

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA

Escuela Superior de Ciencias Marinas

SIMULACION DE LA HIDRODINAMICA EN EL SISTEMA LAGUNAR COSTERO
HUIZACHE-CAIMANERO DE SINALOA, MEDIANTE LA APLICACION DE UN
MODELO NUMERICO DE ELEMENTOS FINITOS

T E S I S
que para obtener el título de
O C E A N O L O G O
p r e s e n t a
EUGENIO GOMEZ REYES

Ensenada B.C., abril de 1981

DEDICATORIA

A la memoria y recuerdo eterno de mis padres CRISPINA REYES DE GOMEZ y PASCUAL GOMEZ SANTES, Q.E.P.D.; quienes me dieron la vida y me enseñaron lo positivo y negativo de ella, lo que me ha guiado para encontrar el camino de mi formación.

A mis hermanos: OSCAR, ORLANDO, OLDA y PASCUAL, por su ejemplo en la unión de ideas, trabajo y decisiones; por la ayuda moral y material que siempre me han brindado; y, por su gran confianza y paciencia que han depositado sobre mí, mis estudios y mis decisiones.

A toda mi familia con respeto. A mis sobrinos: ERICK, SARAID, OSCAR y SAUL; quienes forman parte de mí. A mis cuñadas: DORA ALICIA y MARIA DE LOS ANGELES; a quienes las considero como mis hermanas.

A mis compañeros, maestros y amigos de la Escuela Superior de Ciencias Marinas; a quienes respeto y admiro porque sus actitudes, enseñanzas e ideas están siempre encaminadas hacia la formación de mejores profesionistas.

A mi profesor de matemáticas de la Secundaria y el Bachillerato GREGORIO FLORES BOTELLO, de la E.S.B.O. Num. 8 "Emiliano Zapata", de Poza Rica, Ver.; quien me enseñó las matemáticas básicas, con las cuales me fue posible realizar mis estudios universitarios con facilidad en ese campo, y a quien respeto por su labor, la cual no es insubsistente.

AGRADECIMIENTOS

Durante la elaboración del presente, desde su inicio hasta su presentación, se requirió no tan sólo del empeño del autor, sino de la labor de varias personas, con cuya colaboración fue posible realizar esta tesis.

En primer término agradezco, por su dirección y amistad, al M. en C. IGNACIO DEL VALLE LUCERO, quien sugirió el tema y proporcionó toda la información requerida; además, por haber depositado su confianza sobre mí para poder desarrollar este trabajo.

Hago extensivo mi agradecimiento al M. en C. JOSE GOMEZ VALDEZ, por su apoyo y consejo en el contexto global del trabajo.

Gracias especiales al Ocean. FRANCISCO OCAMPO y al P.O. CUAHUTEMOC NAVA, por la colaboración sobre aspectos técnicos y prácticos del procesamiento de datos.

Al estudiante y amigo GAUDENCIO ARIAS NAVARRO, mi agradecimiento por la ayuda desinteresada y honesta en la presentación de algunas de las figuras. A mis compañeros y amigos: estudiante RICARDO SEPULVEDA por su colaboración en las traducciones, al P.O. EDUARDO MORALES por su amistad ante todo y por su labor entusiasta sobre la revisión en la redacción del escrito, al estudiante ROBERTO CISNEROS MENDEZ por su ayuda en el manejo y ordenamiento de datos, y al estudiante DANIEL LOYA por su colaboración en el ordenamiento de programas computacionales.

Hago mención como algo muy especial, mi reconocimiento y agradecimiento al Ocean. RENE DE LA PAZ VELA por sus sugerencias desinteresadas durante todo el procesamiento de los datos e interpretación física de los mismos, sin las cuales esta tesis hubiera llevado más tiempo para su realización; además, por su fuerte crítica de la misma, la cual no mermó las relaciones amistosas, y sí, por medio de ella fue posible mejorar y ampliar este trabajo.

C O N T E N I D O

SIMULACION DE LA HIDRODINAMICA EN EL SISTEMA LAGUNAR COSTERO HUIZACHE-CAIMANERO DE SINALOA, MEDIANTE LA APLICACION DE UN MODELO NUMERICO DE ELEMENTOS FINITOS

1 .-	INTRODUCCION.....	1
2 .-	OBJETIVO.....	3
3 .-	AREA DE ESTUDIO.....	3
3.1	Descripción.-.....	3
3.2	Recursos pesqueros.-.....	4
3.3	Definición.-.....	5
4 .-	ANTECEDENTES.....	5
5 .-	MODELO.....	6
5.1	Historia.-.....	6
5.2	Descripción.-.....	7
5.3	Resolución de ecuaciones.-.....	9
5.3.1	Elementos Finitos:.....	9
5.3.1.1	Método de Residuales Pesados.....	11
5.3.1.2	Técnica Galeriana.....	12
5.3.2	Sistema de ecuaciones:.....	12
5.4	Parámetros necesarios.-.....	14
6 .-	MATERIALES.....	15
7 .-	DATOS.....	15
7.1	Batimetría.-.....	15
7.2	Mareas.-.....	16
7.3	Salinidades.-.....	16
8 .-	PROCESAMIENTO.....	17
8.1	Segmentación.-.....	17
8.2	Secciones transversales.-.....	17
8.3	Mareas.-.....	18
8.3.1	Digitalización:.....	18
8.3.2	Estacionaridad:.....	18
8.3.3	Sistema Estero Ostial:.....	19
8.3.4	Sistema Huizache:.....	22
8.3.5	Sistema Caimanero:.....	24
8.3.6	Sistema Estero Agua Dulce:.....	27
8.4	Salinidades.-.....	27

9 .- PARAMETROS DE ENTRADA.....	28
9.1 Geometría.-.....	28
9.2 Parámetros de solución.-.....	29
9.3 Condiciones de frontera.-.....	30
10 .- RESULTADOS, DISCUSIONES Y ANALISIS.....	30
10.1 Red Solución.-.....	31
10.2 Marea viva.-.....	32
10.3 Marea muerta.-.....	35
11 .- CONCLUSIONES.....	37
11.1 Area estudiada.-.....	37
11.2 Datos manejados.-.....	37
11.3 Respuesta del modelo.-.....	38
11.4 Hidrodinámica.-.....	38
12 .- BIBLIOGRAFIA.....	40
13 .- TABLAS.....	45
14 .- FIGURAS.....	54

LISTA DE TABLAS

A :	Constituyentes armónicas diurnas y semidiurnas de la marea de Mazatlán, Sin. México.	46
B :	Constituyentes armónicas diurnas y semidiurnas de la marea de Barrón.	47
C :	Constituyentes armónicas diurnas y semidiurnas de la marea de Botadero.	48
D :	Constituyentes armónicas diurnas y semidiurnas de la marea del tapo Caimanero.	49
E :	Constituyentes armónicas de la marea de Chametla.	50
F :	Admitancia entre series de tiempo de mareas.	51
G :	Valores estadísticos de las salinidades (‰) en los nodos de frontera.	52
H :	Valores del coeficiente de rugosidad de Manning.	53

LISTA DE FIGURAS

1.- Sistema lagunar costero Huizache-Caimanero Mazatlán, Sinaloa Mex.	55
2.- Localización de las estaciones de muestreos.	56
3.- Períodos de observaciones.	57
4.- Series de tiempo de mareas originales.	58
5.- Series de tiempo de mareas preprocesadas.	59
6.- Segmentación.	60
7.- Secciones transversales de los sistemas Estero Ostial y Huizache.	61
8.- Secciones transversales de los sistemas Caimanero y Estero Agua Dulce.	62
9.- Estacionaridad de las series de mareas.	63
10.- Series de tiempo de mareas inferidas en cada nodo de frontera (tapos).	64
11.- Espectros de potencia de las series de mareas.	65
12.- Correlogramas cruzados entre series de mareas.	66
13.- Salinidad en los nodos de frontera (tapos).	67
14.- Esquemmatización idealizada del sistema lagunar costero Huizache-Caimanero.	68
15.- Condiciones de frontera.	69
16.- Red de solución.	70
17.- Solución temporal para la marea viva en las regiones A, B, C, D y E.	71
18.- Solución temporal para la marea viva en las regiones F, G, H, I y J.	72
19.- Solución temporal para la marea viva en las regiones K, L, M, N y Ñ.	73
20.- Solución temporal para la marea viva en las regiones O, P, Q y R.	74
21.- Solución espacial para la marea viva en pleamar y bajamar.	75
22.- Solución temporal para la marea muerta en las regiones A, B, C, D y E.	76
23.- Solución temporal para la marea muerta en las regiones F, G, H, I y J.	77
24.- Solución temporal para la marea muerta en las regiones K, L, M, N y Ñ.	78
25.- Solución temporal para la marea muerta en las regiones O, P, Q, y R.	79
26.- Solución espacial para la marea muerta en pleamar y bajamar.	80

LISTA DE SIMBOLOS USADOS

SIMBOLO (=) NOMBRE. ---> UNIDADES DIMENSIONALES:

LONGITUD L^*

MASA M^*

TIEMPO T^*

A (=) Area de flujo de la sección transversal. ---> L^{*2}

A^T (=) Area transversal de todo el flujo. ---> L^{*2}

A^Z (=) Area de flujo estacionario de la sección transversal.
---> L^{*2}

a (=) Amplitud de la ola de marea. ---> L^*

a_0 (=) Amplitud inicial de la ola de marea. ---> L^*

a_j (=) Amplitud de la constituyente j de la marea. ---> L^*

$A_j(t)$ (=) Amplitud de la modulación de satélite para la
constituyente j de la marea. ---> L^*

B (=) Ancho superficial de flujo. ---> L^*

B_0 (=) Ancho superficial constante. ---> L^*

B_e (=) Ancho de banda de las estimaciones del espectro. ---> $1/T^*$

C (=) Coeficiente de Chezy. ---> $L^{*1/2}/T^*$

C_0 (=) Promedio de la serie de marea. ---> L^*

c (=) Concentración de la variable de calidad del agua (ppm).

dc (=) Profundidad del centroide de la sección transversal.
---> L^*

d/dx (=) Cambio espacial.

E (=) Energía. ---> M^*L^{*2}/T^{*2}

F (=) Número de Froude.

Ff (=) Frecuencia de doblamiento. ---> $1/T^*$

f (=) Frecuencia. ---> $1/T^*$

f_j (=) Frecuencia de la constituyente j de la marea. ---> $1/T^*$

$Gze(f)$ (=) Espectro de potencia. ---> M^*L^{*2}/T^{*2}

$\hat{G}_{ze}(f)$ (=) Estimación del espectro de potencia. $\rightarrow M^2 L^2 / T^2$

$G_{ze z_o}(f)$ (=) Espectro de potencia cruzado. $\rightarrow M^2 L^2 / T^2$

$\hat{G}_{ze z_o}(f)$ (=) Estimación del espectro de potencia cruzado.
 $\rightarrow M^2 L^2 / T^2$

G.L. (=) Grados de libertad.

g (=) Aceleración de la gravedad. $\rightarrow L^2 / T^2$

$H(f)$ (=) Admitancia o función de respuesta de frecuencia.

$\hat{H}(f)$ (=) Estimación de la admitancia.

h (=) Profundidad del flujo. $\rightarrow L$

K (=) Coeficiente de dispersión longitudinal. $\rightarrow L^2 / T^2$

L (=) Longitud del canal. $\rightarrow L$

$I(t)$ (=) Función pesada.

M (=) Número de nodos.

Mr (=) Media de una distribución de una variable aleatoria.

m (=) Número de constituyentes armónicas de la marea.

N (=) Número de observaciones o intervalos de datos.

$N1$ (=) Observaciones positivas.

$N2$ (=) Observaciones negativas.

$[N]$ (=) Función de coordenadas. $\rightarrow L$

$[N]_j$ (=) Función interpolada de coordenadas. $\rightarrow L$

n (=) Número de datos.

$\tilde{n}$ (=) Número de frecuencias adyacentes tomadas para la estimación promediada del espectro.

p (=) Variación en el tiempo.

Q (=) Descarga de la sección transversal. $\rightarrow L^3 / T$

$Q1$ (=) Flujo de entrada lateral por unidad de longitud.
 $\rightarrow L^2 / T / L$

R (=) Residual.

Rh (=) Razón hidráulica. $\rightarrow L$

$R_{ze}(t)$ (=) Autocorrelación.

$R_{zez_0}(t)$ (=) Correlación cruzada.

r (=) Corridas.

re (=) Rango de incremento en la masa de una variable por unidad de volumen, en una transformación externa. $\longrightarrow M^*/T^*/L^*$

ri (=) Rango de incremento en la masa de una variable por unidad de volumen, en una transformación interna. $\longrightarrow M^*/T^*/L^*$

S (=) Fronteras del sistema.

S_f (=) Pendiente del canal. $\longrightarrow L^*/L^*$

$S\%$ (=) Salinidad (%).

T (=) Período de tiempo. $\longrightarrow T^*$

t (=) Tiempo. $\longrightarrow T^*$

U (=) Promedio de la velocidad longitudinal en la sección transversal. $\longrightarrow L^*/T^*$

V (=) Dominio del sistema.

V_r (=) Variancia de una distribución de una variable aleatoria.

v (=) Velocidad de la ola. $\longrightarrow L^*/T^*$

W_j (=) Función de coordenadas pesada. $\longrightarrow L^*$

W'_j (=) Derivada de la función de coordenadas pesada con respecto a x .

X (=) Funcional.

X_j (=) Partes de la funcional.

$\bar{x}_i^2$ (=) Valor cuadrático medio de un intervalo de datos.

x (=) Desplazamiento longitudinal. $\longrightarrow L^*$

Z (=) Marea. $\longrightarrow L^*$

Z_i (=) Datos de mareas. $\longrightarrow L^*$

Z_e (=) Serie de tiempo de marea de entrada. $\longrightarrow L^*$

Z_o (=) Serie de tiempo de marea de salida. $\longrightarrow L^*$

$Z_o(t)$ (=) Serie de tiempo de marea predicha. $\longrightarrow L^*$

$Z(t_i)$ (=) Marea teórica. $\longrightarrow L^*$

- α (=) Nivel de significancia.
 β^2 (=) Coherencia.
 $\hat{\beta}^2$ (=) Estimación de la coherencia.
 γ (=) Peso específico del fluido. $\longrightarrow L^3/M^*$
 Δx (=) Intervalo espacial de solución numérica. $\longrightarrow L^*$
 Δt (=) Intervalo temporal de solución numérica. $\longrightarrow T^*$
 ΔT (=) Intervalo de tiempo de muestreo. $\longrightarrow T^*$
 $\partial/\partial x$ (=) Variación espacial o advectiva.
 $\partial/\partial t$ (=) Variación temporal.
 η (=) Coeficiente de rugosidad de Manning. $\longrightarrow T^*/L^{1/3}$
 Θ_j (=) Fase de la constituyente j de marea.
 μ (=) Coeficiente de fricción. $\longrightarrow 1/L^*$
 $\nu_j(t)$ (=) Argumento astronómico de la constituyente j de la marea.
 ξ (=) Error mínimo cuadrado.
 $\pi = 3.1416$
 ρ (=) Densidad del fluido. $\longrightarrow M^*/L^3$
 $\sum$ (=) Sumatoria.
 $\phi(t)_j$ (=) Fase de la modulación de satélite de la constituyente j de la marea.
 τ (=) Desplazamiento de unidades del tiempo. $\longrightarrow T^*$
 $\{\phi\}$ (=) Función de variables desconocidas.
 $\{\hat{\phi}\}$ (=) Estimación de la función de variables desconocidas.
 $\{\phi\}_j$ (=) Valores nodales asociados con cada elemento o parámetros característicos del elemento.
 $\{\phi\}$ (=) Conjunto de parámetros.
 Ω (=) Valor cuadrático medio de la serie de tiempo.

SIMULACION DE LA HIDRODINAMICA EN EL SISTEMA LAGUNAR COSTERO
HUIZACHE-CAIMANERO DE SINALOA, MEDIANTE LA APLICACION DE UN
MODELO NUMERICO DE ELEMENTOS FINITOS

1 .- INTRODUCCION

La utilización mas intensa del medio ambiente marino por el hombre ocurre en la zona costera, específicamente en los estuarios y lagunas costeras. Las características hidrodinámicas y biológicas de estos sistemas los hacen lugares preferentes al establecimiento de puertos y para actividades de producción alimenticia. Son también importantes como áreas de reproducción, desove, crecimiento y alimentación de algunas de las especies marinas de mayor importancia comercial; para otras son áreas de comunicación obligatoria entre el océano y cuerpos de agua terrestres, necesarias para completar ciclos de reproducción y desarrollo (Carrillo, 1980). La resolución de una gran variedad de problemas técnicos, biológicos, químicos y pesqueros en estos sistemas, requieren del conocimiento de su hidrodinámica.

En los 10000 Km. de litoral de la República Mexicana, existen aproximadamente 125 cuerpos costeros, denominados como: bahías, estuarios, lagunillas, lagunas costeras, etc., distribuidos en las fronteras del Pacífico, Golfo de California, Golfo de México y el Caribe (Lankford, 1976). Dentro de estos cuerpos, se encuentra el llamado sistema lagunar costero Huizache-Caimanero, ubicado al Sur del Estado de Sinaloa (fig. 1); caracterizado por alcanzar los niveles más altos de productividad en especies comerciales de la costa del Pacífico del País (Edwards, 1978).

El sistema lagunar costero Huizache-Caimanero posee características particulares muy especiales con respecto a la generalidad de los sistemas estuarinos y lagunares, causadas por las obstrucciones físicas artificiales (tapos), los cuales producen deformación y decaimiento de la energía en la marea (Del Valle y Villalba, 1980), así mismo por la morfología natural del área, alterada durante los períodos de grandes escurrimientos; por estas peculiaridades y las generadas a partir de ellas, se origina un sistema muy complejo, y cuyo estudio hidrodinámico resulta complicado.

La hidrodinámica de los estuarios y lagunas costeras es posible estudiarla a base de modelos físicos y numéricos, los cuales simulan con buena aproximación la situación real. Los modelos numéricos se prefieren sobre los modelos físicos, dada su versatilidad, facilidad de manejo, rapidez en la obtención de los resultados y bajos costos de operación; aunque no pueden reproducir gradientes de densidad tridimensionales, tienen problemas de estabilidad y existe la necesidad de definir condiciones de frontera. Mientras que en un modelo físico

el costo resulta muy elevado, difícil de modificarlo, presentando dificultades para la obtención de las mediciones y se producen efectos de distorsión por la escala; quedando restringido el uso de éstos a la solución de problemas de grandes dimensiones que involucren gastos de inversión elevada (Frank y Herrmann, 1975).

Los modelos numéricos se han utilizado desde mediados del siglo pasado, pero su empleo con más frecuencia en investigaciones ingenieriles ha sido durante las dos últimas décadas, causado por la aparición de computadoras de alta velocidad. Dichos modelos se utilizan para predecir la variación espacio-temporal de los parámetros hidrodinámicos y de calidad del agua: alturas del nivel de agua, velocidades de corrientes, descargas, salinidades, oxígeno, contaminantes, etc. El tamaño y complejidad de un modelo numérico depende de su objetivo. El tratamiento de modelos grandes requiere de mucho tiempo de computación, más datos experimentales y de más suposiciones, con lo cual su habilidad de predicción se ve reducida (Nihoul, 1975); motivando esto último la implementación de técnicas numéricas más adecuadas, como la de elementos finitos, la cual resulta una buena alternativa para la aproximación de fronteras geométricas irregulares, aunque aspectos concernientes a la convergencia y truncamiento de este método están aún en investigación (Vreugdenhil y Voogt, 1975), y además la complejidad de implementación en un computador puede incrementar demasiado el costo en comparación con el obtenido al aplicar el método numérico de diferencias finitas (McDowell y O'Connor, 1977).

El método numérico de elementos finitos consiste en la sustitución de la ecuación diferencial por un conjunto de funciones que la aproximen; donde la mejor estimación resulta cuando el residual de la aproximación es pequeño, esto se logra minimizando el residual por medio de la multiplicación con alguna serie de funciones pesadas, integrándolo sobre todo el dominio e igualando a cero, con lo que se obtiene un conjunto de ecuaciones con parámetros desconocidos, éstos generalmente son escritos como una serie de funciones interpoladas con coeficientes variables (Vreugdenhil y Voogt, 1975). Es decir, el comportamiento de todo el sistema se aproxima por un número finito de parámetros, factibles de producir un ensamblado en las ecuaciones que lo gobiernan, mediante un simple proceso de adición de términos contribuyentes de todos los subdominios o elementos; caracterizándose estos elementos por dividir al sistema en entidades físicamente identificables (Gallagher et al., 1975).

2 .- OBJETIVO

El problema principal que afecta la producción pesquera del sistema lagunar costero Huizache-Caimanero es el proceso intenso de sedimentación. Cualquier proyecto planteado para la rehabilitación del sistema crea la necesidad de implementar un marco teórico y práctico en el conocimiento de su hidrodinámica, para obtener a partir de ella una estimación cuantitativa de la variación espacio-temporal de otros parámetros de interés. Este marco teórico práctico puede resolverse mediante la aplicación de un modelo numérico eficiente.

En vista de lo anterior, el objetivo que se pretende es: obtener un conocimiento de los mecanismos y condiciones que regulan el comportamiento hidrodinámico del sistema lagunar costero Huizache-Caimanero, mediante la adaptación del modelo numérico de elementos finitos "Transient Water Quality Network" de la M.I.T., implementado por Harleman, Dailey, Thatcher, Najarian, Brocard y Ferrara; y a la vez, con la consecuente simulación eficiente en la complejidad del sistema, este modelo se probará y se dispondrá para ser utilizado en pleno en el estudio de éste y de otros sistemas.

3 .- AREA DE ESTUDIO

3.1 Descripción. -

El sistema lagunar costero Huizache-Caimanero se encuentra localizado aproximadamente a 25 Km. al Sureste de Mazatlán, Sin., (fig. 1), desde los 22°50' hasta los 23°10' de latitud Norte y de los 105°55' a 106°18' de longitud Oeste. El sistema lo forman dos lagunas, llamadas precisamente laguna Huizache y laguna Caimanero; la primera cubre un área de aproximadamente 12X5 Km.², ubicada al Noroeste, y la segunda al Sureste, de aproximadamente 20X10 Km.²; ambas están conectadas por una constricción de 300 m. de ancho, denominada Pozo de la Hacienda. Se encuentra separado del Pacífico por una barra de arena de 1.5 - 3.5 Km. de ancho y algo más de 35 Km. de largo, llamada Isla Palmito de la Virgen. Lo bordean al Norte el río Presidio y al Sur el río Baluarte, los cuales se asocian con su descarga en la boca artificial Barrón, de la laguna Huizache y en la boca natural Chametla de la laguna Caimanero respectivamente. Posee cuatro esteros (canales angostos que comunican el río y el mar con la laguna): el Ostial y Pozo del Caimán en Huizache y el de Anonas y Agua Dulce en Caimanero, de los cuales sólo el Ostial y Agua Dulce interactúan con el interior

del sistema, obstaculizándose esta comunicación en ciertas épocas del año (agosto - marzo), a causa de las obstrucciones artificiales llamadas tapos, localizadas como se muestran en la figura 1.

Las lagunas son muy someras; no cuentan con un sistema natural de canales dentro de ellas; alcanzan su máximo volumen en estaciones de lluvia (junio - octubre), activándose una gran cantidad de arroyuelos y zanjales que allí descargan; y se vacían parcialmente en estaciones secas, debido a que la entrada del agua por la marea aumenta muy poco el nivel en ellas (Galindo, 1978). En marzo, la laguna de Huizache queda aislada del mar a causa del cierre de la boca Barrón, producida por el avance en sentido opuesto de dos flechas de arena (Soto, 1969); por lo que cada año en ese mes, un canal artificial es abierto a través de la playa al estero Ostial (boca Barrón), por medio del cual se restablece la comunicación.

El clima de la región es tropical seco, con un promedio anual de precipitación pluvial de 800 mm., del cual un 80% ocurre durante julio y septiembre, y un 12% en junio y octubre. El rango de temperaturas oscila entre los 19° y 28°C (Phleger y Ayala, 1972).

Las lagunas se encuentran sujetas a regímenes de brisas y a los vientos predominantes de la región, los cuales son Noroestes, con una velocidad media mensual de 4 a 9.5 Km/hr.; sin embargo, de junio a septiembre se manifiestan vientos del Suroeste con velocidad media mensual hasta de 9.5 Km/hr. (Moore, 1979).

La marea oceánica de la región es de tipo mixta semidiurna con predominancia semidiurna, en donde a las pleamareas superiores máximas le siguen bajamareas mínimas inferiores (Moore, 1979 y Del Valle y Villalba, 1980).

3.2 Recursos pesqueros. -

De las 4 especies de camarón comercial del Noroeste de nuestro País: blanco (*Penaeus vannamei*), azul (*P. stylirostris*), café (*P. californiensis*) y rojo (*P. brevirostris*), solamente las dos primeras participan de las aguas protegidas en su ciclo biológico (Soto, 1969), por lo que para éstas, junto con la lisa (*Mugil cephalus*), el sistema lagunar costero Huizache-Caimanero ha sido un excelente criadero natural, originando con ello una pesquería bien desarrollada, basada principalmente en la explotación de la población de juveniles de camarón (Edwards y Erowers, 1974 y Edwards, 1977 y 1978).

Para la captura se utilizan las artes de pesca llamadas tapos, contruidos de pilotes de madera o concreto, en medio de los cuales se inserta una cerca de alambre con una luz de malla muy pequeña, formando una verdadera barrera transversal al canal de los esteros; evitando con esto la emigración de juveniles de camarón, los cuales se acumulan en estas trampas, de donde son luego extraídos con canastas. La

entrada de la postlarva del camarón a la laguna Caimanero se lleva a cabo a través de la boca Chametla, y en la laguna de Huizache es facilitada por el canal artificial llamado boca Barrón.

El problema principal que afecta a la producción pesquera en este sistema es el intenso proceso de sedimentación, asumido a la existencia de los tapos (Del Valle y Villalba, 1980); lo que ha motivado la construcción de sistemas de canales artificiales, los cuales también introducirían más agua dulce de los ríos e incrementarían el movimiento de la masa de agua (Edwards, 1978), pero hasta la fecha no se ha logrado el éxito requerido.

3.3 Definición. -

Existe cierta discrepancia en la literatura en relación a la nomenclatura de lo que es el llamado sistema lagunar costero Huizache-Caimanero.

Ringuelet, citado por Soto López (1969), utiliza el término sistema estuarial para estos casos, que por sus características a primera vista pudiera serlo, pero de acuerdo a la definición más actualizada de un estuario, usada por Pritchard (1971): "Un estuario es un cuerpo de agua costero semiencerrado, el cual tiene una comunicación libre con el océano abierto y en el cual el agua de mar es mediblemente diluida con agua dulce del drenaje de la tierra"; es obvio que por la falta de una comunicación libre con el mar, estos cuerpos de agua no pueden ser llamados estuarios; sin embargo, cuerpos de agua de las características de Huizache y Caimanero en cuanto a la dilución del agua de mar y su aislamiento con el océano, son llamados lagunas costeras (Pritchard, 1971).

Por esta razón, a estos cuerpos se les denomina sistema lagunar costero Huizache-Caimanero; entendiéndose por sistema, al conjunto de cuerpos de agua que tienen comunicación entre sí y con el mar, y que a la vez son independientes geográficamente de otros cuerpos.

4 . - ANTECEDENTES

El sistema lagunar costero Huizache-Caimanero ha sido estudiado por diversos autores y en diversos aspectos: Chapa Saldaña y Soto López (1969), recalcan su interés biológico y pesquero; Soto López (1969), discute la influencia de los factores hidrológicos sobre la producción camaronera; Ayala Castañares et al. (1970), en sus aspectos geológicos; Arenas Fuentes (1970), discute el

ciclo hidrológico; Gómez Aguirre (1969) y Gómez Aguirre et al. (1970), expusieron información parcial sobre la planctonología del sistema (citados por Gómez et al., 1974). Gómez Aguirre et al. (1974), describió el ciclo anual del plancton. Amezcua Linares (1977), estudió las generalidades ictiológicas del sistema. Edwards (1978), describe la ecología del sistema.

