

ESTABILIDAD Y HABILIDAD NATURAL DE AUTODRAGADO DE

LA BOCA DEL ESTERO DE PUNTA BANDA B. C.

TESIS QUE PARA OBTENER EL TITULO DE OCEANOLOGO SUSTENTA:

ADOLFO GONZALEZ CALVILLO

ESCUELA SUPERIOR DE CIENCIAS MARINAS

ENSENADA B. C. N., FEBRERO DE 1980.

DEDICATORIA

Dedicada

Al hombre que fomento en mi el interés por la ciencia.....

..... MI PADRE.

A MI MADRE,

MI ESPOSA SANDRA,

Y MI HIJO ADOLFO.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Marco Antonio Uribe R. su dirección y críticas en este trabajo de tesis.

Al M. en C. Román Lizarraga A., y al M. en C. Salvador Farreras S. sus críticas.

Al D. Guido Marinone M., Cuauhtémoc Nava B., Francisco Ocampo T., y Pedro Martínez B. por su ayuda en el trabajo de campo, laboratorio y computación.

INDICE

1. -	INTRODUCCION	
1.1. -	Localización y descripción del área de estudio.....	1
1.2. -	Objetivos.....	1
1.3. -	Antecedentes.....	2
2. -	HIPOTESIS	
2.1. -	Planteamiento.....	7
2.1.1. -	Hipótesis general.....	8
2.1.2. -	Hipótesis particular.....	8
3. -	SUPOSICIONES.....	8
4. -	DOCUMENTOS Y EQUIPO.....	9
5. -	MÉTODOS.....	11
6. -	RESULTADOS Y DISCUSIONES	
6.1. -	Período Dic-Feb 1976-1977.....	18
6.2. -	Período Oct-Ago 1978-1979.....	21
7. -	CONCLUSIONES.....	24
8. -	RECOMENDACIONES.....	25
9. -	FIGURAS Y TABLAS.....	26
10. -	BIBLIOGRAFIA.....	36

SIMBOLOS

- a = Área de mínima sección transversal de la boca medida bajo el nivel medio de mareas.
- a' = Área de mínima sección transversal de la boca, en función del nivel del mar.
- A = Área superficial de la laguna.
- Br = Angulo entre la cresta de la ola y la línea de playa, en la rompiente.
- C = Coeficiente de Chezy
- d = Diámetro medio de los sedimentos del fondo.
- D = Densidad del fluido.
- Ds = Densidad del Sedimento.
- e = Factor de corrección por espacios vacios en el sedimento.
- g = Aceleración de la gravedad.
- g' = Fuerza de gravedad.
- Gs = Peso específico del sedimento.
- G = Peso específico del fluido.
- h = Altura del nivel del mar.
- hr = Altura del oleaje en la rompiente.
- Hr = Profundidad del mar en la rompiente de la ola.
- n = Coeficiente de Manning.
- p = Perímetro mojado.
- Pm = Prisma de mareas en mareas vivas.
- q = Transporte de sedimento por unidad de ancho, por unidad de tiempo.
- Q = Descarga del fluido.
- Qmx = Descarga media máxima.

R = Radio hidráulico.

S1 = Volúmen de arena transportado a lo largo
de la playa.

Sxy = Exceso de flujo de momento perpendicular a la
playa, debido a la presencia de las olas, por
unidad de largo de playa.

t = Tiempo.

TLN = Transporte litoral anual neto de sedimentos.

To = Esfuerzo cortante de fondo

U = Velocidad de fase de la ola.

V = Velocidad del fluido.

Vm = Velocidad media máxima.

ESTABILIDAD Y HABILIDAD NATURAL DE AUTODRAGADO DE
LA BOCA DEL ESTERO DE PUNTA BANDA B. C.

1. - INTRODUCCION:

1.1. - LOCALIZACION Y DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO. El Estero de Punta Banda es una laguna costera natural situada aproximadamente 13 km al sur de el puerto de Ensenada B. C. Tiene aproximadamente 10 km de longitud, por uno a dos km de ancho. Su eje mayor corre paralelo a la línea de playa. Esta limitada al este y al norte por el valle de Maneadero, al sur por Punta Banda, y al oeste por una barra arenosa unida al sur con Punta Banda. En la parte mas nor-oeste esta situada la boca, la cual brinda a la laguna una comunicación libre con la Bahía de Todos Santos (Fig. 1). Esta laguna carece practicamente de aporte fluvial (Secretaría de Marina 1971, 1974).

La boca consta de un canal principal cuya profundidad medida desde el nivel de bajamar media inferior oscila entre los 9 y 10 metros. El canal tiene en su parte superior un ancho de 80 a 100 metros. También cuenta la boca con una zona de bajos que se extiende actualmente hasta 800 metros, completando un ancho de unos 900 metros, en la parte sur de la boca hay un pequeño canal, con profundidades de alrededor de un metro.

1.2. - OBJETIVOS: Considerando la necesidad económica del Estado, y en especial la del Municipio, mucho han insistido tanto la iniciativa privada, como el Comité de Turismo y dependencias

gubernamentales en la creación de un refugio para yates y embarcaciones de pequeño calado en el Estero de Punta Banda. A propósito de lo cual se ha especulado entre:

a) Cerrar la boca natural actual y abrir una nueva en el extremo sur de la barra (Secretaría de Marina 1971, Uribe 1964), y

b) El mejoramiento de la boca actual (O'Brien y Zeevert 1968).

Por lo anterior, este trabajo tiene como objetivos:

Analizar la estabilidad y habilidad natural de autodragado de la boca de el Estero de Punta Banda, operando a marea libre, durante:

a) El período Diciembre-Febrero 1976-1977, período para el cual se cuenta con registro de corrientes en la boca; y:

b) Para las condiciones actuales (Octubre-Agosto 1978-1979).

1.3. - ANTECEDENTES:

1.3.1. - GENERALIDADES. - Comunmente se considera que una boca de mareas es estable, cuando alcanza una condición tal que su sección transversal no varia con el tiempo. O bien, cuando se alcanza el equilibrio entre la cantidad de sedimento que entra y sale por la boca, a fin de que no haya erosión ni sedimentación. También se considera estabilidad al hecho de que la boca no se desplace horizontalmente, o se formen nuevas bocas (Brown 1928, Bruun 1966, Escoffier 1940, Mota-Oliveira 1970, O'Brien 1966, Renge y Partenscky 1974, y otros).

El interés científico en este tópico nace en 1928 (Brown 1928), y al ampliarse ha dividido a los estudiosos en dos grupos: quienes hacen correlaciones o relaciones empíricas entre las variables involucradas en la estabilidad y en algunos procesos físicos dinámicos; y quienes han atacado el problema por la parte puramente teórica. Destacan entre los primeros: Bruun (1966, 1967), Byrne et al (1974), Johnson (1973), O'Brien (1966, 1967, 1971, 1976), O'Brien y Dean (1972), y Sorensen (1977); y entre los segundos: Brown (1928), Bruun (1966), Bruun et al (1974), O'Brien (1976), Renge y Partenscky (1974) y Mota-Oliveira (1970). Algunos de estos trabajos solo han sido modificaciones o refinaciones de trabajos anteriores. Otros, no han pasado de la especulación teórica, y otros mas, son considerados como obsoletos hoy en día.

Los métodos mas usados hoy y que han prevalecido son, entre los empíricos, los de O'Brien (1966) y Bruun (1966) que a pesar de ser ambos empíricos, estan en amplia confrontación en sus ideas fundamentales. Por la parte teórica el trabajo que mas ha destacado es el de Mota-Oliveira (1970).

1.3.2. - CRITERIO DE M. P. O'BRIEN. -

O'Brien (1966) establece que las bocas naturales estables y sin espigones, conservan la relación:

$$a/Pm = 2.0 \times 10^{-5} \dots \dots \dots (1)$$

Con el área y volumen en pies cuadrados y cúbicos respectivamente.

Las principales objeciones que tiene este método son:

primero: Implica que:

- a) El tamaño del sedimento no tiene ningún efecto sobre la estabilidad.
- b) El transporte litoral de sedimentos no afecta la estabilidad de las bocas, por muy abundante que éste sea.
- c) Que dos bocas con la misma relación "a/Pm" pero cuyo comportamiento hidráulico y transporte litoral de sedimentos sean muy diferentes, deben ser idénticamente estables (Bruun 1967, Bruun et al 1974).

y segundo:

- d) Que las bocas que el menciona como estables sean estables en realidad (Este autor incluye El Estero de Punta Banda sin haber hecho ningún estudio previo).

1.3.3.- CRITERIO DE P. BRUUN. -

Bruun (1966), por su parte dice que las bocas estables tienen que cumplir con las siguientes condiciones de estabilidad:

- $P_m/TLN < 100$ (estabilidad pobre)..... (2)
- $P_m/TLN > 250$ (buena estabilidad)..... (3)
- $2a/3TLN < 0.0045$ (estabilidad pobre)..... (4)
- $2a/3TLN > 0.0090$ (buena estabilidad)..... (5)
- $D^2 g Q_{mx} / a C > 0.5 \text{ Kg/m}^2$ (buena estabilidad)..... (6)

Aunque esta última relación es semi-empírica (McDowell y O'Connor 1977).

Las objeciones para este método, pero que pueden aplicarse a los cuatro métodos anteriores, es que en realidad son muy escasas las bocas de las que se tienen estudios completos, detallados, o una historia lo suficientemente larga de modo que se pueda decir algo más concreto sobre su estabilidad (Myrre et al 1974).

Por otra parte, no se puede rechazar una relación empírica, pero tampoco debe aceptarse sin reservas puesto que esto no es coherente con el razonamiento analítico. O mejor aún, dichas correlaciones solo deberían tomarse como base de comparación con algún otro método más aceptable.

