

## APLICACION DE UN MODELO NUMERICO UNIDIMENSIONAL A LA ENSENADA DE LA PAZ, B.C.S.

Por

Eduardo R. Morales G. y Homero R. Cabrera Muro  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior  
de Ensenada, B. C.  
Espinoza No. 843  
Ensenada, Baja California, México.

### RESUMEN

*El conocimiento de la circulación en las lagunas costeras es primordial en la utilización de estos cuerpos de agua. Utilizando resultados de mediciones de corrientes, mareas, viento y en cierta extensión trazadores fluorescentes, se conceptualizó un patrón de circulación para la Ensenada de la Paz, Baja California Sur. Este patrón se sugiere actuante sólo durante el período de observaciones. Con base a esta circulación se esquematizó la ensenada, y se aplicó un modelo numérico unidimensional que reprodujera la circulación propuesta. La circulación observada se mostró conformada esencialmente por la marea y la batimetría de esta cuenca. Los resultados obtenidos del modelo se mostraron también sensitivos a estos factores y en términos promedio sí reproducen el patrón de circulación propuesto.*

### ABSTRACT

*Understanding of the circulation patterns in coastal lagoons is fundamental to their proper management. Circulation of Ensenada de La Paz, Baja California Sur, has been determined from observations of currents, tides, winds and to some extent fluorescent tracer measurements. The pattern obtained may act only during the period of observations (November 1980 and April 1981).*

*To examine further this pattern the lagoon was divided into segments and a numerical unidimensional model applied with which to reproduce the circulation. The circulation is produced principally by tides and the bathymetry of the basin. Results from the model are sensitive also to these variables and reproduce the general circulation pattern suggested.*

## INTRODUCCION

El conocimiento de los procesos de circulación en las lagunas costeras es de importancia en el desarrollo de la Acuicultura y de otras actividades económicas en estos cuerpos de agua. Con ese propósito se desarrolló un programa intensivo de mediciones de variables hidrodinámicas y meteorológicas en la Ensenada de La Paz, Baja California Sur, incluyó un experimento de dispersión con un trazador fluorescente (Rodamina WT).

El presente trabajo expone un posible patrón de circulación como resultado de las observaciones de corrientes y mareas en este cuerpo de agua y la aplicación de un modelo numérico unidimensional que reprodujera esta conceptualización. Los resultados de este estudio son aplicables a la mejor ubicación de las zonas de cultivo y extensivo a problemas de contaminación.

## ANTECEDENTES

La Ensenada de La Paz, B.C.S., se localiza al sureste de la Bahía de La Paz, B.C.S.,  $124^{\circ}06'$ ,  $124^{\circ}10'$  N y  $110^{\circ}19'$ ,  $110^{\circ}25'$  W (Fig. 1). Es una cuenca de aproximadamente  $45 \text{ km}^2$  al nivel medio del mar (N.M.M.) y en su región noreste presenta un par de canales paralelos que forman la boca de la laguna, con profundidades de 10 metros. Existe un canal principal por el centro de la laguna que disminuye su profundidad a 4 m en su región más interna. En esta zona, en los extremos noroeste y suroeste, se observan dos cuencas profundas y el resto de la laguna es somero.

En la región se observa un máximo de radiación efectiva a fines de verano y un mínimo a principios de invierno. El régimen de lluvias es en verano con un máximo en septiembre. Los vientos dominantes durante marzo-agosto son del sur y de octubre a febrero del noreste.

Los aspectos biológicos-pesqueros, químicos y de contaminación en esta laguna, han sido estudiados por diversos autores. El Centro de Investigaciones Biológicas (1975, 1977) y el Centro de Estudios de Aguas Litorales (1978) presentan una lista bastante extensa de ellos.

## METODO

Durante los meses de noviembre de 1980 a abril de 1981, se realizaron mediciones de marea, corrientes, temperatura, salinidad y variables meteorológicas (Tabla 1). Además se efectuó un experimento de detección de un trazador fluorescente. El procesamiento y resultados completos de esta investigación se presenta en el trabajo titulado: "Mareas y Corrientes de la Ensenada de La Paz, B.C.S.", Eduardo Morales G., Tesis de Licenciatura, 1982. Escuela Superior de Ciencias Marinas.

Aquí sólo se presenta la información correspondiente a la magnitud y dirección de la corriente en cinco puntos de la bahía. De acuerdo a esta información y a la batimetría, se conceptualizó un sistema de circulación actuante durante el intervalo de estudio. Posteriormente, fundamentados en ese sistema de circulación se aplicó un modelo unidimensional que reprodujera el sistema propuesto.

## CIRCULACION OBSERVADA

La corriente en la Estación A1, mostró magnitudes mayores durante el reflujo y en la Estación A2 durante el flujo, (Figs. 2 y 3). Esto nos sugiere una cierta preferencia de circulación en la corriente al entrar por el canal de la Estación A2 y al salir por el canal de la Estación A1. En la Estación D1, observamos direcciones de circulación consistentes con la batimetría del canal en ese lugar, pero muestran también magnitudes mayores en llenante que en vaciante. Esta diferencia nos sugiere un sentido de salida diferente actuando sobre cierta porción del volumen de agua que entró por esta estación (Fig. 4).

En las estaciones E y G (Figs. 5 y 6), las corrientes mostraron cambios continuos de dirección durante cada ciclo de marea. En la Estación G, las direcciones cambiaron lentamente en sentido de las manecillas del reloj, dando un giro completo en un ciclo de marea. La Estación E mostró el mismo fenómeno, pero en sentido de giro opuesto al anterior. Durante el segundo período de observaciones se introdujo en forma instantánea un trazador fluorescente (Rodamina WT), en la parte sur y más somera de la laguna. La fluorescencia de este trazador nos sugiere una corriente persistente durante el flujo y reflujo, de oeste a este, en esta zona de la bahía. La circulación resultante propuesta para el período de observaciones puede ser resumida (Fig. 7) como sigue: durante el llenante se observan dos flujos que se funden en uno frente a CICIMAR. Posteriormente, una ramificación sale a la izquierda y se dirige hacia el sur de la laguna. La corriente remanente en el canal principal continúa hacia adentro y frente al Comitán forma un giro a la izquierda, internándose también en la región sur de la ensenada. Finalmente, un tercer flujo se dirige hacia el noroeste, frente al Estero Zacatecas.

Durante el reflujo se presenta una sola dirección de salida (Fig. 8). El flujo oeste-este presenta una circulación por la parte sur de la ensenada y otra por el canal principal. Estos flujos se juntan antes de la boca para salir por los canales ahí existentes.

## ESQUEMATIZACION DE LA ENSENADA

De acuerdo a este patrón de circulación, se esquematizó la laguna en once segmentos (Fig. 9). Mediante planimetría se encontró que entre pleamar media superior y bajamar media inferior, se evacúan 31,000,000 de metros cúbicos. Esto representa un 29 o/o del volumen referido a pleamar media superior. El tiempo de

APLICACION DE UN MODELO NUMERICO

**Tabla 1.- Parámetros medidos, instrumentos, períodos y estaciones que se usaron en este estudio.  
Línea (-.-.-.-.) no procesados. Noviembre 80.**

NOVIEMBRE					ESTACION
DIAS					
1	7	14	21	28	
MAREA VERTICAL					
KAHLSICO 310WA440					GUAYCURA
-----					
BRISTOL LG3X628					CICIMAR
-----					
KAHLSICO 310WA440					COMITAN
-----					
CORRIENTES					
ENDECO 174					A
-----					
ENDECO 174					C
-----					
ENDECO 105					E
-----					
ENDECO 105					G
-----					
VEL. Y DIR. DEL VIENTO					
KHALSICO 02AM300					CICIMAR CONCHALITOS
-----					

**Tabla 2.- Parámetros medidos, instrumentos, períodos y estaciones que se usaron en este estudio.  
Línea (-.-.-.-.-) no procesados. Abril-Mayo 81.**