En cuanto a la hidrodinámica del sistema no se cuenta con muchos trabajos, y los escasos que existen no son específicos en el estudio de este campo:

Phleger y Castañares (1972), suponen tomando en cuenta la distribución de foraminíferos y salinidad: la mayor cantidad de agua del océano entra por el estero Agua Dulce y la mayoría del agua dulce entra por el estero Ostial, produciéndose la mezcla de éstas en la constricción de las lagunas.

Moore (1979), supone a las perturbaciones atmosféricas (rango de frecuencia entre 1 a 100 horas) como un factor importante en la mezcla y movimiento del agua dentro de las lagunas; indicando también una mayor evidencia de la existencia de un flujo de Huizache hacia Caimanero, modificado por el régimen de lluvias y el nivel del agua en las lagunas; además, afirma que el efecto de represa producido por los tapos cuando están en funcionamiento, afectan el refluo en los esteros, siendo esto más evidente sobre el tapo Botadero.

Del Valle y Villalba (1980), asumen el movimiento del agua dentro de las lagunas como respuesta a la brisa, y obtienen valores de mareas, velocidades y de algunos parámetros de calidad del agua durante diversos estadios de la marea; además, especifican una diferencia en el nivel del agua hasta de 50 cm., causada por el efecto de los tapos, los cuales también producen efectos friccionales en la marea.

5.- MODELO

5.1 Historia.-

El modelo numérico de elementos finitos "Transient Water Quality Network", incluyendo la dinámica del ciclo del nitrógeno para ríos y estuarios, es el resultado de la combinación de los trabajos de varios investigadores (Harleman et al., 1977):

Gunaratnam y Perkins en 1970, lo iniciaron mediante la solución de las ecuaciones hidrodinámicas para un flujo inestable en un canal abierto, mediante el método numérico de los residuales pesados de elementos finitos (técnica Galeriana).

Dailey y Harleman en 1972, desarrollaron el modelo para la calidad del

agua de un flujo inestable (técnica Galeriana), dando como predicciones: velocidades, elevaciones, concentraciones de salinidades, temperaturas, demanda de oxígeno y demanda bioquímica de oxígeno; donde la intrusión de cálculos de salinidades estuvieron basados en el trabajo de Thatcher y Harleman de 1972.

Harleman, Brocard y Najarian en 1973, reformaron la porción de temperatura e incluyeron parámetros meteorológicos.

Najarian y Harleman en 1975, hicieron la más reciente modificación, considerando la incorporación del ciclo del nitrógeno, basada en la solución dinámica de su ciclo en términos de 7 formas del nitrógeno existentes en el ambiente marino, y mediante la técnica numérica Galeriana.

5.2 Descripción. --

El modelo resuelve las ecuaciones de continuidad y momentum en una dimensión, para generar la variación temporal y espacial en las descargas, velocidades y elevaciones del nivel del agua, mediante la técnica Galeriana; esta información se utiliza en la resolución de las ecuaciones de conservación de masa, determinando la variación temporal y espacial de las siguientes variables de calidad del agua:

- a) Salinidad.
- b) Temperatura.
- c) Carbonatos.
- d) Variables del nitrógeno:
 - i) Amonio.
 - ii) Nitrito.
 - iii) Nitrato.
 - iv) Fitoplancton.
 - v) Zooplancton.
 - vi) Nitrógeno orgánico particulado.
 - vii) Nitrógeno orgánico disuelto.
- e) Oxígeno disuelto.
- f) Coliformes fecales.

Las ecuaciones de continuidad y momentum se establecen bajo las siguientes suposiciones y condiciones básicas:

- El movimiento es unidimensional.
- Se desprecian los efectos de la fuerza de Coriolis.
- Los efectos de fricción y turbulencia en las fronteras son parametrizados usando relaciones empíricas.
- Se desprecian las disipaciones locales de energía debidas a constricciones o efectos centrífugos por las curvaturas del canal.
- La presión es asumida hidrostática.
- Las aceleraciones verticales son despreciadas.
- El fluido es considerado homogéneo, excepto en las fronteras del océano.
- Las áreas de almacenamiento no tienen efectos inerciales sobre el movimiento.

Las ecuaciones de continuidad y momentum son una expresión de la ecuación de St. Venant (Strelkoff, 1969, Dronkers, 1964, Gunaratnam y Perkins, 1970, Dailey y Harleman, 1972 y Harleman et al., 1977):

i) Continuidad.

$$B \frac{dh}{dt} + \frac{dQ}{dx} - Q_l = 0$$

Variación temporal de la sección transversal + Variación espacial de la descarga - Descarga lateral = 0

ii) Momentum.

$$\frac{dQ}{dt} + 2U \frac{dQ}{dx} = - Ag \{ (1-F^2) \frac{dh}{dx} - F^2 \left(\frac{dA^z}{dx} \right) / B + dc \left(\frac{dp}{dx} \right) / \rho + U |U| / (C^2 Rh) \}$$

Variación temporal de la descarga + Término de advección = - Término de la fuerza de presión

- Efecto de la geometría del canal + Efecto del gradiente de densidad + Efecto de la fuerza de fricción

Donde:

- B (=) Ancho superficial de flujo.
- h (=) Profundidad del flujo.
- t (=) Tiempo.
- Q (=) Descarga de la sección transversal.
- x (=) Desplazamiento longitudinal.
- Ql (=) Flujo de entrada lateral por unidad de longitud.
- U (=) Promedio de la velocidad longitudinal en la sección transversal.
- A (=) Area de flujo de la sección transversal.
- g (=) Aceleración de la gravedad.
- F (=) Número de Froude.
- A^z (=) Area de flujo estacionario de la sección transversal.
- dc (=) Profundidad del centroide de la sección transversal.
- p (=) Densidad del fluido.
- C (=) Coeficiente de Chezy.
- Rh (=) Razón hidráulica.

El coeficiente de Chezy es expresado en función del coeficiente de rugosidad de Manning n :

$$C = [1.49/n][Rh]^{1/6}$$

La densidad está dada en términos de la salinidad S‰:

$$\rho = 0.75 \text{ S‰} + 1000$$

Y el número de Froude es relacionado con la velocidad de la ola v:

$$F = U/v ; \quad v = \sqrt{g(A/B)}$$

Para la ecuación de conservación de masa se toma en consideración el proceso de advección y dispersión, donde la masa del sistema es adicionada o removida, y bajo las condiciones y suposiciones básicas ya establecidas, la ecuación se expresa según Okubo (1964) y Holley y Harleman (1965) (citados por Dailey y Harleman, 1972):

$$\partial(A^T c)/\partial t + \partial(Qc)/\partial x = \partial[A^T K \partial c / \partial x] / \partial x + A^T r_i / r + A^T r_e / r$$

		Incremento	Incremento
Variación + Advección =	Dispersión +	de la masa por	+ de la masa por
local		proceso interno	proceso externo

Donde:

A^T (≡) Área transversal de todo el flujo.

c (≡) Concentración de la variable de calidad del agua.

K (≡) Coeficiente de dispersión longitudinal.

r_i (≡) Rango de incremento en la masa de una variable por unidad de volumen, en una transformación interna.

r_e (≡) Rango de incremento en la masa de una variable por unidad de volumen, en una transformación externa.

γ (≡) Peso específico del fluido.

5.3 Resolución de ecuaciones. --

5.3.1 Elementos Finitos:

La solución numérica de ecuaciones mediante elementos finitos consiste en la minimización de la funcional X , la cual es una integral de las variables desconocidas, factible de ser definida sobre todo el dominio V y las fronteras S del sistema en consideración, donde la función desconocida $\{\phi\}$ y sus derivadas aparecen (Zienkiewicz, 1971):

$$X = \int_V G(\{\phi\}, \partial\{\phi\}/\partial y, \dots) dV + \int_S H(\{\phi\}, \partial\{\phi\}/\partial y, \dots) dS$$

Además, se supone que las variaciones extremas de un área son conocidas y que son válidas como parte de todo el sistema, el cual es dividido por nodos en pequeñas partes llamadas elementos; con lo que es posible representar la función $\{\phi\}$ en forma aproximada $\{\hat{\phi}\}$ (Pinder y Gray, 1977):

$$\{\phi\} \approx \{\hat{\phi}\} = \sum_{j=1}^M [N]_j \{\phi\}_j$$

Donde:

$\{\phi\}_j$ ($\Rightarrow$) Valores nodales asociados con cada elemento o parámetros característicos del elemento.

$[N]_j$ ($\Rightarrow$) Función interpolada de coordenadas.

M ($\Rightarrow$) Número de nodos.

Es decir, si $\{\phi\}$ se aproxima por un polinomio de la forma:

$$\{\phi\} \approx \{\hat{\phi}\} = a + bY$$

Donde:

$$\{\phi\}_j = Y_j ; \quad \{\phi\}_{j+1} = Y_{j+1}$$

Entonces, la función se expresará:

$$\{\phi\} \approx \{\hat{\phi}\} = [(Y_{j+1} - Y)/(Y_{j+1} - Y_j)]\{\phi\}_j + [(Y - Y_j)/(Y_{j+1} - Y_j)]\{\phi\}_{j+1}$$

Y, estableciendo que la funcional total es igual a la suma de sus partes X_j :

$$X = \sum_{j=1}^M X_j$$

Donde la minimización de ella con respecto al número total de parámetros, describe un sistema de ecuaciones a partir del cual se obtiene la solución.

La funcional debe de cumplir con reglas de convergencia como resultado de su división en elementos (Zienkiewicz, 1971):

- Primero; a medida que decrece el tamaño del elemento, las funciones G y H de la integral en la funcional deberán de tender a un solo valor; para lo cual es necesario cumplir el siguiente criterio de convergencia:

Criterio 1.- Para el elemento, la función de coordenadas $[N]_j$ debe ser tal que al escoger un valor $\{\phi\}_j$, sea capaz de representarlo en el límite como un elemento de tamaño que decrece a cero; siendo el valor

de $\{\phi\}$, cualquiera de $\{\phi\}$ o de sus derivadas presentes en la funcional. - Segundo; la validez de la sumatoria sólo se verá afectada si al menos una superficie de integración es adicionada en la frontera interelemento; es decir, debe asegurarse que las funciones G y H permanezcan finitas allí. Esto es:

Criterio 2.- La función de coordenadas $[N]$, tiene que ser escogida de manera que en una interfase de un elemento, $\{\phi\}$ y sus derivadas de un orden menos que el que ocurre en la expresión de G y H que definen la funcional, sean continuas.

5.3.1.1 Método de Residuales Pesados.

Para realizar la integración del sistema de ecuaciones se han desarrollado varias técnicas; en trabajos de modelos, se creó la alternativa de los Residuales Pesados, en donde no se discute la validez de la convergencia de la funcional. Este método consiste en aproximar directamente las ecuaciones que gobiernan el problema, obteniéndose la ventaja de la no necesidad en la construcción de la funcional, y pudiendo éste ser extendido a rangos donde la funcional tal vez no existiría (Zienkiewicz, 1971).

De esta manera, si se considera un problema con un conjunto de ecuaciones diferenciales, con la función desconocida $\{\phi\}$ satisfaciéndose en el dominio V y en la frontera S , y si se pueden escribir las ecuaciones que gobiernan el problema como:

$$D(\{\phi\}) = 0$$

Y si además, un conjunto de funciones que satisfacen la condición de frontera pueden ser escritas como:

$$\{\phi\}_s = [N]\{\tilde{\phi}\}$$

En donde como antes, $[N]$ es una función de coordenadas y $\{\tilde{\phi}\}$ un conjunto de parámetros; entonces, la solución será (Zienkiewicz, 1971):

$$D(\{\phi\}_s) = R = 0$$

De donde, la estimación más aproximada resulta cuando el residual R es el mínimo valor para todos los puntos de V , para lo cual se requiere que el promedio pesado del residual, mediante una función W_j de coordenadas pesadas, sea cero:

$$\int_V W_j R dV = 0$$

A partir de donde se puede formar un sistema de ecuaciones simultaneas linealmente independientes, del cual se resuelve para $\{\phi\}$.

5.3.1.2 Técnica Galeriana.

Una alternativa para que el promedio pesado del residual sea cero, es cuando la función pesada y el residual sean ortogonales en el punto o intervalo de interés; de tal manera que dependiendo del valor escogido para W_j , pueden ser encontradas diferentes aproximaciones.

Cuando $W_j = [N]$, el método produce por lo general la mayor aproximación y es conocido como la técnica Galeriana (Zienkiewicz, 1971).

5.3.2 Sistema de ecuaciones:

Para desarrollar el método numérico de elementos finitos en las ecuaciones de continuidad y momentum, éstas son linearizadas mediante la multiplicación de $U+v$ y $U-v$ sucesivamente en la ecuación de continuidad, y sustrayendo el producto de la de momentum (Gunaratnam y Perkins, 1970):

$$\begin{aligned} \frac{dh}{dt} + (U \pm v) \frac{dh}{dx} - [1/(B(U \mp v))] [\frac{dQ}{dt} + (U \pm v) \frac{dQ}{dx}] = \\ - [Ag/(B(U \mp v))] [F^2 (\frac{dA^*}{dx})/B - Sf - dc(\frac{dp}{dx})/p] + Q1/B \end{aligned}$$

Lo cual, queda expresado en forma lineal:

$$\frac{dh}{dt} + \lambda \frac{dh}{dx} - \{1/(B_0 \bar{\lambda})\} \{ \frac{dQ}{dt} + \lambda \frac{dQ}{dx} \} - \Psi = 0$$

Donde:

Sf (= $\Rightarrow$) Pendiente del canal.

B_0 (= $\Rightarrow$) Ancho superficial constante.

$$\lambda = U + v \text{ (supuestamente constante).}$$

$$\bar{\lambda} = U - v \text{ (supuestamente constante).}$$

$$\Psi = - [Ag/(B \bar{\lambda})] [F^2 (\frac{dA^*}{dx})/B - Sf - dc(\frac{dp}{dx})/p] + Q1/B \text{ (supuestamente constante).}$$

Dando con esto solamente a $h(x, t)$ y $Q(x, t)$ como las variables desconocidas, las cuales se reescriben mediante el método de Residuales Pesados:

$$h(x, t) = \sum_{j=1}^M W_j(x) h_j(t)$$

$$Q(x, t) = \sum_{j=1}^M W_j(x) Q_j(t)$$

Y, empleando la técnica galerkiana sobre todo el dominio, considerado como la longitud L del canal; e indicando la derivada de la función pesada con respecto a x , mediante un primado:

$$\sum_{j=1}^M \left[(dh_j/dt) \int_0^L W_j W_i dx + \lambda h_j \int_0^L W'_j W_i dx - [1/(Bo\bar{\lambda})] [dQ_j/dt] \int_0^L W_j W_i dx + \right. \\ \left. \lambda Q_j \int_0^L W'_j W_i dx \right] - \psi \int_0^L W_i dx = 0 \quad i = 1, \dots, M$$

0, expresado como matriz:

$$\int_0^L \begin{bmatrix} W_{j1} & W'_{j1} & W_{j1} & W'_{j1} & W_1 \\ W_{j2} & W'_{j2} & W_{j2} & W'_{j2} & W_2 \\ . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . \\ W_{jM} & W'_{jM} & W_{jM} & W'_{jM} & W_M \end{bmatrix} dx \begin{bmatrix} dh_j/dt \\ \lambda h_j \\ -[1/(Bo\bar{\lambda})] [dQ_j/dt] \\ -[1/(Bo\bar{\lambda})] \lambda Q_j \\ -\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ . \\ . \\ 0 \end{bmatrix} \quad j = 1, \dots, M$$

A partir de la cual se puede resolver para h y Q empleando (Gunaratnam y Perkins, 1970):

$$W_j(x) = \begin{cases} [x - (j-2)\Delta x]/\Delta x & \text{para: } (j-2)\Delta x \leq x \leq (j-1)\Delta x \\ [j\Delta x - x]/\Delta x & \text{para: } (j-1)\Delta x \leq x \leq j\Delta x \\ 0 & \text{para: cualquier otra } x \end{cases}$$

$$dh_j/dt = (h_j^{p+1} - h_j^p)/\Delta t$$

$$dQ_j/dt = (Q_j^{p+1} - Q_j^p)/\Delta t$$

Donde p indica la variación en tiempo. Y, reproduciendo los coeficientes λ , $\bar{\lambda}$, Bo y ψ , para cada paso en los que se suponen constantes:

$$\lambda \rightarrow \lambda_j^p = (U \pm c)_j^p$$

$$\bar{\lambda} \rightarrow \bar{\lambda}_j^p = (U \mp c)_j^p$$

$$B_0 \rightarrow B_J^P$$

$$\psi \rightarrow \psi_J^{P+1}$$

En donde para ψ_J^{P+1} , el término Sf es desarrollado en series de Taylor:

$$Sf_J^{P+1} = Sf_J^P + (\partial Sf / \partial z)(\partial z / \partial t) \Delta t + (\partial Sf / \partial Q)(\partial Q / \partial t) \Delta t$$

Para las variables de calidad del agua, la ecuación de conservación de masa es tratada con el mismo procedimiento, tomando para ello la descarga Q del resultado hidrodinámico.

5.4 Parámetros necesarios. -

Para desarrollar la solución numérica es necesario conocer los parámetros correspondientes a la geometría del sistema, las condiciones iniciales y las de frontera.

Como un primer paso se hace necesario establecer la discretización del sistema, para delimitar con ello los segmentos y nodos, procurando que ésta describa lo mas aproximado posible las características importantes del sistema real; para lo cual se debe tomar en consideración: batimetría, geometría, descargas, áreas de transporte, áreas de almacenamiento, obstrucciones naturales y/o artificiales y red de datos muestreados. La longitud de los segmentos puede ser variable. Los nodos deben identificarse claramente, cuidando que la numeración entre los adyacentes sea la mínima diferencia algebraica para obtener con ello una reducción en la diagonalización de la matriz de los coeficientes (Segerlind, 1976 y Harleman et al., 1977).

Las secciones transversales son definidas para representar la geometría de los segmentos; en ellas es preciso especificar para cada elevación de la superficie: áreas totales y de flujo, ancho superficial total y de flujo, perímetro mojado y valor del coeficiente de rugosidad (Manning); éste último es un parámetro empírico con el cual se calibra el modelo para llevarlo a una solución aceptable.

En la determinación del intervalo de solución numérica en tiempo Δt y en espacio Δx , se debe tomar en cuenta el criterio desarrollado por Gunaratnam y Perkins (1970), el cual garantiza la convergencia del modelo:

$$\Delta t \leq 5.5 \Delta x / (U+v)$$

La convergencia consiste en tener una solución numérica equivalente a la analítica; para lo cual, se produce del modelo transitorio una respuesta de estado cuasi-estacionario; es decir,

cuando se obtenga que las elevaciones de la superficie y las descargas sean prácticamente las mismas de un período a otro. Para lograr esto, se tiene que proporcionar condiciones iniciales de elevación de la superficie y de descargas; éstas sólo afectan al número de períodos necesarios para lograr la respuesta cuasi-estacionaria.

Las condiciones de frontera pueden ser variaciones en tiempo de las descargas, elevaciones de la superficie o relación entre elevación de la superficie y descarga, especificadas en los nodos de frontera.

Además, es necesario determinar condiciones iniciales y de frontera para la salinidad, pero con una primera aproximación es suficiente, ya que el modelo no es muy sensible a cambios de este parámetro (Harleman et al., 1977).

6 .- MATERIALES

Los materiales usados para la obtención de los datos y en el desarrollo del presente trabajo se enlistan a continuación:

Mapa batimétrico del área de estudio.

Limnigrafos Rossbach.

Botellas Van Dorn.

Salinómetro de inducción Kahlsico.

Equipo integrado de análisis de agua de mar La Motte Chemical.

Computador PRIME 400.

7 .- DATOS

7.1 Batimetría.-

Las curvas de nivel del área en estudio, utilizadas para obtener los parámetros de la geometría y de las secciones transversales, se tomaron del mapa batimétrico de la SRH (hoy SARH), de septiembre de 1976, con una escala de 1:20000.

7.2 Mareas. -

Los registros de las elevaciones de la superficie del agua son los trabajados por Del Valle y Villalba (1980), que se efectuaron en 5 puntos del sistema, localizados como se presentan en la figura 2, denominándolos por su situación como: Barrón, Botadero, Huizache, Caimanero y Chametla. El registro se realizó mediante limnógrafos Rossbach, con precisión de ± 1 cm.; estos instrumentos pertenecen a SOTECSA y al Departamento de Pesca, y estuvieron a cargo de la Escuela de Ciencias del Mar de la UAS.

Los períodos de funcionamiento de los aparatos (fig. 3) y sus informaciones referidas al nivel medio de bajamar inferior son mostrados en la figura 4, en donde los registros de Botadero, Huizache y Caimanero, presentan una alteración anormal y una tendencia de disminuir el nivel; debido lo primero, al paso de la marea por los tapos, y lo segundo, al cese de abastecimiento de agua dulce en las lagunas (Del Valle y Villalba, 1980).

En particular, el registro de Botadero presenta dos tipos diferentes de señales (fig. 4), la de pequeña amplitud es efecto del atascamiento del mecanismo de relojería del aparato (Del Valle y Villalba, 1980); por esto, sólo se tomó en cuenta para su análisis la señal de mayor amplitud (fig. 5).

7.3 Salinidades. -

Los datos referentes a la salinidad se obtuvieron del muestreo de 9 estaciones en la laguna Huizache y 12 en la de Caimanero, localizadas como se observan en la figura 2; donde las estaciones de la laguna Huizache se denominaron con una H inicial, para diferenciarlas de las estaciones de Caimanero (C inicial), y con un número indicativo de la etiqueta dada a la estación.

Los muestreos se realizaron por la Escuela de Ciencias del Mar de la UAS, cubriendo los períodos indicados en la figura 3, tratando que éstos coincidieran con las mareas vivas y muertas.

Las muestras del agua se tomaron en superficie y fondo donde las estaciones por su profundidad lo permitieron; la colecta fue mediante botellas Van Dorn, almacenándose debidamente para su análisis en el laboratorio mediante un salinómetro de inducción marca Kahlsico, de rango entre 0-49‰ y precisión de $\pm 0.003\%$. En algunas ocasiones se efectuó la determinación in situ, mediante un equipo integrado de análisis de agua de la casa La Motte Chemical, cuyo rango en salinidad fluctúa entre 0-55‰ y con una precisión de $\pm 0.01\%$.

B .- PROCESAMIENTO

B.1 Segmentación.-

Para obtener la discretización del área de estudio se ensayaron varias esquematizaciones, en las cuales se consideraron como factores importantes: la batimetría, los transectos de muestreos, y como un factor de mayor peso, la posición de los tapos, que según muestran las series de mareas registradas (fig. 5), afectan cualitativa y cuantitativamente al fenómeno físico; marcando con ello condiciones de frontera necesarias en esos lugares. Además, debido a la no existencia de bifurcaciones de canales sobre el área de estudio, no es posible imponer más de dos condiciones de frontera sobre ella, si es que se segmenta de manera sucesiva, por lo que se optó en dividir al sistema lagunar costero Huizache-Caimanero en 4 sistemas pequeños o subsistemas, con su segmentación correspondiente y delimitados por los tapos como puntos naturales de subdivisión; denominándolos por su sitio ocupado como (fig. 6):

- I).- Sistema Estero Ostial.
- II).- Sistema Huizache.
- III).- Sistema Caimanero.
- IV).- Sistema Estero Agua Dulce.

De esta manera, los lugares ocupados por los tapos quedan como puntos donde deben de reproducirse las condiciones de frontera (mareas).

B.2 Secciones transversales.-

Para representar la geometría en cada segmento de los sistemas, se trazaron secciones transversales en cada uno de ellos, de tal manera que reprodujeran los rasgos más importantes (fig. 6).

Las distancias entre las secciones transversales II-2 a II-2-1 y II-2-1 a II-2-2 del sistema Huizache, y III-1-5 a III-2, III-2 a III-2-1, III-2-1 a III-2-2 y III-2-2 a III-2-3 del sistema Caimanero (fig. 6), las cuales tienen curvatura, se determinaron considerando una conservación de área entre la delimitada por esas secciones y el área correspondiente a un trapecio regular (interpolación lineal del área entre las secciones transversales); calculandose estas distancias a las profundidades definidas por los valores extremos de la marea de las series Huizache y Caimanero, y tomando como la distancia estimada el promedio de estos cálculos.

En cada una de las secciones transversales se calculó: área total

y de flujo, ancho superficial total y de flujo, y perímetro mojado; representados en las figuras 7 y 8. La determinación de los límites de las áreas de flujo dentro de las lagunas, se obtuvo siguiendo la pendiente de las partes más profundas (fig. 7 y 8), aunque estos límites pudieran ser otros a causa de la poca profundidad y a la no existencia de un canal de flujo.

8.3 Mareas. -

8.3.1 Digitalización:

Las series de mareas Z se muestrearon a intervalos de 1 hora; es decir, fueron representadas por una secuencia de:

$$\{Z(j\Delta T)\} \quad j = 0, 1, \dots$$

Con lo cual algunos elementos del registro analógico desaparecen, y donde el intervalo de tiempo de muestreo ΔT está dado en función de la frecuencia de doblamiento F_f (Bendat y Piersol, 1971):

$$\Delta T = 1/(2F_f)$$

Para el caso de estudio, la F_f es la frecuencia máxima esperada; y dado que las máximas frecuencias utilizadas en el análisis de las mareas son de 0.4874 ciclos/hora (constituyentes de aguas someras), se toma como F_f el valor de 0.5; evitando con esto problemas de doblamiento y contaminación (Godin, 1972).

8.3.2 Estacionaridad:

Las mareas son un fenómeno estacionario debido a las fuerzas que las producen, observándose en la costa de la región cercana al sistema lagunar costero Huizache-Caimanero, mareas mixtas con predominancia semidiurna (Moore, 1979 y Del Valle y Villalba, 1980); pero dada la forma anormal de las series Botadero, Huizache y Caimanero (fig. 5), fue necesario usar el procedimiento de distribución libre o no paramétrico (prueba de corridas), para saber la estacionaridad de las series y con ello la validez del procesamiento (con la eliminación previa del promedio y tendencia lineal, ya que esta es la forma en que se ocuparían para su análisis).

La ventaja de este procedimiento es el no suponer una distribución de función específica para la variable de interés. El método consiste en encontrar la probabilidad de una secuencia de N observaciones de

categorías excluyentes (positivas N_1 o negativas N_2) de la misma variable, a lo que se le denomina corridas (r), cuyo número debe esperarse dentro de un intervalo de probabilidad correspondiente a la distribución de una variable aleatoria con media M_r y variancia V_r (Bendat y Piersol, 1971):

$$M_r = 2(N_1 N_2) / N + 1$$

$$V_r = 2(N_1 N_2) (2N_1 N_2 - N) / [N^2 (N-1)]$$

Para este caso, se consideró el valor cuadrático medio $\bar{X}_i^2$ de N intervalos iguales de datos como el parámetro para producir las r corridas, en comparación con el valor cuadrático medio $\bar{X}^2$ de toda la serie. Y, tomando un nivel de significancia $\alpha = 5\%$ para todas las series y sus partes, excepto para Chametla y el primer tramo de Barrón, para las cuales $\alpha = 1\%$, se obtuvieron como resultados que todas las series y sus partes son estacionarias, excepto el último tramo de Barrón (fig. 9).

