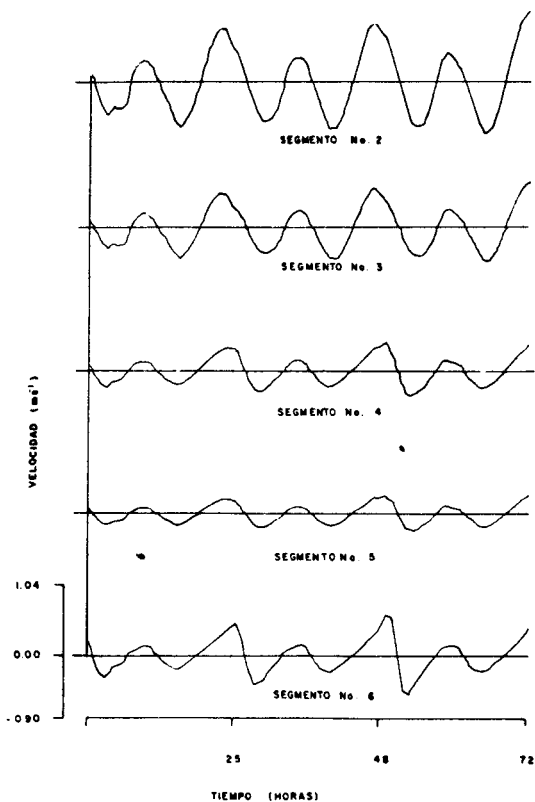


Fig. 6. Velocidades de la corriente debida a efectos de marea astronómica en regiones cercanas a la boca y en algunos segmentos de Bahía Falsa, del 11 al 13 de julio.

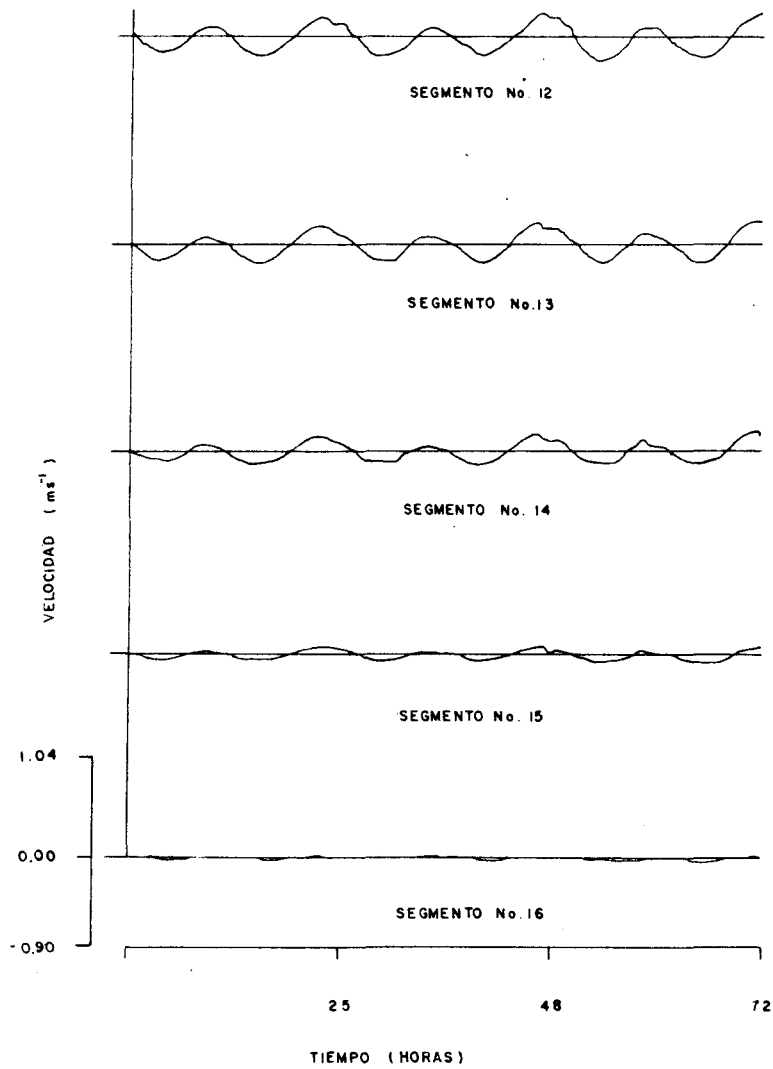


Fig. 7. Velocidades de la corriente debida a efectos de marea astronómica en el interior de Bahía San Simón, del 11 al 13 de julio.