ABRIL – MAYO					ESTACION
DÍAS					
9	15	21	26	1	7
MAREA VERTICAL					
KAHLSICO 310WA440					GUAYCURA
-----					
BRISTOL LG3X628					
-----					CICIMAR
KAHLSICO 310WA440					COMITAN
-----					
CORRIENTES					
ENDECO 105					AIS Y A2S
-----					
ENDECO 174					AIF Y A2F
-----					
ENDECO 105					DI
-----					
VEL. Y DIR. DEL VIENTO					
KHALSICO 02AM300					CICIMAR CONCHALITOS
-----					

APLICACION DE UN MODELO NUMERICO

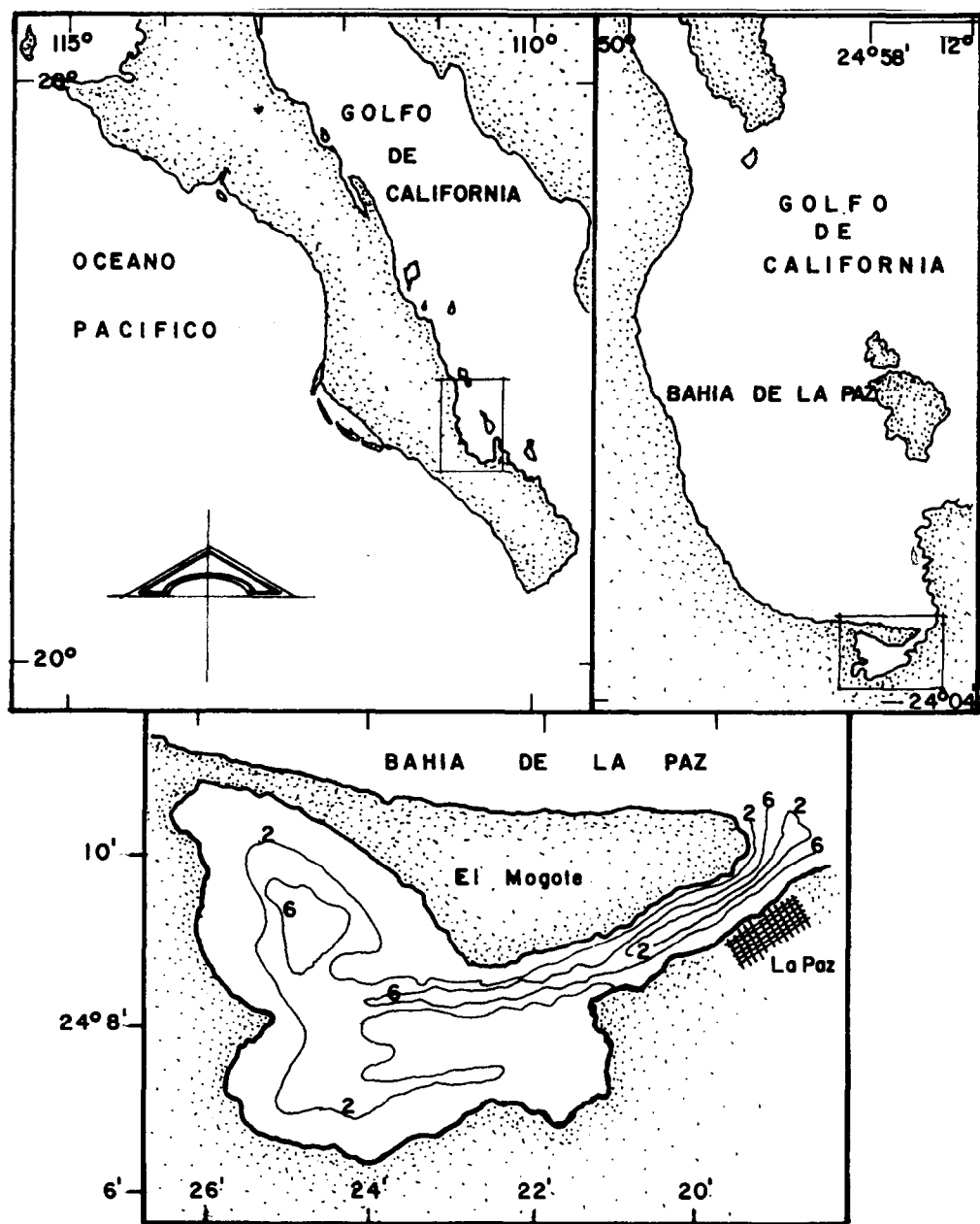


Fig. 1.- Localizacion y batimetría de la Ensenada de La Paz, Baja California Sur

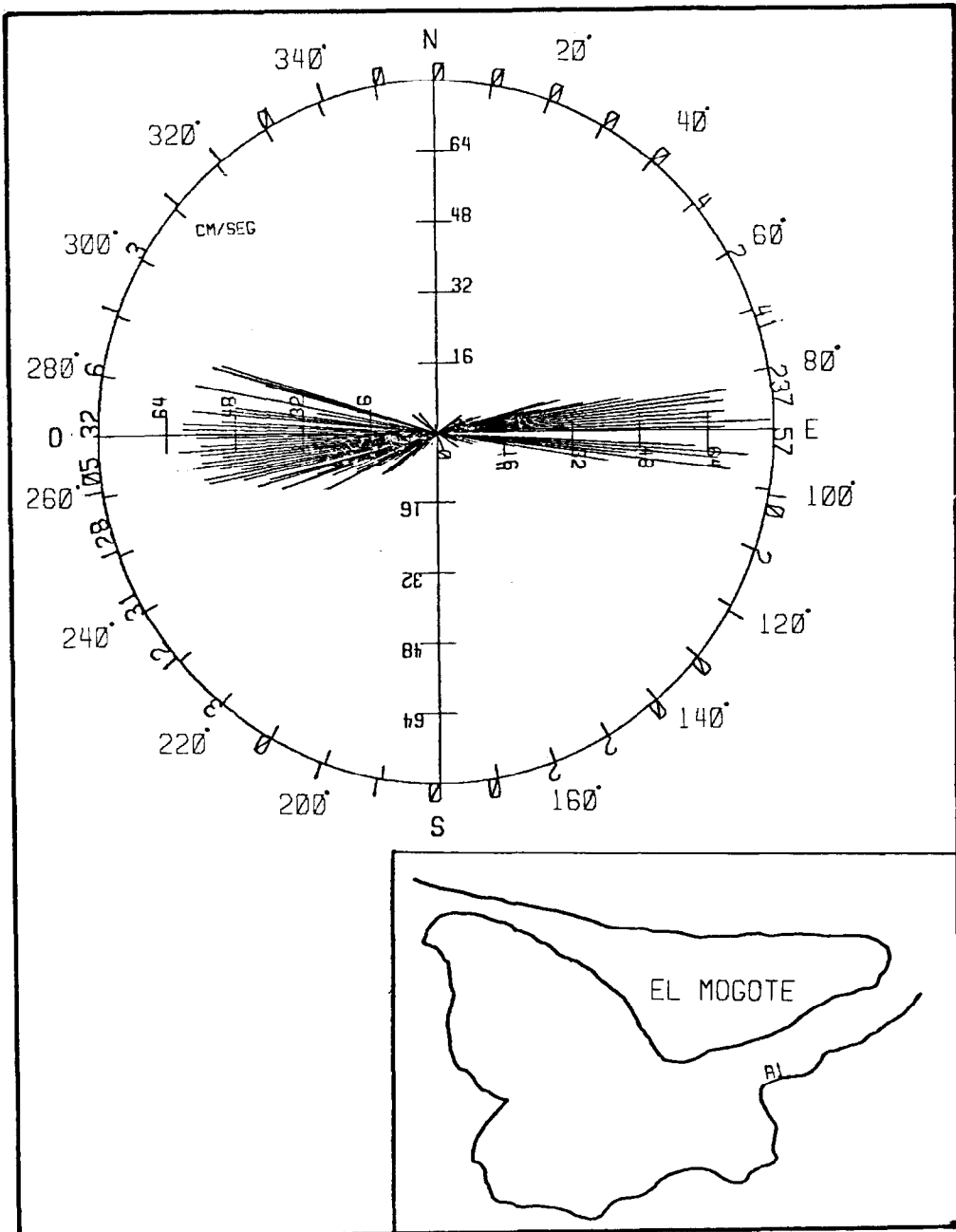


Fig. 2.- Orientación y rapidez de la corriente superficial en la Estación A1. Abril-Mayo 81