B.3.3 Sistema Estero Ostial:

En el sistema en consideración, se requirió la elevación del nivel del agua como condición de frontera en los tapos Botadero y Ostial. Para el tapo Botadero se tomó a la serie Barrón, distante en 400 m.; mientras que para el tapo Ostial la representación se hizo con la serie Botadero, distante en 2000 m. (fig. 2); ya que se observa en las series de mareas registradas (fig. 5) que al menos para las series Barrón y Botadero, es de mayor importancia el efecto del tapo sobre la marea, que la distancia recorrida por ésta.

Para poder elegir los ciclos de marea que se deberían de tomar como las condiciones de frontera y que fueran representativos del muestreo, hubo la necesidad de completar las series Barrón y Botadero.

Para la serie Barrón, se utilizó la función de respuesta de frecuencia $H(f)$ o admitancia, la cual describe las características dinámicas de un sistema lineal físicamente realizable y estable, definida como la transformada de Fourier de una función pesada $l(t)$ (Bendat y Piersol, 1971):

$$H(f) = \int_0^{\infty} l(t) e^{-i2\pi f t} dt$$

Y estimada como $\hat{H}(f)$:

$$\hat{H}(f) = \hat{G}_{z_e z_o}(f) / \hat{G}_{z_e}(f)$$

Donde:

$\hat{G}_{z_e z_o}(f)$ (=) Estimación del espectro de potencia cruzado entre la serie de marea de entrada (z_e) y la serie de marea de salida (z_o).

$\hat{G}_{ze}(f)$ (=) Estimación del espectro de potencia de la serie de marea de entrada.

Siendo el espectro de potencia cruzado $G_{zez_o}(f)$, para datos estacionarios, igual a dos veces la correlación cruzada $R_{zez_o}(t)$ entre Ze y Zo en el dominio de la frecuencia, y el espectro de potencia $G_{ze}(f)$, de la autocorrelación $R_{zeze}(t)$:

$$G_{zez_o}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{zez_o}(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

$$G_{ze}(f) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_{zeze}(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

Y donde, una correlación cruzada es sólo el promedio de la multiplicación de la serie Ze con otra Zo , desplazada cierta unidad de tiempo τ :

$$R_{zez_o} = \lim_{T \rightarrow \infty} 1/T \int_0^T Ze(t) Zo(t+\tau) dt$$

(Cuando la Zo de la correlación cruzada es también Ze , entonces es la autocorrelación).

De esta manera, el sistema que describiría la admitancia se formó por la serie de marea del puerto de Mazatlán, Sin., como la serie de entrada, la cual es bien conocida debido a su largo y continuo registro efectuado por el Instituto de Geofísica de la UNAM, y está localizada a 25 Km. de la serie de salida, representada por Barrón; así, la admitancia refleja la manera como la marea en Mazatlán pasa a ser la marea en Barrón.

Además, se utilizó la coherencia β^2 como una medida del grado de relación entre Ze y Zo , con lo cual se obtiene una idea de la linealidad del sistema, es decir de la proporcionalidad que debe existir entre Ze y Zo (Gabel y Roberts, 1973); donde esta coherencia está estimada como $\hat{\beta}^2$ (Bendat y Piersol, 1971):

$$\hat{\beta}^2 = |\hat{G}_{zez_o}(f)| / [\hat{G}_{ze}(f) \hat{G}_{zo}(f)]$$

De tal manera que: $0 \leq \hat{\beta}^2 \leq 1$; indicando con los valores cercanos a 1, una fuerte relación entre las series Ze y Zo .

Así, con la finalidad de agrupar y separar las frecuencias de las constituyentes armónicas de la marea, se dividió en 11 bandas el rango de frecuencias analizadas (0 - 0.5 ciclos/hora) y se calculó la admitancia para las bandas 1 y 2 de los dos tramos estacionarios de Barrón (271 y 277 datos respectivamente), obteniéndose los resultados mostrados en la tabla F; ya que en estas bandas de frecuencia se encuentran la mayoría de las constituyentes lineales de la marea.

Como la admitancia es posible expresarla mediante la relación (Godin, Eldring y Pinard, 1976):

$$Z_o = H(f)Z_e$$

Es decir, es factible obtener la serie de salida, unicamente multiplicando las amplitudes y sumando las fases de la admitancia y la serie de entrada, a cada frecuencia correspondiente.

En consecuencia, tomando la función de respuesta de la frecuencia originada entre Mazatlán y el primer tramo de Barrón, por ser de mayor coherencia en las bandas correspondientes a las constituyentes diurnas y semidiurnas (tabla F), y con las constituyentes de la marea de Mazatlán de las mismas bandas de frecuencia, las cuales son conocidas (tabla A), se obtuvieron las constituyentes de Barrón (tabla B) con un nivel de significancia de 95%, dando para la diurna como límites de confianza el valor de ± 0.1427 m., y para la semidiurna de ± 0.2331 m., según la distribución Fisher de dos grados de libertad. Los límites de confianza son propiamente producto del cálculo de la admitancia, que por la escasez de los datos son grandes; los de la semidiurna son causados por el valor de la coherencia en esa banda.

Una vez inferidas las m constituyentes de la serie de marea Barrón, se hizo su predicción $Z_o(t)$ (Foreman, 1977):

$$Z_o(t) = \sum_{j=1}^m A_j(t) a_j \cos(2\pi(\varphi_j(t) + \sigma_j(t) - \theta_j))$$

Donde:

- a_j, θ_j (=) Amplitud y fase de la constituyente j .
- $A_j(t), \sigma_j(t)$ (=) Modulación de satélite de la amplitud y fase para cada constituyente j .
- $\varphi_j(t)$ (=) Argumento astronómico para cada constituyente j .

De esta forma se logró obtener la serie completa de Barrón, la cual se asumió como la representante del tapo Botadero, correspondiente al nodo 2 del único segmento del sistema Estero Ostial (fig. 10), obteniéndose para ella límites de confianza de ± 0.2851 m., calculados como la desviación estándar de los residuales entre los dos primeros tramos de la serie original y la predicha; el tamaño de éstos era de esperarse debido a los obtenidos durante la estimación de la admitancia.

La serie Botadero se regeneró en los períodos sin registro, usando para ello también la admitancia, con la salvedad de que ahora la serie predicha de Barrón, pasó a formar la serie de entrada, y la serie Botadero la salida; de esta manera la admitancia refleja la respuesta que la estructura del tapo Botadero produce sobre la marea, ya que éste es la parte física causante del paso de la marea de Barrón a la de Botadero.

Así, se obtuvo la admitancia entre la serie de Barrón predicha y

los dos tramos de Botadero, con 235 y 181 puntos respectivamente (tabla F), y tomando las bandas de la admitancia del segundo tramo por su mayor coherencia según se muestra en la tabla F, y junto con las constituyentes diurnas y semidiurnas de la marea predicha de Barrón (tabla B), se obtuvieron con un nivel de significancia de 95% las constituyentes respectivas de la serie de salida (tabla C), con límites de confianza de ± 0.1316 m. y ± 0.1409 m. para las diurnas y semidiurnas respectivamente; con estas constituyentes se realizó la predicción para la serie Botadero, produciéndola con límites de confianza de ± 0.1196 m., esperados a causa de la estimación de la coherencia y a los pocos datos durante el cálculo de la admitancia.

De esta manera se completó la serie Botadero, la cual se asumió como la serie en el tapo Ostial (fig. 10), correspondiente al nodo 1 del único segmento del sistema Estero Ostial y a la vez al nodo 3 del segmento 2 del sistema Huizache.

B.3.4 Sistema Huizache:

Para los nodos de frontera 1 y 3 del sistema Huizache, localizados en los tapos Pozo de la Hacienda y Ostial respectivamente (fig. 3), las series de mareas ya existían, pues la del nodo 1 se tomó como la serie Huizache que dista 600 m. de su posición requerida (fig. 2), y la del 3 correspondió a la del nodo 1 del sistema Estero Ostial.

En este sistema se realizó un análisis de espectros de potencia, con la finalidad de comprobar la suficiencia de la segmentación hecha en él; es decir, la no necesidad de más segmentos para describir la hidrodinámica en esa área, y también para comprobar que los desplazamientos tomados de la serie de marea para representarlas en los nodos de frontera correspondientes (tapos), causan insignificancia comparado con el efecto producido por los tapos al pasar ésta sobre ellos.

El análisis consistió en demostrar que la pérdida de energía de la marea es en mayor grado por efecto de los tapos que por la fricción del fondo en la distancia que ésta recorre. Así, de acuerdo al teorema de Wiener-Khintchine, el cual establece que la transformada de Fourier de la autocorrelación es el espectro de energía (Hsu, 1973 y Kanasevich, 1975), y siendo el espectro de energía proporcional al espectro de potencia (Bendat y Piersol, 1971), es posible entonces, considerar al espectro de potencia como cierta medida de la energía en el dominio de la frecuencia, que por el teorema de Parseval (Kanasevich, 1975), esta debe ser equivalente a la del dominio del tiempo; por tanto, con los espectros de potencia de las series de mareas, es posible tener una medida de la energía, la cual se puede comparar con la energía teórica E de la marea dada como (Kinsman, 1965):

$$E = 0.5 \rho g a^2$$

Donde la amplitud a de la onda de marea cuando existe perdida de energía, está en función de la amplitud inicial a_0 , el desplazamiento longitudinal x , y el coeficiente de fricción μ (Ippen, 1966):

$$a = a_0 e^{-\mu x}$$

Ahora, con los espectros de potencia de la series Barrón y Botadero (predichas), es posible encontrar un coeficiente de fricción que puede considerarse característico de los tapos, ya que la distancia entre los registros de estas series (800 m.) es pequeña en comparación con la distancia de las series Botadero y Huizache (13900 m.), en la cual el efecto de la perdida de energía por fricción en el fondo influye sobre . Así, se obtuvieron los espectros de potencia para las series predichas Barrón y Botadero, con 36 grados de libertad y nivel de significancia de 95% según una distribución Chi-cuadrada (fig. 11); donde los grados de libertad G.L. se calcularon según Jenkins y Watts (1968) y Otnes y Enochson (1972):

$$G.L. = 2K(2Bn)$$

Donde:

$\hat{n}$ (= $\hat{n}$) Número de frecuencias adyacentes tomadas para la estimación promediada del espectro = 3.

n (= n) Número de datos.

B (= B) Ancho de banda de las estimaciones del espectro = K/n .

De esta manera, si se toma el máximo en la energía obtenida para el espectro de potencia de la serie predicha de Barrón (4.026×10^3), correspondiente a las frecuencias de las constituyentes semidiurnas (fig. 11), y si además se considera al lugar donde se registró la serie original de Barrón como punto de referencia, es posible calcular a_0 , que junto con el máximo en la energía ahora del espectro de potencia de la serie predicha de Botadero (3.42×10^2), también para las mismas constituyentes (fig. 11), y una distancia de 800 m. correspondiente a la separación donde las series originales de Barrón y Botadero fueron registradas, se computa un coeficiente de fricción μ (1.54×10^{-3}); con el cual se predice la energía que debería esperarse a una distancia de 800 m. del tapo Ostial hacia la laguna, determinandose igual a 2.9×10^4 .

Si la energía antes calculada es comparada con el máximo obtenido en el espectro de potencia de la serie Huizache (1.63×10^4), ya que los cálculos realizados para la obtención de y por ende de la energía perdida estuvieron basados también en el máximo de la energía de los espectros de potencia, aunque ahora correspondiente a frecuencias menores que las más bajas de la marea astronómica (fig. 11); se encuentra en esta comparación una diferencia (12.7) atribuida a la fricción en el fondo en la distancia (11100 m.) que separa el lugar

donde la energía se predijo, de aquel donde se registró la serie Huizache; esta pérdida de energía comparada con la que se tuvo en el tapo Botadero (3684) en sólo 800 m. de distancia, resulta despreciable. Siendo evidente también esta comparación al calcular el μ para la laguna (2.6×10^{-5}), donde la diferencia del orden de magnitud es criterio para considerar despreciable la pérdida de energía dentro de la laguna; y se establece el hecho de que el efecto de los tapos para la caída de la energía de la marea es más importante que la distancia que ésta recorre; luego entonces, los desplazamientos hechos de las series de mareas para inferirlas en los nodos de frontera (tapos), no altera significativamente el proceso físico; además, la poca energía ya existente en la laguna Huizache para el movimiento del agua, no amerita una segmentación detallada.

Este procesamiento también nos arroja que la mayor cantidad de la energía en la laguna Huizache es producto no de las constituyentes de la marea astronómica, como en el caso del estero Ostial, sino de un fenómeno que por su período (fig. 11) puede ser atribuido al régimen de vientos mas que a fenómenos atmosféricos del tipo de frecuencias (1 a 100 horas) que las supone Moore (1979), y que al régimen de brisas como lo consideran Del Valle y Villalba (1980).

8.3.5 Sistema Caimanero:

Para representar en este sistema la condición de frontera de su nodo 1 (tapo Pozo de la Hacienda), se usó la serie Caimanero, distante 4400 m. de él (fig. 2). El hecho de tener 2 condiciones de frontera para el tapo Pozo de la Hacienda es debido a la consideración a priori de que las condiciones del nivel de agua antes y después de este tapo, tienen cada una efectos provenientes de diferentes bocas y que su interacción es casi nula; supuesta por la no correlación encontrada entre las series Huizache y Caimanero, efectuadas hasta con 24 horas de desfaseamiento (fig. 12), y por el hecho de que el efecto de la marea astronómica al paso del primer tapo se elimina, en el segundo se destruye y para el tercero su efecto ya no es significativo, según su energía aportada (fig. 11).

En este sistema se hizo también un análisis de espectros de potencia, con las mismas finalidades que en el caso anterior. Con el auxilio de μ determinado anteriormente y supuesto válido para cada tapo, y el máximo en la energía de la serie Chametla (9.222×10^3) para la componente semidiurna (fig. 11), se computó una energía de 7.847×10^2 a 800 m. después del tapo Agua Dulce, con la cual se hizo la predicción para la energía esperada a 800 m. a partir ahora del tapo Caimanero (hacia la laguna), evaluada en 6.68×10^1 ; mientras que a 10800 m. de esta predicción, lugar donde se registró la serie Caimanero, se obtuvo del espectro de potencia de ésta un máximo en la energía de 1.49×10^2 , correspondiente como en el de la serie Huizache, a frecuencias también menores que las más bajas de la marea astronómica (fig. 11); produciéndose una diferencia (-82) mayor que en el caso del sistema anterior, pero que comparada con la caída de energía en el tapo Agua Dulce (8437) en sólo 800 m., resulta despreciable.

Observándose este mismo resultado al calcular el μ para esta laguna (-3.7×10^{-5}). Por lo tanto, las aseveraciones hechas en el sistema Huizacha en cuanto al desplazamiento de las series de mareas y a la no segmentación detallada, son extensivas para este sistema.

El hecho significativo en este procesamiento es que la diferencia de energía entre el lugar donde la serie Caimanero fue registrada y a 800 m. hacia la laguna después del tapo Caimanero donde se predijo, fue de signo negativo, es decir en vez de obtener que la energía se disipara por efecto de fricción en el fondo a lo largo de la distancia recorrida, aparece que se gana energía; esto se puede explicar tomando en consideración que el fenómeno, supuesto el régimen de viento que produce esta alta energía, actúa en mayor grado sobre esta laguna, creando una diferencia muy marcada entre la energía de la marea astronómica y la que éste aporta, según se observa en la figura 11.

Para reproducir la serie en el tapo Caimanero, correspondiente al nodo 3 de frontera de este sistema y a la vez al nodo 1 de frontera del sistema Estero Agua Dulce, se utilizó la admitancia obtenida entre la serie predicha de Barrón y el segundo tramo de la de Botadero, pues se obtuvo como la respuesta que el tapo produce sobre la marea; y como en este caso se consideró al sistema que la admitancia describe, formado por la marea de Chametla como la serie de entrada y al tapo Agua Dulce como la parte física modificadora de la marea al paso de él, pudiéndose con esto calcular la serie de salida, la cual se supone representante de la condición de marea en el nodo 3. Así, sólo bastó multiplicar las amplitudes y sumar las fases de las bandas de dicha admitancia con las constituyentes diurnas y semidiurnas de Chametla.

La obtención de las constituyentes de Chametla se logró mediante el análisis armónico (Godin, 1972 y Foreman, 1977); éste consiste en suponer a la serie de marea como una suma armónica de m constituyentes, incluyendo su promedio C_0 :

$$Z(t_i) = C_0 + \sum_{j=1}^m a_j \cos(2\pi(f_j t_i - \theta_j))$$

Donde interesa encontrar la amplitud a_j y la fase θ_j de cada constituyente j de frecuencia f_j conocida; para lo cual se usa la técnica del error mínimo cuadrado.

Así, reescribiendo $Z(t_i)$ como (Godin, 1972 y Foreman, 1977):

$$Z(t_i) = C_0 + \sum_{j=1}^m (C_j \cos(2\pi f_j t_i) + S_j \sin(2\pi f_j t_i))$$

Donde:

$$a_j = \sqrt{C_j^2 + S_j^2} \quad ; \quad \theta_j = \text{ARCTAN}(S_j/C_j)$$

Y, siendo el error mínimo cuadrado la minimización de la diferencia al

cuadrado ξ de lo medido Z_i y lo teórico $Z(t_i)$ para n numero de datos:

$$\xi = \sum_{i=1}^n (Z_i - C_0 - \sum_{j=1}^m (C_j \cos(2\pi f_j t_i) + S_j \sin(2\pi f_j t_i)))^2$$

Con respecto a los coeficientes C_0 , C_j y S_j ; resultando:

$$\begin{aligned} d\xi/dC_0 &= 2 \sum_{i=1}^n (Z_i - C_0 - \sum_{j=1}^m C_j \cos(2\pi f_j t_i) - \sum_{j=1}^m S_j \sin(2\pi f_j t_i))(-1) = 0 \\ d\xi/dC_j &= 2 \sum_{i=1}^n (Z_i - C_0 - \sum_{j=1}^m C_j \cos(2\pi f_j t_i) - \sum_{j=1}^m S_j \sin(2\pi f_j t_i))(-\cos(2\pi f_j t_i)) = 0 \\ d\xi/dS_j &= 2 \sum_{i=1}^n (Z_i - C_0 - \sum_{j=1}^m C_j \cos(2\pi f_j t_i) - \sum_{j=1}^m S_j \sin(2\pi f_j t_i))(-\sin(2\pi f_j t_i)) = 0 \end{aligned}$$

Lo cual se expresa también como una matriz de $m \times m$

$$\begin{bmatrix} n & D_1 & D_2 \dots D_m & G_1 & G_2 \dots G_m \\ D_1 & DD_{11} & DD_{12} \dots DD_{1m} & DG_{11} & DG_{12} \dots DG_{1m} \\ D_2 & DD_{21} & DD_{22} \dots DD_{2m} & DG_{21} & DG_{22} \dots DG_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ D_m & DD_{m1} & DD_{m2} \dots DD_{mm} & DG_{m1} & DG_{m2} \dots DG_{mm} \\ G_1 & GD_{11} & GD_{12} \dots GD_{1m} & GG_{11} & GG_{12} \dots GG_{1m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_m & GD_{m1} & GD_{m2} \dots GD_{mm} & GG_{m1} & GG_{m2} \dots GG_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_m \\ S_1 \\ \vdots \\ S_m \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} Z_i \\ Z_i \cos(2\pi f_1 t_i) \\ Z_i \cos(2\pi f_2 t_i) \\ \vdots \\ Z_i \cos(2\pi f_m t_i) \\ Z_i \sin(2\pi f_1 t_i) \\ \vdots \\ Z_i \sin(2\pi f_m t_i) \end{bmatrix}$$

Donde:

$$D_k = \sum_{i=1}^n \cos(2\pi f_k t_i)$$

$$G_k = \sum_{i=1}^n \sin(2\pi f_k t_i)$$

$$DD_{kj} = \sum_{i=1}^n (\cos(2\pi f_k t_i))(\cos(2\pi f_j t_i)) = DD_{jk}$$

$$GG_{kj} = \sum_{i=1}^n (\sin(2\pi f_k t_i))(\sin(2\pi f_j t_i)) = GG_{jk}$$

$$DG_{kj} = \sum_{i=1}^n (\cos(2\pi f_k t_i))(\sin(2\pi f_j t_i)) = GD_{jk}$$

De la cual es posible obtener C_j y S_j .

De esta forma se obtuvieron las constituyentes para Chametla mostradas en la tabla E, de las cuales se tomaron las diurnas y semidiurnas para obtener las constituyentes respectivas de la marea asumida en el tapo Caimanero (tabla D), y con ellas predecir la marea en ese punto (fig 10.), con límites de confianza no calculados a causa de la falta de datos de marea en esa localidad para producir los residuales. Quedando con esto completas las condiciones de frontera para este sistema.

8.3.6 Sistema Estero Agua Dulce:

Para este sistema, la serie en la frontera de su nodo 1 correspondió a la serie del nodo 3 del sistema Caimanero, y para la condición en la frontera de su nodo 2 se supuso a la serie de marea Chametla, aunque ésta dista en 3200 m. y es alterada por el recorrido, pero respaldándose en la validez de los análisis previos, en donde se mostró que la distancia recorrida modifica poco la marea en comparación con el efecto que producen los tapos; por lo que la alteración que pudiera tener esta serie, se ve incluida en la que producen los tapos.

8.4 Salinidades. -

La obtención de la salinidad en cada nodo de frontera se realizó mediante el cálculo de la mediana (estimada como el cuartil medio) de los datos de todos los períodos de muestreo de las estaciones localizadas más cercanas a ellos (fig. 2).

Las medianas de las salinidades obtenidas se presentan en la figura 13, donde se muestra la dispersión como la distancia intercuartílica del cuartil superior e inferior (Tuckey, 1977); siendo los valores estadísticos de estos cálculos, los exhibidos en la tabla G.

De este procesamiento no es posible obtener alguna información inferible en buen grado, dada la escasez de los datos (tabla G), afortunadamente el modelo no es muy sensible a cambios de salinidad y una distribución aproximada de ella es suficiente para la obtención apropiada de la solución hidrodinámica (Harleman et al., 1977); por lo que se considera a la estimación hecha de este parámetro como aceptable para el propósito presente.

9. - PARAMETROS DE ENTRADA

9.1 Geometría. -

El sistema Estero Ostial se aproximó a un canal de flujo, quedando integrado por un solo segmento de 2400 m., con el nodo 1 de frontera corriente arriba en el tapo Ostial y el 2 corriente abajo en el tapo Botadero (fig. 6). Para su representación geométrica se describió una sola sección transversal (0) característica del canal (fig. 7).

En el sistema Huizache la geometría se representó por 6 secciones transversales en cada uno de sus dos segmentos (fig. 6); el primero correspondió desde el tapo Pozo de la Hacienda corriente arriba hasta el nodo 2 interno a 4500 m. corriente abajo, donde se hicieron necesarias las secciones transversales: II, II-1-1, II-1-2, II-1-3, II-1-4 y la II-2 (fig. 7), localizadas a 0, 600, 1400, 2650, 3900 y 4500 m. respectivamente a partir del nodo 1, con la característica para todas las secciones de que el ancho superficial de flujo tiende a igualarse al perímetro mojado, común de canales muy anchos (Henderson, 1966); para el segmento 2, que abarcó desde el nodo 2 corriente arriba hasta 8000 m. en el nodo 3 de frontera corriente abajo (tapo Ostial), se describieron las secciones transversales: II-2, II-2-1, II-2-2, II-2-3, II-2-4 y I (fig. 7), ubicadas a 0, 1660, 3230, 4300, 5800 y 8000 m. respectivamente a partir del nodo 2, con las mismas características que en el segmento 1 en cuanto al ancho superficial y al perímetro mojado para todas las secciones, excepto la II-2-4 y I.

Para el sistema Caimanero la representación geométrica quedó determinada por 12 secciones transversales entre sus 2 segmentos (fig. 6); 7 para el segmento 1, que abarcó desde el nodo 1 de frontera corriente arriba en el tapo Pozo de la Hacienda hasta 8000 m. en el nodo 2 interno corriente abajo: II, III-1-1, III-1-2, III-1-3, III-1-4, III-1-5 y III-2 (fig. 8), situadas a 0, 720, 1700, 3340, 4530, 5800 y 8000 m. respectivamente a partir del nodo 1; y 5 secciones transversales para el segmento 2, abarcando desde el nodo 2 corriente arriba hasta el nodo 3 de frontera en el tapo Caimanero (corriente abajo) y con una longitud igual al segmento 1: III-2, III-2-1, III-2-2, III-2-3 y III (fig. 8), localizadas a 0, 2250, 5470, 7400 y 8000 m. respectivamente a partir del nodo 2. Siendo el ancho superficial de flujo para todas las secciones de este sistema muy cercano al perímetro mojado, excepto para la sección III.

El sistema Estero Agua Dulce se aproximó como en el caso del sistema Estero Ostial a una canal de flujo de 2800 m., representándolo por su diferencia marcada en profundidad con 2 secciones transversales, colocadas en los nodos de frontera (fig. 8), el 1 en el tapo Caimanero corriente arriba y el 2 en tapo Agua Dulce corriente abajo.

Con estas secciones transversales se aproximó detalladamente la geometría del área de estudio, obteniéndose así la esquematización idealizada mostrada en la figura 14.

9.2 Parámetros de solución.-

El intervalo espacial de solución numérica Δx , para los sistemas Huizache y Caimanero fue establecido en base a la irregularidad geométrica, que éstos poseen, quedando determinado por 500 m., siendo éste una distancia menor que la existente entre 2 secciones transversales de los sistemas. Para determinar el intervalo temporal de solución numérica Δt , referido a un período de marea de 44640 seg., se usó el criterio de Gunaratnam y Perkins (1970), tomando para ello los valores máximos de ancho superficial de flujo correspondiente a la sección II-2-1 en Huizache y III-2-3 en Caimanero (fig. 6), pues con ellos se obtenía el valor más pequeño del Δt , y considerando valores promedios aproximados de velocidades en estas localidades (6 y 5 cm/seg. respectivamente) dados por Del Valle y Villalba (1980), se estimó un $\Delta t=637.71$ seg., dando con esto 70 incrementos en el período de marea, y previendo con ello la convergencia de la solución, la cual se determinó con una incertidumbre del 5%.

Para los sistemas Esteros Ostial y Agua Dulce, la determinación del Δx no requirió de alguna consideración geométrica ya que se trataron como simples canales de flujo, por lo que la elección del $\Delta x=400$ m. obedeció al hecho de tener más de 6 incrementos dentro del único segmento de los sistemas y obtener así una solución razonable (Harleman et al., 1977). Para obtener el Δt , como en los sistemas anteriores se tomaron los valores promedios aproximados de las velocidades en esos lugares (60 y 30 cm/seg. respectivamente) dados por Del Valle y Villalba (1980), estimando con ello el $\Delta t=496$ seg., es decir 90 incrementos en un período de marea; y la convergencia de la solución se indujo con una incertidumbre también del 5%.

Con los parámetros anteriores se corrió el programa computacional del modelo en la PRIME 400 del CICESE, para dos períodos de marea representativos de las condiciones extremas del período de muestreo (condiciones de frontera), calibrándose con los coeficientes de rugosidad de Manning, cuyo valor de 0.018 fue característico para las secciones transversales de todos los sistemas, excepto para el sistema Caimanero en el cual existió mucha variación en ello, sobre todo en su segmento 1; siendo los valores usados en este sistema los mostrados en la tabla H.

9.3 Condiciones de frontera. -

De las series de mareas inferidas en los tapos (fig. 10), correspondientes a los nodos de frontera en los sistemas, se eligió simultáneamente un ciclo de marea viva y otro de marea muerta de manera que reflejaran las condiciones extremas representativas del período total del muestreo.