1.3.4. - ANALISIS DE MOTA-OLIVEIRA. - El trabajo de Mota-Oliveira (1974) es completamente teórico, pero con bases experimentales muy fuertes (Keulegan 1967). Haciendo las menos simplificaciones posibles (incluye pendiente de las paredes de la laguna, fricción, desfase y amortiguación de la ola de marea, etc.), encierra en su "repletion coefficient" las características hidrodinámicas de una boca de mareas. Supone que la habilidad natural de autodragado es proporcional a la capacidad de carga de fondo, y ésta a su vez está caracterizada por la tercera o sexta potencia de la velocidad del fluido. Entendiéndose como capacidad de carga de fondo, la descarga de sedimento que es producida por el esfuerzo de corte entre el fluido y el fondo. Este modelo se integra en una computadora, obteniéndose como salida la capacidad de carga de fondo para el flujo y reflujo en función del "repletion coefficient". La principal limitación de este método es que el canal de entrada debe ser prismático y simétrico (cosa que no sucede en Punta

Banda), y la capacidad de la computadora disponible para integrar las ecuaciones. Lo último, ha provocado que la aplicación de este método haya quedado muy restringida, además del gran tiempo de uso y costo de computadora.

Son pues los métodos de O'Brien y Bruun los que generalmente se usan, aunque el de Bruun es el más ampliamente usado.

1.3.5. - ESTUDIOS REALIZADOS EN MEXICO. - Los estudios que se han realizado en México con el fin de determinar estabilidad en bocas de marea, se han basado en la aplicación del método de Bruun (Comision Nacional Consultiva de Pesca 1970, Olivares-Beltran 1967, Cervantes 1967, Gutiérrez 1974, y otros).

O'Brien (1966, 1967) y O'Brien y Zeevart (1968) mencionan la boca de el Estero de Punta Banda como una boca estable, pero no tengo referencia de ningún estudio anterior a este trabajo de tesis, en el que se haya analizado su estabilidad o habilidad natural de autodragado. Mas aún, los valores que dan estos autores para el prisma de mareas y área transversal de la boca no corresponden a las dimensiones actuales de la laguna (en este trabajo se hizo un levantamiento de la boca en octubre y noviembre de 1979), ni a las medidas que se muestran en los planos batimétricos del lugar (Secretaría de Marina 1960, 1971, Departamento de Pesca 1975), (Ver sección 5.4).

2. - HIPOTESIS:

2.1. - PLANTEAMIENTO. - Lankford (1976) establece que la forma de la curva de marea en el Pacífico, donde la marea alta superior precede a la marea baja inferior (Fig. 2), las corrientes durante el reflujo son mayores que las corrientes durante el flujo. El efecto de este tipo de marea sera el de evacuar sedimento de la laguna hacia el mar. Y por lo tanto, considera que este es el principal mecanismo que impide asolvamientos internos de lagunas en zonas donde la marea es del tipo que muestra la figura 2. Tambien Groen (1967), hace notar que la amplitud de la corriente depende de la forma de la curva de marea.

Raras veces (si es que hay algun caso) la curva de mareas es simétrica. La pendiente de la curva indica la velocidad con que el nivel del mar sube o baja. Esto quiere decir que en lagunas donde es despreciable el efecto de amortiguación y desfaseamiento de la ola de marea, pendientes diferentes (en valor absoluto) de la curva de marea para un nivel fijo, indican que el agua entra (flujo), o sale (reflujo) con velocidad diferente a traves de una misma área hidráulica. Además, la suposición de Mota-Oliveira (1970) de que la capacidad de carga de fondo esta caracterizada por alguna potencia de la velocidad, es un hecho que ha sido comprobado experimentalmente en repetidas ocasiones (v.g. Bruun et al 1974, Aguilar 1967, ASCE 1971). Por lo dicho en este párrafo, y aunado a lo que menciona Lankford (1976), se propone la siguiente:

2.1.1. - HIPOTESIS GENERAL. - En una boca de mareas una curva de mareas asimétrica (Fig. 3), y además, con forma similar a la que se muestra en la figura 2, indica un transporte neto de arena; siempre y cuando ésta esté disponible. ---En el caso del Estero de Punta Banda existe un lecho arenoso en el fondo, de más de 10 m de espesor (Secretaría de Marina 1971). Además el evacuado de arena de la laguna hacia el mar sería relativamente más fácil, ya que el diámetro medio de la arena es ligeramente menor en el interior de la boca, que al exterior de la misma; (Secretaría de Marina 1971, ver también la sección 5.2)--- Este transporte neto de arena será hacia afuera (adentro), si el lado de mayor valor absoluto de la pendiente es en el reflujó (flujo) (ver Fig. 3).

2.1.2. - HIPOTESIS PARTICULAR. - La marea predominante en el Estero de Punta Banda (ver el método de obtención en la sección 5.5, y figs. 2 y 3a) indica un transporte neto de arena hacia el exterior de la laguna, por lo tanto, El Estero de Punta Banda posee habilidad natural de autodragado la cual tiende a estabilizar la boca.

3. - SUPOSICIONES:

- a) El principal mecanismo de transporte litoral de sedimentos es la aproximación oblicua del oleaje hacia la costa.
- b) La batimetría de la laguna no ha cambiado considerablemente desde 1971.

- c) Las corrientes medidas en el canal, son representativas de toda el área transversal de la boca. ---Pritchard et al (1978) menciona que posiblemente durante el flujo, las velocidades en la zona de los bajos sean ligeramente mayores que en la zona del canal debido al efecto del oleaje. Sin embargo, en sus resultados se ve que en algunos casos el fenómeno es inverso, (ver figuras 11 y 12 de Pritchard et al 1978). Por lo tanto, dejamos la suposición de este inciso tal y como esta.---
- d) La marea en la boca del Estero de Punta Banda se comporta de la misma manera que la marea registrada en el puerto de Ensenada (ver sección 5.5, además Pritchard et al 1978).

4. - DOCUMENTOS Y EQUIPO:

- a) Carta batimétrica de la Bahía de Todos Santos, escala 1:35,000
Secretaría de Marina 1973.
- b) Planos Batimétricos del Estero de Punta Banda, escala 1:8,000
Secretaría de Marina 1960, 1971.
- c) Plano Batimétrico del Estero de Punta Banda, escala 1:5,000
Departamento de Pesca 1975.
- d) Estadísticas de oleaje de 3 años de "swell" del Hemisferio sur,
Marine Advisers 1961.

- e) Estadísticas de oleaje de 23 años de "sea" y "swell" del Hemisferio Norte. Meteorology International Inc. 1977.
- f) Sistema Prime 400. con digitalizador tipo TALOS CIBERGRAPH, del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE).
- g) Planimetro polar de compensación Filotecnia, tipo 236/A
- h) Transitos (2) marca DIETZGEN, precision 20". ESCUELA SUPERIOR DE CIENCIAS MARINAS (ESCM).
- i) Nivel marca Dietzgen (ESCM).
- j) Ecosonda marca Raytheon modelo DE-119, de registro continuo en papel. Precision: 10 cm (CICESE).
- k) Lancha inflable con motor, modelo Zodiac (CICESE).
- l) Correntímetros (2) modelo BRAINCON HCM-1381, marca ENDECO. Registro continuo en película fotografica, de rapidez y dirección, precisión 1% (CICESE).
- m) Registros de marea (CICESE).
- n) Draga de almeja (ESCM).
- o) Juego de tamices y agitador de tamices (ESCM).
- p) Horno (ESCM).

5. - METODOS:

5.1. - CORRIENTES. - Los correntímetros fueron colocados en la boca del Estero de Punta Banda por la sección de Hidrografía de Lagunas Costeras del CICESE. Se colocó uno, justo abajo del nivel de baja mar media inferior, y el otro a 2 m del fondo en línea vertical con el de superficie, en el canal. Se tiene registro para el correntímetro del fondo durante el periodo de Dic-Ene 1976-77, de 35 días a partir del 14 de Diciembre. Para el correntímetro de la superficie, existe un registro de 27 días a partir del 4 de Febrero de 1977. Existe además, un registro de mediciones simultáneas de los dos correntímetros, de 5 días a partir del 14 de Diciembre lo cual permitió establecer una relación para la velocidad promedio.

5.2. - DIAMETRO DEL SEDIMENTO. - El diámetro de los sedimentos del fondo, durante el período Dic-Feb 1976-77 fue obtenido por Aguilar R. y L. (1977). Para el periodo de Oct-Ago 1978-79, se tomaron muestras del sedimento, en el canal, en la zona de bajos, y hacia el interior y exterior de la boca, con una draga de almeja desde una lancha. Las muestras se tamizaron siguiendo el método tradicional de Inman (1952) para obtener el diámetro medio de las partículas.

5.3. - PRISMA DE MAREAS. - Se calculó el volumen de agua en el interior de la laguna, con un planímetro polar de compensación, para niveles espaciados 25 cm en la vertical, usando el plano batimétrico del Estero de Punta Banda de la Secretaría de Marina (1971). Posteriormente se sacaron muestras de esa curva a cada 5 cm de elevación del nivel del mar. De esta manera se obtiene el volumen de la laguna en función del nivel del mar

(Fig. 6).

.- AREA TRANSVERSAL. - Siguiendo un procedimiento similar al anterior, se cálculo la mínima sección transversal en función del nivel del mar, a partir de las batimetrías de la Secretaría de Marina (1960, 1971), el Departamento de Pesca (1975), y un levantamiento que se efectuó en Oct-Nov 1979 (Figs. 4 y 5). Este levantamiento batimétrico de la zona de la boca, se efectuó con ecosonda, localizando la lancha con dos transitos en dos estaciones en tierra, y corrigiendo posteriormente por el efecto de la marea. El levantamiento se complementó con nivelación diferencial hasta donde fue permisible por las mareas mas bajas.