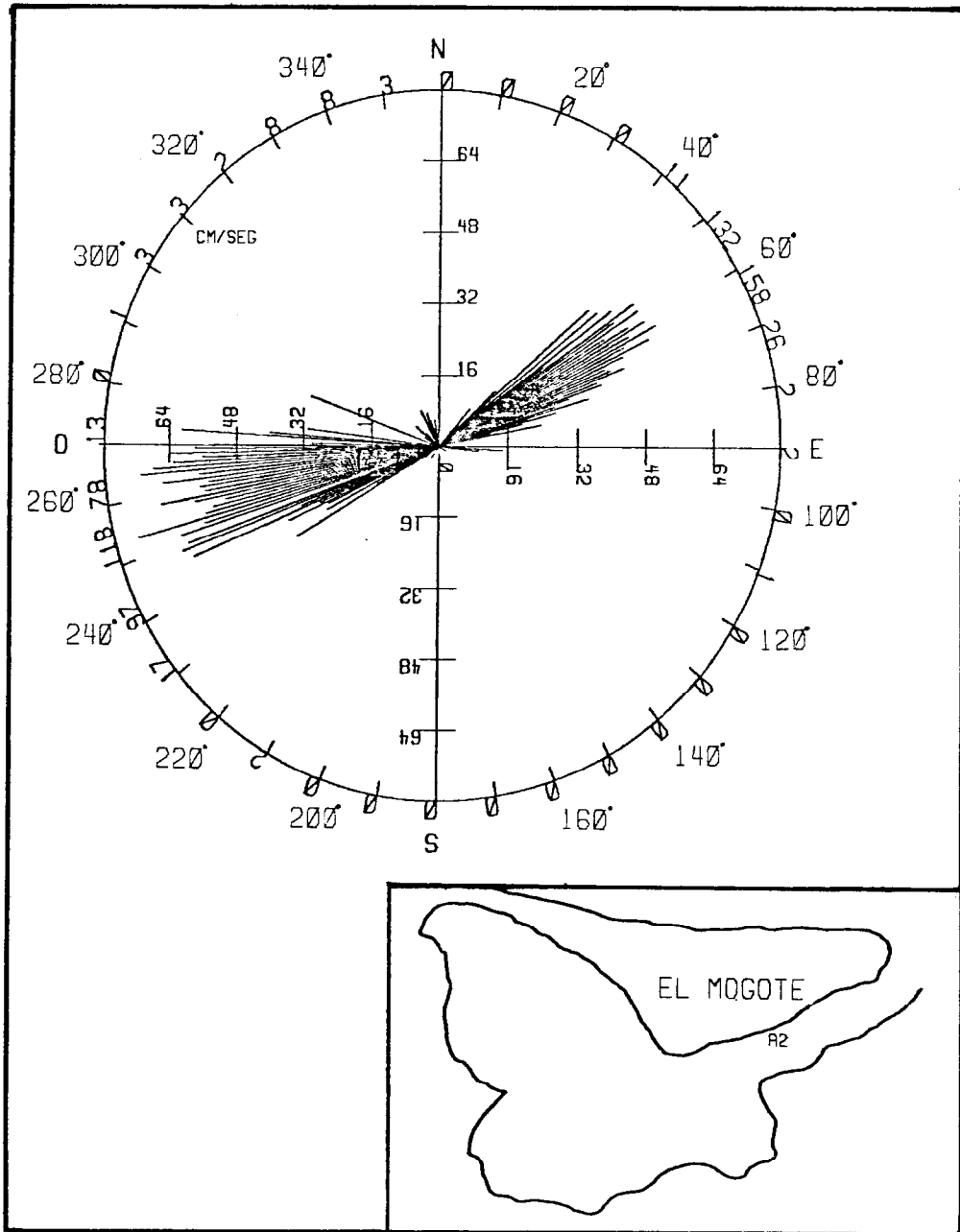


Fig. 3.- Orientación y rapidez de la corriente superficial en la Estación A2. Abril-Mayo 81