Para considerar en que boca se podría tomar como inicialización del proceso físico y así poder delimitar los períodos de marea de las condiciones de frontera en la serie de tiempo correspondiente, se obtuvo una correlación cruzada entre las series inferidas en los tapos Botadero y Agua Dulce que según su localización (fig. 2), representan prácticamente las condiciones en las bocas Barrón y Chametla respectivamente; resultando en ello un valor máximo de la correlación de -0.944 , e indicando un retardo en la marea de 00:10 horas para la boca Chametla (fig. 12). El valor de la correlación obtenido fue grande aunque las series que representan las condiciones en las bocas sean diferentes, pues para el tapo Botadero se tiene que a las pleamares máximas superiores le siguen bajamares mínimas inferiores (fig. 10), concordante con la marea de la región (Moore, 1979 y Del Valle y Villalba, 1980), mientras que para el tapo Agua Dulce a las pleamares máximas superiores no siempre le siguen bajamares mínimas inferiores (fig. 10).

De esta manera se eligieron los ciclos de marea empezando por el tapo Botadero; para la marea viva correspondió desde las 03:00 horas del día 3 de noviembre de 1979 (723 horas a partir del inicio del registro: 4/oct./79), abarcando 44640 seg., y el ciclo de marea muerta se inició a las 00:00 horas del 13 de noviembre de 1979 (960 horas a partir del inicio del registro: 4/oct./79), con una duración igual al ciclo anterior, mostrados en la figura 15; en donde no se observa para las condiciones del tapo Pozo de la Hacienda algún ciclo bien conformado, además de que sus rangos de variación (6 cm.) son demasiado pequeños comparados con los de las bocas (130 cm.); esto se acentúa más en la marea muerta.

10 .- RESULTADOS, DISCUSIONES Y ANALISIS

10.1 Red Solución. -

La solución hidrodinámica de los sistemas se eligió en lugares donde de acuerdo a la geometría debería existir un cambio ligeramente marcado en ella, y no en cada incremento Δx donde existiría la solución. De esta manera se determinaron regiones de solución en cada sistema, que juntas formaron la red solución del área de estudio mostrada en la figura 16; donde para el sistema Estero Ostial las regiones A y C se situaron en sus extremos (tapo Botadero y tapo Ostial), y la B en la mitad de éste (1200 m.); las regiones J, H y C se fijaron en los nodos 1, 2 y 3 respectivamente del sistema Huizache, la región I se situó casi a la mitad del segmento 1 de este sistema (2000 m. a partir de J), mientras que las regiones G, F, E y D se distribuyeron a lo largo de su segmento 2 a 1500, 3000, 4500 y 6000 m. respectivamente a partir de H; en el sistema Caimanero las regiones K, N y P describieron la solución en los nodos 1, 2 y 3 respectivamente, las regiones L y M se situaron a 4500 y 6500 m. respectivamente del segmento 1 a partir del tapo Pozo de la Hacienda, y las regiones Ñ y O a 5500 y 7500 m. respectivamente del segmento 2 a partir de N; para el sistema Agua Dulce las regiones P y R se colocaron en los tapos Caimanero y Agua Dulce, extremos de este sistema, y en su parte casi intermedia (1200 m. antes del tapo Agua Dulce) se situó la región Q.

De esta forma queda la región C como solución común para los sistemas Estero Ostial y Huizache, en igual caso que la región P lo es para los sistemas Caimanero y Estero Agua Dulce; pero en ambas regiones sólo se tomó la solución resuelta en los esteros por considerarla más certera dada la sencillez de éstos, tratados como un canal de flujo. En el tapo Pozo de la Hacienda quedaron descritas 2 regiones (J y K) correspondientes a la solución en Huizache y Caimanero, dado que fue el único punto con dos condiciones de frontera diferentes a la vez.

Así, en la red solución (fig. 16) quedó distribuida la solución temporal descrita para todo el ciclo de marea viva y muerta. La solución espacial de la marea viva se obtuvo en el incremento Δt de 14 seg. para los sistemas Huizache y Caimanero, y de 18 seg. para los sistemas Esteros Ostial y Agua Dulce, equivalentes a 8928 seg., que corresponde a la pleamar de la marea del tapo Botadero (fig. 15), lugar donde tiene inicio el proceso físico; para la bajamar (31248 seg.) se utilizaron los Δt de 49 seg. y 63 seg. para los pares de sistemas Huizache y Caimanero y Esteros Ostial y Agua Dulce respectivamente; mientras que para la marea muerta los Δt de 21 seg. y 27 seg. en pleamar (13392 seg.) y 56 seg. y 72 seg. en bajamar (35712 seg.) para los pares de sistemas Huizache y Caimanero y Esteros Ostial y Agua Dulce respectivamente (fig. 15).

Para lograr la respuesta cuasi-estacionaria de cada uno de los sistemas, es decir la convergencia de la solución dada por la marea, descargas y velocidades, se necesitaron 6 períodos repetitivos de la marea viva, así mismo de la marea muerta.

10.2 Marea viva. --

La solución temporal en cada región concerniente al ciclo de marea viva como condición de frontera es mostrada en las figuras 17, 18, 19 y 20; donde para las descargas y velocidades el signo positivo indica siempre dirección al mar. En ésta se observa que el modelo reproduce perfectamente las condiciones dadas para la marea en el tapo Botadero (fig. 17, A) y para la del tapo Agua Dulce (fig. 20, R), donde la marea astronómica no ha sufrido ninguna alteración por efecto de los tapos; pero para las condiciones en el tapo Pozo de la Hacienda (figs. 18, J y 19, K), donde la marea astronómica ha desaparecido (registrándose sólo un rango pequeño en la elevación de la superficie del agua), las condiciones reproducidas por el modelo tanto para la región J y K, han sufrido variación escalonada oscilante alrededor de su forma principal. Las soluciones de la marea en los tapos Ostial y Caimanero (figs. 17, C y 20, P), comparadas con las condiciones de frontera dadas para esas localidades (fig. 15), son confiables, a excepción de un pequeño intervalo de aproximadamente 558 seg. al inicio del ciclo, donde la solución no es correcta pues existe un ligero salto observado también en las gráficas de las descargas y velocidades; pero este error en la predicción al menos no se propaga en tiempo ni produce desfaseamiento de la solución, y en el espacio se comporta de manera constante, llegando hasta desaparecer en algunos casos (figs. 17-20).

La forma marcadamente escalonada para la predicción de las mareas en las regiones D, E, F, G, H, I, L, M y N, correspondientes a la solución dentro de las lagunas, donde el rango de variación no es mayor de 3 cm. (figs. 17-19), es causada por la acumulación de los residuales que resultan del redondeo de los números en el modelo, debido precisamente a la pequeña amplitud de la marea en esos lugares.

Observando la marea desde el inicio del proceso en el tapo Botadero (fig. 17), se tiene una conservación del ciclo en el sistema Estero Ostial (regiones A-C) relativa al predicho en el sistema Huizache (regiones D-J), donde se observa un cambio gradual desde la región C hasta la E, a partir de donde se mantiene con una tendencia a descender el nivel durante todo el ciclo, hasta la frontera en el tapo Pozo de la Hacienda (fig. 18), en donde la marea cambia nuevamente cualitativa y cuantitativamente sin haber pasado por algún obstáculo (tapo) que justifique este hecho, sólo el estrechamiento del ancho superficial del fujo en la localización de esta frontera, el cual puede hacer variar la amplitud de la onda de marea incrementándola, pero no puede cambiar la forma de ella; esta alteración posiblemente se deba a la interacción con el sistema Caimanero, para el cual la marea predicha en la frontera en cuestión difiere en forma y tamaño con la obtenida en sus otras regiones de solución (figs. 19 y 20), fenómeno atribuido también a la mutua interacción con el sistema Huizache; de tal manera que esta interacción junto con el tapo de por medio y aunado al estrechamiento del lugar, producen una relación no apreciable entre la marea inmediatamente antes y después del tapo Pozo de la Hacienda (figs. 18, J y 19, K). El cambio marcado y persistente en la marea

para las regiones de solución de L. hasta N y de Ñ hasta P del sistema Caimanero (figs. 19 y 20), se puede explicar como el término del poco efecto de la marea proveniente de la boca Barrón y al predominante efecto de la que entra por la boca Chametla, la cual es de mayor influencia hacia dentro de la laguna Caimanero de lo que es la marea de la boca Barrón en la laguna Huizache, esto último concordante en parte con Phleger y Castañares (1972), ya que el ciclo de marea en el estero Agua Dulce (regiones P-R) es persistente y no se deforma fácilmente, llegando hasta el segmento 2 del sistema Caimanero (regiones Ñ-R) y aún en el segmento 1 (regiones L-N) dado que la forma principal del ciclo se conserva (figs. 19 y 20).

En cuanto a las descargas y velocidades se tiene una correspondencia exacta en comportamiento para todas las regiones de solución, excepto para la A, aunque en algunos casos existen para las velocidades oscilaciones escalonadas alrededor de la forma principal, producto del rango pequeño en variación donde el redondeo de las cifras se intensifica (figs. 17-20). En la región A la descarga parece responder al ciclo de marea, pero sólo en la primera parte de éste, ya que en el resto del ciclo (22320 - 44640 seg.) existe un desajuste; además, la no correspondencia del comportamiento de las velocidades con las descargas es demasiado marcado en esta porción del ciclo de marea (fig. 17, A), lo cual es posiblemente causado por la creación de los flujos subcrítico y supercrítico, característicos de los saltos hidráulicos formados en controles estructurales (Henderson, 1966) como lo son los tapos; la creación de estos flujos se ve facilitada por la diferencia de nivel del agua formada precisamente en esta última porción del ciclo de las regiones de solución A y B (figs. 17 A y B), lo cual coincide con el salto de agua de más de 35 cm. formado en el tapo Botadero, según Del Valle (1981, comunicación personal).

Las descargas y velocidades en los sistemas Estero Ostial y Huizache (regiones A-J) tienen la característica de no cambiar su dirección de reflujo, solamente varía en más tiempo el intervalo de reflujo de mayor magnitud, más acentuado en el sistema Huizache, y llegando a bajar la velocidad hasta 1.5 cm/seg. en la región E, todo esto concordante con la tendencia de disminuir su nivel del agua durante el ciclo (figs. 17 y 18). Mientras que para los sistemas Caimanero y Estero Agua Dulce (regiones K-R) la dirección en las descargas y velocidades son cambiantes, concordando el nivel alto del agua con el flujo (dirección hacia la laguna) y el bajo con el reflujo para el sistema Agua Dulce, y un desfase de 180° en esta correspondencia para el sistema Caimanero (figs. 19 y 20), causado seguramente por efecto del tapo (Caimanero), según lo ponen de manifiesto Moore (1979) y Del Valle y Villalba (1980); además ambos sistemas presentan mayor magnitud e intervalo de tiempo en los reflujos que en los flujos tanto para las descargas como para las velocidades, y no existe una relación apreciable de estos parámetros con el nivel del agua para las regiones L-Ñ (figs. 19 y 20). Este comportamiento se puede explicar como una influencia mayor de la marea sobre la laguna Caimanero que en la laguna Huizache, como fue visto también en el análisis del nivel del agua; además, esta influencia logra tener efecto sobre la laguna Huizache, produciendo en ella una continua

salida del agua a través del estero Ostial.

Observando el proceso de las descargas y velocidades desde el sistema Ostial (fig. 17), se encuentra una relación de desfase de 180° con la marea, excepto para la región A, cuyo particular comportamiento ya fue explicado; mientras que en el sistema Huizache, se produce un ajuste en este desfasamiento, y se ejerce a la vez otro comportamiento de las descargas y velocidades, el cual gradualmente se modifica a través de la excursión en la laguna Huizache (figs. 17 y 18); fenómeno esperado debido a la existencia del tapo, a la poca variación del nivel del agua y a la escasa energía de la marea en este sistema (fig. 12).

En la frontera Pozo de la Hacienda la solución para J y K en descargas y velocidades son completamente diferentes en forma y magnitud (figs. 18, J y 19, K), esto es producto de las diferentes condiciones de frontera dadas para el mismo lugar (fig. 15) y a la diferencia del nivel del agua, causado por el efecto represivo del tapo, del cual Moore (1979) describe y Del Valle y Villalba (1980) indican una diferencia en el nivel del agua hasta de 50 cm. Con las soluciones de descargas y velocidades en la regiones J y K la relación inapreciable de la mutua interacción de los sistemas Huizache y Caimanero, encontrada en el análisis de mareas, empieza a entenderse, pues olvidándose de las magnitudes y únicamente tomando en consideración el comportamiento, se muestra en J que para el inicio del ciclo hay un flujo débil hacia Huizache, el cual puede ser interpretado como un "reflujo" hacia Caimanero que no se registra en J, pero si en K, manifestándose con valores altos en descargas y velocidades con dirección a la laguna Caimanero, y cuando en K el comportamiento cambia de sentido, se registra en J un flujo fuerte hacia la laguna Huizache (figs. 18, J y 19, K). El hecho de porque no se registra en la región J un reflujo evidente hacia la laguna Caimanero siendo el nivel del agua en J mayor que en K (aproximadamente 10 cm.), se puede explicar primero por el efecto represivo del tapo y luego por el mayor nivel del agua (12 cm.) y además descendente de la región I (figs. 18 y 19).

Dentro del sistema Caimanero se observan dos zonas con diferentes formas en el ciclo de descargas y velocidades (figs. 19 y 20), correspondientes al segmento 1 y 2 (regiones L-N y Ñ-O); este fenómeno no puede ser atribuido al efecto de un tapo pues en ese recorrido no lo hay, mas sin embargo se puede explicar como el cese de la poca influencia que el sistema Huizache ejerce sobre el de Caimanero, del cual habla Phleger y Castañares (1972), pero lo asumen más alrededor del tapo Pozo de la Hacienda; ya que observando con detenimiento los ciclos de ambas zonas, se tiene que los dos presentan la característica de marcar un fuerte reflujo hacia el mar al inicio de éste, pero después se desvanece hasta cambiar de sentido para que posteriormente se incremente, sólo que en las regiones L-N que corresponden al segmento 1, durante estos intervalos hay a la vez una caída y un nuevo aumento, atribuido a la introducción del efecto del sistema Huizache.

El desfasamiento de 180° de la marea con las descargas y velocidades para las regiones del segmento 2 del sistema Caimanero

(figs. 19 y 20), se atribuye como ya se dijo al efecto del tapo, y además también se reafirma el hecho de que éste modifica la forma, pues es claramente visto el cambio en comportamiento y desfase del paso del sistema Agua Dulce (donde los ciclos son bien marcados y persistentes) al sistema Caimanero a través del tapo Caimanero.

La solución espacial en todas las regiones excepto en la B y Q, durante la pleamar y bajamar del tapo Botadero, es mostrada en la figura 21, donde se observa a primera vista que la circulación propiamente esta restringida a los esteros, ya que en las lagunas es de pequeña magnitud y permanece invariable ante cualquier condición de la marea, a excepción de la laguna Caimanero en la zona cercana al tapo Caimanero, donde hay un cambio de dirección en la circulación, efecto atribuido a la influencia relativamente marcada de la marea en esa zona, como fue también visto en el análisis de la solución temporal. En esta solución se observa con claridad que en la laguna Huizache y el estero Ostial siempre existe un refluo (hacia el mar), manifestado en pleno en el tapo Botadero durante la bajamar, del cual también Moore (1979) lo pone en evidencia; este mantenimiento del refluo se ve alimentado por la interacción de la laguna Caimanero a través del tapo Pozo de la Hacienda durante la bajamar, ya que es de observarse que la circulación en la laguna Caimanero responde en pequeña escala a la condición de la marea, aunque en la zona al norte de ella casi no es evidente por no observarse el cambio de dirección debido a que sus velocidades son cercanas a cero.

En la solución espacial (fig. 21), es posible observar el mismo comportamiento que en la solución temporal en cuanto a que la marea entrante por la boca Chametla es de mayor efecto, pues la introducida por Barrón se distorsiona al paso del primer tapo (tapo Botadero), mientras que en el estero Agua Dulce permanece invariable hasta el segundo tapo (tapo Caimanero), a partir de donde se sigue manifestando hacia la laguna Caimanero, aunque con desfase para las condiciones de pleamar y bajamar.

10.3 Marea muerta. -

La solución temporal para cada región referida al ciclo de marea muerta como condición de frontera se exhibe en las figuras 22, 23, 24 y 25; donde como en el caso anterior los valores positivos de las descargas y velocidades indican la dirección hacia el mar.

En esta solución para el nivel del agua se observa el mismo tipo de características y comportamiento como en el caso de la marea viva en cuanto a: la exactitud y discrepancia de la reproducción de las condiciones de frontera por el modelo, al error de la solución al inicio del ciclo y al comportamiento escalonado, más acentuado por la intensificación del redondeo en el rango de variación más pequeño (figs. 22-25). La diferencia esencial con el ciclo de marea viva estriba en el hecho de que la predominancia de la marea sobre la laguna

Caimanero no es marcada en este caso, pues según se observa en las figuras 24 y 25, la marea se conserva únicamente en el estero Agua Dulce (regiones P-R), pero al paso del tapo Caimanero sufre deformación.

La correspondencia en la forma principal de las descargas y velocidades se conserva, sólo se intensifica la tendencia escalonada de la velocidad, debido a su rango más pequeño, dando con esto que la semejanza en detalle desaparezca (figs. 22-25). En la región A se observa el comportamiento de las descargas y velocidades parecido al caso de la marea viva (fig. 22, A).

En el sistema Huizache (regiones D-J) las descargas se modifican gradualmente de frontera a frontera (figs. 22 y 23), en igual caso que en el sistema Caimanero (figs. 24 y 25), existiendo ahora para este sistema una clara relación entre las descargas y velocidades en sus segmentos 1 y 2 (regiones K-N y R-O), además no cambian su dirección de reflujo (hacia el mar), sólo las velocidades alcanzan el valor de cero en las regiones K, L, M y N, y las descargas tienden a ello (fig. 24); en el sistema Estero Agua Dulce el ciclo de descargas y velocidades conserva su forma pero al paso del tapo Caimanero se ve modificado cualitativa y cuantitativamente, como en la solución de la marea viva. Este comportamiento se puede explicar como la acción independiente de los sistemas Estero Ostial y Huizache con los sistemas Caimanero y Estero Agua Dulce, lo que produce el cambio gradual del ciclo de descargas en ambas lagunas y la relación del segmento 1 y 2 del sistema Caimanero; además, la influencia de la marea sobre la laguna Caimanero ahora se ve restringida sólo al estero Agua Dulce. La dirección del reflujo hacia el mar en ambas lagunas se explica como una evacuación del agua en ellas, provocada por la poca amplitud de la marea en las bocas, la cual no logra recuperar el nivel del agua del mar con el de las lagunas.

Observando el proceso desde el tapo Botadero hasta el tapo Agua Dulce (figs. 22-25), se tienen las mismas características en el comportamiento de las descargas y velocidades con el nivel del agua y efectos de los tapos que en la condición de marea viva, a excepción de que en el sistema Estero Ostial la marea se modifica fuertemente (figs. 22, A, B y C), efecto atribuido a la poca influencia de ella; y ahora no existe una relación entre las regiones de solución J y K del tapo Pozo de la Hacienda (figs. 23, J y 24, K), lo que se explica por la acción independiente de las lagunas Huizache y Caimanero hecho que permite la relación de los ciclos de descargas y velocidades en el segmento 1 y 2 del sistema Caimanero como ya fue explicado.

La solución espacial en todas las regiones excepto B y Q y también durante la pleamar y bajamar del tapo Botadero como en el caso de la marea viva es mostrada en la figura 26, en donde se observan las mismas características como en la condición anterior en cuanto a la circulación de importancia en los esteros; y ahora el efecto de la marea en la laguna Caimanero se ve restringido exclusivamente al estero Agua Dulce. La diferencia esencial en esta solución es que el reflujo (hacia el mar) de la laguna Huizache no se ve alimentado por la de

Caimanero, ya que en ésta también se presenta de manera continua.

La semejanza en las magnitudes de las velocidades en la circulación de las lagunas en las soluciones espaciales de la marea viva (fig. 21) y de la marea muerta (fig. 26), reafirman el hecho de que la circulación en ellas no depende de la condición de la marea.

11 .- CONCLUSIONES

11.1 Area estudiada.-

La complejidad del sistema lagunar costero Huizache-Caimanero en cuanto a lo somero de su morfología, su geometría irregular y de variación extrema, la falta de un canal de flujo dentro del cuerpo lagunar, las descargas de los ríos en las bocas, y más aún, el efecto que producen los tapos, lo hacen complicado para su estudio hidrodinámico con modelos numéricos, pero con modelos físicos sería además de costoso casi imposible de obtener una solución adecuada.

11.2 Datos manejados.-

Los datos de mareas trabajados no son del todo confiables para hacer estimaciones cuantitativas demasiado precisas, dado que el mal funcionamiento del mecanismo de los aparatos no permitió un período de registro continuo y adecuado en la mayoría de las series de tiempo, por lo mismo las estimaciones hechas de la marea para inferirlos en los tapos resultaron con límites de confianza grandes, como se muestra en la figura 10; además, la no estacionariedad del último tramo de la serie original de Barrón es originado por el inadecuado registro de los datos.

Los datos de salinidad son confiables, pero su escasez no permite un análisis más completo y adecuado.

Con el uso de estos datos, los resultados logrados son considerablemente aceptables para el objetivo de conocer los mecanismos y condiciones que regulan el comportamiento de la hidrodinámica en el sistema; pero si se requiere de mayor precisión, es necesario usar mejores datos, con los que se logren estimaciones con mejores rangos en el intervalo de confianza.

11.3 Respuesta del modelo.-

La flexibilidad del modelo de elementos finitos en cuanto a la elección del tamaño diferente en los segmentos y las distancias entre las secciones transversales, permitió aproximar detalladamente la geometría irregular del área de estudio.

La variabilidad en las magnitudes de las condiciones de frontera dadas forman un sistema complicado para la solución numérica, de tal manera que con las condiciones iniciales trabajadas, la convergencia de la solución por el modelo a la respuesta de estado cuasi-estacionario se logra con más ciclos de los esperados.

Los resultados obtenidos por el modelo son confiables, ya que el error al inicio del ciclo sobre los parámetros de mareas, descargas y velocidades en algunas regiones de solución, constituyen escasamente el 1.25% del resto del ciclo; y porque la solución inconsistente para la región A, puede ser corregida con una segmentación más apropiada para el estero Ostial, en la que el tapo Botadero sea tratado como un control estructural (opción posible por el modelo). Respecto a los escalonamientos en las regiones donde el rango de variación es pequeño, se considera aceptable, pues la tendencia y el comportamiento se alcanzan a describir, ya que es de tomarse en cuenta lo somero del área y la no inclusión de términos no-lineales ni fuerzas producto del efecto del viento en las ecuaciones hidrodinámicas del modelo. Por lo que el modelo numérico de elementos finitos "Transient Water Quality Network" de la M.I.T. por Harleman, Dailey, Thatcher, Najarian, Brocard y Ferrara, es eficiente para la obtención de la hidrodinámica en el sistema lagunar costero Huizache-Caimanero y es recomendable para ser usado en la obtención de la variación espacio-temporal de los 12 parámetros de calidad del agua incluidos en él. Para una solución más precisa de la hidrodinámica en este sistema, habría la necesidad de adaptar otro modelo numérico también de elementos finitos que use términos no-lineales de efecto del viento, pero por la variación del rango obtenido en los parámetros, no se justifica esta precisión; además, por la complejidad del área de estudio a la que fue sometido el modelo, éste es recomendable para ser usado en otros sistemas lagunares y estuarinos, con la confianza de obtener soluciones muy convincentes.

11.4 Hidrodinámica.-

La circulación dentro del sistema lagunar costero Huizache-Caimanero está regida por el efecto de los tapos, los cuales producen cambios de comportamiento y desfases cualitativos y cuantitativos en las mareas, descargas y velocidades, creando en las áreas situadas entre ellos, cambios muy marcados como para considerarlos hidrodinámicamente diferentes; y haciendo que la circulación sólo tenga importancia en los esteros, induciendo a las lagunas a una independencia de las condiciones astronómicas de las

mareas, y motivando en ellas a responder más a efectos del viento, el cual aporta más energía sobre la laguna Caimanero, debido a la mayor magnitud del área donde actúa el viento.

El efecto de la marea en las lagunas se manifiesta más sobre la de Caimanero, la cual entra por la boca Chametla y alcanza a influenciar a la laguna Huizache a través del tapo Pozo de la Hacienda, produciendo en ella y consecuentemente en el estero Ostial un continuo flujo de salida hacia el mar; mientras que el efecto de la laguna Huizache sobre la de Caimanero no llega más allá de la mitad de esta laguna.

Durante la condición de marea de pequeña amplitud (marea muerta), las lagunas actúan independientes y tienden ambas a desalojar agua, indicando con esto que la influencia recibida por el efecto del viento no es determinante para alterar la dirección en la circulación dentro de las lagunas.

12 .- BIBLIOGRAFIA

- Amezcuca Linares F., 1977. Generalidades ictiológicas del sistema lagunar costero Huizache-Caimanero, Sinaloa, México. Anales del Centro de Cien del Mar y Limn., UNAM, 1977, 1 (4): 1-26.
- Arenas Fuentes V., 1970. Informe final de las investigaciones correspondientes a la hidrología y productividad en los Planes Piloto de Escuinapa-Yavaros. Informe Depto. Centro de Cien. del Mar y Limn., UNAM, 1970, 191-233.
- Ayala Castañares A., M. Guitiérrez y V.M. Malpica, 1970. Informe final de los estudios de Geología Marina en las regiones de Yavaros, Son., Huizache y Caimanero, Sin., y Agiabampo, Sin., durante la primera etapa. Informe Depto. Centro de Cien. del Mar y Limn., UNAM, 1970, 3-190.
- Bendat Julius S y Allan G. Piersol, 1971. Random Data: analysis and measurement procedures. Wiley-Interscience, 407 pags.
- Carrillo Barrios-Gómez E., 1980. El mar, arcén de los tesoros del planeta. Comunidad CONACYT, enero 1980, El futuro nos visita, num. 109, 116-121.
- Chapa Saldaña H. y R. Soto López, 1969. Resultados preliminares del estudio ecológico y pesquero de las lagunas litorales del Sur de Sinaloa, México. En: Ayala Castañares A. y F.B. Phleger, Lagunas Costeras un Simposio, Mem. Simp. Intern. Lagunas Costeras UNAM-UNESCO, noviembre 28-30, 1967, 653-662.
- Dailey James E. y D.R.F. Harleman, 1972. Numerical model for the prediction of transient water quality in estuary networks. Report num. 158, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, MIT, October 1972.
- Del Valle Lucero I. y Armando Villalba L., 1980. Estudio hidrodinámico y ecológico del sistema lagunar Huizache-Caimanero-Marisma las Cabras en otoño. En prensa.
- Dronkers J.J., 1964. Tidal computations in rivers and coastal waters. North-Holland publishing Co.-Amsterdam, 518 pags.
- Edwards R.R.C., 1977. Field experiments on growth and mortality of Panaeus vannanai in Mexico coastal lagoon complex. Estuarine and Coastal Marine Science, 1977, 1 (5): 107-121, Academic Press Inc.
- , 1978. Ecology of a coastal lagoon complex in Mexico. Estuarine and Coastal Marine Science, 1978, 1 (6): 75-92, Academic Press Inc.