.- MAREAS. - El registro de marea que se utilizó, fue el de mediciones reales, con datos a cada hora. Por interpolación, se obtuvieron alturas a cada 20 minutos. La marea que se uso fue la registrada en el puerto de Ensenada, ya que no hay registros disponibles en la boca de la laguna. Además, Pritchard et al (1978) muestra que la amortiguación y desfaseamiento que sufre la ola de marea, del puerto a la laguna, es despreciable.

Para determinar el tipo de marea predominante en El Estero de Punta Banda, se calcularon los valores absolutos de las pendientes de la curva de marea, para dos ciclos de marea (un día) cada cuarto día, durante un año. Posteriormente se promediaron estos valores de las pendientes, obteniéndose algo similar a lo que muestra la figura 3a.

5.6. - TRANSPORTE LITORAL DE SEDIMENTOS. - El "swell" del hemisferio sur (Marine Advisers 1961) y el "sea" y "swell" del hemisferio norte (Meteorology International Inc. 1977) de mar abierto, se lleve a la costa usando el programa de refracción de Wilson (1966). Este programa fue adaptado previamente al sistema PRIME 400. El criterio de rompiente que se uso fue:

$$hr/Hr = 0.8 \dots\dots\dots (7)$$

que es el que se ha observado en playas con poca pendiente (Komar 1976).

Una vez el oleaje en la costa, el transporte litoral de sedimentos se estimo con la fórmula de Komar e Inman (1970), (Komar 1976), escrita aqui en la forma:

$$Sl = \frac{(K S_{xy} U)}{(D_s - D) g e^f} \dots\dots\dots (8)$$

donde "K" es una constante que depende del sistema de unidades que se este usando. Sustituyendo la formula 7 en la 8, podemos escribir ésta última como:

$$Sl = 1.2961 \times 10^{-2} (hr)^{2.5} \text{SENO}(Br) \text{COSENO}(Br) \dots\dots (9)$$

El método descrito aquí para calcular el transporte litoral de sedimentos, es usado frecuentemente por diversos autores, y ya ha probado su efectividad (King 1972, Mogel y Street 1974, USACERC 1977).

Esta estimación del transporte litoral de sedimentos se hizo tomando en cuenta el 57% del "swell" del hemisferio sur que tiene dirección mas nor-este, que se supuso tendría mas efecto sobre las playas de la bahía, que el oleaje con dirección mas nor-nor-este.

5.7. - METODOS DE P. BRUUN Y M. P. O'BRIEN. - Se hace una comparación de los métodos de Bruun (1966) y O'Brien (1966), para el período de registro de los correntímetros, y otra para las condiciones actuales.

5.7.1. - Metodo de M. P. O'Brien. - Los datos de los planos mas cercanos a 1971 tienen muy pocos datos de la zona de la boca, por lo que no se podia depender exclusivamente del área transversal de la boca obtenida a partir de dichos planos (Secretaría de Marina 1971, Departamento de Pesca 1975). A fin de tener con que comparar estos datos, se calcularon descargas para intervalos de 20 minutos, utilizando los registros de marea y los volúmenes de la laguna en función de la altura de marea. Al dividir el volumen que entra o sale de la laguna (durante el intervalo) entre la velocidad representativa del intervalo, da por resultado el área hidráulica. Cuando se grafica la elevación del nivel del mar contra las áreas hidráulicas obtenidas (una por cada 20 minutos) de los 62 días del registro, resulta una curva que representa la variación del área transversal de la boca en función del nivel del mar. Esta curva no tan solo es muy aproximada a la obtenida de los planos, sino que además es casi idéntica a la curva que representa el estado actual (levantamiento de Oct-Nov 1979) (Fig. 5).

Con esta información (P_m, a) se puede obtener el índice de estabilidad de acuerdo al criterio de O'Brien.

5.7.2. - Método de P. Bruun. - En la aplicación del método de Bruun, la fórmula 12 (sección 5.8.1) requiere de la estimación del coeficiente de fricción de Chezy. Este coeficiente está dado en función del coeficiente de Manning por la fórmula:

$$C = \frac{(R)^{1/6}}{n} \dots \dots \dots (10)$$

donde "n" se encuentra en tablas (Chow 1959), y para el caso que nos ocupa, oscila entre 0.020 y 0.030, lo cual produce variaciones muy grandes en el coeficiente de Chezy a la tercera potencia (Fórmula 13).

El coeficiente de Chezy también está dado por la fórmula empírica desarrollada por Bruun y Gerritsen (1960):

$$C = 30 + (5)\text{Log}(a') \dots \dots \dots (11)$$

Se ha demostrado que esta fórmula es útil en la estimación del coeficiente de fricción de Chezy (Bruun 1966).

La comparación de las dos últimas fórmulas, con los valores extremos del coeficiente de Manning (Fig. 7) muestra que el valor del coeficiente de Chezy estimado por la fórmula 11 cae entre los valores medios del mismo coeficiente estimado a partir de la fórmula 10.

La comparación de la ecuación 11 con el coeficiente de Strickler, arroja resultados similares al anterior. Es por esto que se escogió la fórmula 11, para ser usada dentro de la

ecuación 13.

5.8. - METODO DISEÑADO PARA LA EVALUACION DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA BOCA DEL ESTERO DE PUNTA BANDA. -

5.8.1. - Período Dic-Feb 1976-1977. -

Usando el área transversal y perímetro mojado (en función del nivel del mar), el registro de corrientes, el registro de marea, y el diámetro medio de las partículas del fondo, se aplicó la fórmula de Engelund-Hansen (Bruun et al 1974, ASCE 1971), para obtener el transporte de sedimento en la boca:

$$q = 0.05 G_s V^2 \left\{ \frac{d}{g' (G_s/G - 1)} \right\}^{0.5} \left\{ \frac{T_0}{(G_s - G)d} \right\}^{1.5} \dots \dots \dots (12)$$

Donde:

$$T_0 = (D g)^{3/2} (V/C)^3 \dots \dots \dots (13)$$

Esta fórmula, además de ser correcta dimensionalmente, fue calificada por un comité de la American Society of Civil Engineers (ASCE 1971) como una de las más confiables en transporte de sedimentos en canales y bocas.

Tomando en cuenta los intervalos de 20 minutos, la fuerza de gravedad, los pesos específicos, y la fórmula 11, la fórmula anterior se puede escribir como:

$$q = 7.6257 \times 10^{-8} V^5 p / (d(30 + 5 \text{Log}(a)))^3 \dots \dots \dots (14)$$

"q" dado en metros cúbicos para el intervalo de 20 min., "a" en metros cuadrados, y "V" en cms./seg.

Aquí vemos nuevamente que la capacidad de carga de fondo

es función de una potencia (quinta) de la velocidad. En esta fórmula, "a" y "p", están en función del nivel del mar, como se describió en la sección 5.4.

A partir de lo anteriormente dicho, se hace un programa para la computadora. Este programa estima básicamente, las variables involucradas en la ecuación 14, para el cálculo de "q", para intervalos de tiempo del tamaño que uno desee, y por un período de tiempo tan largo como sea posible. Dicho programa se alimenta con "d", "a(h)", "p(h)", y la serie de velocidades. Al final se obtiene el volumen de arena transportado para cada intervalo, así como el volumen transportado acumulativo (Tablas I y II).

5.8.2. - Período Oct-Ago 1978-1979. -

Para las condiciones actuales, no se cuenta con registros de corrientes. En cambio se cuenta con mediciones de la forma y profundidad del canal, área transversal y perímetro mojado en función del nivel del mar, y diámetro medio de las partículas del fondo. Además de contarse también con el registro real de marea.

Es relativamente fácil calcular las velocidades; pues se conoce el volumen de agua que se descarga por una cierta área conocida en un intervalo de tiempo, tan pequeño, como uno quiera. El intervalo escogido fue también de 20 minutos.

Con estas velocidades se alimenta un programa similar al descrito en la sección anterior, obteniéndose igualmente, el

transporte de arena instantaneo y el acumulativo (Tabla III). Para los dos casos se introdujo una velocidad crítica para el movimiento del sedimento. Esta velocidad depende en cada caso del tamaño del grano (Hjulstrom 1939, Krumbein y Sloss 1969, Allen 1970).

5.9. - CALIBRACION DEL MODELO. -

A fin de tener un aspecto de comparación entre las velocidades medidas y las calculadas, se repitió el procedimiento descrito en la sección anterior, para el periodo en que se cuenta con registro de corrientes (Dic-Feb 1976-77). Un resultado típico de esta comparación se muestra en la figura B (ver sección 6.1.3).

6. - RESULTADOS Y DISCUSIONES:

6.1. - PERIODO DIC-FEB 1976-77. -

6.1.1. - METODO DE M. P. O'BRIEN. - Se tiene un prisma de mareas durante mareas vivas, de 22.7 millones de metros cúbicos (802 millones de pies cúbicos). Y un área transversal bajo el nivel medio del mar de 1080 mts. cuadrados (11,620 pies cuadrados). esto da una relación de "a/Pm", de: 1.45×10^{-5} . Esto representa una desviación de un 25% o lo que es lo mismo, un buen índice de estabilidad. Al aplicar la relación de Johnson (1973) el resultado es similar. En cambio la relación de Sorensen da un índice mas elevado de estabilidad.

6.1.2. - METODO DE P. BRUUN. - Para los indices de Bruun tenemos:
El transporte litoral anual neto de sedimentos es en dirección

Norte-Sur, y en la región cercana a la boca es 4×10^5 metros cúbicos, obtenido de acuerdo a la sección 5.6. Esto da como resultado: $P_m/TLN = 57$ que indica condiciones pésimas de estabilidad.

Un resultado interesante en la evaluación del transporte litoral neto de sedimentos, es que el efecto del "swell" del hemisferio sur sobre las playas de la bahía, es despreciable. Otra característica interesante es que el transporte litoral neto de sedimentos es en dirección norte-sur. En este caso, la forma de la barra arenosa que limita a la laguna hacia el mar, no indica la dirección del transporte litoral neto como generalmente se cree.