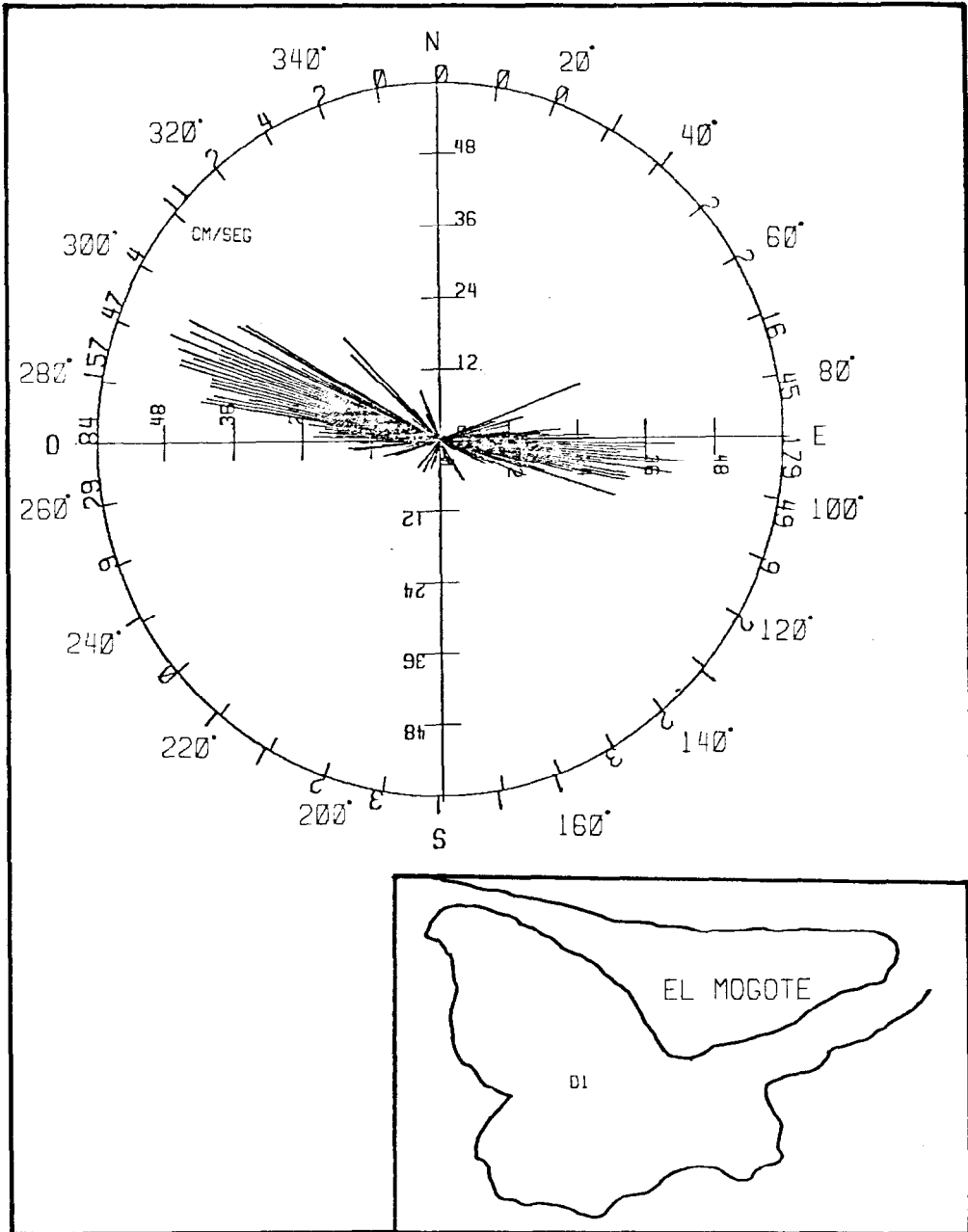


Fig. 4.- Orientación y rapidez de la corriente en la Estación D1. Abril-Mayo 81

APLICACION DE UN MODELO NUMERICO

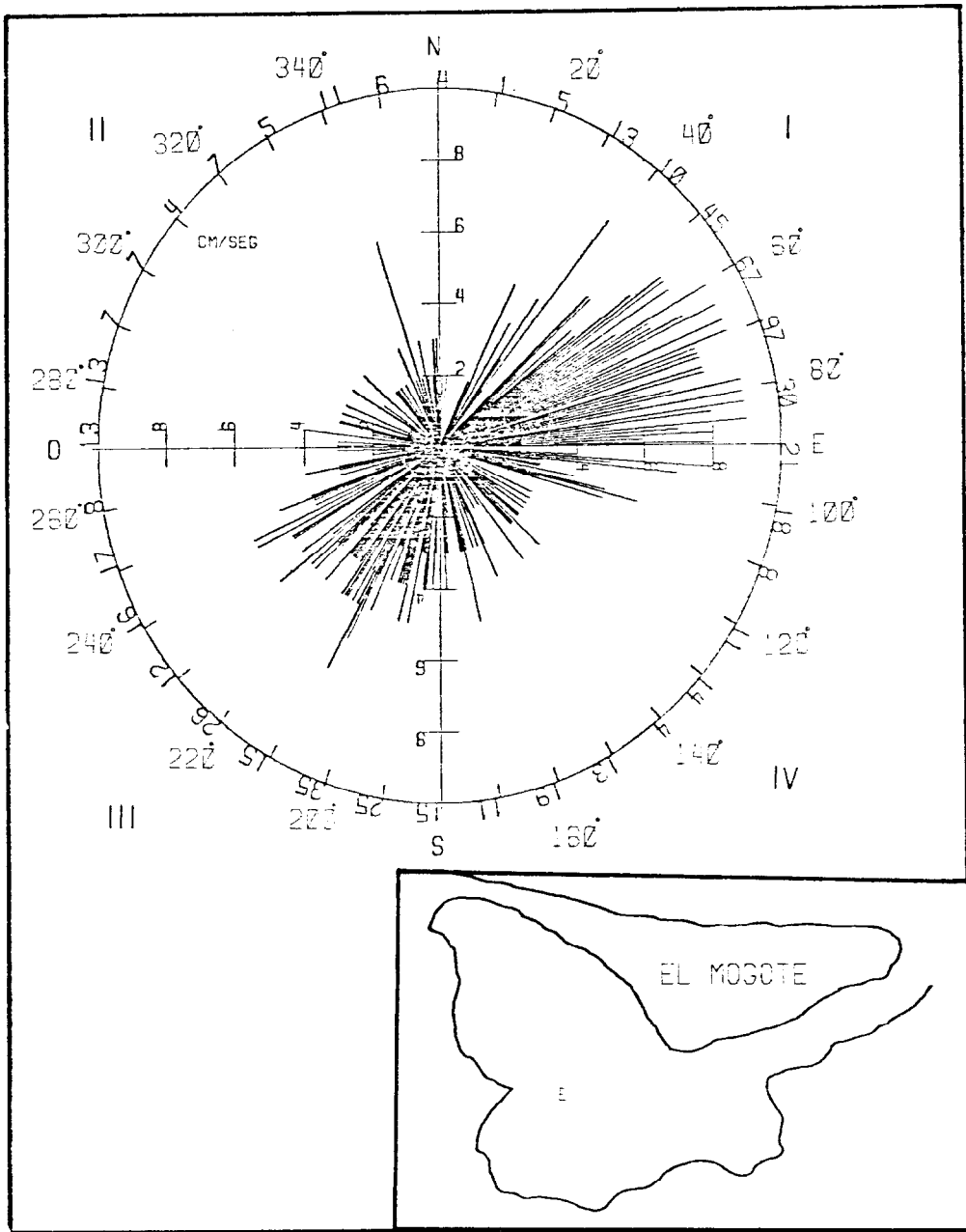


Fig. 5.- Orientación y rapidez de la corriente en la Estación E. Noviembre 1980

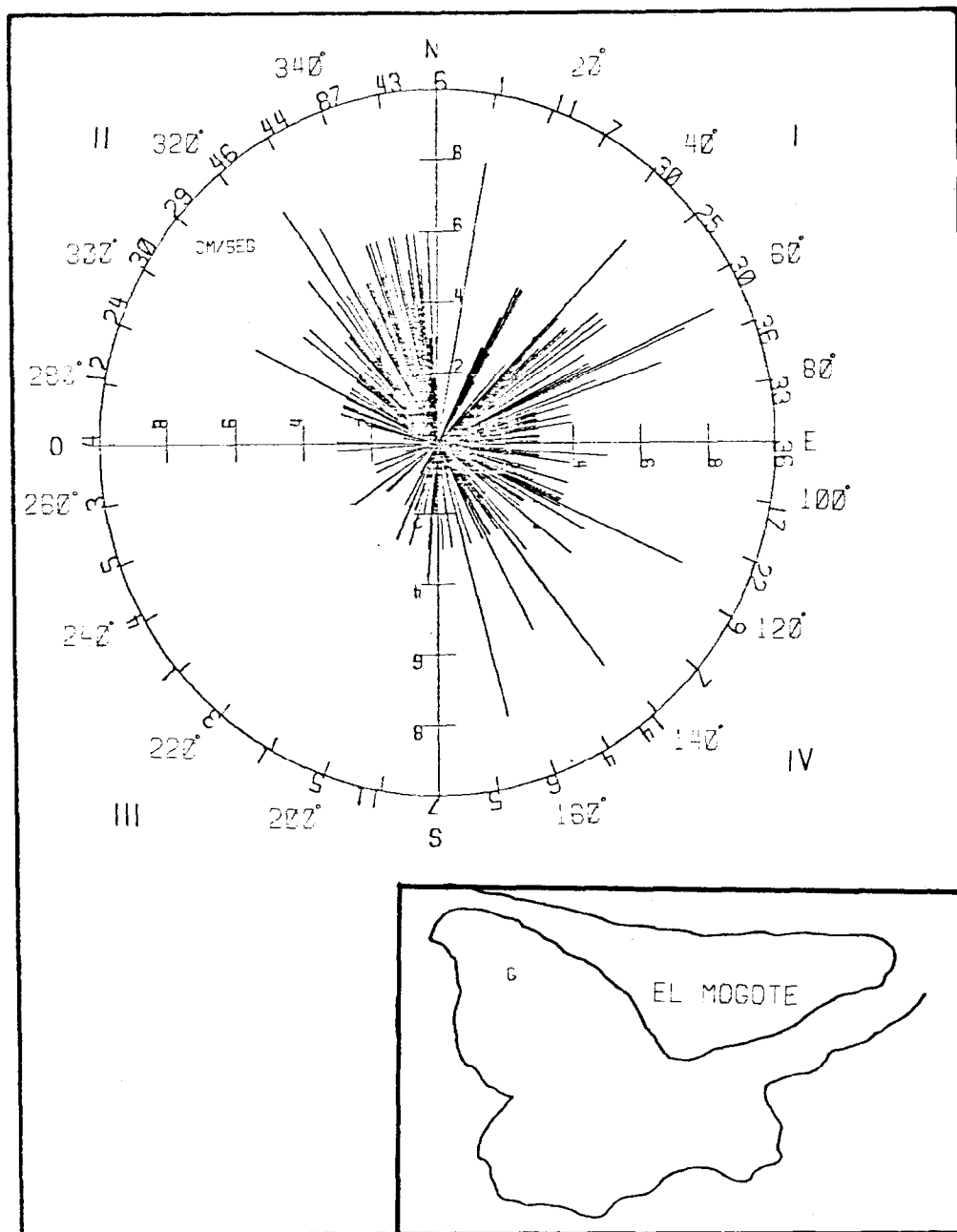