- Edwards R.R.C. y A.B. Browsers, 1974. Strimp research in Mexican lagoons. Fishing News International, November 1974, 13 (11): 14-15.
- Foreman M.G.G., 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. Report num. 77-10, Pacific Marine Science, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay Victoria, B.C., July 1977.
- Frank A. y Herrmann Jr., 1975. Overview of physical estuary practice. Symposium of modeling techniques, 1975, 2: 1270-1290, The American Society of Civil Engineers.
- Gabel R.A. y R.A. Roberts, 1973. Signals and linear systems. John Wiley & Sons., 415 pags.
- Galindo Reyes J.G., 1978. Contribución al conocimiento de la productividad primaria en la laguna del Caimanero Mpo. del Rosario, Sin. Informe Depto. Centro de Cien. del Mar y Limn., UNAM, 1978.
- Gallagher R.H., J.T. Oden, C. Taylor y D.C. Zienkiewicz, 1975. Finite elements in fluids. En Viscous flow and hydrodynamics, 1975, 1: 1-280, John Wiley & Sons.
- Godin Gabriel, 1972. The analysis of tides. University of Toronto Press, 264 pags.
- Godin Gabriel, S. Eldring y P. Pinard, 1976. The reduction of the tidal observations in Chesterfield inlet with the help of the admittance function. Publish internal of MEDS, 1976.
- Gómez Aguirre S., 1969. Informe final de la primera etapa de los estudios del plancton en los Planes Pilotos Escuinapa-Yavaros. Informe Depto. Centro de Cien. del Mar y Limn., UNAM, 1969, 52-107.
- Gómez Aguirre S., C. Flores Coto, S. Licea Durán, H. Santoyo y A. Martínez, 1970. Informe final de la segunda etapa de los estudios del plancton en los Planes Piloto Escuinapa-Yavaros. Informe Depto. Centro de Cien. del Mar y Limn., UNAM, 1970, 234-286.
- Gómez Aguirre S., S. Licea Durán y C. Flores Coto, 1974. Ciclo anual del plancton en el sistema Huizache-Caimanero México, (1969-1970). Anales del Centro de Cien. del Mar y Limn., UNAM, 1974, 1 (1): 83-98.
- Gunaratnam Daniel J. y Frank E. Perkins, 1970. Numerical solution of unsteady flows in open channels. Report num. 127, Hydrodynamics Laboratory, Department of Civil Engineering, MIT, July 1970.

- Harleman D.R.F., D.N. Brocard y T.O. Najarian, 1973. A predictive model for transient temperature distributions in unsteady flows. Report num. 175, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, MIT, November 1973.
- Harleman D.R.F., J.E. Dailey, M.L. Thatcher, T.O. Najarian, D.N. Brocard y R.A. Ferrara, 1977. User's manual for the M.I.T. transient water quality network modelo--including nitrogen-cycle dynamics for rivers and estuaries. Ecological Research Series, EPA-600/3-77-010, January 1977, Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis, Oregon.
- Henderson F.M., 1966. Open channel flow. McMillan publishing Co. Inc., 522 pags.
- Holley Jr. E.R. y Harleman D.R.F., 1965. Dispersion of pollutants in estuary type flows. Report num. 74, Hydrodynamics Laboratory, Department of Civil Engineering, MIT, January 1965.
- Hsu Hwei P., 1973. Análisis de Fourier. Fondo Educativo Interamericano, S.A., 274 pags.
- Ippen Arthur T., 1966. Estuary and coastline hydrodynamics. Engineering Societies Monographs, McGraw-Hill, Book Company Inc., 744 pags.
- Jenkins G.M. y D.G. Watts, 1968. Spectral analysis and its applications. Holden-Day, 525 pags.
- Kanasewich E.R., 1975. Time sequence analysis in Geophysics. The University of Alberta Press, 364 pags.
- Kinsman Blair, 1965. Wind waves their generation and propagation on the ocean surface. Prentice-Hall, 676 pags.
- Lankford Robert R., 1976. Coastal lagoons of Mexico their origin and classification. En Estuarine Processes, 1976, 2: 182-215, Academic Press Inc.
- McDowell D.M. y B.A. O'Connor, 1977. Hydrodynamics behaviour of estuary. John Wiley & Sons., 428 pags.
- Moore Nigel H., 1979. The anual physical hidrografic cycle of a tropical-lagoon system on the Pacific coast of Mexico. Tesis doctoral, Centro de Cien. del Mar y Limn., UNAM, 1979.
- Najarian T.O. y D.R.F. Harleman, 1975. A real time model of nitrogen-cycle dynamics in an estuarine system. Report num. 204, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, MIT, July 1975.

- Nihoul Jacques C. J., 1975. Modelling of marine systems. Oceanography Series, 1975, 10 (2): 41-67, Elsevier.
- Okubo A., 1964. Equations describing the diffusion of an introduced pollutant in a one-dimensional estuary. Studies in Oceanography, University of Tokyo Press, 1964, 216-226.
- Otnes R.K. y Loren Enochson, 1972. Digital time series analysis. John Wiley & Sons., 467 pags.
- Phleger Fred B. y A. Ayala Castañares, 1972. Ecology and development of two coastal lagoons in northwest Mexico. Anales del Centro de Cien. del Mar y Limn., UNAM, 1972, 43: 1-20.
- Pinder George F. y William G. Gray, 1977. Finite element simulation in surface and subsurface hydrology. Academic Press Inc., 295 pags.
- Pritchard D.W., 1971. What is an estuary?. The Estuarine Environment Estuaries and Estuarine Sedimentation, short course lecture notes, 30-31 October 1971, WYE Inst., I-1 -- I-11, American Geological Institute.
- Ringuelet A.R., 1962. Ecología acuática continental. EUDEBA, 138 pags.
- Segerlind Larry J., 1976. Apllied finite element analysis. John Wiley & Sons., 422 pags.
- Soto López R., 1969. Mecanismo hidrológico del sistema de lagunas litorales Huizache-Caimanero y su influencia sobre la producción camaronera. Tesis de licenciatura en Oceanología, UABC, 1969.
- SRH Dir. Oral. de Irrigación y Control de Rios. Dirección de Acuacultura Distrito de Acuaculta Escuinapa. Lagunas Huizache-Caimanero. Plano general. Rosario Sin., sep. de 1976.
- Strelkoff Theodor, 1969. One-dimensional equations of open-channel flow. Journal of the Hydraulics Division, May 1969, 95 (HY3): 861-876, proceedings of the American Society of Civil Engineers.
- Thatcher M.L. y D.R.F. Harleman, 1972. Mathematical model for the prediction of unsteady salinity intrusion in estuaries. Report num. 144, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering, MIT, February 1972.
- Tuckey J.W., 1977. Exploratory data analysis. Addison-Wesley publishing Company, 688 pags.

Vreugdenhil C.B. y J. Vooget, 1975. Hydrodynamics transport phenomena in estuaries and coastal waters. Symposium of modeling techniques, Scope of mathematics models, 1975, 1: 690-709, The American Society of Civil Engineers.

Zienkiewicz O.C., 1971. The finite element method in engineering science. McGraw-Hill Book Company Inc., 521 pags.

13 .- TABLAS

TABLA A

CONSTITUYENTES ARMONICAS DIURNAS Y SEMIDIURNAS DE LA MAREA DE
MAZATLAN, SIN. MEXICO (23°11'; 106°25').

NUMERO	NOMBRE	FRECUENCIA (ciclos/hora)	AMPLITUD (m.)	FASE (grados)
1	SA	0.00011407	0.1176	219.00
2	SSA	0.00022816	0.0262	215.00
3	MSM	0.00130978	0.0131	64.76
4	Q1	0.03721850	0.0287	70.00
5	O1	0.03873064	0.1453	69.00
6	P1	0.04155257	0.0667	70.00
7	S1	0.04166666	0.0157	331.05
8	K1	0.04178073	0.2066	71.00
9	J1	0.04329289	0.0142	72.16
10	2N2	0.07749710	0.0115	225.53
11	MU2	0.07768944	0.0129	255.99
12	N2	0.07899924	0.0804	251.00
13	NU2	0.07920161	0.0182	258.50
14	M2	0.08051138	0.3474	255.00
15	L2	0.08202355	0.0154	228.17
16	T2	0.08321925	0.0178	237.07
17	S2	0.08333333	0.2282	253.00
18	K2	0.08356147	0.0716	249.00

TABLA B

CONSTITUYENTES ARMONICAS DIURNAS Y SEMIDIURNAS DE LA MAREA DE
BARRON (23°05'; 106°16').

NUMERO	NOMBRE	FRECUENCIA (ciclos/hora)	AMPLITUD (m.)	FASE (grados)
1	SA	0.00011407	0.0951	178.28
2	SSA	0.00022816	0.0212	174.28
3	MSM	0.00130978	0.0106	24.04
4	Q1	0.03721850	0.0232	29.28
5	O1	0.03873064	0.1175	28.28
6	P1	0.04155257	0.0540	29.28
7	S1	0.04166666	0.0127	290.33
8	K1	0.04178073	0.1671	30.28
9	J1	0.04329289	0.0115	31.44
10	2N2	0.07748710	0.0066	174.65
11	MU2	0.07768944	0.0074	205.11
12	N2	0.07899924	0.0462	200.12
13	NU2	0.07920161	0.0105	207.62
14	M2	0.08051138	0.1995	204.12
15	L2	0.08202355	0.0088	177.29
16	T2	0.08321925	0.0102	186.19
17	S2	0.08333333	0.1311	202.12
18	K2	0.08356147	0.0411	198.12

TABLA C

CONSTITUYENTES ARMONICAS DIURNAS Y SEMIDIURNAS DE LA MAREA DE
BOTADERO (23°06' / 106°16').

NUMERO	NOMBRE	FRECUENCIA (ciclos/hora)	AMPLITUD (m.)	FASE (grados)
1	SA	0.00011407	0.0401	167.35
2	SSA	0.00022816	0.0089	163.35
3	MSM	0.00130978	0.0045	13.11
4	Q1	0.03721850	0.0098	18.35
5	O1	0.03873064	0.0496	17.35
6	P1	0.04155257	0.0228	18.35
7	S1	0.04166666	0.0054	279.40
8	K1	0.04178073	0.0705	19.35
9	J1	0.04329289	0.0049	20.51
10	2N2	0.07748710	0.0019	73.14
11	MU2	0.07768944	0.0022	103.60
12	N2	0.07899924	0.0135	98.61
13	NU2	0.07920161	0.0031	106.11
14	M2	0.08051138	0.0583	102.61
15	L2	0.08202355	0.0026	75.78
16	T2	0.08321925	0.0030	84.68
17	S2	0.08333333	0.0383	100.61
18	K2	0.08356147	0.0120	96.61

TABLA D

CONSTITUYENTES ARMONICAS DIURNAS Y SEMIDIURNAS DE LA MAREA DEL
TAPO CAIMANERO (22° 52'; 106° 03').

NUMERO	NOMBRE	FRECUENCIA (ciclos/hora)	AMPLITUD (m.)	FASE (grados)
1	Q1	0.03721850	0.0076	171.57
2	O1	0.03873064	0.0489	207.00
3	K1	0.04178073	0.0675	192.66
4	J1	0.04329289	0.0102	189.91
5	OO1	0.04483084	0.0082	50.81
6	OO2	0.07597493	0.0041	50.71
7	MU2	0.07768944	0.0054	-55.96
8	N2	0.07899924	0.0158	194.64
9	M2	0.08051138	0.0869	-93.93
10	L2	0.08202355	0.0244	49.99
11	S2	0.08333333	0.0558	240.96

TABLA E

CONSTITUYENTES ARMONICOS DE LA MAREA DE CHAMETLA (22°51'; 106°02').

NUMERO	NOMBRE	FRECUENCIA (ciclos/hora)	AMPLITUD (m.)	FASE (grados)
1	Q1	0.03721850	0.0179	182.50
2	O1	0.03873064	0.1159	217.93
3	K1	0.04178073	0.1600	203.59
4	J1	0.04329289	0.0241	200.84
5	OO1	0.04483084	0.0194	61.74
6	OQ2	0.07597493	0.0141	152.22
7	MU2	0.07768944	0.0184	45.55
8	N2	0.07899924	0.0542	296.15
9	M2	0.08051138	0.2974	7.58
10	L2	0.08202355	0.0837	151.50
11	S2	0.08333333	0.1910	342.47
12	MO3	0.11924203	0.0169	46.93
13	M4	0.16102275	0.0084	318.06
14	MS4	0.16384467	0.0115	20.44
15	S4	0.16666666	0.0079	69.51

TABLA F

ADMITANCIA ENTRE SERIES DE TIEMPO DE MAREAS

ADMITANCIA ENTRE LA MAREA DE MAZATLAN Y LA MAREA DE BARRON

TRAMO 1": 00:00 Hrs., 5/oct/79 --- 06:00 Hrs., 16/oct/79 (271 datos)

BANDAS	FRECUENCIA (ciclos/hora)	ESPECTRO DE MAZATLAN	POTENCIA BARRON	COHERENCIA	AMPLITUD (m.)	FASE (grados)
1	0.0455	0.008516	0.006687	0.9128	0.8089	-40.72
2	0.0909	0.041717	0.026839	0.7161	0.5744	-50.88

TRAMO 2": 18:00 Hrs., 17/oct/79 --- 06:00 Hrs., 29/oct/79 (277 datos)

BANDAS	FRECUENCIA (ciclos/hora)	ESPECTRO DE MAZATLAN	POTENCIA BARRON	COHERENCIA	AMPLITUD (m.)	FASE (grados)
1	0.0455	0.009944	0.012213	0.7826	0.8673	-68.33
2	0.0909	0.048027	0.033738	0.6235	0.5226	-141.80

ADMITANCIA ENTRE LA MAREA PREDICHA DE BARRON Y LA MAREA DE BOTADERO

TRAMO 1": 04:00 Hrs., 29/oct/79 --- 22:00 Hrs., 7/nov//79 (235 datos)

BANDAS	FRECUENCIA (ciclos/hora)	ESPECTRO DE PRE. BAR.	POTENCIA BOTADERO	COHERENCIA	AMPLITUD (m.)	FASE (grados)
1	0.0455	0.010682	0.001146	0.7223	0.2366	47.57
2	0.0909	0.044820	0.002862	0.3578	0.0904	8.35

TRAMO 2": 22:00 Hrs., 14/nov/79 --- 10:00 Hrs., 22/nov//79 (181 datos)

BANDAS	FRECUENCIA (ciclos/hora)	ESPECTRO DE PRE. BAR.	POTENCIA BOTADERO	COHERENCIA	AMPLITUD (m.)	FASE (grados)
1	0.0455	0.010262	0.002447	0.8640	0.4219	-10.93
2	0.0909	0.025621	0.003855	0.7530	0.2921	-101.51

TABLA G

VALORES ESTADISTICOS DE LAS SALINIDADES (%) EN LOS NODOS DE FRONTERA

LOCALIZACION DEL NODO DE FRONTERA	ESTACION	--MIN. --CUARTIL-MEDIANA-CUARTIL-MAX.					-NO. DE DATOS
			INFERIOR		SUPERIOR		
Tapo Botadero	H2	13.57	13.57	20.790	21.69	22.72	7
Tapo Ostial	H3	12.44	12.67	15.270	16.28	18.08	6
T. Pozo de la Hacienda	H9	21.69	24.40	25.935	26.66	28.84	6
Tapo Caimanero	C3	24.24	24.24	24.730	25.11	31.62	6
Tapo Agua Dulce	C2	20.79	22.73	24.700	24.95	25.17	4

TABLA H

VALORES DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING

SISTEMA	SECCION TRANSVERSAL	MANNING
Ostia	0	0.018
	I	0.018
	II-2-4	0.018
	II-2-3	0.018
	II-2-2	0.018
Huizache	II-2-1	0.018
	II-2	0.018
	II-1-4	0.018
	II-1-3	0.018
	II-1-2	0.018
	II-1-1	0.018
	II	0.018
	III-1-1	0.060
Caimanero	III-1-2	0.200
	III-1-3	0.060
	III-1-4	0.070
	III-1-5	0.080
	III-2	0.090
	III-2-1	0.090
	III-2-2	0.090
	II-2-3	0.090
	III	0.200
	IV	0.018
Agua Dulce	IV	0.018

14 .- FIGURAS

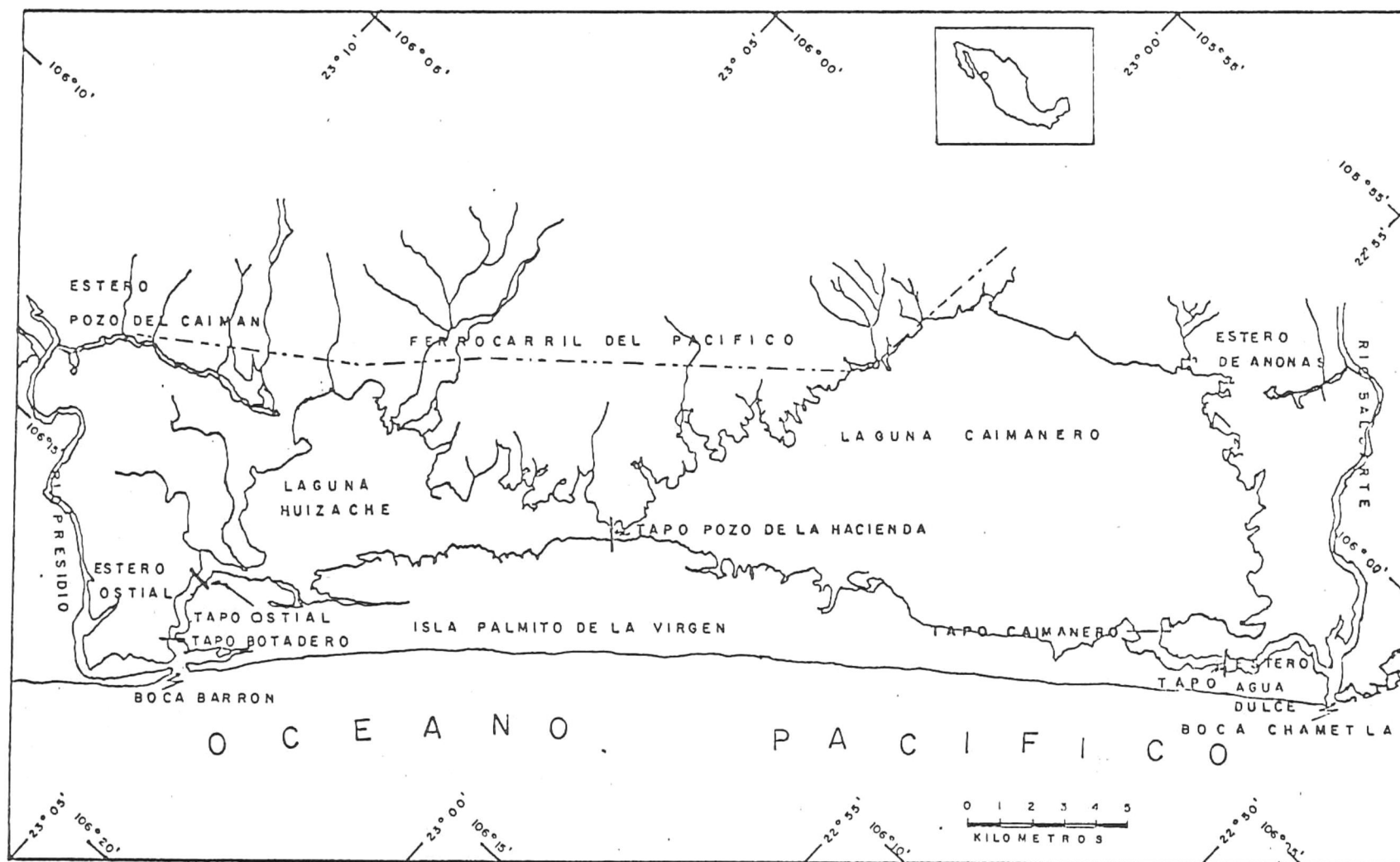


Fig. 1.- SISTEMA LAGUNAR COSTERO HUIZACHE-CAIMANERO,
MAZATLAN SINALOA, MEX.