El otro índice de Bruun resulta: $2a/3TLN = 0.0018$, indicando igualmente, condiciones malas de estabilidad.

Sin embargo la relación semi-empírica:

$$D^2 g Q_{mx} / (aC)^2 = g V_m / (30 + 5 \text{Log}(a))^2$$

es indicativa de un boca muy estable si el paso del TLN de norte a sur a través de la boca es llevado a cabo por los flujos de marea. Y por el contrario, indica boca inestable cuando el paso se hace a través de la barra exterior de la boca.

De lo anterior se ve que los criterios de Bruun y O'Brien están en clara contradicción. Mas aun, no existe consistencia dentro de los índices de Bruun.

Esto justifica lo dicho anteriormente, de que no es suficiente la aplicación de un método empírico, sino que debe compararse y/o complementarse con métodos de bases teóricas, analíticas, y aún experimentales, mas fuertes.

6.1.3. - RESULTADOS DEL METODO DISENADO. -

Los resultados del tamizado muestran que tanto para los períodos de 1976-77, como para las condiciones actuales, el diámetro medio del grano oscila entre 0.20 y 0.30 mm. Se efectuaron cálculos con ambos valores. Los resultados que se presentan, corresponden a los cálculos con el diámetro de 0.3 mm. Al utilizar el diámetro de 0.2 mm, los resultados son aproximadamente el doble.

Al aplicar el método bosquejado en la sección 5.8.1 se puede ver claramente que el transporte neto de arena para el período Dic-Ene es hacia afuera de la laguna (Tabla I). Para el período de Febrero se ve que el transporte neto de arena es hacia el interior de la laguna (Tabla II), pero la cantidad es un orden de magnitud inferior al transporte de Dic-Ene.

Al analizar los datos mas en detalle, se puede ver una oscilación de 15 días en el transporte neto de arena para el período de Dic-Ene (Tabla I), y otra de 12 días para el período de Febrero (Tabla II). Sin mencionar, por supuesto, las oscilaciones diarias y semidiarias que desde luego, son obvias.

Es posible que el transporte hacia el interior de la laguna en el mes de Febrero corresponda a una oscilación en el transporte neto de arena, de un período mayor de 15 días. Pero

como el registro de corrientes no es lo suficientemente largo, no se puede comprobar.

Usando los datos de las velocidades calculadas (como se explicó en la sección 5.8.2) para el periodo Dic-Ene, los resultados del transporte neto de arena no solamente son del mismo orden de magnitud, sino que se corresponden dentro de un 25%.

La comprobación de que, tanto el método usado, como las suposiciones hechas son validas; es la comparación de las velocidades medidas contra las velocidades calculadas. Un ejemplo lo muestra la figura 8.

6.2. -PERIODO OCT-AGO 1978-1979. -

Se usaron datos de marea de 11 meses, que comprenden desde Octubre de 1978, hasta Agosto de 1979, aplicandose al método descrito en la sección 5.5. Algunos de los resultados se muestran en la tabla 3.

Con esta serie de 11 meses es posible apreciar ahora con facilidad, oscilaciones de 15 y 30 días en el transporte neto de sedimentos. Incluso se aprecia una oscilación de 6 meses. Estos movimientos periódicos de arena son confirmados por los vecinos el lugar.

Esto, además, corrobora la idea de que los resultados del período de Febrero de 1977 sean una oscilación en el transporte neto de sedimentos, de un periodo mayor de 15 días.

Estos períodos de oscilación evidentemente corresponden a períodos de marea, lo cual viene a comprobar la hipótesis.

Lo más notable de todos estos resultados, es la capacidad que tiene la boca, no tan solo de impedir que esta se cierre, sino también de impedir asolvamientos internos.

Este transporte neto de arena hacia afuera de la laguna es un orden de magnitud menor que el transporte litoral anual neto. Esto implica que si el transporte litoral atravieza la zona de la boca de norte a sur por medio de los flujos de marea, la cantidad anual de arena que llega a la boca puede ser superior a la cantidad de arena que la boca es capaz de evacuar. Por otro lado, si el paso del transporte litoral se hace en parte a través de la barra exterior sumergida, y en parte por los flujos de marea, la boca del Estero de Punta Banda es capaz de evacuar desde un 20% hasta un 40% del transporte litoral neto.

Un criterio que ha sido muy ampliamente usado para determinar la forma de paso del transporte litoral (USACERC 1977, Bruun 1967) es que la razón $r = TLN/Q_{mx}$ sea mayor de 200. Donde el "TLN" está en yardas cúbicas por año, y "Q_{mx}" en yardas cúbicas (en mareas vivas). Algunos valores característicos para este caso son:

$$r = TLN/Q_{mx} = 500,000/1750 = 285$$

que indica un paso de arena del transporte litoral, de norte a sur predominantemente por la barra.

Nuevamente tenemos que este criterio es empírico. Por eso

debe tomarse solo como una guía preliminar.

Sin embargo, la formación de una barra exterior en forma de semiluna como en el Estero de Punta Banda (Secretaría de marina 1960, 1971), siempre ha sido indicio de paso de arena del transporte litoral de sedimento, a través de la barra exterior sumergida (Bruun 1966, Byrne 1974, USACERC 1977).

Información adicional sobre la estabilidad de la boca del Estero puede obtenerse de los Parergones del Instituto Geológico de México (1913). Esta referencia nos indica que la boca no ha variado en absoluto su posición en 80 años. Este es un historial lo suficientemente grande como para considerar la boca del Estero de Punta Banda como una boca estable. La historia de la boca estable mas antigua de que se tenga registro data de 125 años, y es Wachapreague Inlet en la península de Delmarva (Byrne 1974).

7. - CONCLUSIONES:

- a) El criterio de O'Brien para estabilidad de bocas, indica que la boca del Estero de Punta Banda tiene una desviación de un 25% de lo que se considera como condiciones óptimas de estabilidad.
- b) Los criterios de Bruun indican por el contrario, condiciones de inestabilidad.
- c) No es posible obtener información confiable (ni aun como una primera aproximación) sobre la estabilidad de la boca de El Estero de Punta Banda, a partir de la aplicación de los métodos de Bruun y O'Brien; ya que están en contradicción.
- d) De la información disponible para el período Dic-Feb 1976-77, se obtiene que las condiciones de habilidad natural de autodragado son buenas.
- e) Se demuestra la validez del método diseñado.
- f) El transporte de arena dentro de la boca tiene oscilaciones que corresponden a ciclos de marea semidiarios, diarios, semimensual, mensual y semi-anual.
- g) El paso del transporte litoral parece ser a través de la barra sumergida, y es en dirección norte a sur.
- h) El Estero de Punta Banda muestra una buena habilidad natural de autodragado.

- i) Aun cuando el paso del transporte litoral de sedimentos no fuera completamente a través de la barra exterior sumergida, la habilidad natural de autodragado permite a la boca evacuar una cantidad considerable (del 20% al 40%) de esta arena.
- j) La boca del Estero de Punta Banda ha permanecido en su posición actual, al menos durante los últimos 80 años.
- k) Puede considerarse que la boca del Estero posee un buen grado de estabilidad.
- l) Se comprueba la hipótesis para el caso de "El Estero" de Punta Banda B. C.

B. - RECOMENDACIONES:

Aunque este trabajo ha cumplido con sus objetivos, es recomendable complementarlo con estudios sobre el movimiento de sedimentos en los bajos en el interior y exterior de la boca. Estos movimientos deben estar asociados con las oscilaciones en el transporte de arena en la boca, y podrían ser alterados al poner espigones, o cualquier otra estructura.