Fig. 6.- Orientación y rapidez de la corriente en la Estación G. Noviembre 1980

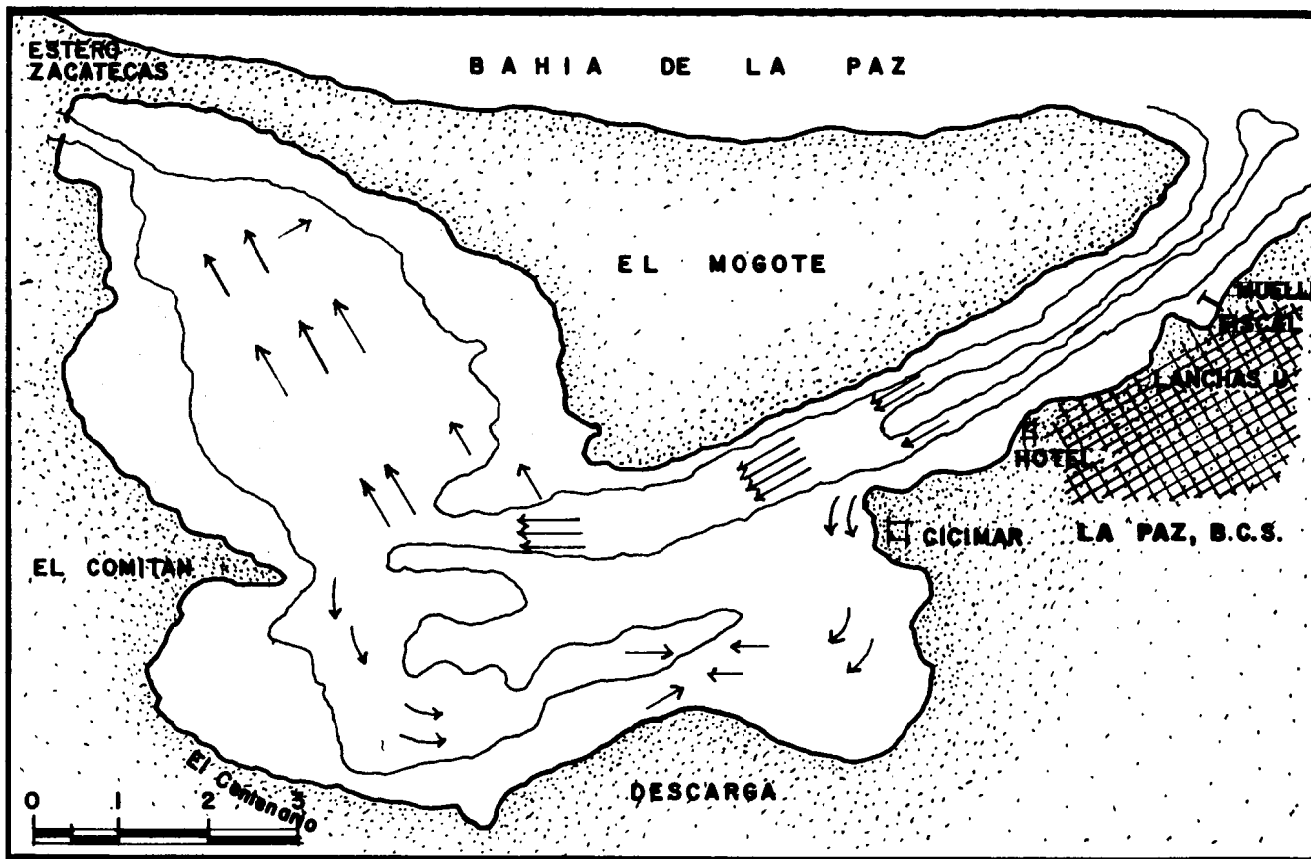


Fig. 7 Orientación de la corriente total en el flujo (los vectores no son a escala)

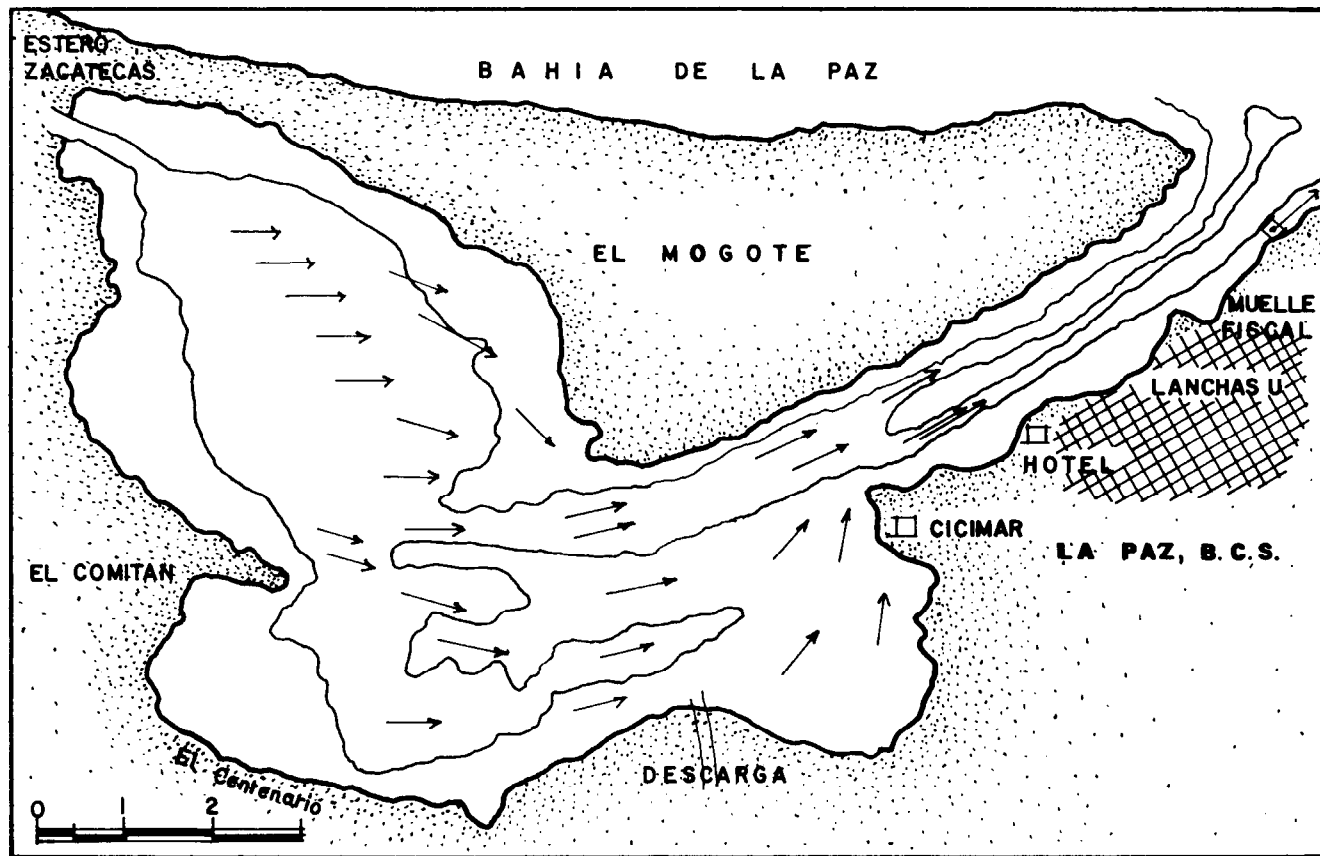


Fig. 8 Orientación de la corriente total en el refluo.  
(los vectores no son a escala)