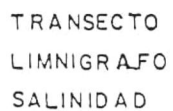


Fig. 2.- LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES DE MUESTREOS

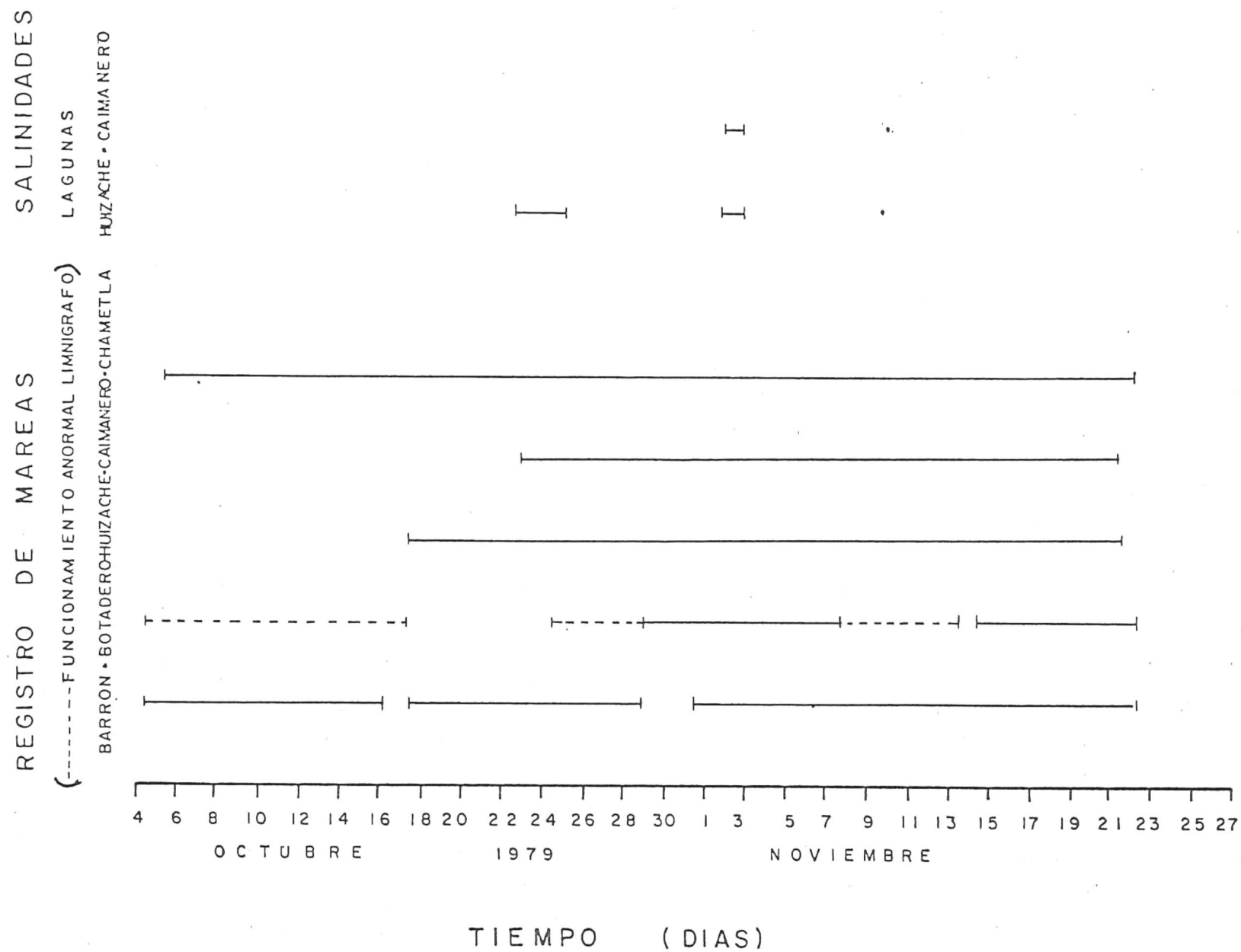


Fig. 3. - PERIODOS DE OBSERVACIONES

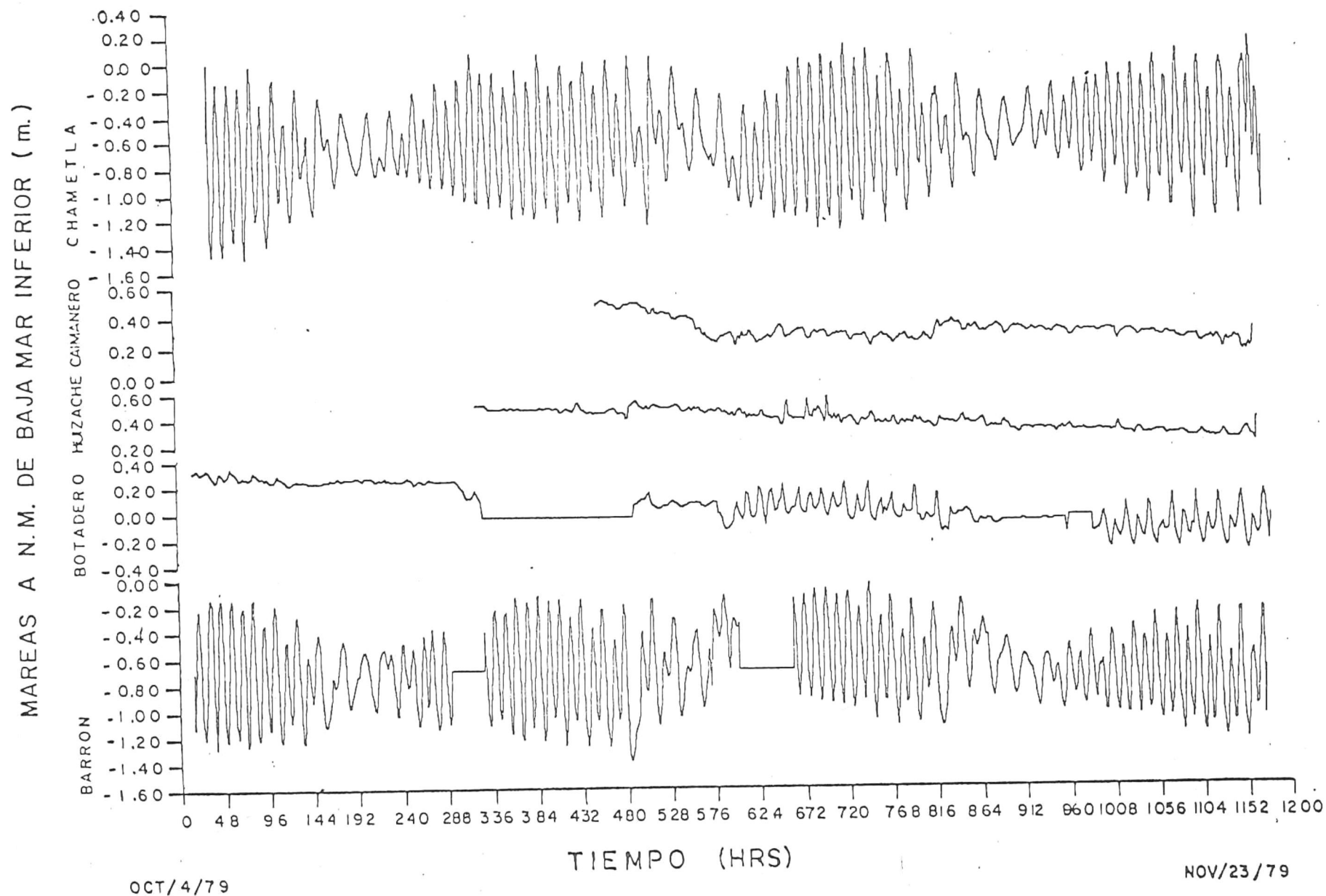


Fig.4.- SERIES DE TIEMPO DE MAREAS ORIGINALES

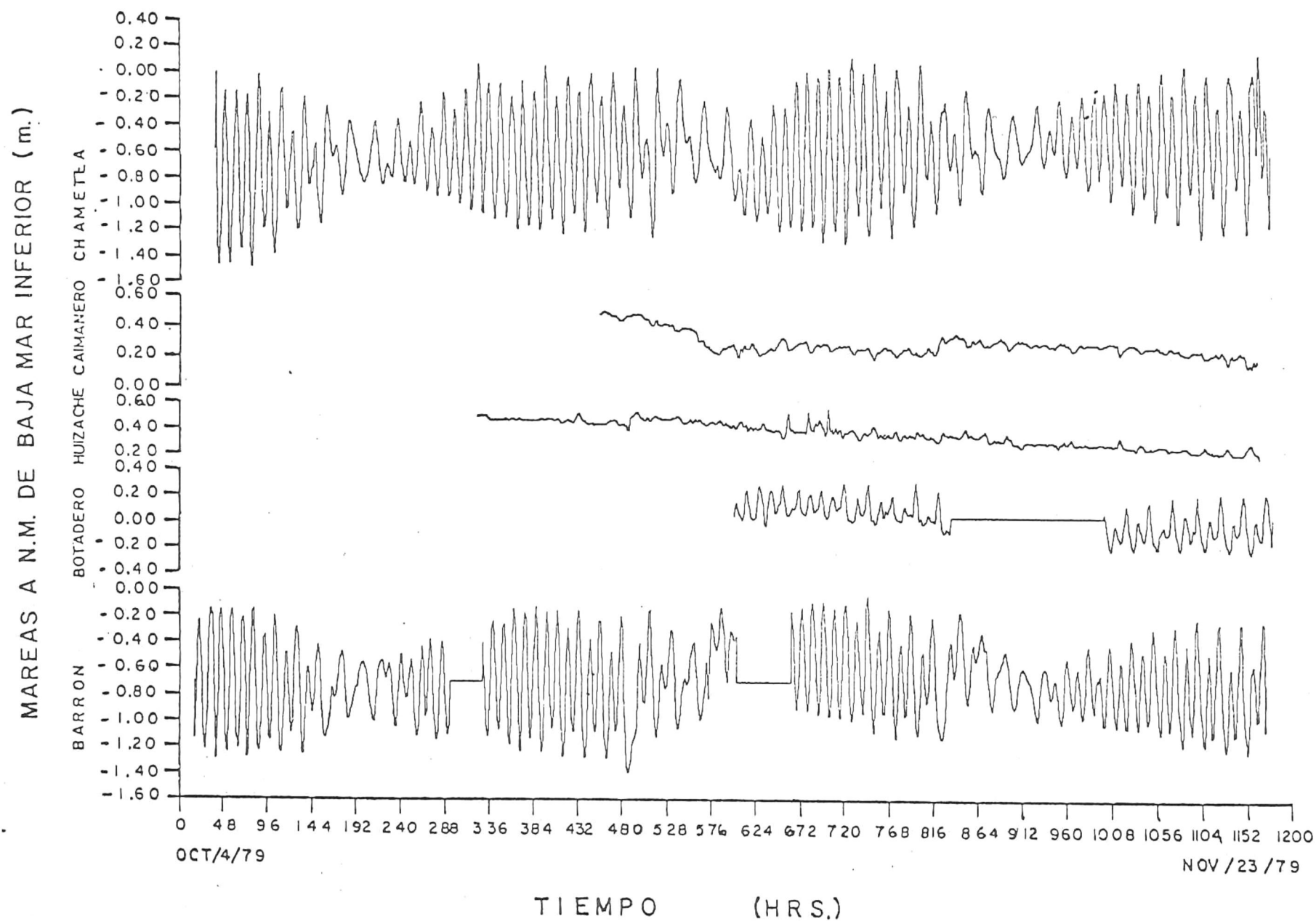


Fig. 5.- SERIES DE TIEMPO DE MAREAS PREPROCESADAS

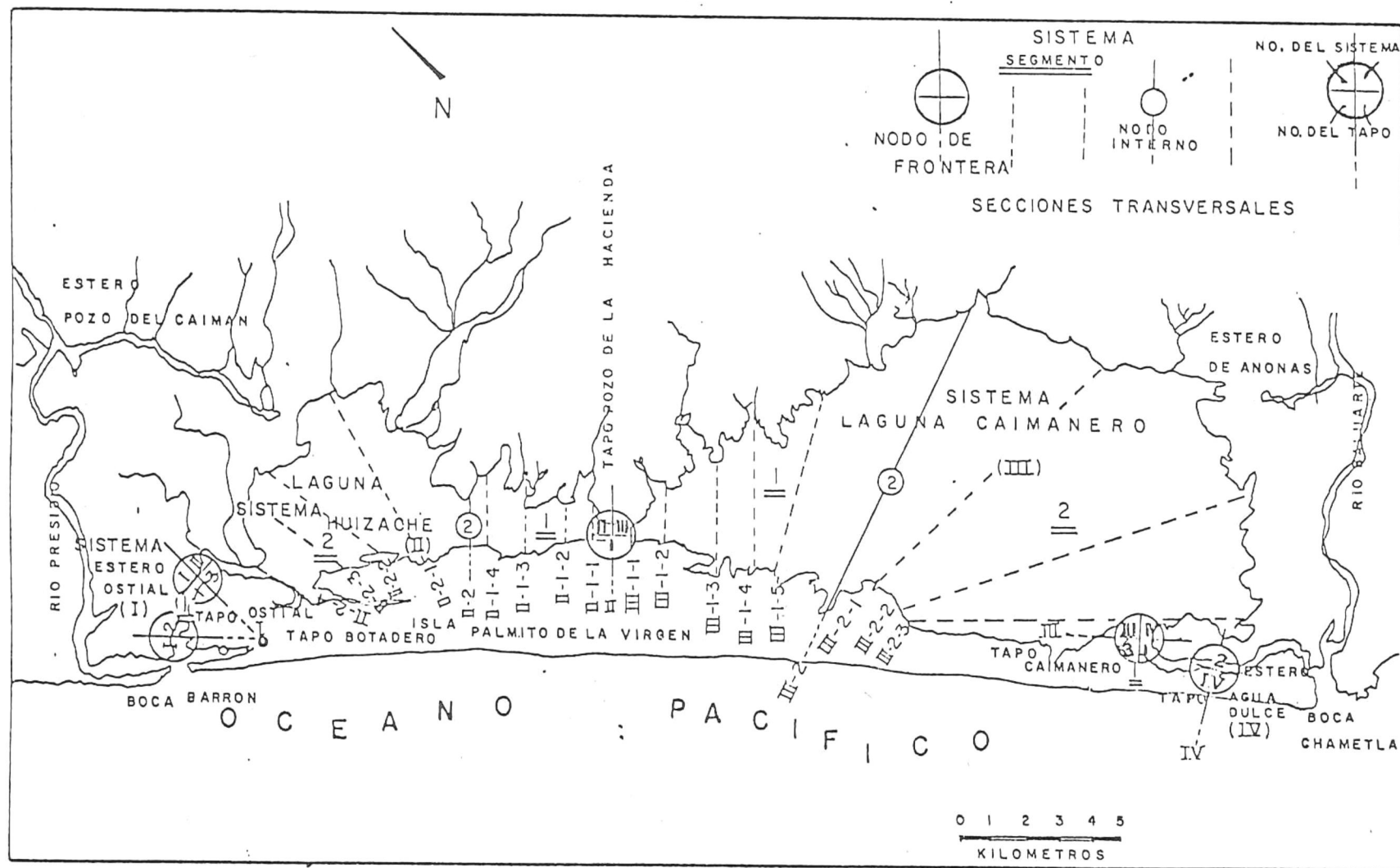


Fig. 6.— SEGMENTACION.

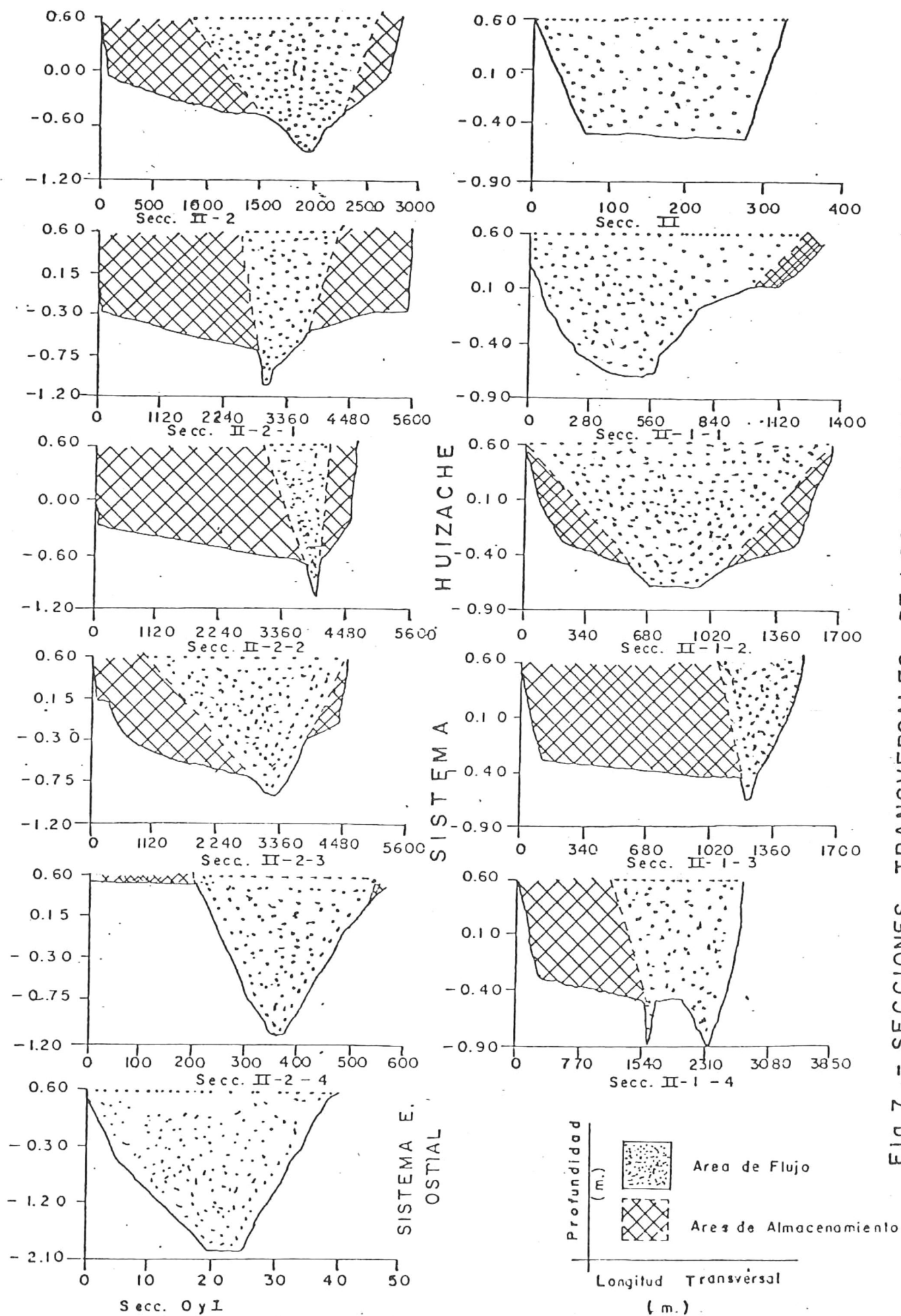
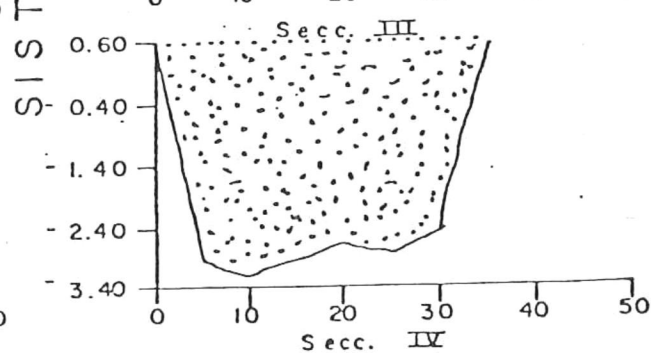
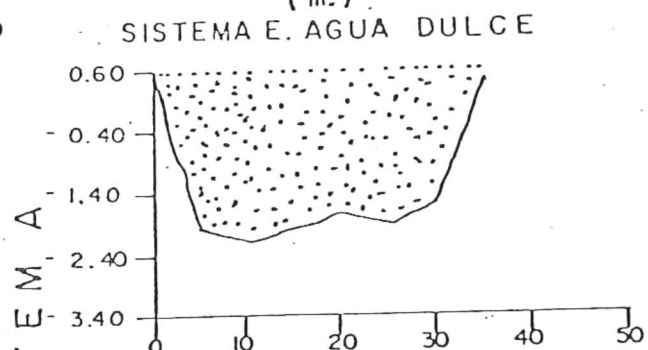
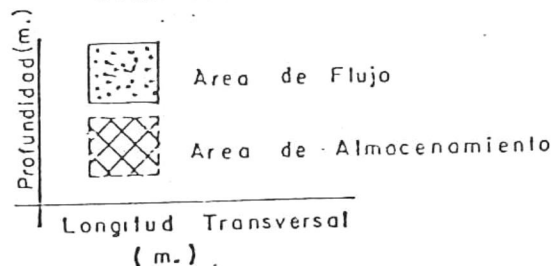
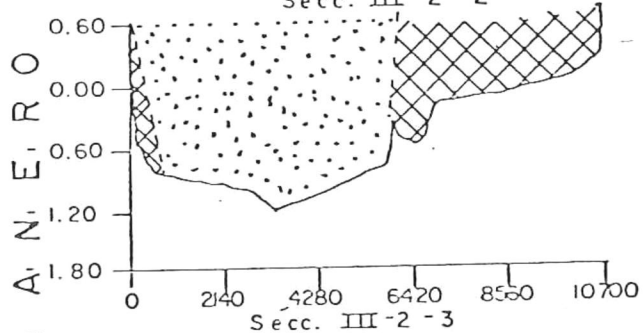
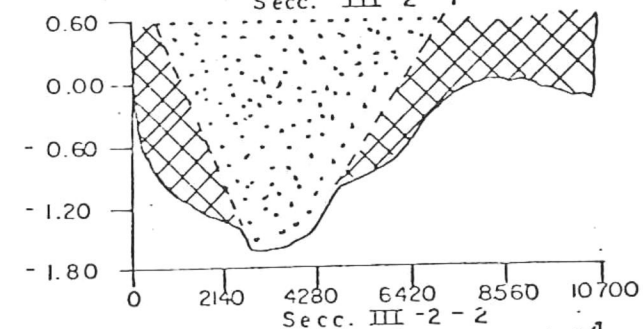
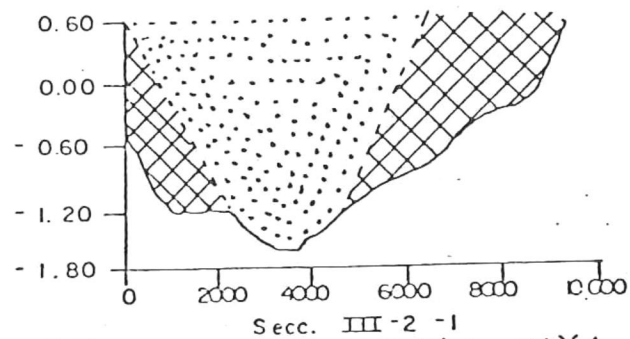
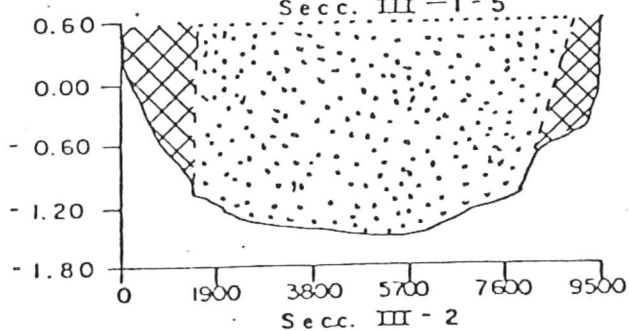
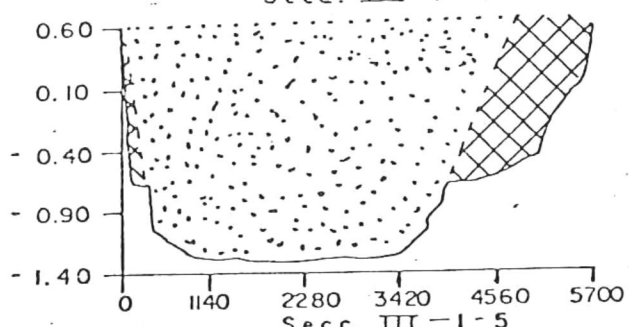
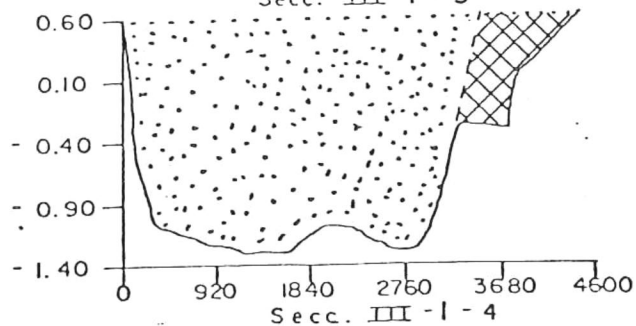
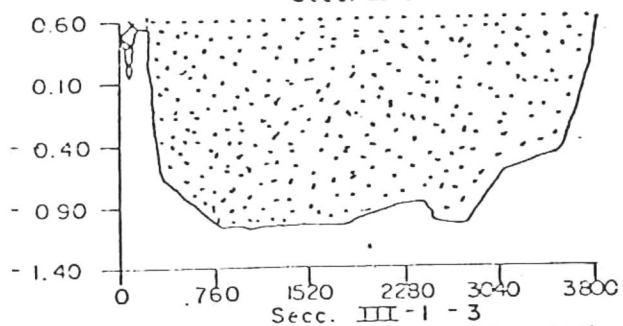
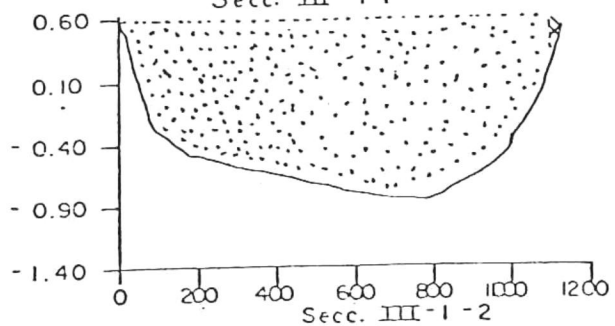
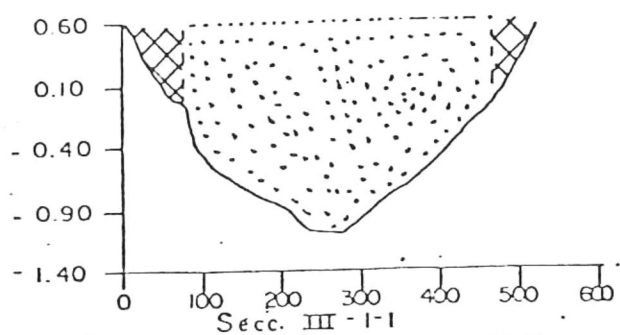


Fig. 7.- SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS SISTEMAS E. OSTIAL Y HUIZACHE



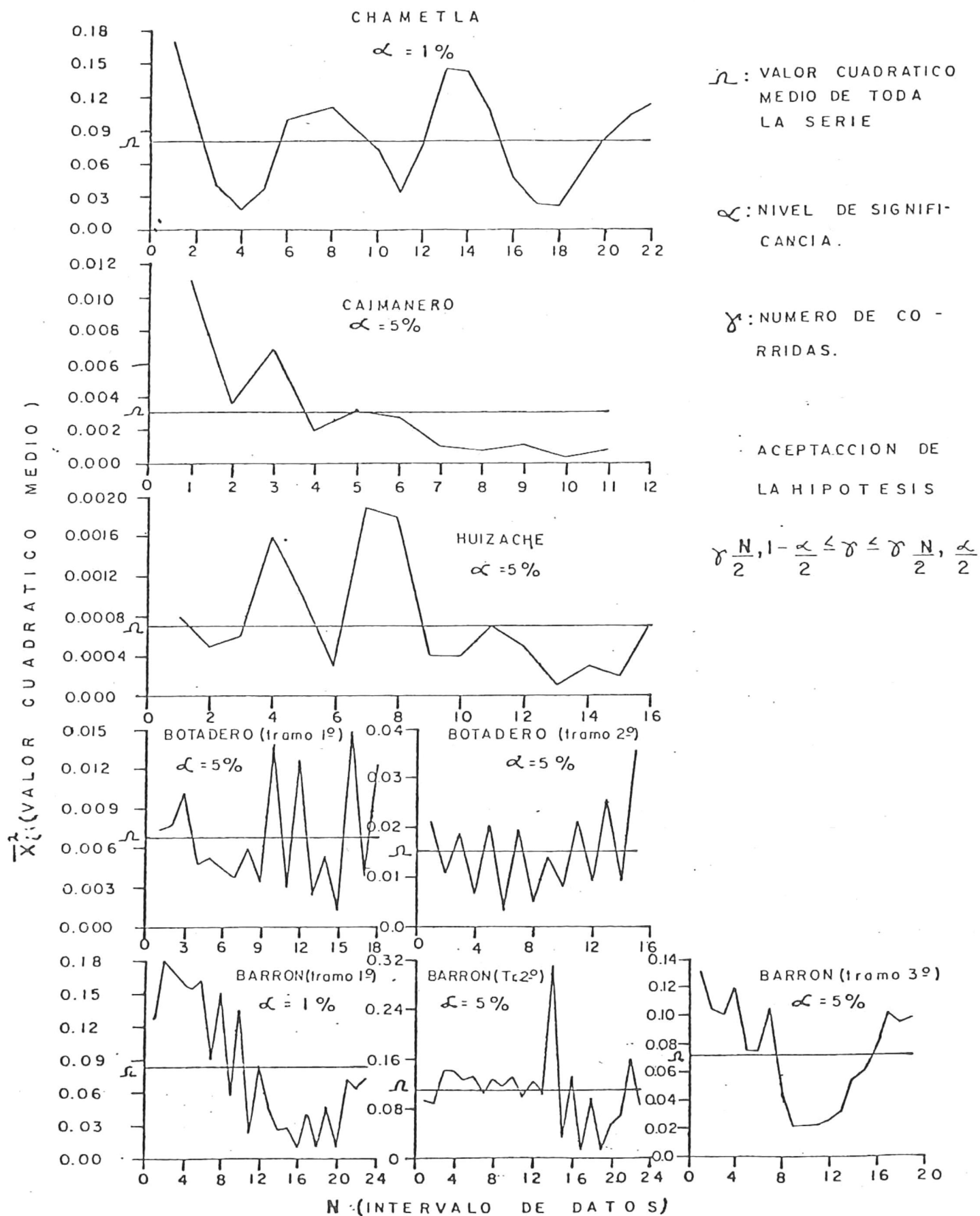


Fig.9-ESTACIONARIDAD DE LAS SERIES DE MAREAS:

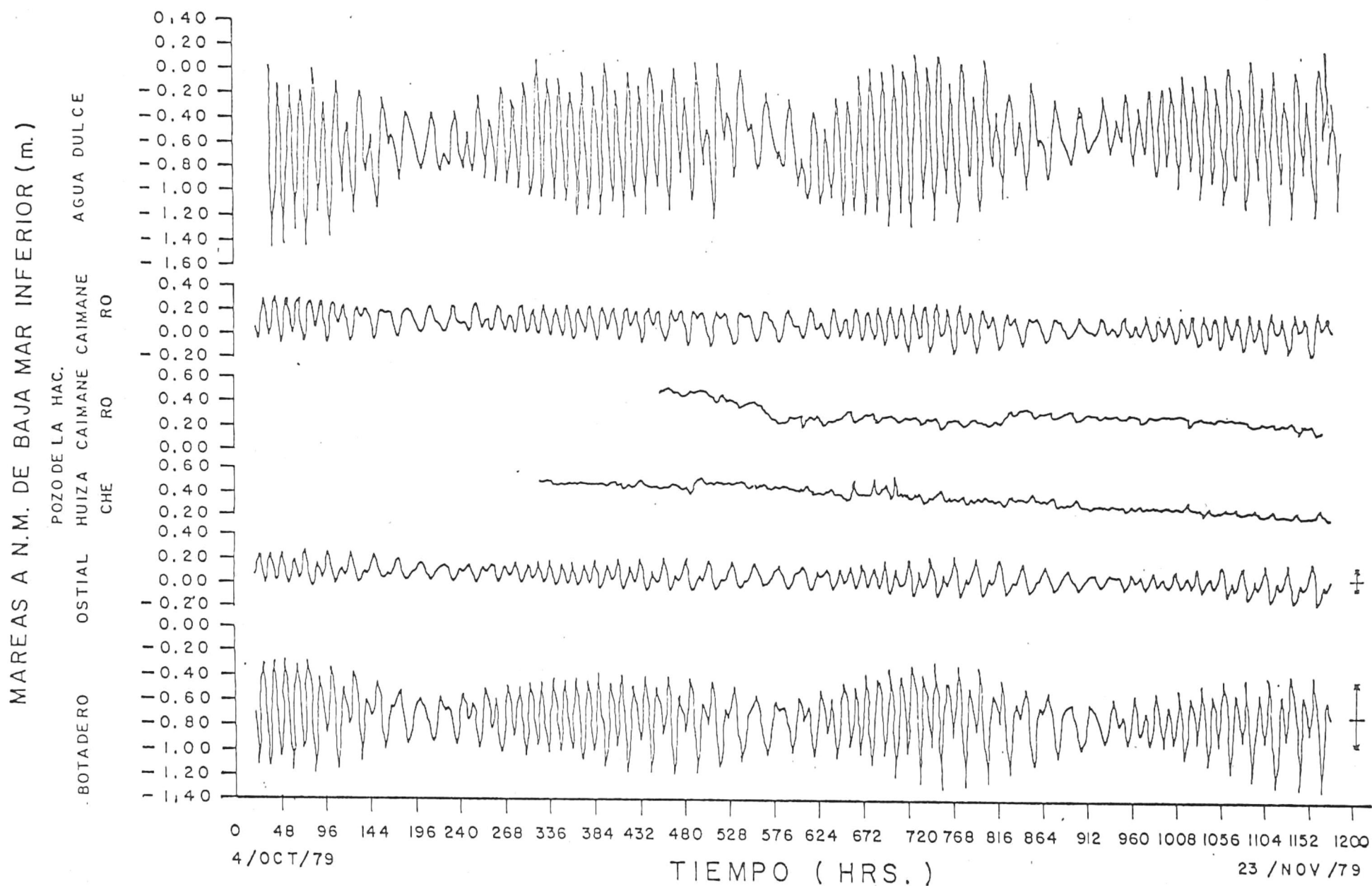
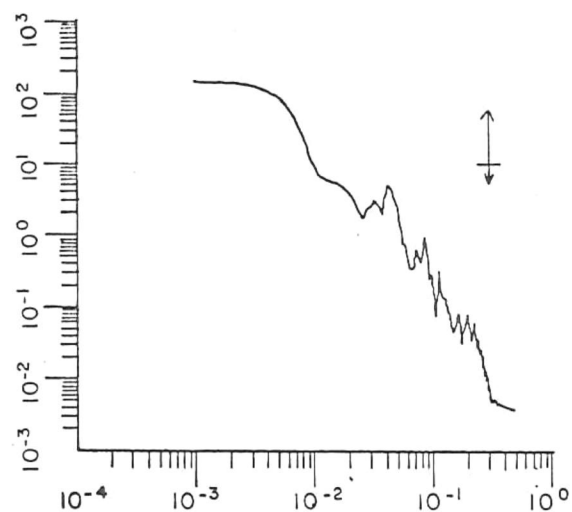
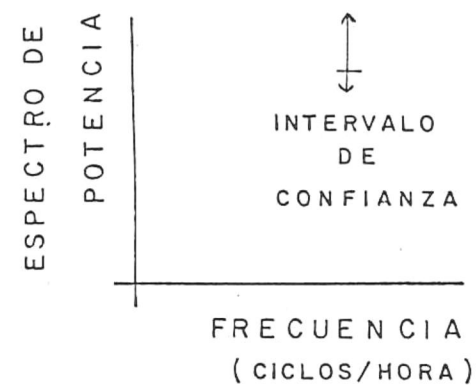
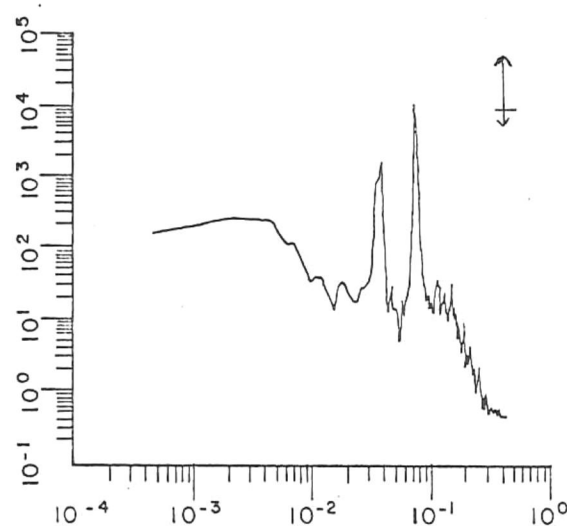