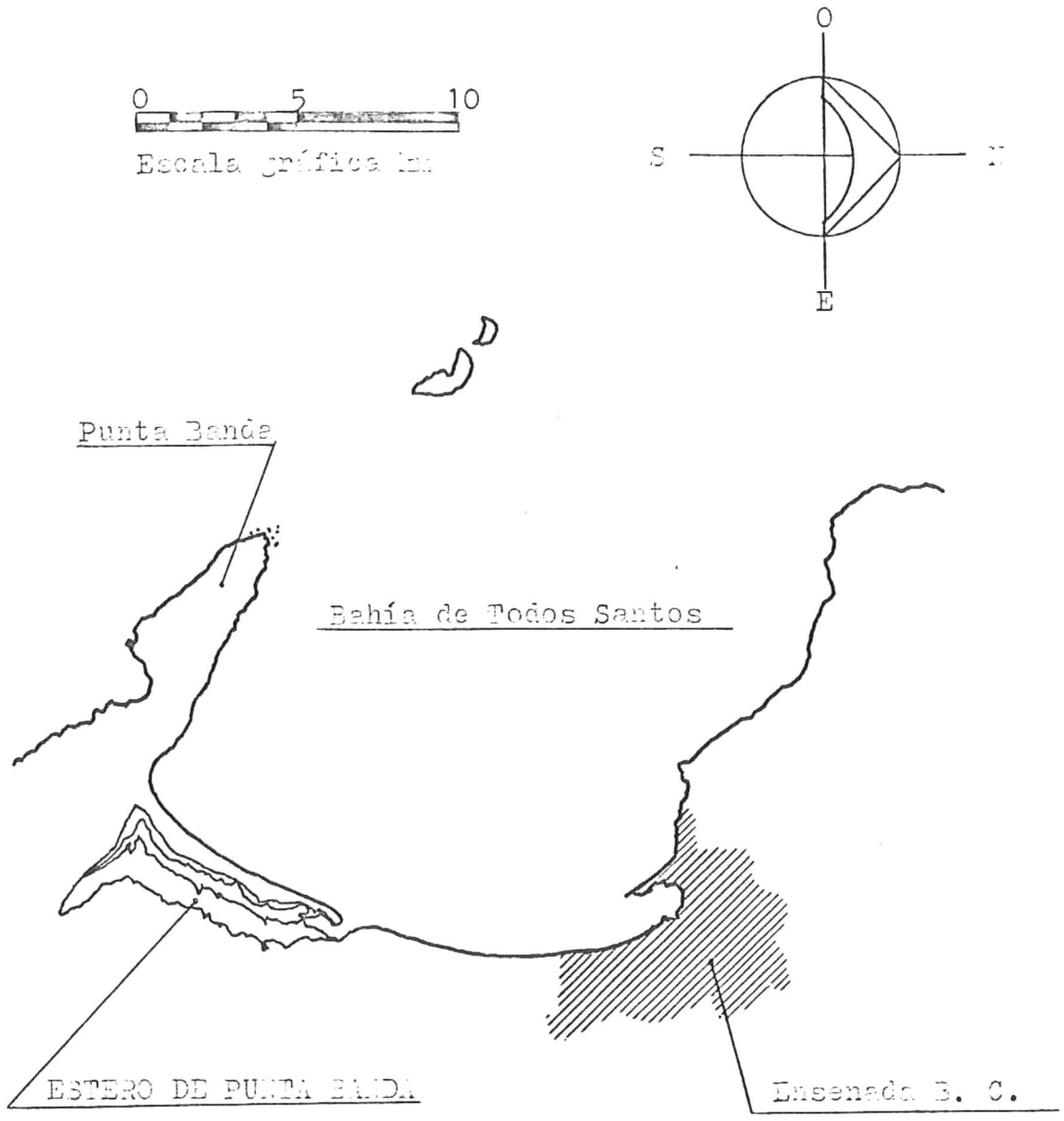


Fig. 1.- Localización del Estero de Punta Banda.

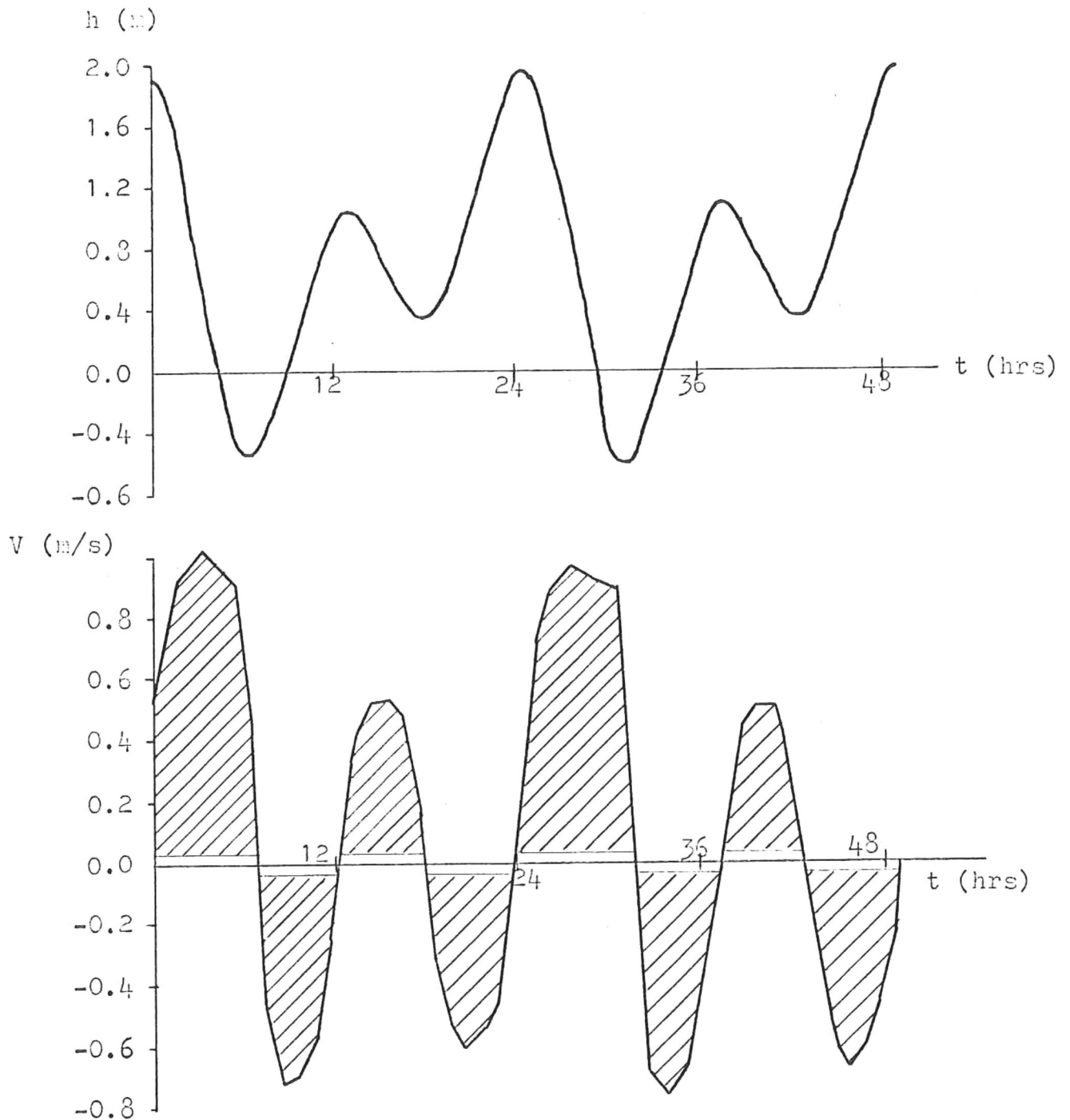


Fig. 2.- Curva de marea (arriba) para dos días de diciembre de 1976, y las velocidades (abajo) correspondientes al mismo período de tiempo en la boca de El Estero de Punta Banda. El nivel de referencia para la marea es la baja mar media inferior. Las velocidades positivas indican agua saliendo de la laguna.

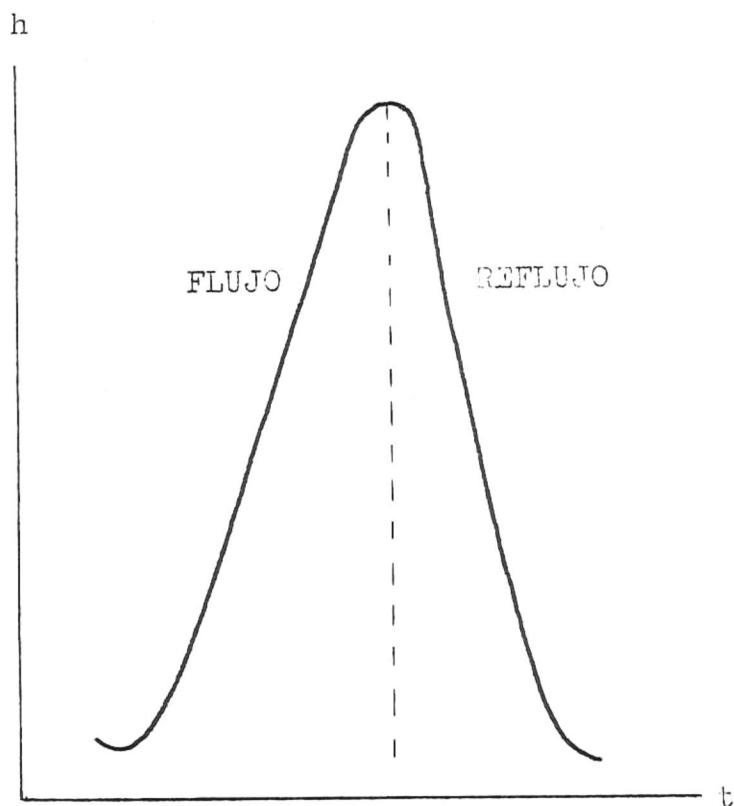


Fig. 3a.- Curva de marea representativa de un transporte neto de sedimento hacia el exterior de la laguna.