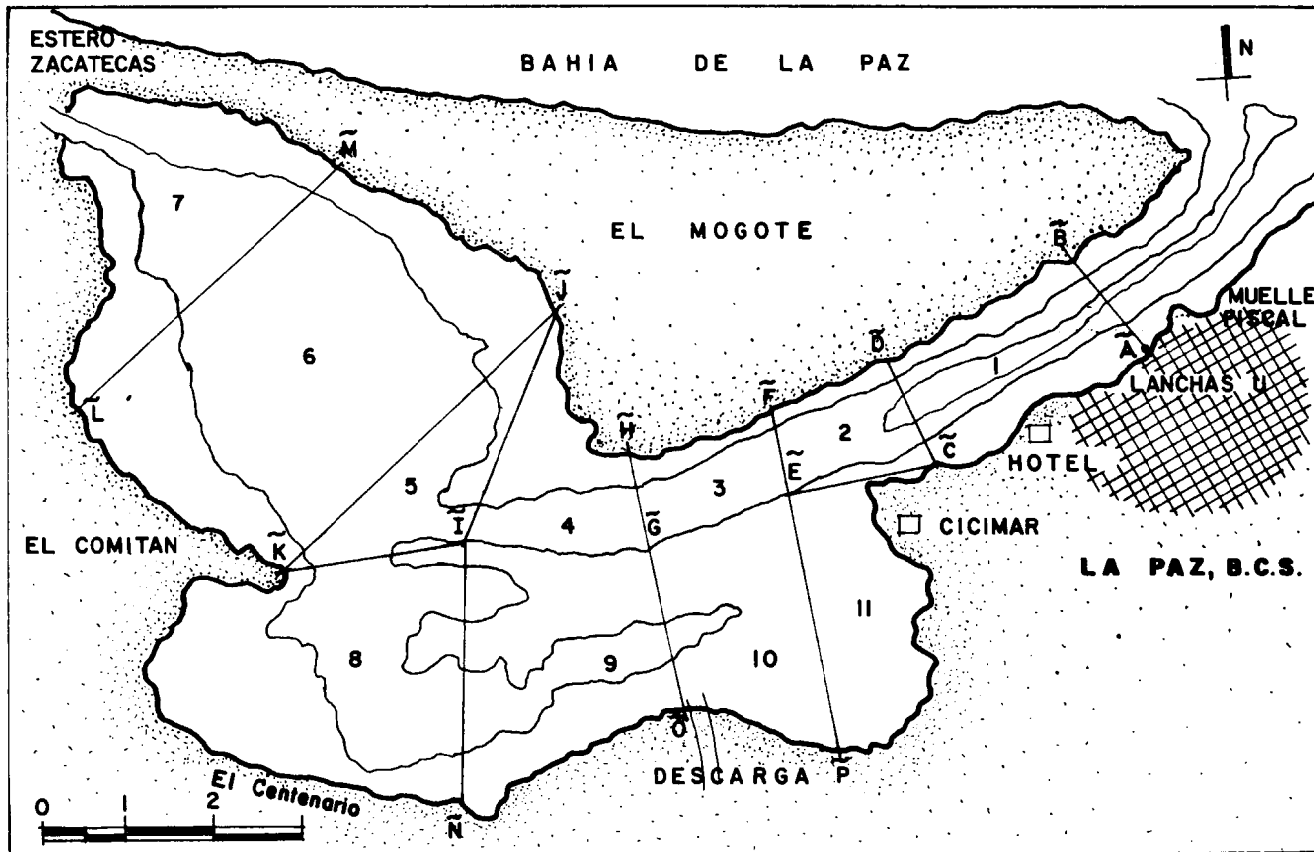


Fig. 9.- Esquematzación de la Laguna. (segmentos y secciones).

evacuado, calculado con el método de prisma de marea (Ketchum, 1951), es de 3.5 ciclos aproximadamente. El valor es bajo debido a que el método supone mezcla completa en cada ciclo de marea y esto ocurre solo parcialmente. También parte del volumen que se desaloja durante el refluo regresa con el flujo siguiente (Dyer, 1973). Sin embargo, el valor es semejante al reportado por el Centro de Estudios de Aguas Litorales en su Informe de Actividades, CEAL, 1978.

## DESCRIPCION DEL MODELO

El principio de continuidad de masa requiere que el flujo en un intervalo de tiempo dado a través de cualquier sección transversal del canal, sea igual a la variación del volumen de agua comprendido entre esa sección y la cabeza de la laguna durante el mismo intervalo de tiempo.

La expresión formal (Henderson, 1966), es como sigue:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + B \frac{\partial Y}{\partial T} = 0 \quad (1)$$

Donde:

- Q = Flujo a través de sección transversal.
- X = Distancia de la sección de la cabeza.
- Y = Altura del agua.
- T = Tiempo.
- B = Ancho promedio del canal.

Su expresión en diferencias finitas:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta X} + B \frac{\Delta Y}{\Delta T} = 0 \quad (2)$$

$$\Delta Q = - (B \Delta X \Delta Y) / \Delta T \quad (3)$$

$$\Delta Q = - \Delta V / \Delta T \quad (4)$$

Donde:

V = Volumen entre la sección y la cabeza y tomamos  $\Delta T = 1$  hora.

$$\Delta Q = -\Delta V \quad (5)$$

Donde:

$Q =$  Es el flujo debido a la marea, que pasa por la sección transversal desde el tiempo  $T_1$  con área  $A_1$ , hasta el tiempo  $T_2$  con área  $A_2$ . Para simplificar tomamos un área promedio entre  $T_1$  y  $T_2$ , y calculamos la velocidad promedio con que pasó ese flujo a través de la sección. Con esto obtenemos una velocidad promedio en tiempo y en espacio.

$$\Delta Q = \bar{U} \bar{A} \quad (6)$$

Donde:

$\bar{U}$ : Velocidad promedio en la sección.  
 $\bar{A}$ : Area promedio de la sección.

Entonces,

$$U = \frac{1}{\bar{A}} (-\Delta V) \quad (7)$$

Donde:

$$\Delta V = \int_{Y_1}^{Y_2} s dy \quad (8)$$

$S =$  superficie de la laguna entre la sección y la cabeza; y

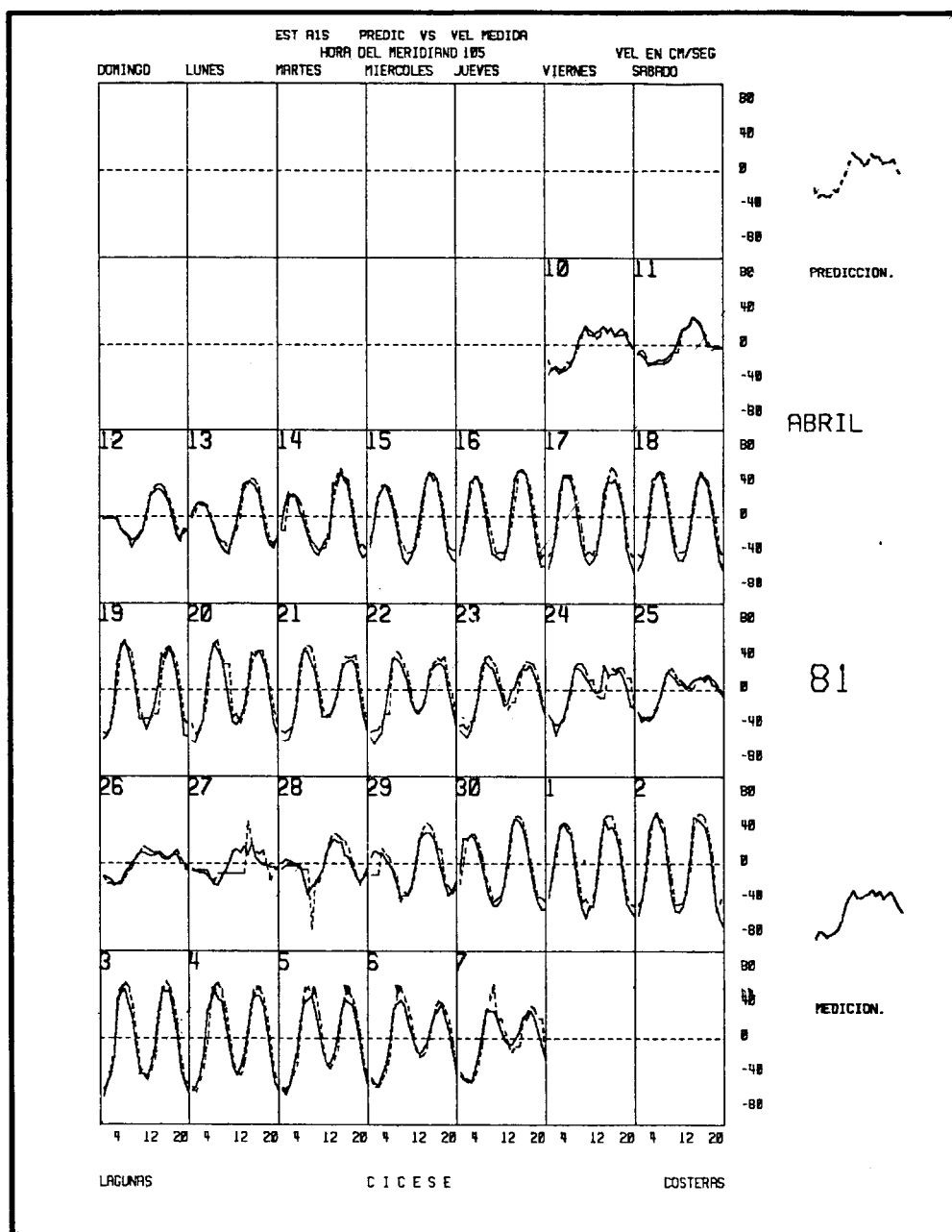
$$\bar{A} = \int_{Y_1}^{Y_2} A dy / \int_{Y_1}^{Y_2} dy \quad (9)$$

El modelo ha sido utilizado anteriormente en esta forma por De la Paz, 1978, y Ocampo, 1980 en el Estero de Punta Banda y San Quintín, respectivamente.

## RESULTADO DEL MODELO

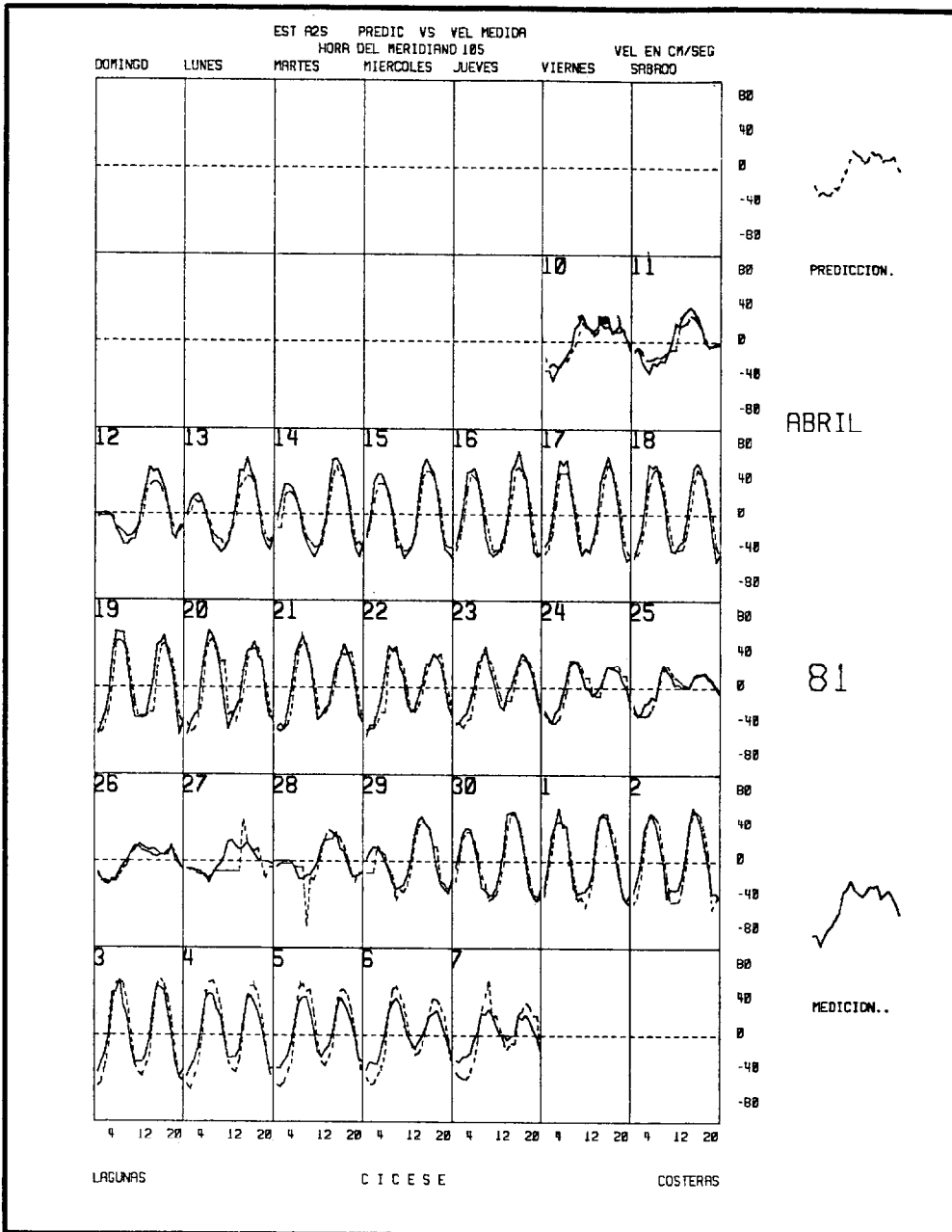
En virtud de contar con mediciones de corrientes confiables sólo en las Estaciones A1S y A2S y D1 del período abril y mayo, se obtuvieron predicciones sólo para estas estaciones. Los registros de las Estaciones E y G, debido a su dispersión en dirección, no son consistentes con el criterio del flujo unidireccional del modelo. Las comparaciones entre las velocidades calculadas y las componentes de las observadas a lo largo del canal se presenten en las figuras 10, 11 y 12.