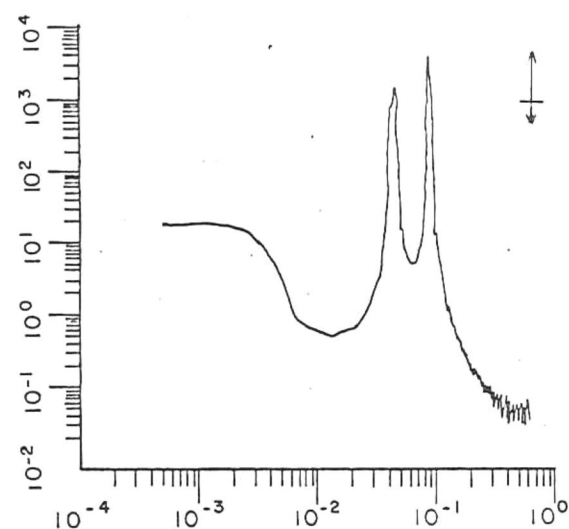
Fig. 10.- SERIES DE TIEMPO DE MAREAS INFERIDAS EN CADA NODO DE FRONTERA (TAPOS)



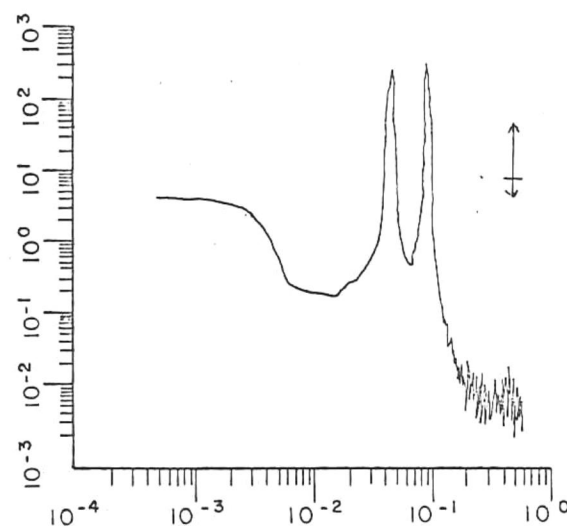
CAIMANERO



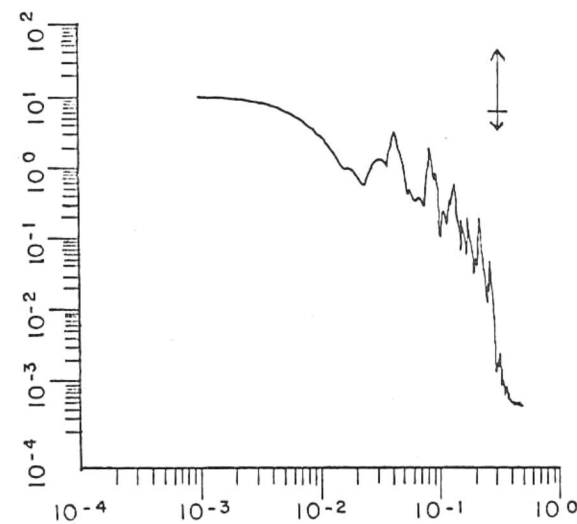
CHAMETLA



BARRON (PREDICHA)

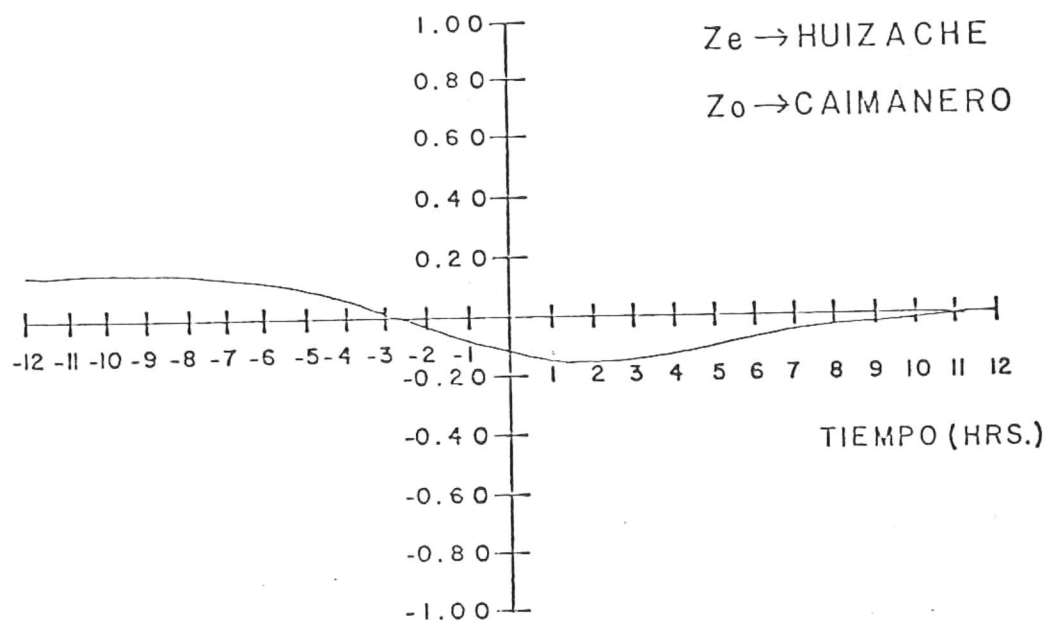


BOTADERO (PREDICHA)



HUIZACHE

Fig. II.- ESPECTROS DE POTENCIA DE LAS SERIES DE MAREAS.



$Z_e \rightarrow \text{SERIE FIJA}$
 CORRELACION CRUZADA = $R_{ZeZo}(t)$ $Z_o \rightarrow \text{SERIE DESPLAZADA}$

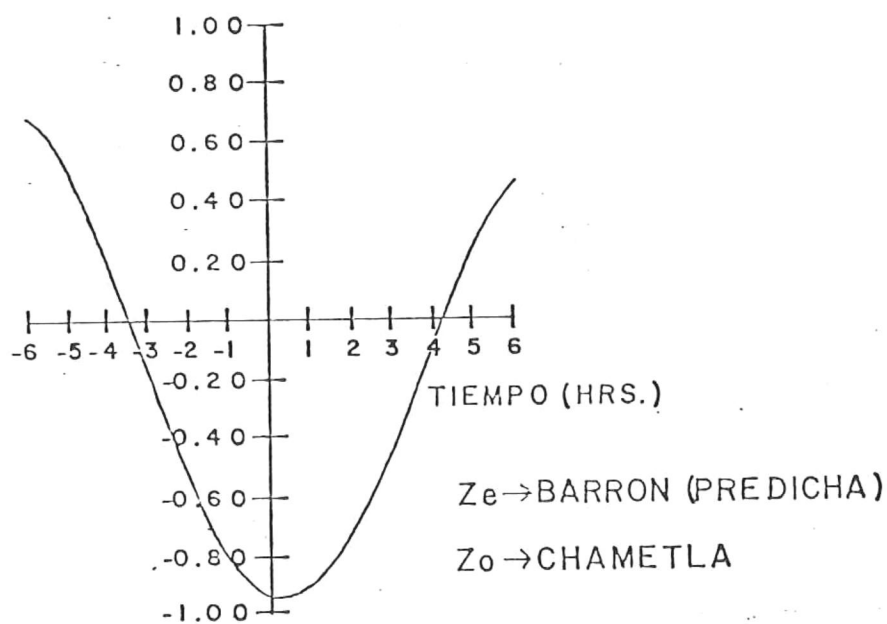


Fig. 12 .- CORRELOGRAMAS CRUZADOS ENTRE SERIES DE MAREAS.

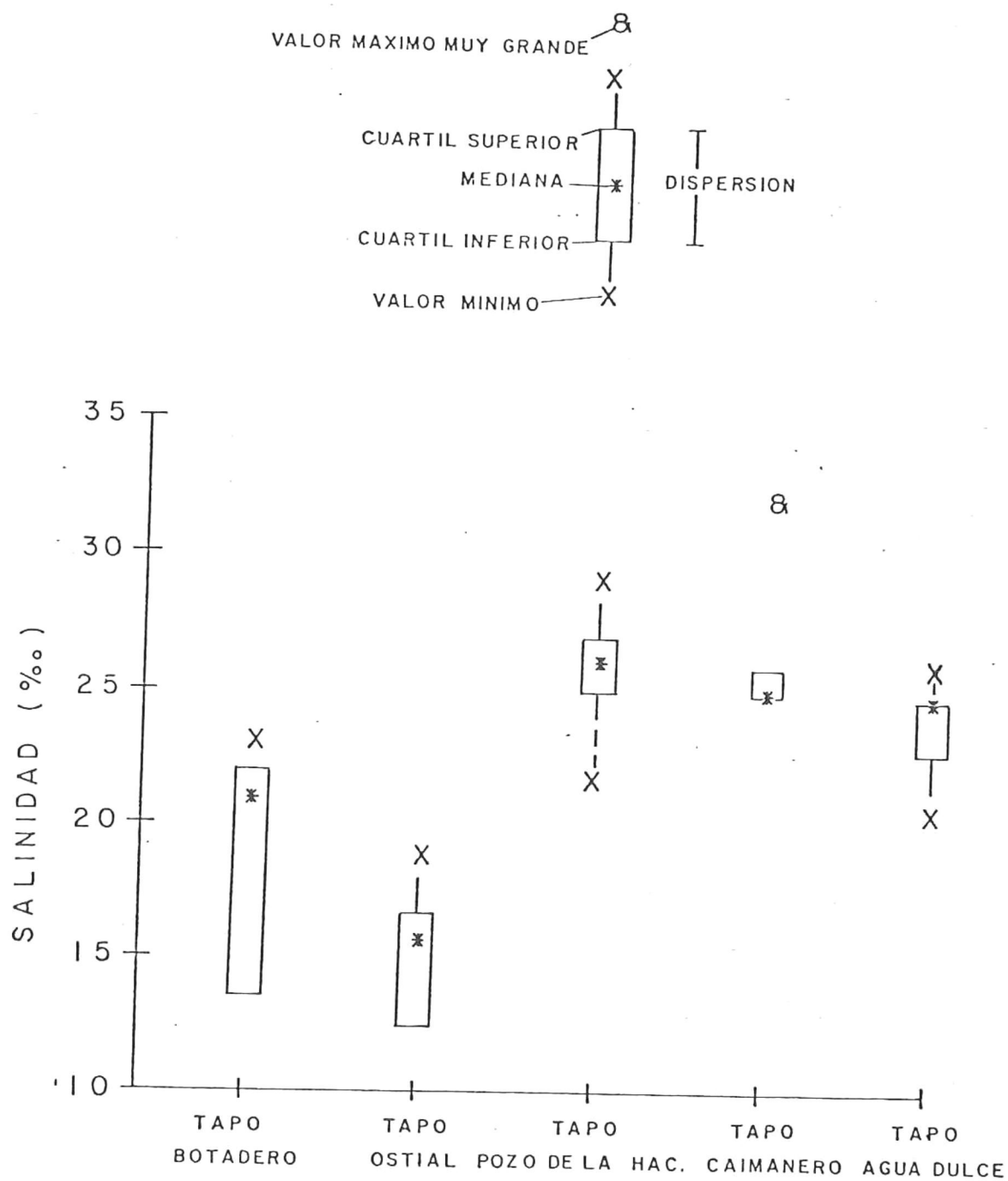


Fig. 13 - SALINIDAD EN LOS NODOS DE FRONTERA (TAPOS).

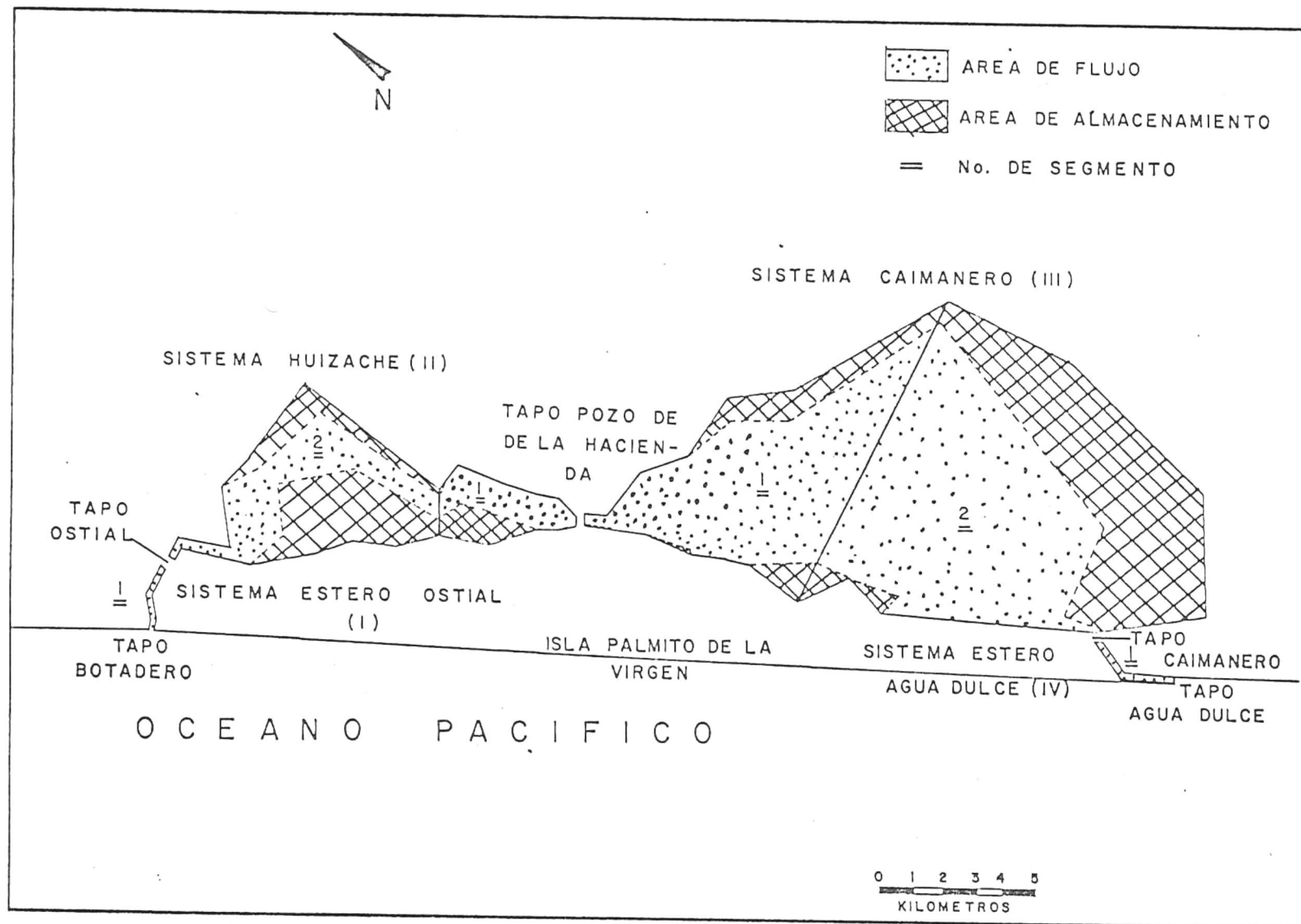


Fig.14.- ESQUEMATIZACION IDEALIZADA DEL SISTEMA LAGUNAR COSTERO HUIZACHE - CAIMANERO

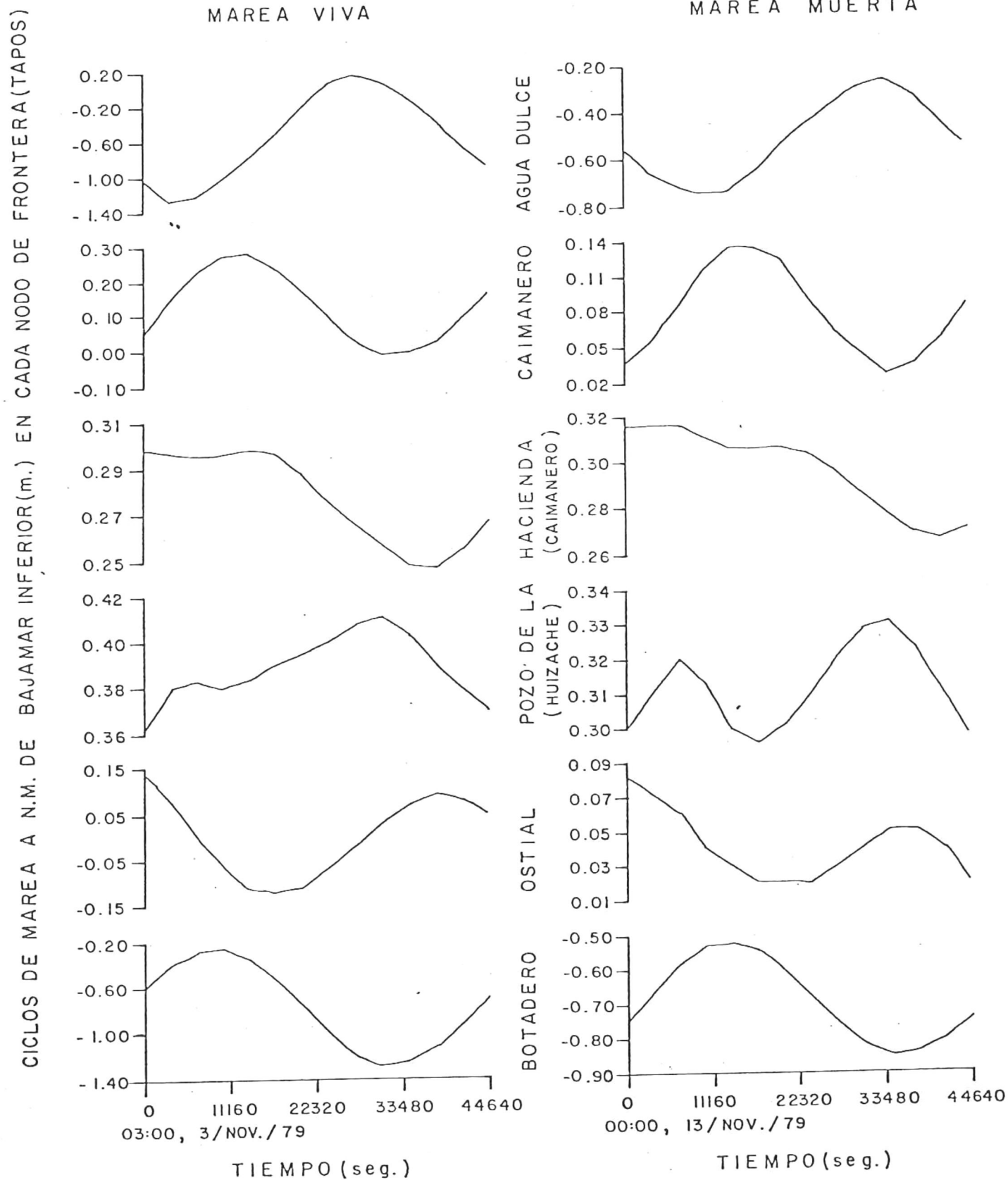


Fig.15.- CONDICIONES DE FRONTERA.

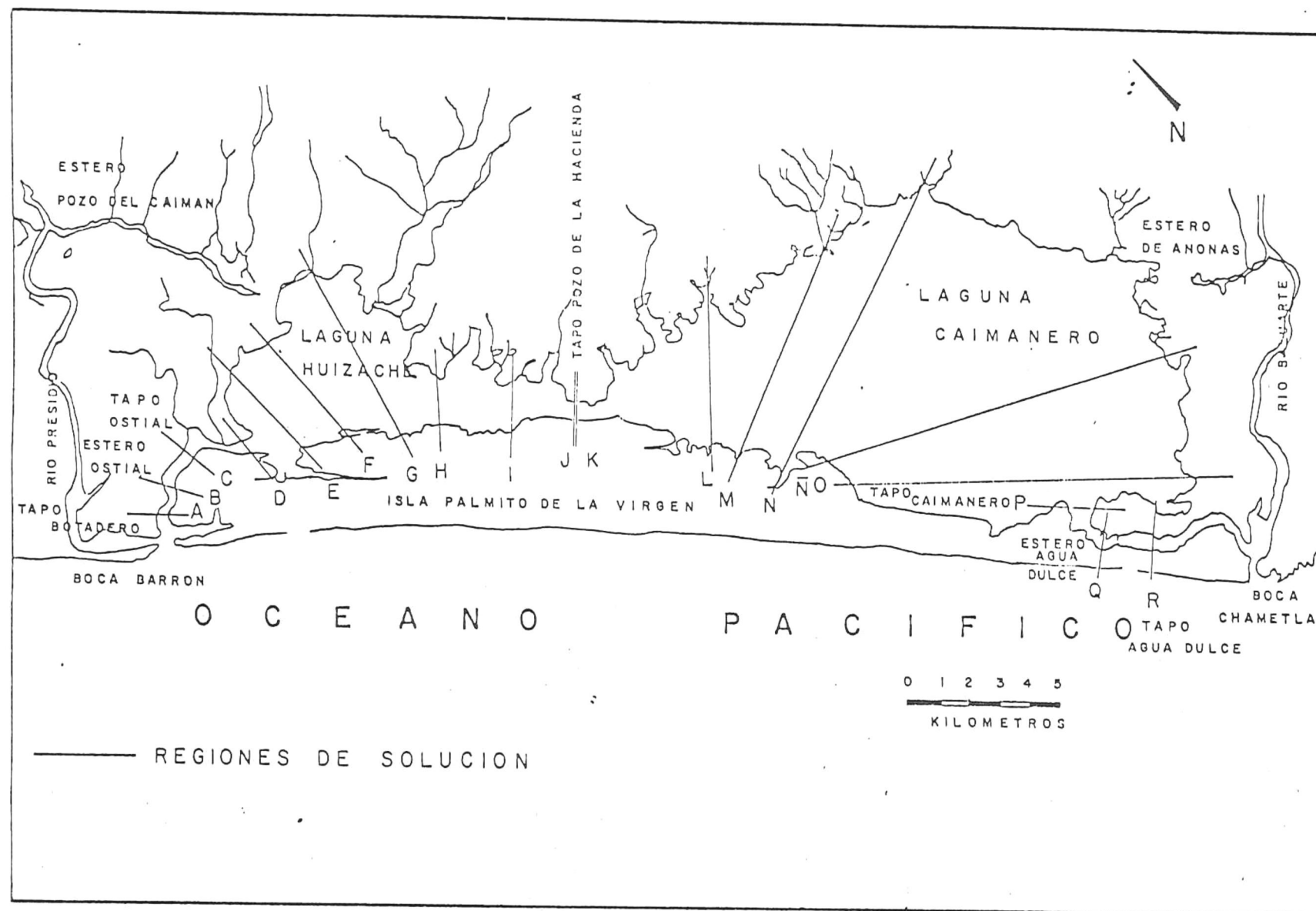


Fig. 16.— RED DE SOLUCION

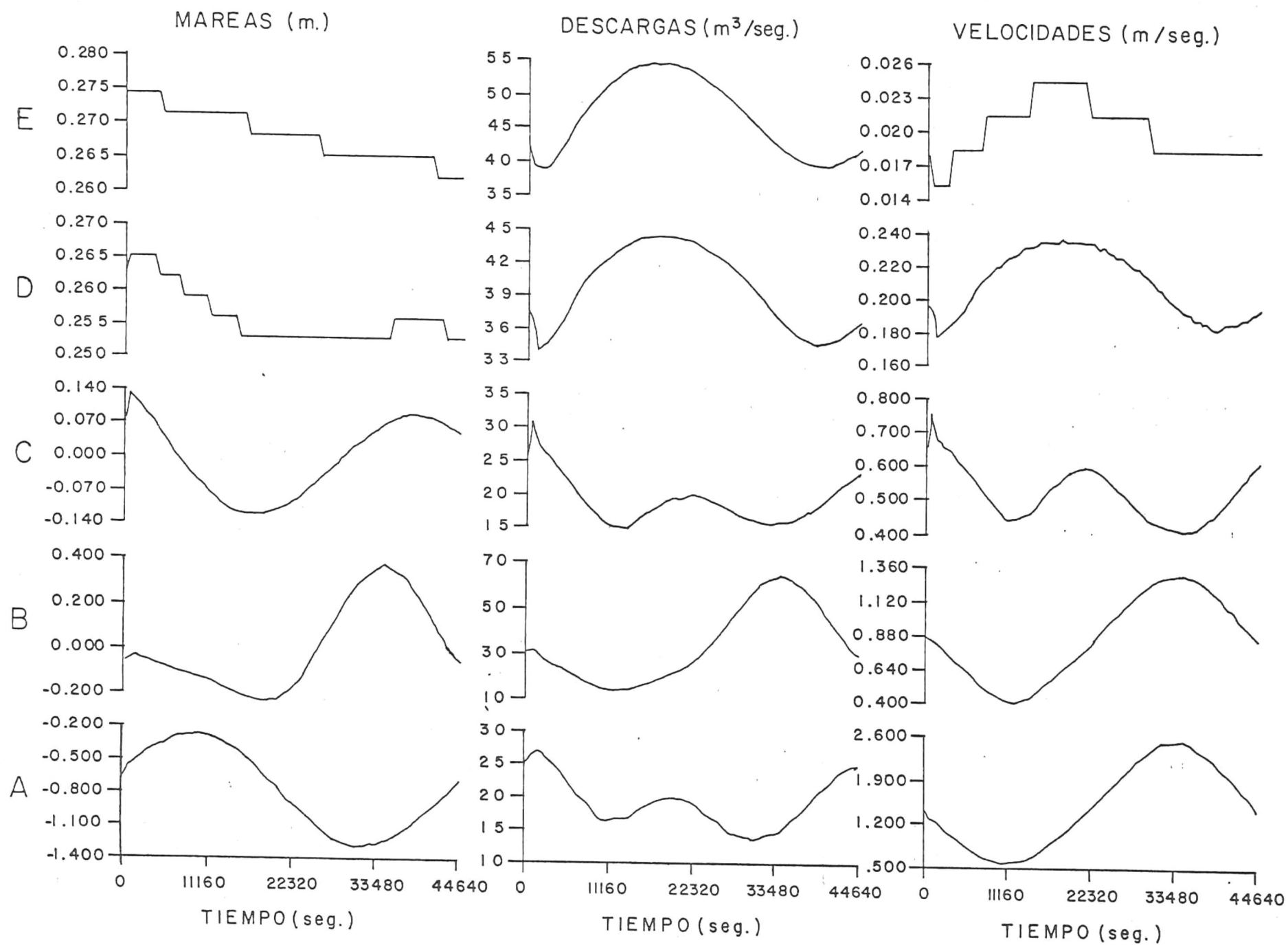


Fig. 17 .- SOLUCION TEMPORAL PARA LA MAREA VIVA EN LAS REGIONES A,B,C,DyE.