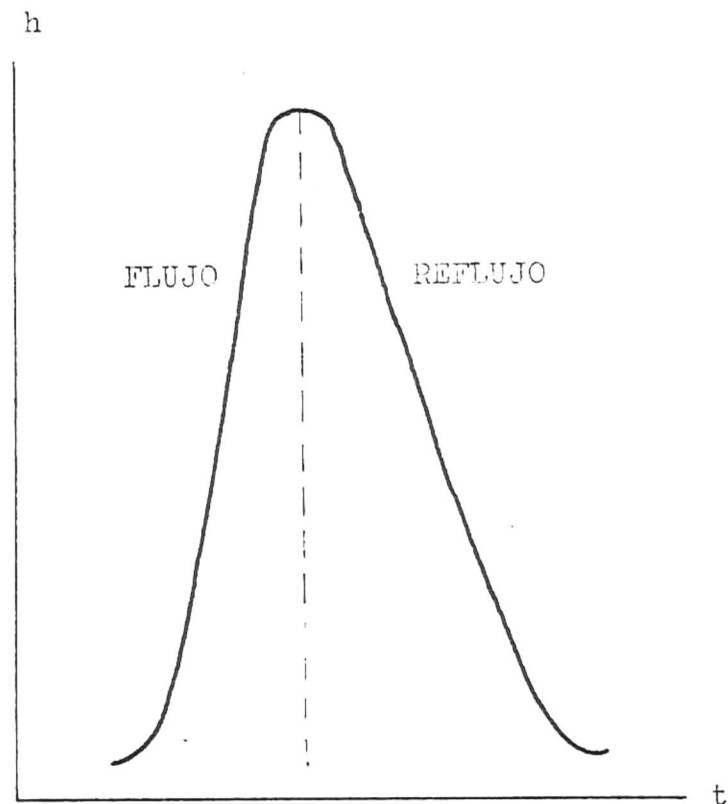
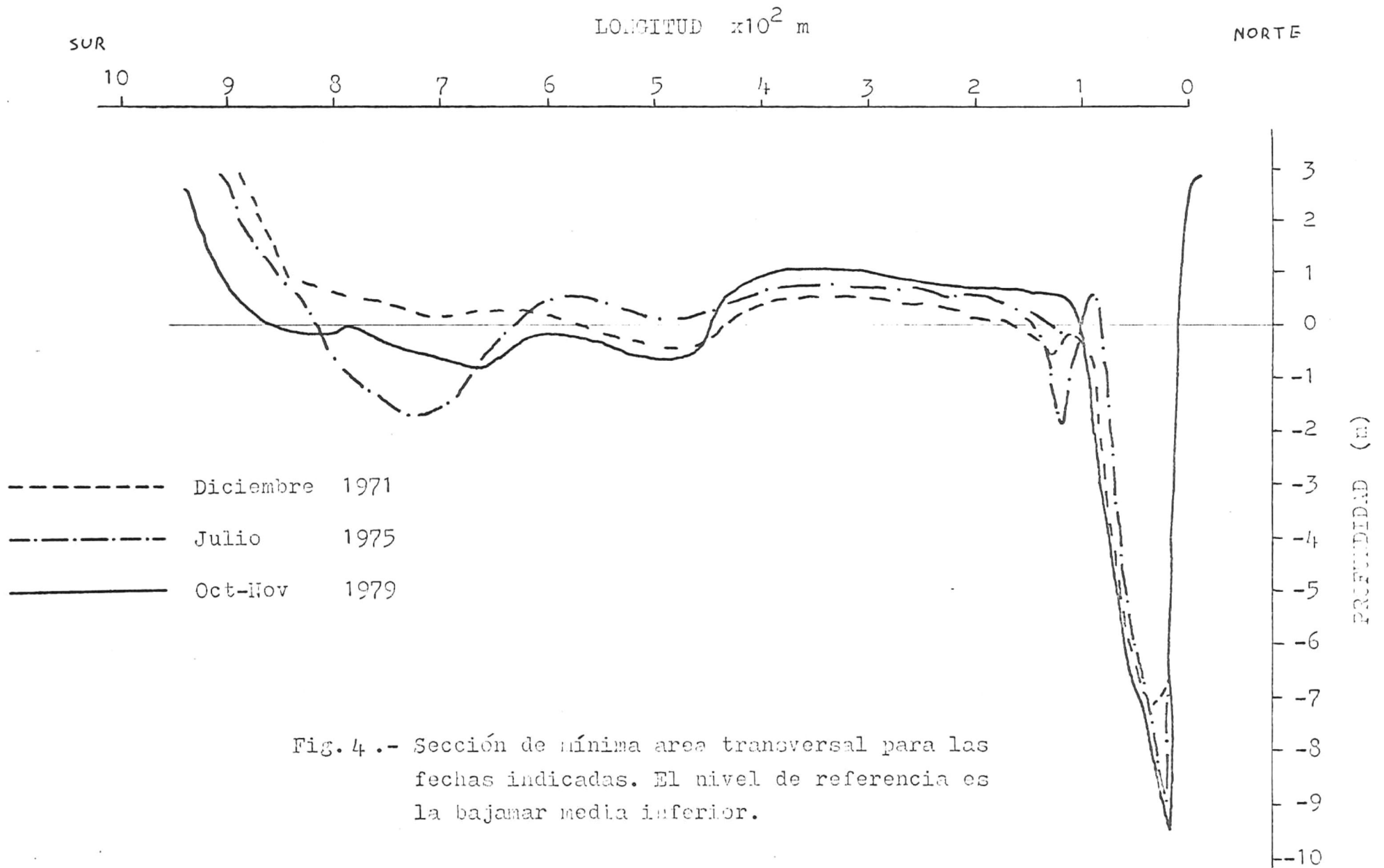


Fig. 3b.- Curva de marea representativa de un transporte neto de sedimento hacia el interior de la laguna.



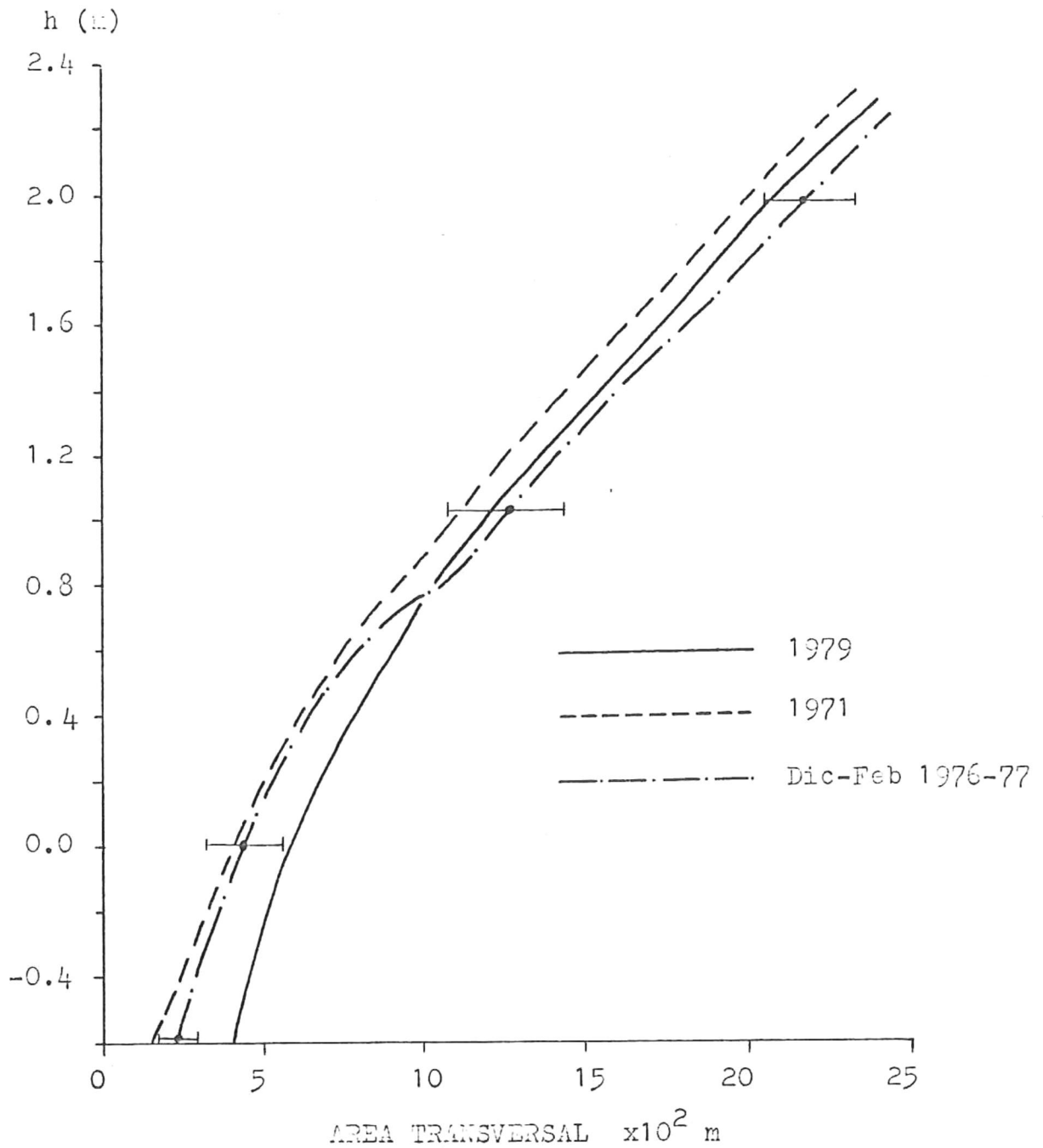


Fig. 5.- Secciones de Mínima área transversal en función del nivel del mar. La curva para Dic-Feb 1976-77, - fue calculada a partir del registro de velocidades, el registro de marea, y el volumen de la laguna en función del nivel del mar (fig. 6). Nivel de referencia: baja mar media inferior.