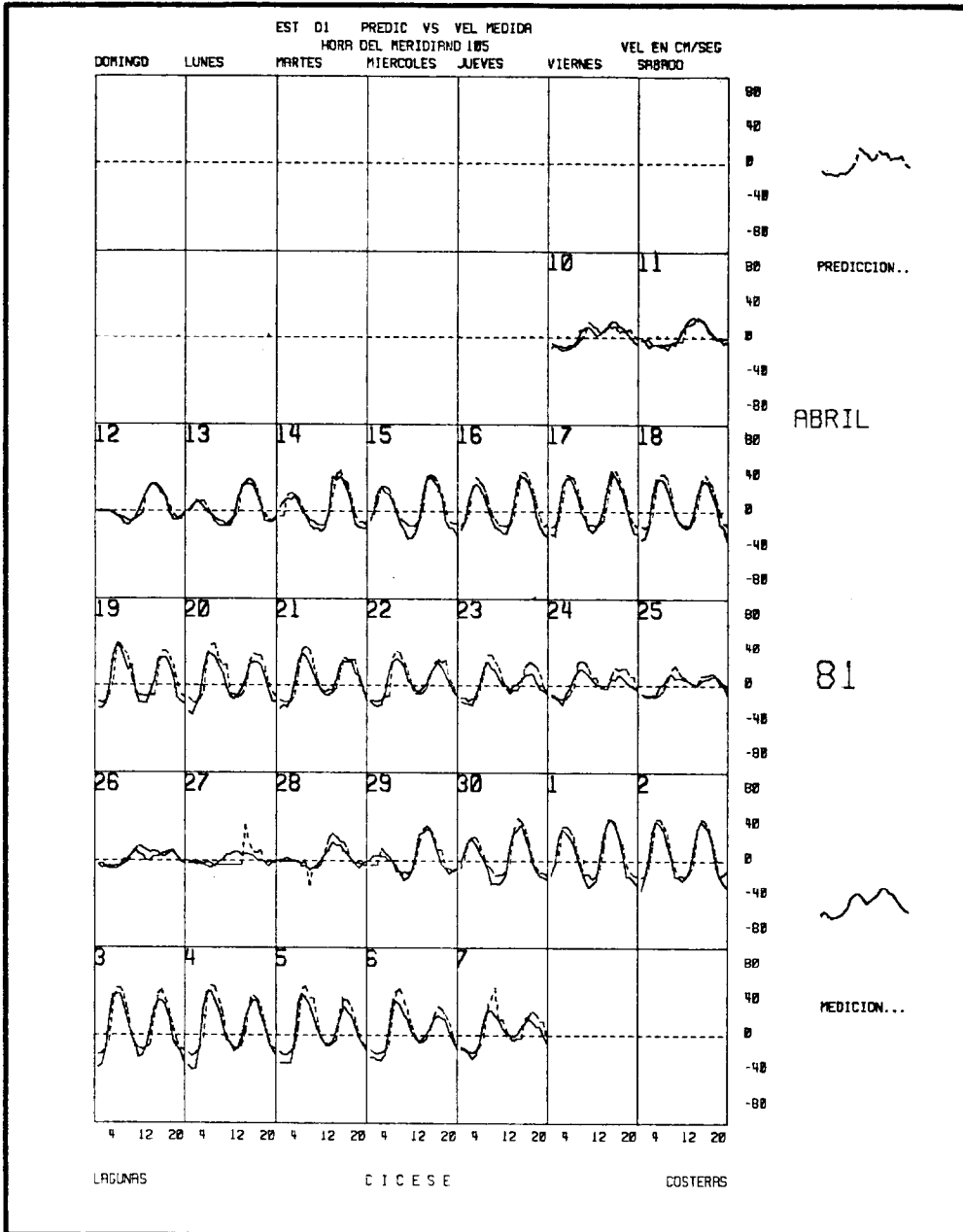


**Fig. 10** Series de tiempo simultáneas de la velocidad de la corriente medida (línea continua) vs. la velocidad predicha (línea punteada). Estación AIS. Abril-Mayo del '81

APLICACION DE UN MODELO NUMERICO



**Fig. 11** Series de tiempo simultáneas de la velocidad de la corriente medida (línea continua) vs. la velocidad predicha (línea punteada). Estación A2S. Abril-Mayo del '81



**Fig. 12** Series de tiempo simultáneas de la velocidad de la corriente medida (línea continua) vs. la velocidad predicha (línea punteada). Estación D1. Abril-Mayo del '81

## APLICACION DE UN MODELO NUMERICO

Las velocidades obtenidas del modelo fueron calculadas utilizando el registro de mareas logrado en la Estación El Comitán, debido a la falla del instrumento correspondiente a la Estación CICIMAR durante este período. Justificamos el uso de datos del Comitán por la alta correlación observada entre ambas estaciones durante el período de observación. La comparación de la serie calculada con el registro de la Estación A1S (Fig. 10) muestra gran similitud entre los días 10, 11 y 12 de abril. En estos días la marea fue diurna. Durante los días 13 al 24, con marea semidiurna, las velocidades observadas fueron mayores que las calculadas durante el reflujo. La comparación de la serie calculada con el registro de la Estación A2S (Fig. 11), muestra alta correlación los días de marea diurna y a diferencia de los datos del instrumento en la posición A1S, las velocidades medidas fueron mayores que las calculadas en flujo durante los días 12 al 19.

Las irregularidades que se presentan en los días 27 y 28 de abril se deben a problemas mecánicos del mareógrafo al momento de registrar la marea.

Estas diferencias nos indican una preferencia de flujo de la corriente total astronómica y meteorológica por el canal de la Estación A2 y en reflujo por el canal de la Estación A1. Probablemente esto se deba a la topografía del canal, notándose que, cuando la marea empieza a subir se encuentran casi al descubierto las zonas someras o bajas. Esto separa a los dos canales de entrada, pudiendo el desbalance de flujo entre ambos canales justificarse por masas de agua provenientes de zonas distintas de circulación en la bahía como indica la batimetría de esta última. Cuando se unen en el segmento 2 las dos corrientes de salida, se impone la dirección de flujo que viene por el canal principal debido a su mayor momentum sobre todo en las mareas semidiurnas, porque traen aparejadas mayores velocidades y mayor masa de agua por unidad de tiempo. Estos resultados son consistentes con aquellos obtenidos a partir de los registros de corrientes en ambas estaciones. La comparación con la serie de la Estación D1 (Fig. 12), presenta un ajuste alto en reflujo y velocidades medidas menores que las calculadas en flujo.

Estas predicciones se lograron considerando la circulación como se mostró en las figuras 7 y 8. También se supuso que sólo el 80 o/o del volumen que entró por el canal principal a los segmentos 5, 6 y 7 regresó por el mismo.

El 20 o/o restante suponemos que regresa por la planicie del sur de la laguna.

Al incluir esta última condición se logró incrementar la correlación entre las predicciones y las mediciones, logrando 0.90, 0.95, 0.92 en las Estaciones D1, A1S y A2S respectivamente.

Las velocidades calculadas representan valores promedio en la sección vertical, y en estos términos el modelo utilizado sí reproduce el patrón de circulación propuesto para el período de estudio considerado.

El modelo es útil como una primera aproximación para comenzar a entender la complejidad de la circulación en este cuerpo de agua.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo expone parte de los resultados del proyecto La Paz, realizado por el grupo de Dinámica de Lagunas Costeras, CICESE y financiado por la Secretaría de Educación Pública a través del Departamento de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Baja California Sur.

## LITERATURA CITADA

- CENTRO DE ESTUDIOS DE AGUAS LITORALES, 1978. Informe de las Actividades realizadas por el CEAL, 1977. S.A.R.H. Subsecretaría de Protección y Ordenación Ecológica. La Paz, B.C.S., México.
- CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS, 1976. Informe de Labores del Centro de Investigaciones Biológicas. La Paz, B.C.S., México.
- CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS, 1977. Resultados de las Investigaciones del Centro de Investigaciones Biológicas, 1977. La Paz, B.C.S., México.
- DE LA PAZ VELA, R., 1978. Hidrodinámica y dispersión de contaminantes en el Estero de Punta Banda, B.C. Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Ciencias Marinas, U.A.B.C., Ensenada, B.C., México. 48 p.
- HENDERSON, F.M., 1966. "Open Chanel Flow". The MacMillan Co. New York, N.Y. 522 p.
- MORALES, G.E., 1982. Mareas y Corrientes en la Ensenada de La Paz, B.C.S. Tesis de Licenciatura. Unidad de Ciencias Marinas, U.A.B.C., Ensenada, B.C. México. 52 p.
- OCAMPO, F, 1980. Análisis de Mareas y Predicción de Velocidad mediante un Modelo Unidimensional en Bahía San Quintín, B.C. Tesis de Licenciatura, Escuela Superior de Ciencias Marinas, U.A.B.C., Ensenada, B.C., México, 63 p.