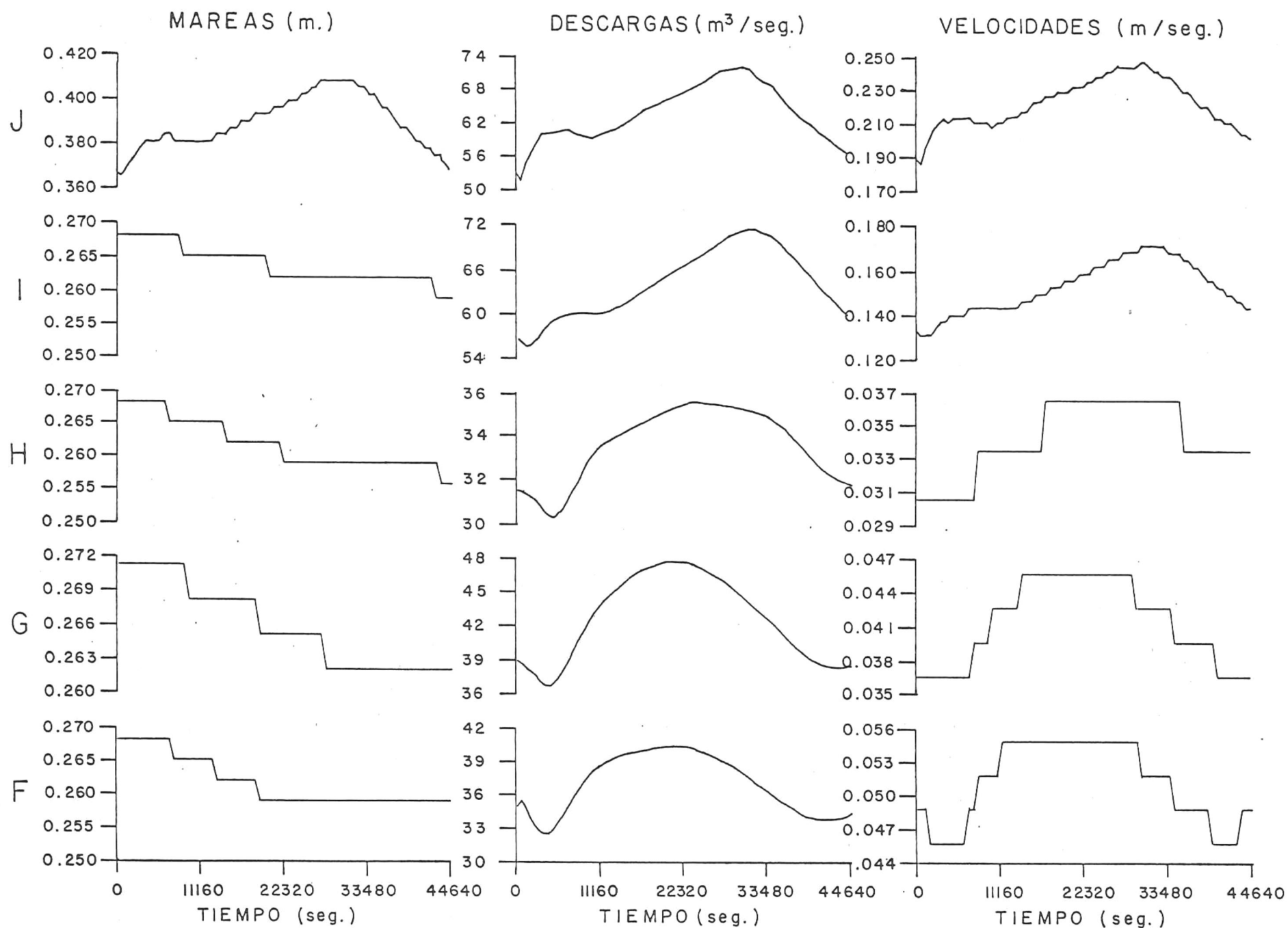


Fig. 18.- SOLUCION TEMPORAL PARA LA MAREA VIVA EN LAS REGIONES F, G, H, I y J.

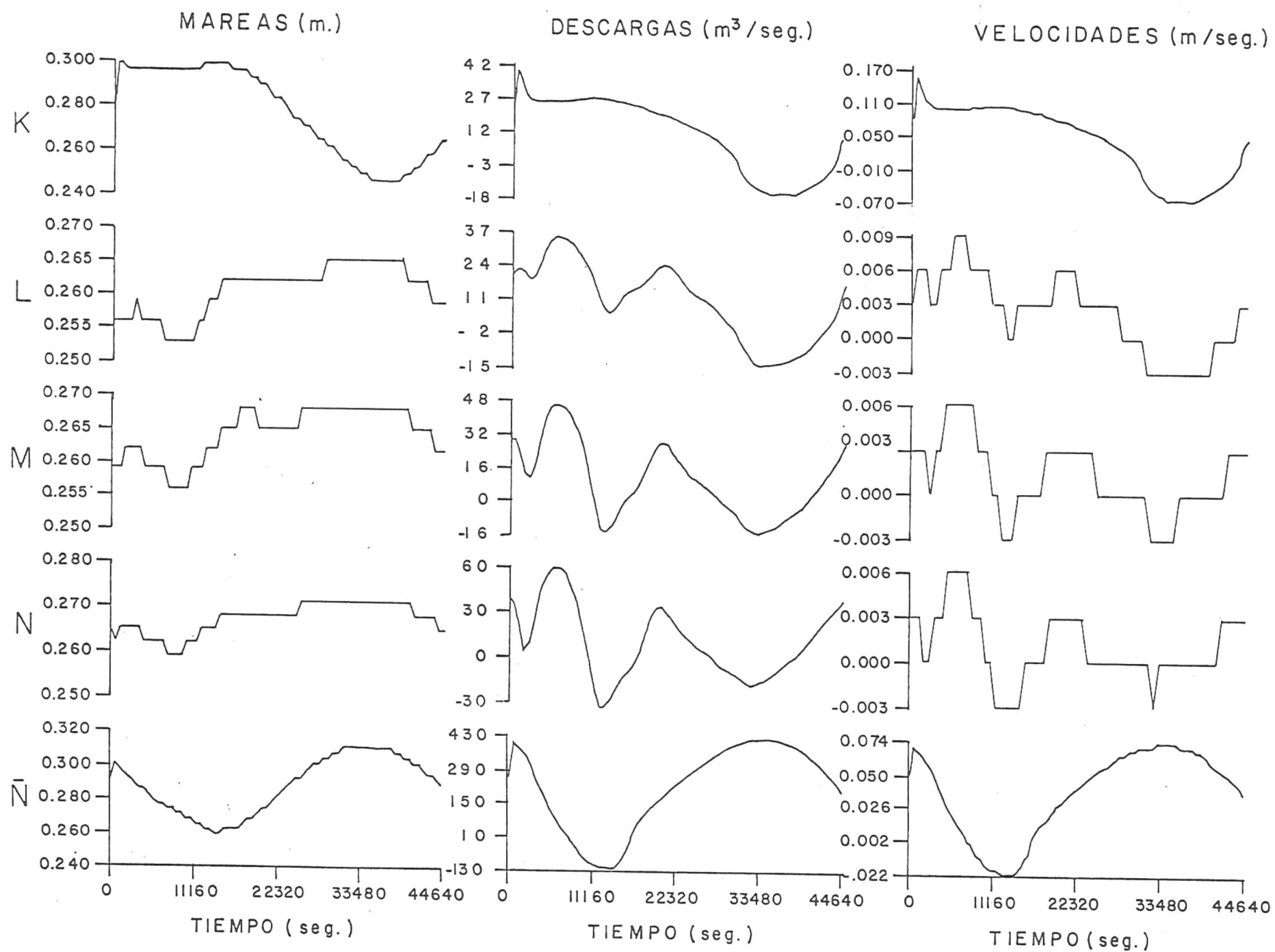


Fig.19.- SOLUCION TEMPORAL PARA LA MAREA VIVA EN LAS REGIONES K,L,M,N y $\bar{N}$

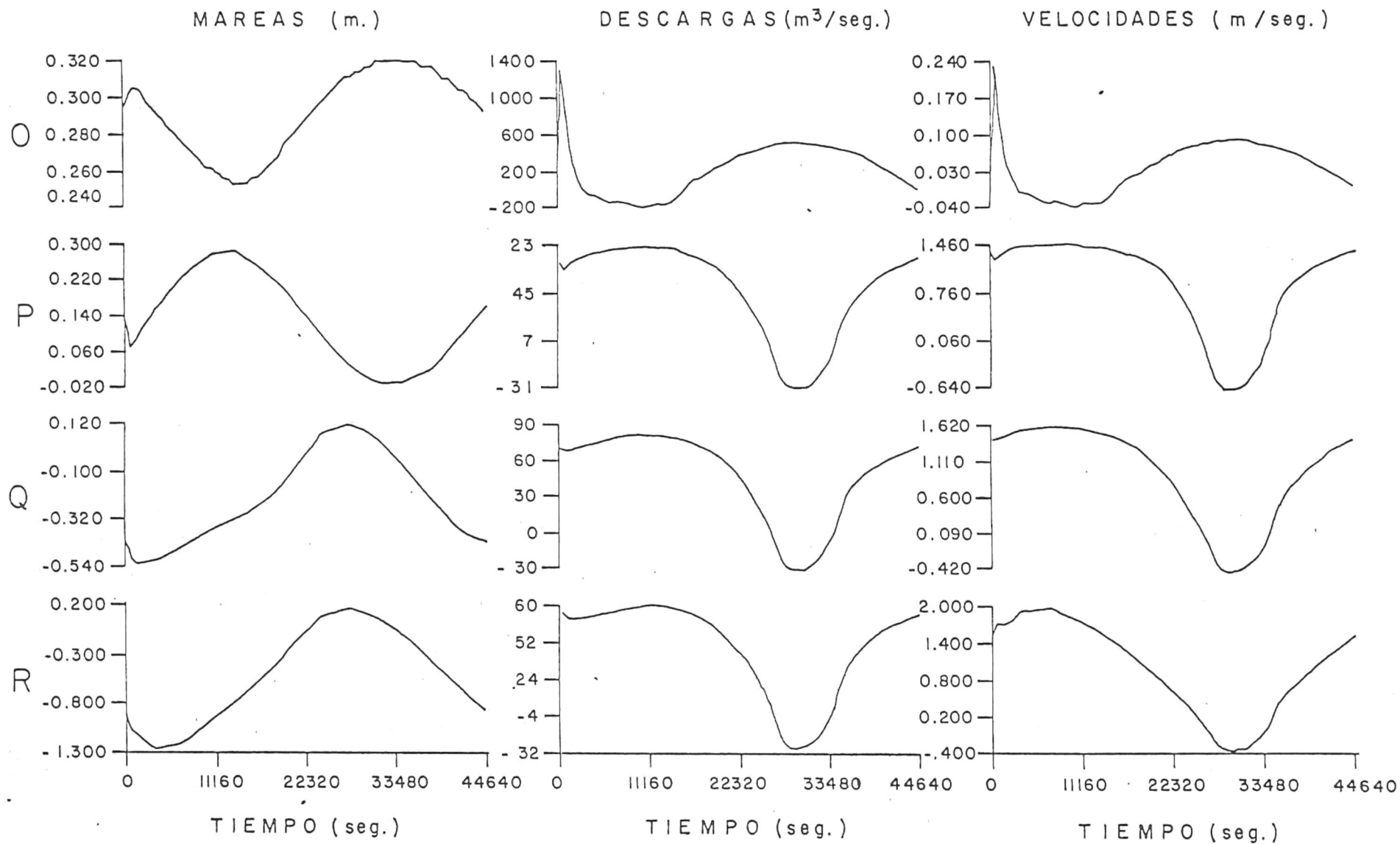


Fig. 20.— SOLUCION TEMPORAL PARA LA MAREA VIVÁ EN LAS REGIONES O, P, Q y R.

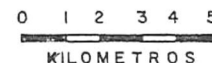


Fig. 21.- SOLUCION ESPACIAL PARA LA MAREA VIVA EN
PLEAMAR Y BAJAMAR

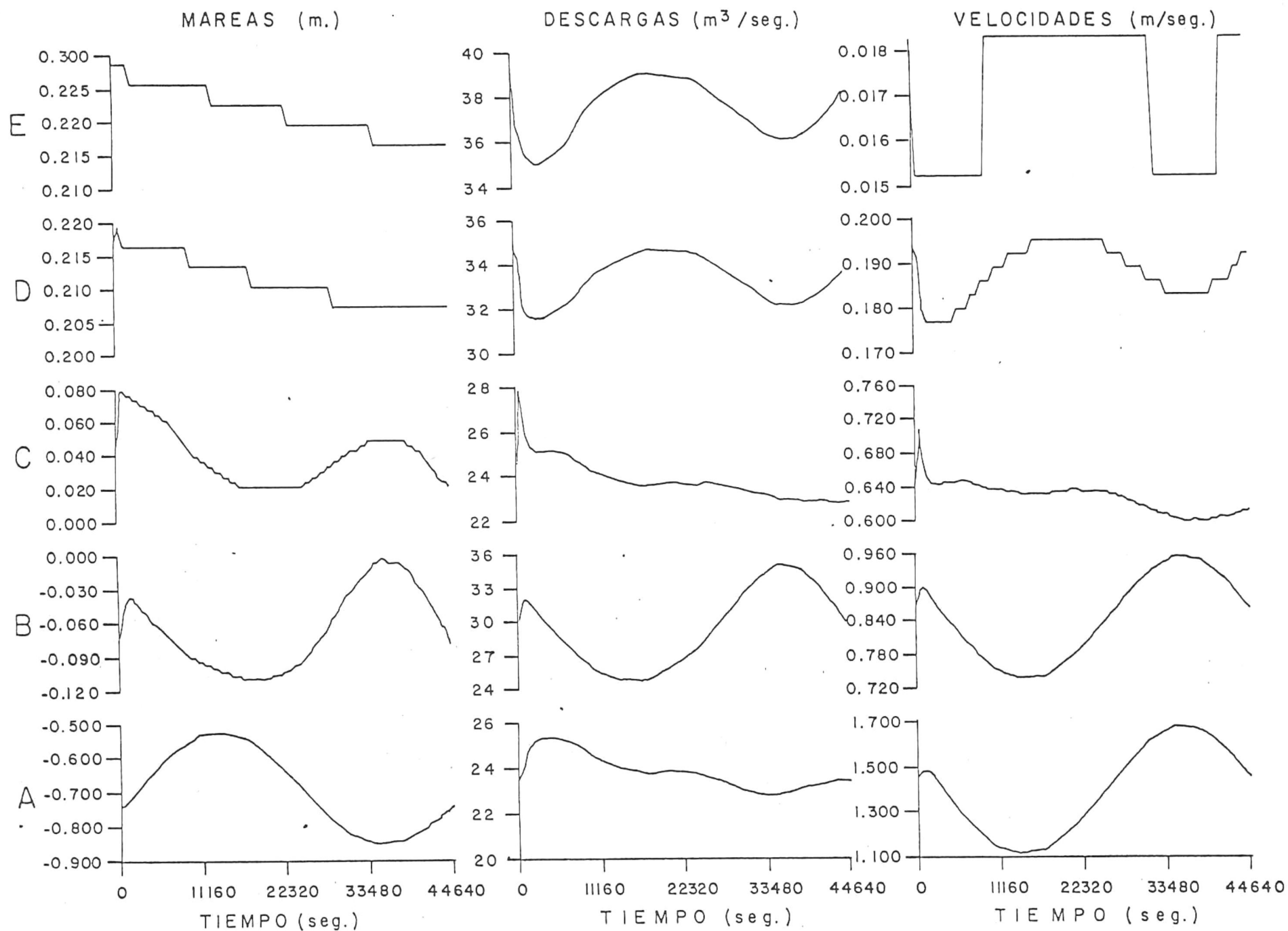


Fig. 22.- SOLUCION TEMPORAL PARA LA MAREA MUERTA EN LAS REGIONES A,B,C,D y E.

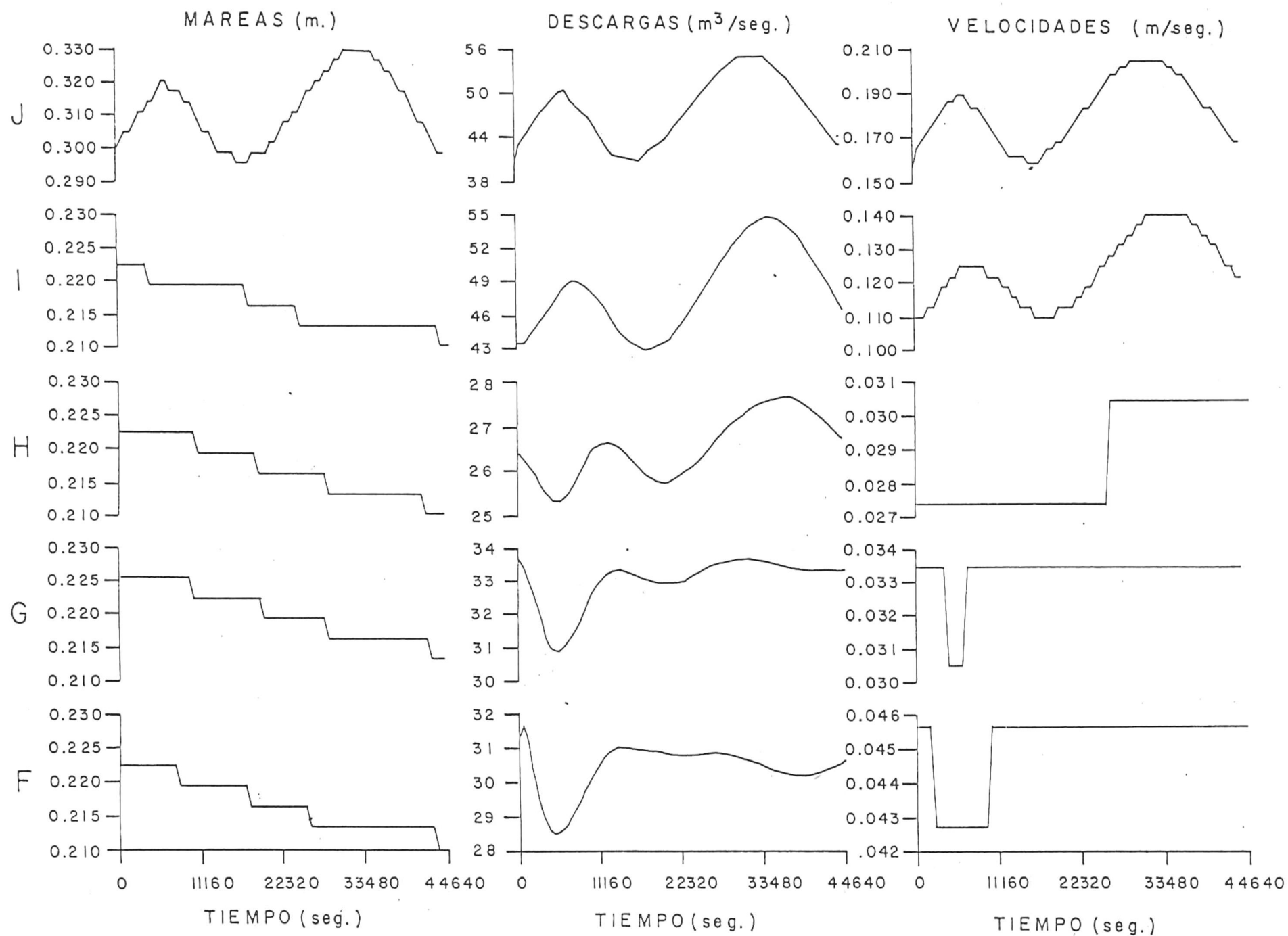


Fig.23.- SOLUCION TEMPORAL PARA LA MAREA MUERTA EN LAS REGIONES F,G,H,I y J.

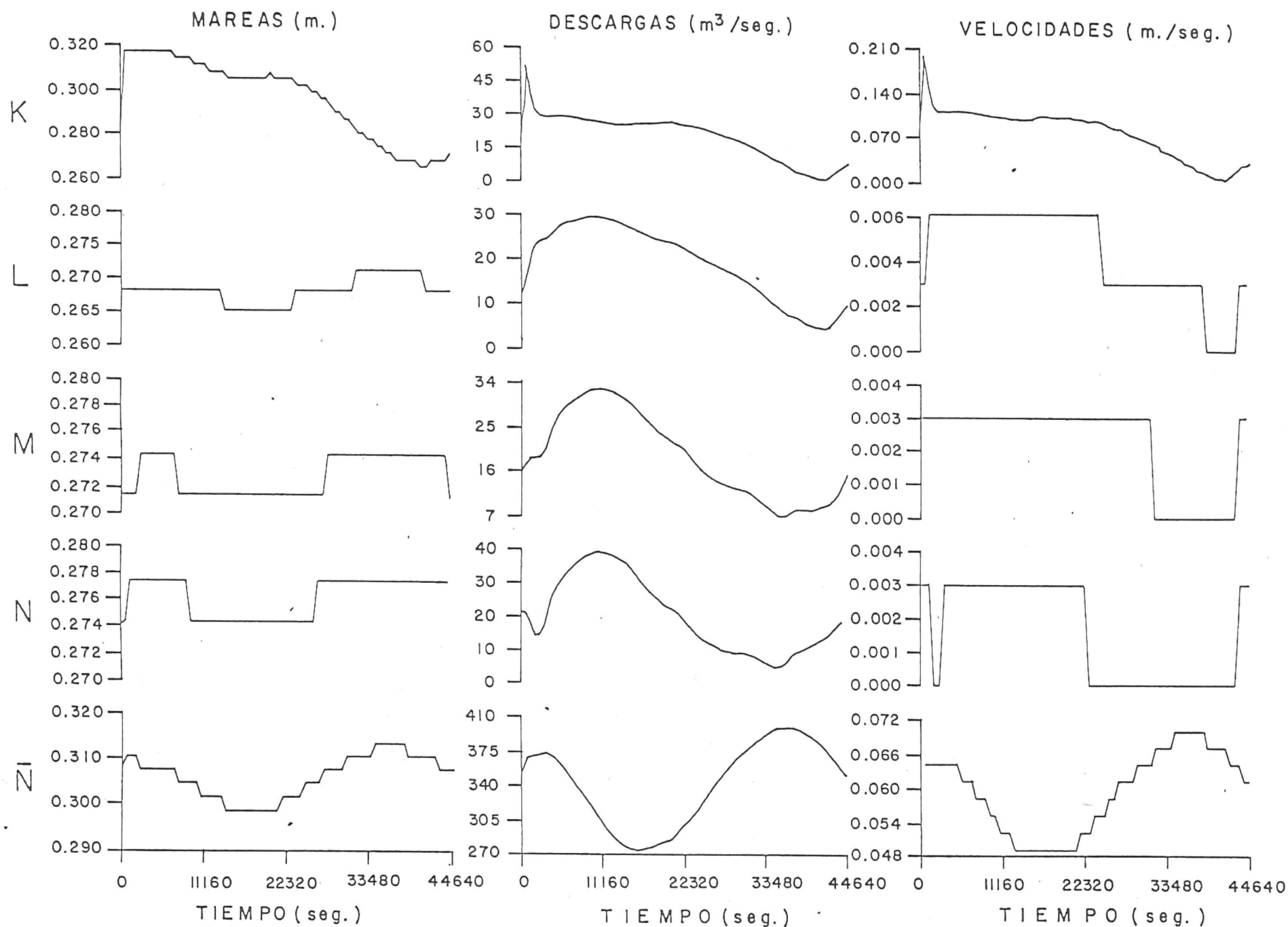


Fig. 24.- SOLUCION TEMPORAL PARA LA MAREA MUERTA EN LAS REGIONES K, L, M, N, y $\bar{N}$.

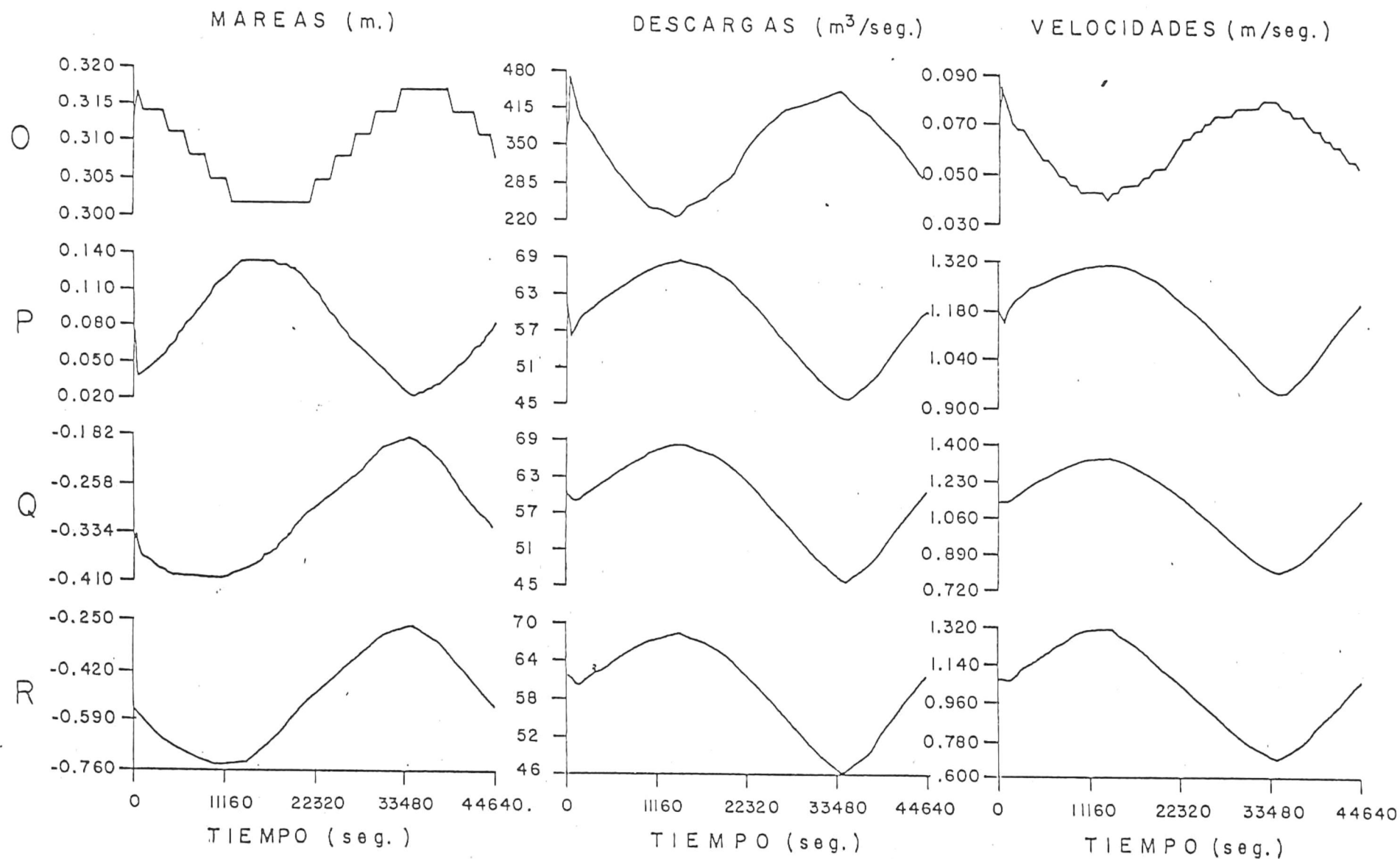


Fig. 25.- SOLUCION TEMPORAL PARA LA MAREA MUERTA EN LAS REGIONES O, P, Q y R.