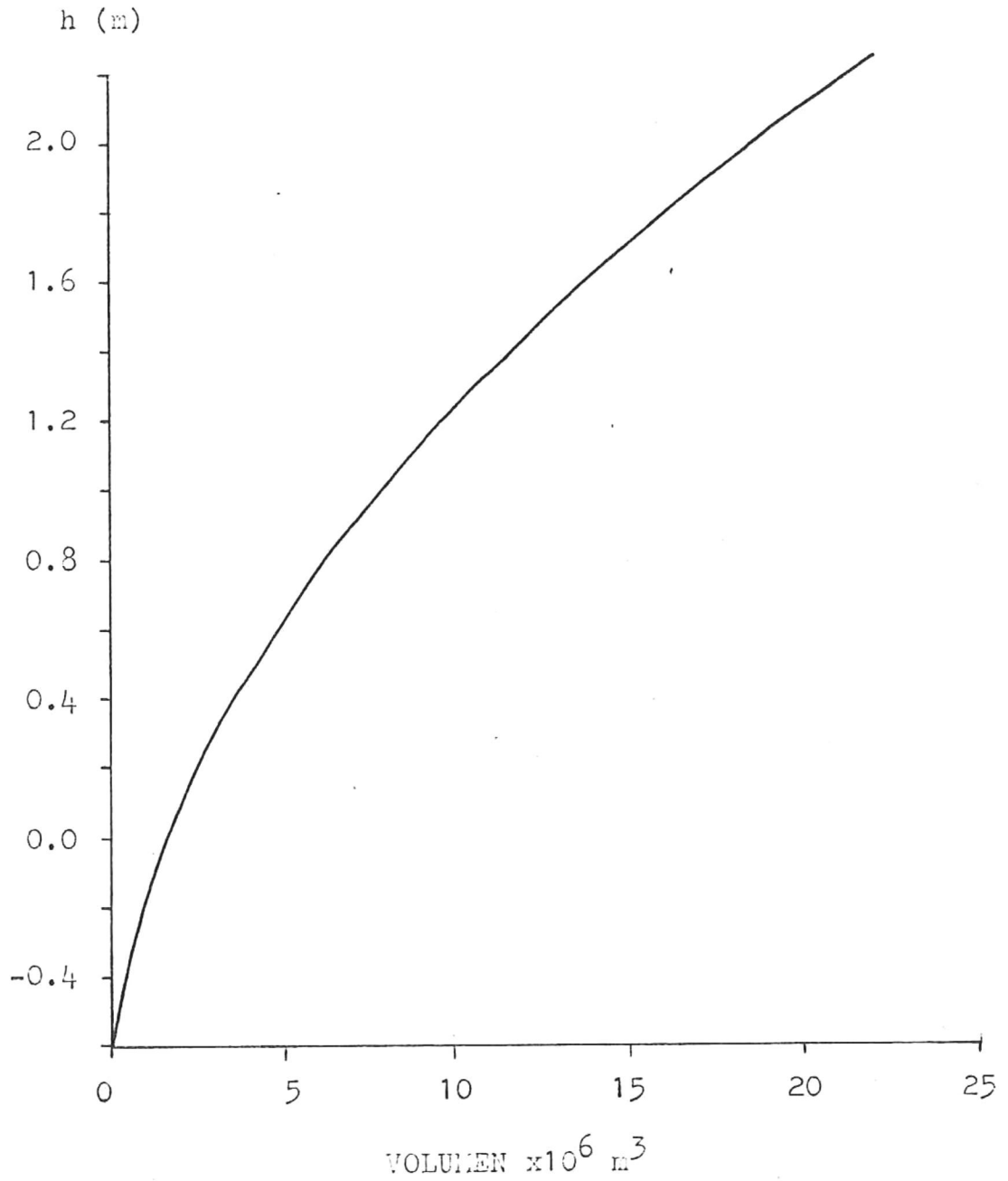


Fig. 6.- Volúmen de agua en el interior de la laguna, en función del nivel del mar. Obtenido del plano batimétrico del Estero de Punta Banda, de la Secretaría de Marina (1971). Nivel de referencia: baja mar media inferior.

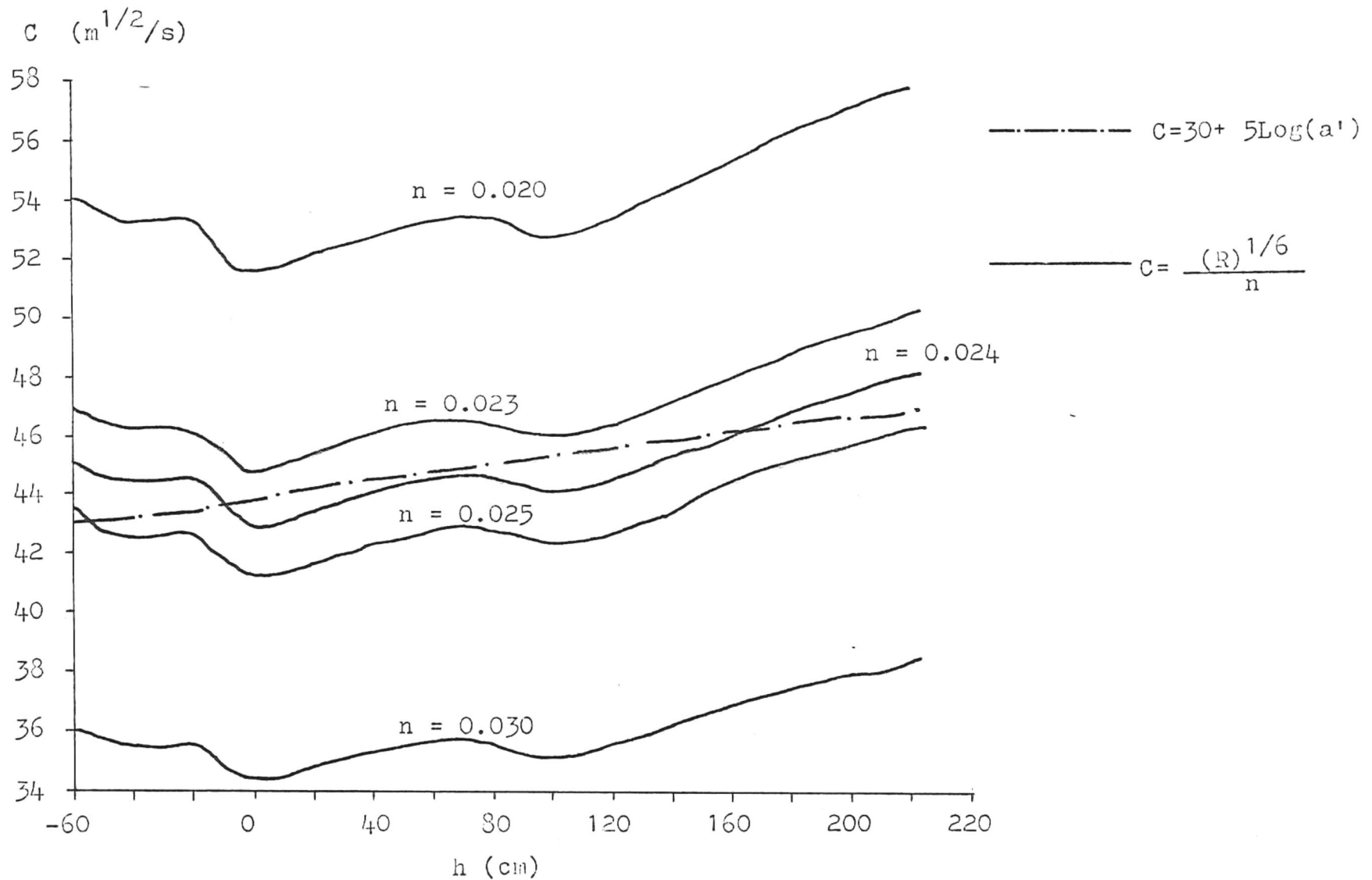


Fig. 7.- Comparación del coeficiente de fricción de Chezy dado por la fórmula de Bruun y Gerritsen (1960), contra el mismo coeficiente obtenido a partir de su relación con el coeficiente de Manning. El área transversal y el perímetro mojado usados en esta comparación, corresponden al levantamiento de 1979.

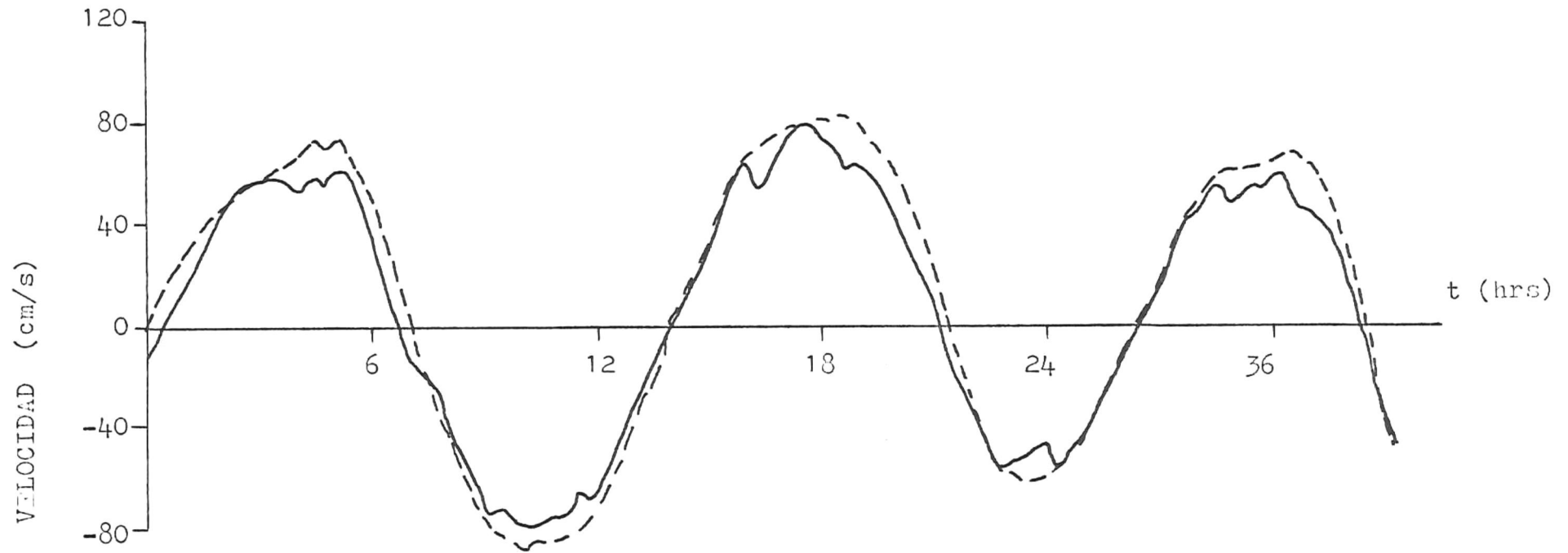


Fig. 8.- Una comparación de las velocidades medidas (línea quebrada), con las velocidades calculadas. Los valores positivos de la velocidad, indican --- agua saliendo de la laguna. Estos valores corresponden a dos días de --- diciembre de 1976.

Tabla 1.- Volúmenes transportados de arena, para el período Dic-Ene 1976-77. El signo negativo indica transporte de arena hacia el interior de la laguna.