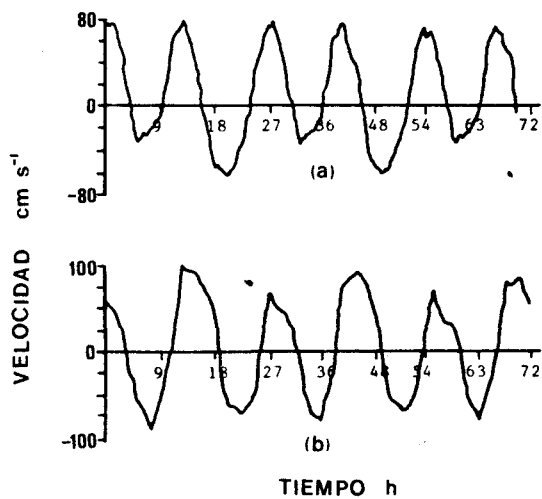


Fig. 8. Velocidad de la corriente, del 17 al 20 de julio:

a) Registradas por el correntómetro cercano a la boca. b) Calculadas por el modelo unidimensional para el segmento 2.

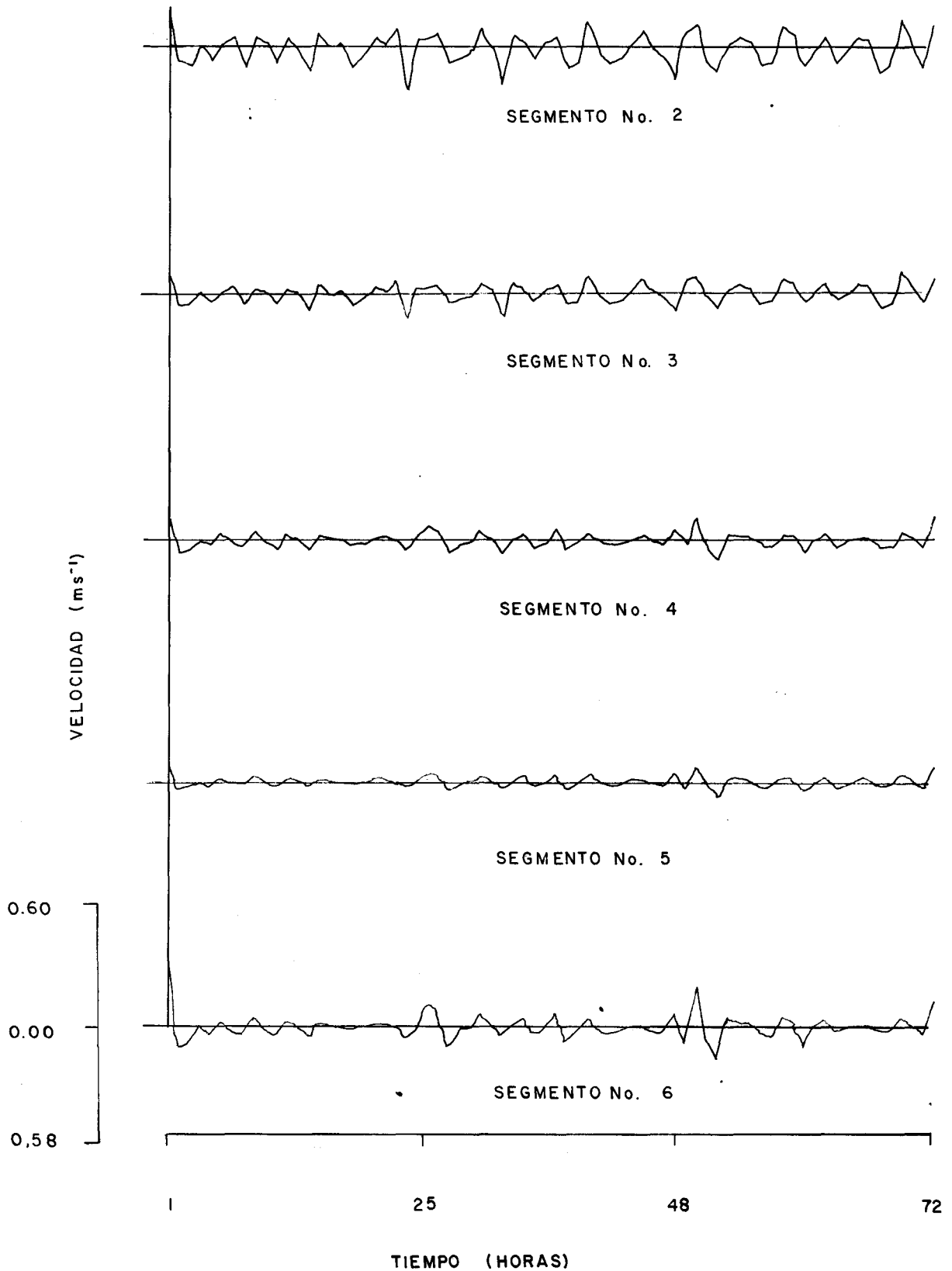


Fig. 9. Velocidad de la corriente debida a efectos de marea no-astronómica en regiones cercanas a la boca y en algunos segmentos de Bahía Falsa, del 11 al 13 de julio.

CONCLUSIONES

El modelo unidimensional de propagación de mareas reproduce la situación observada en las corrientes en la bahía con un buen grado de aproximación, sugiriendo que la circulación principal se efectúa a lo largo de los canales que forman el eje de las bahías.

La hidrodinámica en la bahía es básicamente el resultado de dos factores: la marea astronómica y el efecto del viento. La marea astronómica domina la circulación en ambos brazos de la bahía; sin embargo, el efecto del viento es notorio en regiones cercanas a la boca de Bahía Falsa y en las zonas próximas a la cabeza en Bahía San Simón durante el período de muestreo.

Las velocidades calculadas de la corriente obtenidas por medio del modelo de descargas son muy similares a las registradas con los correntómetros (10% de diferencia máxima). Las alturas de la marea no-astronómica son relativamente mayores en la cabeza de Bahía San Simón que cerca de la boca; sin embargo, las corrientes producidas por estos efectos no varían de la misma manera. Esto se debe a que la velocidad de la corriente no depende solamente del volumen transportado, sino también de la topografía y del cambio de volumen respecto al tiempo. La periodicidad de las velocidades de las corrientes producidas por efectos no-astronómicos corresponden a la periodicidad de los procesos que las inducen.

La aplicación de la transformada Z permite obtener una predicción aceptable de la altura de marea para cualquier segmento en Bahía San Quintín. La utilidad de dicho método es evidente para series temporales y puede resultar valiosa su aplicación también para otros parámetros.

BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ-BORREGO, S., G. BALLESTEROS GRIMALVA y A. CHEE BARRAGAN, 1975. Estudio de algunas variables físico-químicas superficiales en Bahía San Quintín, en verano, otoño e invierno. *Ciencias Marinas* 2, 2, 1-9.
- ALVAREZ-BORREGO, S., M. DE J. ACOSTA RUIZ y J. R. LARA LARA, 1977. Hidrología comparativa de las dos bocas de dos anti-estuarios de Baja California. *Ciencias Marinas*, 4, 1, 12-22.

BENDAT, J. S. y A. F. PIERSOL, 1971. Random data: Analysis and measurement procedures. Wiley-Interscience, New York, 407 pp.

CLAERBUT, J. F., 1976. Fundamentals of geophysical data processing with applications to petroleum prospecting. McGraw-Hill, 274 pp.

CHAVEZ de NISHIKAWA, A. G. y S. ALVAREZ-BORREGO, 1974. Hidrología de la Bahía de San Quintín, B.C., en invierno y primavera. *Ciencias Marinas* 1, 2, 31-61.

DEL VALLE LUCERO, I., 1979. Aplicación de un modelo numérico y análisis de condiciones hidrodinámicas en Bahía San Quintín, B.C., Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE, 36 pp.

HENDERSON, F. M., 1966. Open channel flow. McMillan Co., New York, 522 pp.

MONREAL GOMEZ, M. A., 1980. Aplicaciones de un modelo de dispersión en Bahía San Quintín, Baja California, México. Tesis de Maestría en Oceanografía. CICESE.

VON ROSENBERG, D. U., 1969. Methods for the numerical solution of partial differential equations. American Elsevier Publishing Company, 128 pp.

TOLSTOY, I., 1973. Wave propagation. McGraw-Hill International series in the earth and planetary sciences, 466 pp.

ZERTUCHE GONZALEZ, J. A. y S. ALVAREZ-BORREGO, 1978. Series de tiempo de variables físico-químicas en las bocas de anti-estuarios de Baja California. *Ciencias Marinas*, 5, 1, 91-103.

M. A. Monreal G. y D. A. Salas de León,
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM,
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria,
México, D. F., 04510, México, D. F., México.