PERIODO EN DIAS	VOLUMEN POR PERIODO 3 M	VOLUMEN ACUMULATIVO 3 M
0	0	0
3	500	500
6	3,700	4,200
9	3,400	7,600
12	1,200	8,800
15	-100	8,700
18	0	8,700
21	300	9,000
24	1,000	10,000
27	400	10,400
30	-100	10,300
33	-100	10,200
35	400	10,600

Tabla 2.- Volúmenes transportados de arena para el periodo Febrero de 1977. El signo negativo indica transporte hacia el interior de la laguna.

PERIODO EN DIAS	VOLUMEN POR PERIODO 3 M	VOLUMEN ACUMULATIVO 3 M
0	0	0
3	-250	-250
6	-130	-380
9	-20	-400
12	100	-300
15	-350	-650
18	-230	-880
21	-70	-950
24	0	-950
27	-10	-960

Tabla 3. - Transporte mensual (columna II) y acumulativo (columna III) en mts. cúbicos, para el período Oct-Ago 1978-79 (columna I). Hacia el exterior de la laguna.

I	II	III
OCT78	2,619	2,619
NOV78	7,584	10,203
DIC78	12,353	22,556
ENE79	8,771	31,327
FEB79	2,956	34,283
MAR79	2,852	37,135
ABR79	2,898	40,023
MAY79	4,054	44,870
JUN79	8,477	52,564
JUL79	8,286	60,840
AGO79	2,768	63,618

11. - BIBLIOGRAFIA:

- AGUILAR, A. V. - 1967. - Apuntes de Hidráulica Fluvial. - Asociación Mexicana de Ingeniería Portuaria, A. C.
- AGUILAR, R. y L. - (Comunicación personal. 1977).
- ALLEN, V. R. L. - 1970. - Physical Processes of Sedimentation. - Am. Elsevier Pub. Co. Inc. Chp. 5.
- ASCE, Task Commite on Sediment Transport. - 1971. - Sediment Transportation Mechanics: Sediment Discharge Formulas. - Proc. Am. Soc. of Civil Eng., Jour. Hydr. Div. No. H74, 523-567.
- BROWN, E. I. - Feb 1928. - Inlets on Sandy Coasts. - Proc. ASCE, 44: 505-553.
- BRUUN, P. - 1966. - Tidal Inlets and Littoral Drift. - Univ. Book Co. Oslo Norway, 210pp.
- , - Nov 1967. - Tidal Inlets on Alluvial Shores. - Lagunas Costeras: Un Simposio. - UNAM-UNESCO 349-366.
- BRUUN, P. and F. GERRIJSEN. - 1960. - Stability of Tidal Inlets. - North Holland Pub. Co. 130pp.

- BRUUN, P., F. GERRITSEN, and P. A. BHAKTA. - Nov 1974. -
Evaluation of Overall Entrance Stability of Tidal Entrances. -
Proc. 14th Conf. on Coastal Eng. 2:1567-1584.
- BYRNE, J. R., J. R. DE-ALTERIS, and P. A. BULLOCK. - 1974. -
Chanel Stability in Tidal Inlets: A Case Study. - Proc. 14th
Conf. on Coastal Eng. 2:1585-1604.
- CERVANTES, C. D. - Nov 1967. - Estabilidad del Acceso a la Bahía
del Mar Muerto. - Lagunas Costeras: Un Simposio. - UNAM-UNESCO
367-376.
- CHOW, V. T. - 1955. - A Note on the Manning Formula. - Trans. Am.
Geophys. Uni. 36(4):688.
- COMISION NACIONAL CONSULTIVA DE PESCA. - 1970. - Bahía de Altata.
Análisis Teórico de la Estabilidad del Acceso. - Reporte
Interno.
- DEPARTAMENTO DE PESCA. - 1975. - (Plano Batimétrico del Estero de
Punta Banda).
- ESCOFFIER, F. F. - Oct 1940. - The Stability of Tidal Inlets. -
Shore and Beach, 8(4):114-115.
- GUTIERREZ, L. H. and C. D. CASTRO. - 1974. - Study of
Topolobampo Bay Mexico Entrance. - Proc. 14th Conf. on
Coastal Eng. 2:115-1169.

GRÖEN, P. - Nov. 1967. - Physical Hydrology of Coastal Lagoons. -
Lagunas Costeras: Un Simposio. - UNAM-UNESCO 275-280.

HJULSTROM, F. - 1939. - Transportation of Detritus by Moving Water. -
Recent Marine Sediments: Tulsa, AAPG 5:31. - En: Krumbein y
Gloss 1969.

INMAN, D. L. - 1952. - Measures for Describing the Size
Distribution of the Sediments. - Jour. of Sedimentary
Petrology, 22:125-145.

INSTITUTO GEOLOGICO DE MEXICO. - 1913. - Parergones del Instituto
Geológico de México., Memoria de la Comisión del Inst. Geol.
de Mex. que Explora la Región de la Baja California., 4(2)
pp108, y lamina 1.

JOHNSON, J. W. - 1973. - Characteristics and Behavior of Pacific
Coast Tidal Inlets. - Jour. Waterways Harbors and Coastal
Eng. Div. 99(WW3):325-339.

KEULEGAN, G. H. - July 1967. - Tidal Flow in Entrances, Waterlevel
Fluctuations of Basins in Communications with the Seas. -
Commite on Tidal Hydraulics, Waterways Exp. Station, Tech.
Bull No. 14.

KING, C. A. M. - 1972. - Beaches and Coasts. - Edward Arnold Ed.
215-381.

KOMAR, P. D. - 1976. - Beach Processes and Sedimentation. - Prentice Hall, Inc. Chpts. 3, 5, 7.

KOMAR, P. D. and D. L. INMAN. - 1970. - Longshore Sand Transport on Beaches. - Jour. of Geophysical Res. 75(30):5914-5927.

KRUMBEIN, W. C. and L. L. SLOSS. - 1969. - Estratigrafia y Sedimentacion. - UTHEA cap. 6.

LANKFORD, R. R. - 1976. - Coastal Lagoons of Mexico their Origin and Clasification. - Estuarine Environments. John Wiley ed. 2:182-215.

MARINE ADVISERS. - 1961. - A Statistical Survey of Ocean Waves Characteristics in Southern California Waters. - U. S. Army Corps of Eng., Contract No. DA-04-353 CIVENG 60-37.

MCDOWELL, D. H. and B. A. O'CONNOR. - 1977. - Hydraulic Behaviour of Estuaries. - John Wiley and Sons ed. 292pp.

METEOROLGY INTERNATIONAL INC. - Feb 1977. - Deep Water Wave Statistics for the California Coast. Station 6. - Dept. of Navigation and Ocean Development, 1416 Ninth Street, Sacramento California.

NOTA-OLIVEIRA, I. B. - 1970. - Natural Flushing Ability in Tidal Inlets. - Proc. 12th Conf. on Coastal Eng. 1827-1845.

MOGEL, T. R. and R. L. STREET. - 1974. - Computer Evaluation of Littoral Transport. - Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., 3:715-725.

O'BRIEN, M. P. - Sep 1966. - Equilibrium Flow Areas of Tidal Inlets on Sandy Coasts. - Proc. 10th Conf. on Coastal Eng. Tokio Japan 1:676-686.

-----, - Nov 1967. - Dynamics of Tidal Inlets. - Lagunas Costeras: Un Simposio. - UNAM-UNESCO 397-406.

-----, - May 1971. - Notes on Tidal Inlets on Sandy Shores. - Univ. of Calif. Berkeley, HEL 24-5, 52pp.

O'BRIEN, M. P. - Feb 1976. - Notes on Tidal Inlets on Sandy Shores. - USACERC 26pp.

O'BRIEN, M. P. and L. ZEEVART. - 1968. - Design of Small Tidal Inlet. - Proc. 11th Conf. on Coastal Eng. Chpt. B, 1242-1257.

O'BRIEN, M. P. and R. G. DEAN. - 1972. - Hydraulics and Sedimentary Stability of Coastal Inlets. - Proc. 13th Conf. on Coastal Eng., 761-780.

OLIVARES, B. G. - Nov 1967. - Acceso a la Bahía de Topolobampo. - Lagunas Costeras: Un Simposio. - UNAM-UNESCO, 407-420.

PRITCHARD, D. W.; R. V. DE LA PAZ; H. M. CABRERA; S. S. FARRERAS y E. MORALES. - 1978. - Hidrografía Física del Estero de Punta Banda. Parte I: Analisis de Datos. - Ciencias Marinas 5(2):1-23.

URIBE, R. M. A. - 1964. - Bitacora personal de estudios físicos en Punta Banda.

RENGE, E. and H. W. PARTENSKY. - 1974. - Stability Criteria for Tidal Basins. - Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., 2:1605-1618.

SECRETARIA DE MARINA. - 1960. - (Plano Batimetrico del Estero de Punta Banda).

SECRETARIA DE MARINA. - Dic 1971. - Estudios Físicos en Punta Banda, Ensenada, B. C. Mexico. - Dirección General de Obras Maritimas. Reporte Interno.

SECRETARIA DE MARINA. - 1973. - Carta de Navegacion de la Bahía de Todos Santos. - Dirección General de Oceanografía y Señalamiento Marítimo

SECRETARIA DE MARINA. - 1974. - Estudio Geográfico de la Region de Ensenada. - Dirección General de Oceanografía y Señalamiento Marítimo. pp 73, 104, 124-126, 145-147.

SORENSEN, R. M. - Dec 1977. - Procedures for Preliminary Analysis of Tidal Inlets Hydraulics and Stability. - USACE Coastal Eng. Res. Center, Coastal Eng. Tech. Aid No. 77-B.

USACERC. - 1977. - Shore Protection Manual. - U. S. Army Corps of
Eng. Res. Center, Vols. 1, 2, y 3.

WILSON, W. S. - Feb 1966. - A Method for Calculating and Plotting
Surface Wave Rays. - U. S. Army Coastal Eng. Res. Center,
Tech. Memo. No. 17.